Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Севастопольский государственный университет»

На правах рукописи

Кротов Кирилл Викторович

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ МНОГОУРОВНЕВОЙ ОПТИМИЗАЦИИ РАСПИСАНИЙ МНОГОСТАДИЙНЫХ ПРОЦЕССОВ С АДАПТАЦИЕЙ

05.13.08 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Диссертация
на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант:
Скатков Александр Владимирович
доктор технических наук, профессор

Севастополь – 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ……..…….5

ГЛАВА 1. ОБОСНОВАНИЕ АКТУАЛЬНОСТИ РАЗРАБОТКИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ РАСПИСАНИЙ МНОГОСТАДИЙНЫХ ПРОЦЕССОВ В КОНВЕЙЕРНЫХ СИСТЕМАХ...…….…….…….....16

1.1. Анализ видов задач математического моделирования и построения расписаний многостадийных процессов выполнения заданий в конвейерных системах …….…..16

1.2. Обоснование актуальности разработки математических моделей и методов построения расписаний многостадийных процессов выполнения заданий в конвейерных системах.....20

1.3. Обоснование актуальности разработки методов математического моделирования влияния возмущающих воздействий и методов построения динамических расписаний выполнения заданий в конвейерных системах…….……..……..……..28

1.4. Обоснование актуальности разработки методов математического моделирования и методов построения расписаний выполнения пакетов заданий в конвейерных системах…….36

ГЛАВА 2. ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ РАСПИСАНИЙ МНОГОСТАДИЙНЫХ ПРОЦЕССОВ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЙ В КОНВЕЙЕРНЫХ СИСТЕМАХ И КЛАССИФИКАЦИЯ ЗАДАЧ ПОСТРОЕНИЯ РАСПИСАНИЙ……..…...47

2.1. Информационная модель системы построения расписаний многостадийных процессов выполнения заданий в конвейерных системах…….…..47

2.2. Классификация задач построения расписаний многостадийных процессов выполнения заданий в конвейерных системах……..……..52

ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОСТАДИЙНЫХ ПРОЦЕССОВ ВЫПОЛНЕНИЯ ЕДИНИЧНЫХ ЗАДАНИЙ В КОНВЕЙЕРНЫХ СИСТЕМАХ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ РАСПИСАНИЙ МНОГОСТАДИЙНЫХ ПРОЦЕССОВ ВЫПОЛНЕНИЯ ЕДИНИЧНЫХ ЗАДАНИЙ ……64

3.1. Математическая модель многостадийных процессов выполнения единичных заданий в конвейерных системах……..…….....64

3.2. Алгоритм построения расписаний многостадийных процессов выполнения единичных заданий в конвейерных системах…...…….....69

3.3. Математическая модель влияния на многостадийные процессы выполнения заданий поступления в систему заданий в моменты времени $d_i > 0$ и метод построения динамических расписаний выполнения заданий в конвейерных системах при различных моментах времени их поступления…….…….…….....76

3.4. Математическая модель влияния на многостадийные процессы выполнения заданий поступления в систему в моменты времени $d_i > 0$ высоко приоритетных заданий и метод построения динамических расписаний выполнения заданий при различных моментах времени их поступления и разных приоритетах…….....95

3.5. Математическая модель влияния на многостадийные процессы выполнения заданий отказов приборов конвейерной системы и метод построения динамических расписаний выполнения заданий в конвейерной системе с учетом восстановления приборов …….…….....109

ГЛАВА 4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЫПОЛНЕНИЯ ПАКЕТОВ ЗАДАНИЙ В КОНВЕЙЕРНЫХ СИСТЕМАХ И МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ РАСПИСАНИЙ ПРОЦЕССОВ ВЫПОЛНЕНИЯ ПАКЕТОВ ЗАДАНИЙ……..124

4.1. Математическое моделирование процессов выполнения пакетов заданий в конвейерных системах, модель иерархической игры оптимизации решений при построении расписаний выполнения пакетов заданий в конвейерных системах…….……..…124

4.2. Метод оптимизации решений по составам пакетов заданий в иерархической игре построения расписаний их выполнения в конвейерных системах ……..……..…...137

4.3. Метод оптимизации порядков выполнения пакетов заданий в конвейерных системах в иерархической игре построения расписаний …….....152

4.4. Применение генетических алгоритмов для оптимизации составов пакетов заданий в иерархической игре построения расписаний их выполнения в конвейерных системах ..…..…156

4.5. Анализ результатов исследований применения метода построения расписаний многостадийных процессов выполнения пакетов заданий в конвейерных системах……..…….....160

ГЛАВА 5. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЫПОЛНЕНИЯ ПАКЕТОВ ЗАДАНИЙ В КОНВЕЙЕРНЫХ СИСТЕМАХ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ КОМПЛЕКТОВ РЕЗУЛЬТАТОВ И МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ РАСПИСАНИЙ ПРОЦЕССОВ ВЫПОЛНЕНИЯ ПАКЕТОВ ЗАДАНИЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ КОМПЛЕКТОВ……166

5.1. Математическое моделирование процессов выполнения пакетов заданий в конвейерных системах при формировании комплектов результатов, модели иерархических игр оптимизации решений по составам пакетов заданий и расписаниям их выполнения…….....166

5.2. Способы упорядочивания типов комплектов, определения моментов времени окончания формирования комплектов результатов выполнения пакетов заданий в соответствии с расписаниями……..……...……..……..……..176

5.3. Метод оптимизации расписаний многостадийных процессов выполнения пакетов заданий в конвейерных системах при формировании комплектов результатов……..…...…...182

5.4. Анализ результатов исследований метода построения расписаний выполнения пакетов заданий в конвейерных системах при условии формирования комплектов …….185

ГЛАВА 6. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЫПОЛНЕНИЯ ПАКЕТОВ ЗАДАНИЙ В КОНВЕЙЕРНЫХ СИСТЕМАХ ПРИ ОГРАНИЧЕНИИ НА ВРЕМЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ, МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВОВ ГРУПП ПАКЕТОВ ЗАДАНИЙ И РАСПИСАНИЙ ВЫПОЛНЕНИЯ ПАКЕТОВ ЗАДАНИЙ ИЗ ГРУПП……....194

6.1. Математическое моделирование процессов выполнения пакетов заданий в конвейерных системах при ограничении на время функционирования. Модель иерархической игры оптимизации составов пакетов заданий, групп пакетов заданий и расписаний выполнения пакетов заданий, входящих в группы, в конвейерных системах …….……...194

6.2. Метод оптимизации составов групп пакетов заданий, выполняемых в течение заданных интервалов времени функционирования конвейерной системы …..……..…..204

6.3. Алгоритм построения расписаний выполнения в конвейерных системах пакетов заданий, входящих в группы…….…...221

6.4. Анализ результатов исследований метода построения расписаний выполнения пакетов заданий в конвейерных системах в течение интервалов времени ограниченной длительности.....225

6.5. Математическое моделирование процессов выполнения пакетов заданий в конвейерных системах при ограничении на время функционирования и формировании комплектов. Модель иерархической игры оптимизации составов пакетов заданий, групп пакетов заданий и расписаний выполнения пакетов заданий, входящих в группы, в конвейерных системах ……230

6.6. Метод распределения по комплектам результатов выполнения в конвейерных системах заданий из пакетов, включенных в группы….....……..…….....237

6.7. Метод оптимизации составов групп пакетов заданий, выполняемых в конвейерных системах, с учетом формирования комплектов результатов…….……..……..…….…...238

6.8. Анализ результатов исследований метода оптимизации составов групп пакетов заданий, выполняемых в конвейерных системах при ограничении на длительности интервалов времени функционирования и формировании комплектов……...246

6.9. Особенности методов математического моделирования многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС и построения расписаний выполнения ЕЗ и ПЗ в КС…….…...248

6.10. Архитектура комплекса программ построения расписаний выполнения заданий (включая пакеты заданий) в многостадийных системах……..…….….253

ЗАКЛЮЧЕНИЕ…….…….……..…..263

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ…….….268

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ…….……..…….…....269

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ДОКАЗАТЕЛЬСТВО ТЕОРЕМЫ О ФОРМИРОВАНИИ ЛОКАЛЬНО ОПТИМАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ МЕТОДОМ GREEDY SCHEDULER….……..…...295

ПРИЛОЖЕНИЕ 2 ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЙ В КОНВЕЙЕРНЫХ СИСТЕМАХ, МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ РАСПИСАНИЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ..……...…….……301

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПОСТРОЕНИЯ РАСПИСАНИЙ МНОГОСТАДИЙНЫХ ПРОЦЕССОВ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЙ В КОНВЕЙЕРНЫХ СИСТЕМАХ…….……..…..…….……..346

ПРИЛОЖЕНИЕ 4. АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ …..….....413

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследований. В значительном количестве сфер практической деятельности (мелкосерийное производство, обработка данных) процесс выполнения работ разных видов предусматривает наличие строго заданной последовательности образующих его этапов. Процессы выполнения работ, имеющие определенную последовательность этапов, реализуемые на приборах обрабатывающих систем, называются многостадийными процессами. С целью уточнения понятия многостадийного процесса в рассмотрение введено понятие задания. Под заданием подразумевается, состоящая из отдельных этапов, каждый из которых выполняется на соответствующем ему приборе системы с целью получения результата (установлено однозначное соответствие между этапом выполнения задания и прибором обрабатывающей системы). Для всех заданий количество этапов их выполнения является одинаковым. Количество приборов в обрабатывающей системе соответствует количеству этапов выполнения заданий. Технологический маршрут выполнения заданий предусматривает последовательную реализацию их этапов и, соответственно, последовательное прохождение всеми заданиями приборов в обрабатывающей системе в строго заданной их последовательности. Тогда многостадийным процессом является процесс выполнения заданий в обрабатывающей системе, предусматривающий последовательную реализацию действий с ними на каждом из ее приборов. Сама система в этом случае является конвейерной системой (КС).

Выполнение заданий разных типов обеспечивается наладкой и переналадкой приборы КС на реализацию действий с ними. Тогда процесс выполнения заданий на обрабатывающих приборах в КС характеризуется параметрами: длительностями выполнения заданий на обрабатывающих приборах, длительностями наладок и переналадок приборов с выполнения заданий одного типа на выполнение заданий другого типа. Типизация заданий выполнена с точки зрения одинаковых либо разных значений этих параметров (к одному типу относятся задания, имеющие равные их значения). Тогда определены разные типы заданий, соответственно, задания разных типов и наборы заданий, в которые входят задания одного типа. Эффективная реализация многостадийных процессов обеспечивается решением задачи построения расписаний выполнения заданий в КС. С точки зрения однотипных и разнотипных заданий различают расписания выполнения в КС единичных заданий (ЕЗ) разных типов, либо заданий, входящих в их наборы (наборы однотипных заданий).

Многостадийный процесс выполнения ЕЗ подвержен возмущающим воздействиям разных видов, которые влияют на его ход, определенный первоначально сформированным расписанием, названным статическим расписанием (СР). С целью адаптации многостадийного процесса выполнения ЕЗ в КС к возмущающим воздействиям реализуется изменение СР много-

стадийного процесса выполнения заданий на приборах и формирование динамических расписаний. Динамическое расписание формируется на основе СР при фиксации возмущающих воздействий на ход многостадийного процесса выполнения ЕЗ в КС с целью его адаптации к влиянию этих воздействий (для снижения влияния возмущающих воздействий). Различают внешние и внутренние возмущающие воздействия. Первый вид воздействий связан с изменением множества заданий (с поступлением в КС новых заданий, приоритеты которых равны либо превышают приоритеты заданий, уже выполняемых в КС в соответствии с СР), второй вид воздействий связан с изменением множества обрабатывающих приборов КС (с отказами приборов и их восстановлением). Адаптация хода многостадийного процесса выполнения ЕЗ в КС к возмущающим воздействиям разных видов, осуществляемая путем построения динамических расписаний, обеспечивает повышение эффективности реализации этого процесса в КС и эффективности использования ресурсов приборов КС. Таким образом, для адаптации многостадийных процессов к возмущающим воздействиям решается задача построения на основе сформированных СР динамических расписаний (ДР), в которых учтены виды воздействий.

В случае выполнения в КС заданий, входящих в разные наборы, построение расписаний осуществляется для пакетов заданий (ПЗ) разных типов. Под ПЗ подразумевается совокупность заданий одного типа, выполняемых без переналадки обрабатывающих приборов КС на выполнение заданий других типов. Построение расписаний выполнения наборов заданий разных типов предполагает рассмотрение пакетов следующих видов: фиксированных ПЗ, в которые включены все задания, входящие в их наборы; ПЗ разных типов, составы которых оптимизируются с точки зрения введенного критерия. Необходимость оптимизации составов ПЗ связана со значительными неоднородностями длительностей выполнения заданий разных типов на приборах КС, а также со значительными неоднородностями длительностей переналадок приборов КС на выполнение заданий разных типов. Для сформированных ПЗ реализуется определение расписаний их выполнения в КС. Поэтому задача построения расписаний многостадийных процессов выполнения ПЗ разных типов предусматривает определение решений по их составам и расписаниям их выполнения в КС (решение задачи построения расписаний обеспечивается решением двух подзадач: оптимизации составов ПЗ и оптимизации расписаний выполнения ПЗ на приборах КС).

В ряде практических задач требуется формирование комплектов результатов выполнения ПЗ в КС (оптимизация составов ПЗ и расписаний их выполнения реализуется при учете формирования комплектов результатов). Также не менее важным является решение задачи построения расписаний многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС при ограничениях на используемые ресурсы системы (ограниченными являются длительности интервалов времени функционирования КС). В этом случае решение задачи построения расписаний процессов вы-

полнения заданий в КС обеспечивается решением подзадач: оптимизации решений по составам ПЗ; оптимизации решений по составам групп ПЗ, выполняемых в течение интервалов времени функционирования системы заданных длительностей; расписаний выполнения ПЗ каждой из групп в КС. Оптимизация составов ПЗ, составов групп ПЗ и расписаний выполнения ПЗ, включенных в группы, в КС обеспечивает повышение эффективности использования ресурсов и увеличение количества заданий, выполненных в течение временных интервалов.

Задача построения статических и динамических расписаний выполнения ЕЗ в КС является *NP*-трудной. Ее решение без ограничений на количество обрабатывающих приборов КС, на значения параметров выполняемых заданий, на виды формируемых последовательностей выполнения заданий возможно только путем привлечения приближенных и метаэвристических методов оптимизации расписаний. При этом решение задачи построения статических и динамических расписаний выполнения ЕЗ в КС базируется на следующих моделях: процесса выполнения ЕЗ в КС; влияния возмущающих воздействий разных видов на ход процесса выполнения заданий, предусмотренный статическим расписанием. Вопросы моделирования влияния на ход многостадийных процессов выполнения ЕЗ в КС возмущающих воздействий разных видов являются слабо проработанными. В связи с этим разработка новых методов математического моделирования влияния возмущающих воздействий разных видов на ход процесса выполнения заданий, предусмотренный СР, является актуальной.

Для существующих методов построения статических и динамических расписаний выполнения ЕЗ в КС свойственны ограничения на размерность задачи, либо они используют эвристические правила и метаэвристичекие алгоритмы, не позволяющие гарантированно получать решения, приближающиеся к оптимальным, при разных наборах значений входных параметров. Также отсутствуют методы построения динамических расписаний, в которых учитываются различные виды возмущающих воздействий. В связи с этим актуальным является совершенствование методов оптимизации СР выполнения ЕЗ в КС и разработка новых методов оптимизации ДР, учитывающих влияние возмущающих воздействий разных видов.

Построение расписаний многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС, связанное с оптимизацией составов пакетов и расписаний реализации действий с ним на приборах, также является *NP*-трудной задачей. Ее решение требует привлечения численных методов оптимизации. Применение этих методов базируется на математических моделях: выполнения ПЗ в КС; выполнения ПЗ в КС при формировании комплектов результатов; выполнения ПЗ в КС при ограничении на длительности интервалов времени их функционирования; выполнения ПЗ в КС при ограничении на длительности интервалов времени функционирования систем и формировании комплектов результатов. В настоящее время слабо проработанными являются методы математического моделирования выполнения ПЗ в КС (в том числе при формировании комплектов

результатов, при ограничении на ресурсы систем). По этой причине разработка новых методов математического моделирования многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС является актуальной.

Существующие методы построения расписаний многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС имеют ограничения, связанные с размерностью задачи, позволяют получать решения для задачи в узкой постановке (на основе директивных сроков), не гарантируют получения решений, приближающихся к оптимальным, при различных значениях входных параметров (метаэвристические алгоритмы и эвристические правила).По этой причине разработка методов построения расписаний многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС, включающих методы оптимизации их составов и расписаний реализации действий с ними на приборах, является актуальной. Актуальной является разработка методов построения расписаний многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС при условии формирования комплектов результатов и при ограничениях на ресурсы системы. Актуальной является разработка комплекса программ, реализующего предложенные модели и методы. Актуальным также является исследование эффективности использования разработанных методов математического моделирования и численной оптимизации при решении задач построения расписаний многостадийных процессов выполнения ЕЗ и ПЗ в КС.

Степень разработанности проблемы. Решения задач построения расписаний многостадийных процессов выполнения ЕЗ в КС нашли свое отражение в работах таких отечественных авторов таких, как Танаев В.С., Сотсков Ю.Н., Струсевич В.А., Шкурба В.В., Шафранский Я.М., Прилуцкий М. Х., Ковалев М. Я., Лазарев А. А., Гафаров Е.Р., Кобак В.Г., Нейдорф Р. А., а также в работах зарубежных авторов: Johnson S.M., Brucker P., Pinedo M. L., Morton T.E., Pentico D.W. Решения задач построения динамических расписаний процессов выполнения ЕЗ в КС нашли свое отражение в работах авторов: Chetto M., Kim H., Lee S., Marchand A., Qiu D., Wang J., Zhu X. (периодические задания, директивные сроки); Madureira A., Ramos C., Carmo Silva S. A , He L., Jarvis S.A., Spooner D.P., Chen X., Nudd G.R., Dahal K., Hossain A., Varghese B., Abraham A., Xhafa F., Bierwirth C., Kopfer H., Mattfeld D.C., Rixen I. (метаэвристические алгоритмы); Visalakshi P., Sivanandam S.N., Jakobovic D., Budin L., Hwang J., Wood T., Hunt R., Johnston M., Zhang M., Cosnard M., Jeannot E., Rougent L., Terekhova D., Tran T., Down D. G., Beck J. C. (эвристические правила). Однако они посвящены оптимизации динамических расписаний процессов выполнения ЕЗ в КС при поступлении новых заданий, приоритеты которых равны приоритетам выполняющихся заданий, либо посвящены упорядочиванию периодических и апериодических заданий с учетом их директивных сроков. Другие виды воздействий указанными этими авторами не исследуются. Методы построения расписаний выполнения ЕЗ в КС имеют ограничения на размерность решаемой задачи, на значения параметров процессов

выполнения заданий, не гарантируют получение решений, приближающихся к оптимальным. Модификации этих алгоритмов либо сложны для реализации, либо приводят к значительному росту интервала времени, затрачиваемого на построение расписаний. Методы математического моделирования влияния возмущающих воздействий на ход процесса выполнения, предусмотренный статическим расписанием не являются проработанными. Не разработаны методы построения динамических расписаний.

Решению задач построения расписаний выполнения ПЗ посвящены работы авторов: Agha M., Adonyi R., Díaz-Ramírez J., Friedler F., Henning G.P., Huertas J.I., Mendez C.A., Ning Ch., Romero J., Puigjaner L., Zeballos L.J., You F. (планирование выполнения партий материалов в непрерывных производствах); Ковалев М.Я., Chandra P., Bein W., Noga J., Wiegley J., Steiner G. (расписания выполнения фиксированных пакетов); Surjandari I., Rachman A., Purdianta A., Dhini A., Koehler F. Khuller S., Monch L., Balasubramanian H., Fowler J. W., Pfund M. E., Dang Th.-T., Frankovic B., Budinska I., Kohn R., Rose O., Laroque Ch., Cheng T.,Yuan J., Yang A., Van der Zee D.-J., Li Sh., Ng C.T, Yuan J., Jin M., Liu X., Luo W., Tan Y., Huangi W., Sun Y., Yue Y., Li X., Wang Y., Ramasubramanian M., Mathirajan M., Ogun B., Cigdem A.-U. (определение составов ПЗ для выполнения на одном и параллельных приборах, с учетом директивных сроков, с использованием эвристических правил, метаэвристических алгоритмов и целочисленного программирования); Kreipl S., Pinedo M., Yugma C. (использование имитационных моделей).

Методы математического моделирования многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС и методы построения расписаний их выполнения (предполагающие оптимизацию составов ПЗ и расписаний реализации действий с ними на приборах) являются слабо разработанными и обеспечивают решение узкого круга задач. Методы математического моделирования процессов выполнения ПЗ в КС при условии формирования комплектов из результатов, процессов выполнения ПЗ в КС при ограничениях на ресурсы (в частности, при ограничении на длительности интервалов времени функционирования систем) не разработаны. Также не разработаны методы построения расписаний процессов выполнения ПЗ в КС в задачах данного вида. В силу сказанного разработка методов математического моделирования многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС и численных методов оптимизации решений по составам пакетов и расписаниям их выполнения является актуальным.

Объектом исследований является многостадийный процесс выполнения заданий в КС, включая выполнение ПЗ.

Предметом исследований являются методы математического моделирования многостадийных процессов выполнения ЕЗ и ПЗ в КС, численные методы построения расписаний многостадийных процессов выполнения ЕЗ и ПЗ в КС, комплекс программ построения расписаний

многостадийных процессов выполнения ЕЗ и ПЗ в КС, использующий разработанные и методы моделирования и оптимизации.

Цель и задачи исследования. Цель работы состоит в разработке новых методов математического моделирования многостадийных процессов выполнения ЕЗ и ПЗ в КС, разработке новых методов построения расписаний для многостадийных процессов выполнения ЕЗ и ПЗ в КС, комплекса программ построения расписаний процессов выполнения ЕЗ и ПЗ в КС. Для достижения поставленной цели в работе поставлены и решены **задачи**:

– синтеза информационной модели системы построения расписаний и классификации задач построения расписаний выполнения заданий в КС;

– совершенствования и разработки новых численных методов построения статических расписаний многостадийных процессов выполнения ЕЗ в КС;

– разработки новых методов математического моделирования влияния возмущающих воздействий на ход многостадийных процессов выполнения заданий, предусмотренный статическим расписанием, новых методов оптимизации динамических расписаний выполнения ЕЗ в КС, учитывающих возмущающие воздействия разных видов, использование которых позволяет выполнить адаптацию многостадийных процессов к этим воздействиям;

– разработки новых методов математического моделирования многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС, учитывающих, в том числе требование формирования комплектов результатов и ограничения на ресурсы системы;

– разработки новых численных методов построения расписаний выполнения ПЗ в КС, учитывающих, в том числе, требование формирования комплектов из результатов и ограничения на ресурсы системы, предусматривающих применение теории иерархических игр с целью оптимизации решений по составам ПЗ, составам групп ПЗ и расписаниям их выполнения;

– разработки комплекса программ, реализующего построение расписаний многостадийных процессов выполнения ЕЗ и ПЗ в КС.

Теоретическая и методологическая база исследования. Для решения указанных задач использовались методы системного анализа, теории множеств, теории многоуровневых систем, теории иерархических игр, теории расписаний, методы вычислительной математики и оптимизации, методы решения экстремальных задач, методы предметно-ориентированного анализа и проектирования программных систем.

Научная новизна. Основными научными результатами являются новые методы математического моделирования многостадийных процессов выполнения ЕЗ и ПЗ в КС, новые методы построения расписаний многостадийных процессов выполнения ЕЗ и ПЗ в КС, а именно:

1) впервые предложена информационная модель системы построения расписаний выполнения заданий в КС; с ее использованием разработана классификация задач построения распи-

саний многостадийных процессов выполнения ЕЗ и ПЗ в КС; ее отличием от существующих классификаций является то, что задачи построения расписаний рассматриваются как иерархически упорядоченные взаимодействующие подзадачи, каждая из которых предусматривает оптимизацию решений на соответствующих уровнях иерархии;

2) впервые предложен метод математического моделирования влияния возмущающих воздействий на ход многостадийных процессов выполнения ЕЗ в КС, предусмотренный статическим расписанием; это делает возможной оптимизацию динамических расписания их выполнения в КС с целью адаптации многостадийных процессов к влиянию возмущающих воздействий разных видов;

3) впервые предложен метод математического моделирования многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС, предусматривающий представление моделей процессов в виде совокупности иерархически взаимосвязанных компонент; с целью оптимизации решений по составам ПЗ, составам групп ПЗ, выполняемых в течение ограниченных интервалов времени, расписаний их выполнения в КС предложены математические модели иерархических игр, предоставляющие способ идентификации решений на уровнях иерархии;

4) разработан численный метод оптимизации статических расписаний выполнения ЕЗ, позволяющий получить результаты, являющиеся лучшими, чем известные метаэвристические алгоритмы; разработан численный метод построения динамических расписаний, позволяющий осуществлять адаптацию многостадийных процессов к возмущающим воздействиям разных видов и уменьшить влияние возмущающих воздействий на ход процессов выполнения ЕЗ в КС;

5) разработан метод построения расписаний выполнения пакетов заданий в конвейерных системах, предусматривающий представление обобщенной задачи в виде совокупности иерархически взаимосвязанных подзадач, для каждой из которой определяются локально оптимальные решения на каждом из уровней иерархии;

6) впервые разработан метод оптимизации составов ПЗ, позволяющий формировать локально оптимальные решения на верхнем уровне в иерархической игре построения расписаний процессов выполнения ПЗ в КС, а также разработан метод оптимизации расписаний выполнения ПЗ в КС; разработанные методы позволяют реализовать совместную оптимизацию составов ПЗ и расписаний их выполнения в КС без ограничений на размерность задачи и на значения входных параметров, при учете технологических параметров процесса;

7) впервые разработан метод распределения результатов выполнения ПЗ в КС по комплектам и метод вычисления моментов времени окончания формирования комплектов, обеспечивающие оптимизацию составов ПЗ и расписаний их выполнения в КС при условии формирования комплектов результатов;

8) впервые предложен метод оптимизации составов групп ПЗ, выполняемых в течение ограниченных интервалов времени функционирования КС (в том числе учитывающий формирования комплектов результатов); указанные методы позволяют реализовать построение расписаний выполнения ПЗ при ограничении и формировании комплектов, что предусматривает оптимизацию составов ПЗ, составов групп ПЗ, расписаний выполнения ПЗ из групп в КС;

9) с целью разработки комплекса программ построения расписаний выполнения ЕЗ и ПЗ в КС развит предметно-ориентированный подход к проектированию программных систем, что позволило реализовать адаптивную процедуру управления ходом решения задач, обеспечивающую его гибкость; с использованием комплекса программ получены результаты экспериментальных исследований зависимости эффективности применения математических моделей процессов выполнения ЕЗ и ПЗ в КС, математических моделей иерархических игр оптимизации решений, методов локальной оптимизации решений от значений параметров задач.

Практическая значимость работы заключается в том, что результаты исследований легли в основу построения алгоритмов моделирования многостадийных процессов выполнения ЕЗ и ПЗ в КС, алгоритмов оптимизации расписаний многостадийных процессов выполнения ЕЗ и ПЗ в КС с использованием соответствующих программ. Построение расписаний процессов выполнения ЕЗ и ПЗ с использованием предложенных моделей и методов оптимизации позволяет значительно сократить простои приборов КС, снизить общее время выполнения ЕЗ и ПЗ в КС, увеличить количество заданий, входящих в пакеты, включенные в группы, выполняемые в течение временных интервалов ограниченных длительностей.

Практическая ценность и реализация результатов исследования. Полученные результаты исследований, включающие разработанные методы математического моделирования процессов выполнения ЕЗ и ПЗ в КС, методы построения расписаний выполнения ЕЗ и ПЗ в КС имеют большое практическое значение. С их использованием решаются задачи построения расписаний выполнения заданий на обработку данных в КС (на обработку данных дистанционного зондирования Земли с целью идентификации негативных природных явлений и техногенных воздействий, их характеристик и условий распространения), задачи построения расписаний обработки партий деталей в мелкосерийном производстве (оптимизации составов партий и расписаний их обработки при восстановлении цилиндрических деталей узлов и агрегатов транспортного и технологического оборудования). То есть результаты работы применяются в различных областях деятельности, связанных с выполнением заданий в КС. Результаты диссертационной работы внедрены: в АО «КБ Радиосвязи» (г.Севастополь) при решении задач построения расписаний установления радиосвязи; в ООО «Севастопольэнерго» (г.Севастополь) для решения задач планирования ремонта оборудования; в ФГУП «13-й судоремонтный завод Черноморского флота» МО РФ для решения задач планирования процессов в мелкосерийном

производстве; в ООО «Центр разработки программного обеспечения 1С:Рарус» (г.Севастополь) для решения задач оптимизации выполнения складских операций.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1) информационная модель системы построения расписаний выполнения заданий в КС; классификация задач построения расписаний многостадийных процессов выполнения заданий в КС;

2) метод математического моделирования влияния возмущающих воздействий на ход многостадийных процессов выполнения ЕЗ в КС, предусмотренный статическим расписанием;

3) метод математического моделирования многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС, предусматривающий представление моделей процессов в виде совокупности иерархически взаимосвязанных компонент;

4) метод оптимизации статических расписаний выполнения ЕЗ в КС, метод оптимизации динамических расписаний выполнения ЕЗ в КС, позволяющий осуществлять адаптацию многостадийных процессов к возмущающим воздействиям разных видов;

5) метод построения расписаний выполнения ПЗ в КС, предусматривающий представление обобщенной задачи в виде совокупности иерархически взаимосвязанных подзадач, для каждой из которых формируется локально оптимальное решение на соответствующем ей уровне иерархии; метод оптимизации составов ПЗ, позволяющий формировать локально оптимальные решения на верхнем уровне в иерархической игре построения расписаний процесса выполнения ПЗ в КС, метод оптимизации расписаний выполнения ПЗ в КС;

6) методы распределения результатов выполнения ПЗ в КС по комплектам и вычисления моментов времени окончания их формирования;

7) методы оптимизации составов групп ПЗ, выполняемых в течение ограниченных интервалов времени функционирования КС;

8) комплекс программ построения расписаний выполнения ЕЗ и ПЗ в КС.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и симпозиумах:23-я международная научно-техническая конференция «Прикладные задачи математики» (г. Севастополь, 2015 г.), Научная сессия НИЯУ МИФИ-2015 (г, Москва, 2015 г.), Международная научно-практическая конференция «Информационные технологии и информационная безопасность в науке, технике и образовании «Инфотех – 2015» (г. Севастополь, 2015 г.), 24-я международная научно-техническая конференция «Прикладные задачи математики» (г. Севастополь, 2016 г), I-я Междисциплинарная Всероссийская научно-практическая конференция «Развитие методологии современной экономической науки и менеджмента» (г. Севастополь, 2017 г.), Международная научно-практическая конференция «Информационные технологии и информационная безопас-

ность в науке, технике и образовании «Инфотех – 2017» (г. Севастополь, 2017 г.), IV-я межрегиональная конференция «Перспективные направления развития отечественных информационных технологий» (г. Севастополь, 2018 г.), Международная научно-практическая конференция «Интеллектуальные информационные системы – 2018» (Воронеж, 2018), V-я межрегиональная конференция «Перспективные направления развития отечественных информационных технологий» (г. Севастополь, 2019 г.), Международная конференция «Математическое моделирование» (г. Москва, 2020 г.), Международная научно-техническая конференция «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении 2021» (ICMTMTE 2021).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 38 работ, в том числе 10 статей в изданиях, входящих в перечень ВАК для публикации основных результатов докторских диссертаций; 6 статей в изданиях, включенных в перечни Web of Science и Scopus; 2 статьи в журналах, включенных в базу РИНЦ, 17 работ в сборниках отечественных и международных конференций, 3 свидетельства на государственную регистрацию программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка основных сокращений, списка литературы из 294 наименований. Основная часть (без приложений) содержит 294 страницы машинописного текста, 3 таблицы, 59 рисунков. Также основной материал работы дополнен четырьмя приложениями объемом 122 страницы. Нумерация формул, таблиц, рисунков в пределах каждого раздела самостоятельная.

В первой главе выполнен анализ видов задач математического моделирования и построения расписаний многостадийных процессов выполнения заданий в КС, анализ существующих методов математического моделирования и построения расписаний многостадийных процессов выполнения ЕЗ и ПЗ в КС, обоснование актуальности разработки математических моделей и методов построения расписаний процессов выполнения заданий в КС.

Во второй главе выполнен синтез информационной модели многостадийных процессов выполнения заданий в КС, а также обоснование классификации задач построения расписаний многостадийных процессов выполнения заданий на основе иерархического подхода.

В третьей главе реализовано построение математической модели процесса выполнения ЕЗ в КС, осуществлен синтез метода построения расписаний, основывающегося на «жадном» подходе в дискретной оптимизации, реализован синтез метода математического моделирования влияния возмущающих воздействий на ход многостадийных процессов выполнения заданий, реализовано построение методов оптимизации динамических расписаний, учитывающих возмущающие воздействия разных видов.

В четвертой главе синтезирован метод математического моделирования многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС, предусматривающий представление их моделей в виде иерар-

хически взаимосвязанных компонент; развит подход к построению расписаний многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС, базирующийся на теории иерархических игр, реализован синтез математической модели процесса выполнения ПЗ в КС и вида критериев оптимизации решений на уровнях иерархической игры, реализовано построение методов определения локально оптимальных решений по составам ПЗ и расписаниям их выполнения в КС.

В пятой главе развит иерархический подход к построению расписаний процессов выполнения ПЗ в КС с учетом формирования комплектов результатов. Реализован синтез математических моделей процессов выполнения ПЗ в КС с учетом формирования комплектов, выполнен синтез моделей иерархических игр для определения решений по составам ПЗ и расписаниям их выполнения в КС при оперативном формировании комплектов и формировании комплектов в заданные директивные сроки. Реализовано построение методов упорядочивания идентификаторов типов комплектов для каждой из задач оптимизации расписаний выполнения ПЗ и методов распределения результатов по комплектам с учетом расписания их выполнения.

В шестой главе развит иерархический подход для решения задачи построения расписаний выполнения ПЗ в КС при ограничении на длительности интервалов времени функционирования. Построена модель иерархической игры оптимизации составов ПЗ, составов групп ПЗ и расписаний их выполнения в КС, а также метод оптимизации составов групп ПЗ, выполняемых в течение этих интервалов. Синтезирована модель процесса выполнения ПЗ в КС при ограничении на длительности интервалов времени их функционирования и формировании комплектов. Разработан метод оптимизации составов групп ПЗ, учитывающий условие формирования комплектов. Выполнено развитие предметно-ориентированного подхода при разработке программных систем применительно к проектированию комплекса программ построения расписаний многостадийных процессов выполнения ЕЗ и ПЗ в КС. На его основе разработана архитектура системы построения расписаний процессов выполнения заданий в КС.

В Приложении 1 приведено доказательство теоремы о формировании локально оптимальных решений с использованием метода оптимизации, основывающегося на «жадных» стратегиях. В Приложении 2 рассматривается применение разработанных математических моделей процессов выполнения ЕЗ и ПЗ в КС, методов оптимизации при построении расписаний выполнения заданий на обработку данных дистанционного зондирования Земли в Web-ориентированной системе мониторинга ОС. В Приложении 3 приведены примеры использования разработанных моделей и методов оптимизации для решения задач построения расписаний выполнения ЕЗ и ПЗ на обработку данных ДЗЗ. Рассмотрено применение разработанных моделей и методов при решении задач построения расписаний процессов восстановления деталей узлов и агрегатов технологического и транспортного оборудования. В Приложении 4 представлены акты внедрения результатов работы в производство.

ГЛАВА 1. ОБОСНОВАНИЕ АКТУАЛЬНОСТИ РАЗРАБОТКИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ РАСПИСАНИЙ МНОГОСТАДИЙНЫХ ПРОЦЕССОВ В КОНВЕЙЕРНЫХ СИСТЕМАХ

1.1. Анализ видов задач построения расписаний многостадийных процессов выполнения заданий в конвейерных системах

В различных областях практической деятельности выполнение работ требует минимизации времени получения результатов и максимизации эффективности использования оборудования систем. Снижение временных затрат на выполнение заданий связано с распараллеливанием операций с ними. Распараллеливание возможно путем реализации двух подходов [1-3]:

– распределения выполнения заданий по параллельно функционирующим обрабатывающим устройствам; при этом каждое устройство реализует действия с назначенными ему заданиями, являющиеся одинаковыми для всех устройств, входящих в систему, либо действия, реализуемые с заданиями на каждом из устройств, являются различными;

– конвейеризации выполнения заданий в многостадийных системах.

Конвейеризация выполнения заданий возможна в том случае, когда процесс реализации действий с ними представлен в виде совокупности стадий, для которых задана одинаковая последовательность [4-6]. Каждая стадия процесса выполнения задания закреплена за определенным обрабатывающим прибором КС. Формирование результатов выполнения задания на одном из устройств (после осуществления определенной стадии процесса) является условием начала реализации следующей за ней стадии выполнения этого задания. Процесс выполнения заданий в КС характеризуется параметрами [6-8]: 1) длительностями выполнения задания на приборах КС; 2)длительностями переналадок приборов КС с выполнения задания одного типа на выполнение задания другого типа.

Множество заданий, выполняемых в КС, может быть охарактеризовано одним из следующих свойств: 1) всем заданиям, в него входящим, соответствуют различные значения введенных в рассмотрение параметров длительностей выполнения и переналадки приборов КС; 2) множество заданий состоит из подмножеств, в каждое из которых входят задания, характеризуемые одинаковыми значениями параметров длительностей выполнения и переналадки приборов КС. Задания, характеризуемые одинаковыми значениями длительностей выполнения и переналадок приборов КС, относятся к одному типу и входят в одно их подмножество, Задания, входящие в разные подмножества, отнесены к разным типам.

В случае, если все задания, выполняемые в КС, характеризуются различными значениями длительностей реализации действий с ними на приборах КС и длительностей переналадок при-

боров, то в системе реализуется многостадийный процесс выполнения единичных заданий (ЕЗ). Если задания характеризуются равными значениями параметров длительностей выполнения и переналадок приборов КС, то они объединены в наборы однотипных заданий. Тогда в КС реализуется выполнение либо ЕЗ разных типов, либо наборов заданий разных типов.

Единичные задания либо задания, входящие в разные их наборы характеризуются разными значениями параметров длительностей их выполнения на разных приборах КС и длительностей переналадок приборов. Для эффективной реализации многостадийного процесса выполнения заданий требуется осуществить построение расписаний реализации действий с заданиями на приборах КС [6-8]. Построение расписаний выполнения заданий в КС предполагает определение порядков реализации действий с ними на каждом из приборов системы (определение вида последовательностей выполнения заданий на приборах) [6-8]. Построение расписаний многостадийных процессов выполнения заданий в КС обеспечивает повышение эффективности использования ресурсов приборов (снижение простоев приборов при их выполнении), а также повышение производительности систем.

При реализации многостадийного процесса выполнения ЕЗ, предусмотренного сформированным расписанием, возможны возмущающие воздействия, влияющие на его ход: 1) изменение состава множества заданий, для которых должно быть выполнено построение расписаний; 2) изменение состава множества обрабатывающих приборов КС.

Первый вид возмущающих воздействий связан с поступлением в систему для выполнения новых заданий (при этом приоритеты поступающих заданий равны или превышают приоритеты заданий, уже входящих в это множество). Второй вид возмущающих воздействий предполагает отказ приборов КС и их последующее восстановление, обуславливающие не возможность реализации на них действий с заданиями. Под влиянием возмущающих воздействий ход многостадийного процесса выполнения ЕЗ в КС, предусмотренный статическим расписанием, изменяется, что приводит к увеличению простоев приборов и снижению производительности системы. С целью адаптации многостадийного процесса к возмущающим воздействиям, влияющим на его ход, этот процесс должен быть модифицирован. Модификация многостадийного процесса с целью снижения влияния возмущающих воздействий на его ход (адаптация процесса), реализуется посредством построения динамических расписаний.

Таким образом, статическое расписание (СР) – это решение по порядкам реализации действий с заданиями на приборах КС, определенное для первоначально сформированных множеств заданий разных типов и обрабатывающих приборов. Динамическое расписание (ДР) – это решение по порядкам выполнения заданий на приборах КС, формируемое на основе полученного статического расписания после фиксации возмущающих воздействий, в котором учтено их влияние на ход реализации действий с заданиями, соответствующий СР.

В соответствии с изложенным подходом построение статических расписаний обеспечивает повышение эффективности использования ресурсов обрабатывающих приборов КС (снижение простоев приборов при выполнении заданий), а также повышение производительности функционирования КС. Построение динамических расписаний обеспечивает снижение простоев приборов КС, вызванных возмущающими воздействиями, влияющими на ход процесса выполнения заданий, а также повышение производительности системы (тем самым обеспечивается адаптация процессов выполнения заданий к возмущающим воздействиям с целью снижения их влияния). По этим причинам решение задач построения статических и динамических расписаний выполнения ЕЗ в КС является актуальным.

При условии, что однотипные задания объединены в наборы, решается задача построения расписаний многостадийных процессов выполнения пакетов заданий (ПЗ) в КС. Построение расписаний выполнения заданий, входящих в разные их наборы, в составе пакетов осуществляется с учетом длительностей реализации действий с ними на приборах и длительностей переналадок приборов на реализацию действий с ними. С целью повышения производительности КС при реализации действий с заданиями, входящими в разные наборы, их выполнение осуществляется в пакетах, составы которых оптимизируются. В этом случае решение задачи построения расписаний выполнения ПЗ разных типов в КС предусматривает оптимизацию составов пакетов и расписаний реализации действий с ними на приборах. В дальнейшем под ПЗ подразумевается совокупность заданий одного типа, которые выполняются в КС без переналадки ее приборов на реализацию действий с заданиями других типов. При переходе от выполнения ПЗ одного типа к выполнению ПЗ другого типа требуется переналадка приборов.

Необходимость оптимизации составов ПЗ возникает при наличии значительных неоднородностей длительностей их (заданий) выполнения на приборах КС и неоднородностей длительностей переналадок приборов КС на реализацию действий с ними. Под неоднородностью длительностей выполнения заданий подразумевается различие в значениях этого параметра у рассматриваемых заданий для разных приборов КС. Под неоднородностью длительностей переналадок подразумевается различие в значениях этого параметра для разных приборов.

Решение задачи построения расписаний процессов выполнения ПЗ в КС, предусматривающее оптимизацию составов пакетов и расписаний реализации действий с ними на приборах системы, порождает возможность решения новых задач. В ряде практических приложений необходимо осуществлять формирование комплектов результатов выполнения заданий в КС. В этом случае после выполнения заданий, включенных в пакеты, формируются результаты, распределяемые по комплектам. Тогда построение расписаний процесса выполнения заданий в КС предполагает: 1) оптимизацию составов ПЗ с учетом параметров процесса их выполнения в КС; 2) определение расписаний выполнения сформированных ПЗ на приборах КС; 3)формирование

комплектов заданных составов из результатов выполнения заданий (реализуется распределение результатов по комплектам заданных составов в соответствии с расписанием). Построение расписаний выполнения ПЗ в КС при этом условии обеспечивает уменьшение простоев приборов и ритмичность формирования комплектов результатов (то есть определение загрузки приборов КС выполнением заданий, которая обеспечивает равномерное формирование комплектов или формирование комплектов в заданные для них директивные сроки).

Еще одной задачей построения расписаний процессов выполнения заданий в КС, решение которой связано с формированием пакетов, является задача синтеза расписаний при условии, что ресурсы обрабатывающей системы ограничены (ограничены интервалы времени функционирования системы). Тогда наряду с задачей определения составов ПЗ возникает задача, решение которой предусматривает формирование совокупностей пакетов, выполняемых в течение каждого из интервалов времени ограниченной длительности. Наборы ПЗ, выполняемые в течение интервалов времени функционирования системы ограниченной длительности, формируются в соответствии с требованием наиболее полного использования ограниченного ресурса КС. Поэтому составы ПЗ должны обеспечивать наиболее полное использование временного ресурса КС при выполнении заданий (минимизировать не эффективное использованием ресурса), а с другой стороны должны обеспечивать максимальное количество заданий, выполненных в течение указанных временных интервалов. С целью построения дальнейших рассуждений в рассмотрение введено понятие групп ПЗ, выполнение которых осуществляется в течение временных интервалов функционирования КС ограниченной длительности. Группы ПЗ – непересекающиеся множества пакетов, которым соответствуют интервалы времени функционирования КС ограниченной длительности. Тогда актуальным является решение задач построения расписаний выполнения ПЗ в КС при ограничении на длительности интервалов времени их функционирования, которое обеспечивается оптимизацией составов ПЗ, составов групп ПЗ, расписаний выполнения ПЗ, включенных в группы, на приборах КС. Построение расписаний выполнения ПЗ при ограничении на длительности интервалов времени функционирования КС обеспечивает увеличение количества заданий, выполняемых в течение этих временных интервалов, а также обеспечивает повышение эффективности использования ограниченного ресурса КС.

Развитием рассмотренных задач является задача построения расписаний процессов выполнения ПЗ при формировании комплектов и ограничении на длительности интервалов времени функционирования КС. В этом случае построение расписаний предусматривает оптимизацию составов ПЗ, составов групп ПЗ, выполняемых в течение ограниченных временных интервалов, расписаний выполнения ПЗ из групп в КС. Построение расписаний процесса выполнения ПЗ в КС при введенных условиях реализуется с учетом требования формирования максимального количества комплектов из результатов выполнения заданий, входящих в пакеты,

включенные в группы. Также построение расписаний выполнения ПЗ предполагает формирование таких решений, которые обеспечивают использование ограниченного ресурса времени КС в максимальной степени. В силу сказанного, решение задач построения расписаний выполнения ПЗ в КС обеспечивает: увеличение количества заданий, выполняемых в течение ограниченных временных интервалов, равномерность формирования комплектов из результатов выполнения заданий, повышение эффективности использования ограниченных ресурсов КС, повышение производительности КС при выполнении заданий, входящих в пакеты. По этой причине решение задач построения расписаний выполнения ПЗ в КС является актуальным.

Актуальность задач построения расписаний выполнения ЕЗ и ПЗ в КС обусловлена также потребностями в их решении для различных сфер практической деятельности: 1) при обработке данных в КС (при обработке данных дистанционного зондирования Земли с целью идентификации на поверхности негативных природных явлений и техногенных воздействий на окружающую среду, определения их характеристик и условий распространения (Приложения 2,3)); 2) при обработке деталей (передаточных партий деталей) в мелкосерийном производстве (при восстановлении поверхностей деталей узлов и агрегатов технологического и транспортного оборудования на специализированных ремонтных предприятиях (Приложение 3)). Задачи построения расписаний выполнения ЕЗ и ПЗ в КС являются NP-трудными ([6-9]) поэтому для их решения требуется разработка численных методов оптимизации. В тоже время оптимизация динамических расписаний процесса выполнения ЕЗ в КС основывается на математических моделях влияния возмущающих воздействий на его ход. В связи с этим актуальна разработка метода математического моделирования влияния возмущающих воздействий на ход процесса выполнения ЕЗ в КС, предусмотренный статическим расписанием. Также оптимизация расписаний выполнения ПЗ в КС основывается на математических моделях многостадийных процессов реализации действий с ними на приборах КС. По этой причине актуальна разработка метода математического моделирования процесса выполнения ПЗ в КС.

1.2. Обоснование актуальности разработки математических моделей и методов построения расписаний многостадийных процессов выполнения заданий в конвейерных системах

Основополагающим в теории расписаний является понятие задания как единицы работы, выполняемой в системе с данными или материалами [6-8]. Через i обозначим тип заданий, характеризующихся равными длительностями выполнения на обрабатывающих приборах КС и равными длительностями переналадок приборов на реализацию действий с ними, n– общее количество типов заданий ($i = \overline{1,n}$), n^i – количество заданий i-го типа, которые выполняются в

КС. Система, осуществляющая выполнение заданий, является конвейерной, тогда порядок (технологический маршрут) прохождения ими обрабатывающих приборов является строго заданным и фиксированным. Через l обозначим номер прибора, входящего в состав КС ($l = \overline{1,L}$).Порядки реализации действий с заданиями на приборах КС представляются в виде последовательностей их выполнения на приборах [6-8]. Обозначим через π^l ($l = \overline{1,L}$) последовательность реализации действий с заданиями на l-м приборе [6-8]. Последовательность π^l является конечной, содержит все задания nтипов, которые должны быть выполнены в системе. Совокупность последовательностей реализации действий с заданиями разных типов на l-х приборах КС ($l = \overline{1,L}$) образует расписание выполнения заданий в системе [6-8]. Обозначим расписание выполнения заданий в КС через π , тогда расписание будет иметь вид: $\pi = \{\pi^1, \pi^2, \pi^3, ..., \pi^L\}$.Для представления последовательностей выполнения заданий на l-х приборах КС введены в рассмотрение матрицы порядка реализации действий с ними, обозначенной как P^l (размер матрицы $n \times n$). Элемент $p_{ij}^l = 1$, если задание i-го типа занимает в π^l j-ю позицию, $p_{ij}^l = 0$ в случае, если задание i-го типа не занимает в последовательности π^l их выполнения j-ю позицию. Расписанию π соответствуют матрицы P^l ($l = \overline{1,L}$) порядков реализации действий с заданиями на приборах КС.

В соответствии с [6-8] через t_{li} обозначим длительность реализации действий с заданием i-го типа на l-м приборе КС, через $\overline{t_i}$ – момент времени окончания выполнения задания i-го типа в системе, через D_i – директивный срок окончания выполнения задания i-го типа в КС. Параметры $\overline{t_i}$ и D_i используются при синтезе критериев оптимальности расписаний в [6-8]: 1) $L_i = (\overline{t_i} - D_i)$– временное смещение момента времени завершения выполнения задания i-го типа относительно его директивного срока; 2) $T_i = max\{0, \overline{t_i} - D_i\}$– запаздывание с окончанием выполнения задания i-го типа относительно директивного срока D_i; 3) $E_i = max\{0, D_i - \overline{t_i}\}$– опережение с окончанием выполнения задания i-го типа относительно его директивного срока; 4) U_i– бинарная переменная ($U_i = 0$, если $\overline{t_i} \le D_i$ и $U_i = 1$, если $\overline{t_i} > D_i$). В соответствии с введенными в рассмотрение критериями в [6-8] формулируются задачи оптимизации решений по порядкам выполнения заданий на приборах КС: 1) $min(\overline{t_{max}})$, где $\overline{t_{max}} = \max\limits_{i \in I}(\overline{t_i})$– задача минимизации момента времени окончания выполнения заданий в системе; 2) $min(L_{max})$, где

$L_{max} = \max\limits_{i \in I}(L_i)$ – задача минимизации максимального временного смещения времени окончания выполнения заданий относительно директивных сроков; 3) $min(\sum\limits_{i=1}^{n} t_i)$ – задача минимизации суммарного времени окончания выполнения заданий; 4) $min(\sum\limits_{i=1}^{n} T_i)$ – задача минимизации суммарного запаздывания с выполнением заданий относительно директивных сроков; 5) $min(\sum\limits_{i=1}^{n} U_i)$ – задача минимизации количества запаздываний.

Базовые работы по теории расписаний [6-8] посвящены рассмотрению задач разных типов. В соответствии с организацией системы выполнения ЕЗ в виде последовательности приборов, необходим анализ математических моделей процессов реализации действий с заданиями в таких системах и методов построения расписаний в одно маршрутных системах типа *Flow-Shop* [6-8]. Порядки выполнения заданий в расписании $\pi = \{\pi^1, \pi^2, \pi^3, ..., \pi^L\}$ представляются последовательностями вида[6]: $\pi^l = \{i_1, i_2, i_3, ..., i_n\}$, где i_j – идентификатор *i*типа задания, занимающего в последовательности их выполнения на *l*-м приборе *j*-ю позицию. Математическая модель процесса выполнения ЕЗ в КС [6] позволяет определять на основе сформированных последовательностей π^l $(l = \overline{1,L})$ значения моментов времени начала выполнения заданий *i*-х типов на *l*–х приборах КС t_i^{0l}. Модель является базовой и интерпретируется в работах [6-8], [10-27] при рассмотрении различных способов построения последовательностей π^l.

Базовые алгоритмы решения задач построения расписаний выполнения ЕЗ в КС рассмотрены в [6]. Определено свойство оптимальных расписаний для двух приборной задачи, предполагающее одинаковый порядок выполнения заданий на первом и втором приборах, а также свойство, предполагающее одинаковый порядок выполнения заданий на предпоследнем и последнем приборах. Сформулирован способ формирования последовательностей в оптимальном расписании в двух приборной задаче. Доказывается, что задачи построения расписаний для 3-х и более приборов являются *NP*-трудными вне зависимости от того, допускается или нет прерывание при выполнении заданий. От задач в общем виде в [6] выполняется переход к задачам определенных классов: с упорядоченными или доминантными матрицами длительностей выполнения заданий (накладываются ограничения на длительности выполнения ЕЗ в КС), с одинаковыми порядками выполнения ЕЗ на всех приборах. Для решения таких задач в [6] рассмотрены приближенные методы построения расписаний с априорно заданной точностью

определения решений. При значительных длительностях выполнения заданий и большом количестве приборов погрешность расписаний значительно возрастает.

Для задач *FlowShop* в [7] выполняется обоснование условий оптимальности расписаний для потоковых систем в задаче вида $F|\cdot|\overline{t_{max}}$. Для построения расписаний в двух стадийных системах предлагается способ формирования последовательностей, предусматривающий упорядочивание заданий по не возрастанию величины $w_i = sign(b_i - a_i)(W - min(a_i, b_i)$, где a_i и b_i – длительности выполнения*i*-го задания на первом и втором приборах, *W*– константа.

В [8] для задачи $F2|\cdot|C_{max}$ формулируется метод Джонсона построения последовательностей выполнения заданий на приборах системы. Способ построения расписаний предполагает формирование двух частей в последовательности π выполнения заданий: $\pi = (\pi_1, \pi_2)$. На каждом шаге алгоритма выделяется *i*-е задание с наименьшим значением длительности выполнения на *l*-ом приборе t_{li} $(l = \overline{1,2})$. Если *l=1*, то задание*i* добавляется в конец частичного расписания π_1: (π_1, i), если *l=2*, тогда задание добавляется в начало последовательности π_2: (i, π_2). В итоге порядки выполнения заданий имеют вид двух последовательностей (π_1, π_2) и является одинаковым на первом и втором приборах.

В [10] рассматривается применение методов теории расписаний к решению задач планирования на железнодорожном транспорте. В основу построения моделей в указанных задачах положен пространственно-временной граф, вершинами которого являются события, происходящие с поездами. Определение маршрута между соответствующими пунктами состоит в идентификации наикратчайшего пути на пространственно-временном графе. Также в [10] уделено внимание решению задач формирования составов и расписаний движения поездов при двух станциях на маршруте (двух приборная задача). Указанные задачи сводятся к одно приборной задаче теории расписаний. В итоге в [10] выполнено сведение задач построения расписаний поездов к решению одно приборной задачи и применен метод динамического программирования, позволяющий получить точные решения. Однако применение данного метода ограничено для задач большой размерности.

Обоснованию подхода, предусматривающего сведение задач построения расписаний, для которых отсутствуют приближенные методы решения, к одно приборным задачам, для которых эти методы разработаны, посвящены работы [11,12]. С точки зрения классификации [28] решаемые задачи определены следующим образом: $1|d_i|L_{max}$, $1|d_i|\sum w_i U_i$, $1|\cdot|\sum T_i$, где $d_i \geq 0$ – момент времени поступления заданий в систему для выполнения. Для решения задач применены: метод ветвей и границ, метод ветвей и отсечений, полиномиальные/ псевдополиномиальные алгоритмы, в которых учитываются ограничения на значения параметров. Обос-

новывается возможность перехода от исходной задачи, для которой эти ограничения не выполняются, к задаче с ограничениями, и использование полученного расписания в качестве решения задачи первого вида с определенной погрешностью.

В [13] рассматриваются способы усовершенствования алгоритмов ограниченного перебора (метода ветвей и границ (МВГ) и его вариаций – метода Алексеева и метода Романовского) для решения задачи распределения заданий по параллельно действующим приборам. Реализация метода предполагает, что длительности выполнения заданий на всех приборах одинаковы, осуществляется модификация списка заданий, который используется при построении расписаний. Это обеспечивает реализацию условия кратности, предусматривающего, что количество заданий кратно числу приборов, и обеспечивает снижение времени расчетов при определении решений. Также выполнено развитие списочных алгоритмов, предполагающих выстраивание заданий в определенном порядке и реализацию правил использования списков для построения расписаний. Работа [14] посвящена решению задач планирования вычислений в системах реального времени с параллельно действующими приборами. Для распределения заданий между параллельно действующими приборами предложен эвристический алгоритм, предполагающий: 1) вычисление значения идеальной оценки окончания выполнения заданий; 2) распределение заданий на каждый незагруженный прибор до тех пор, пока суммарная длительность их выполнения не превысит калиброванного значения для этого прибора; при превышении калиброванного значения рассматриваемое задание удаляется из расписания и на текущий прибор назначаются задания, пока суммарная загрузка не достигнет калиброванного значения; 3) назначение на прибор, который является наименее загруженным, задания, имеющего наибольшую длительность выполнения; 4) повторение процесса распределения заданий.

Работы [15, 16] посвящены рассмотрению алгоритмов построения расписаний выполнения заданий в системах разных типов: одно приборных, с параллельно действующими приборами, с приборами, последовательно выполняющими задания (*FlowShop*), с приборами, выполняющими задания в произвольном порядке (*OpenShop*), с приборами, обрабатывающими заданий в соответствии с различными (но заданными) маршрутами (*JobShop*). В [15] рассматриваются разные одно приборные задачи, в которых учитываются особенности, связанные с указанием: 1) отношения предпочтения при выполнении заданий в виде ациклических деревьев; 2) возможности прерывания выполнения заданий; 3) различных моментов времени поступления заданий для выполнения. Рассматривается задача *FlowShop* для двух приборов с критерием $\overline{t_{max}}$ (вида $F2|\cdot|\overline{t_{max}}$). Формулируется особенность расписания, определяющая одинаковые порядки выполнения заданий на первом и втором приборах. Расписание строиться путем формирования левого (I_1) и правого (I_2) списков заданий с их последующей конъюнкцией. В [16]

упрощающим условием при решении задачи построения расписаний в системе *FlowShop* является предпосылка об одинаковом порядке реализации действий на всех приборах (при $L \geq 4$). В случае малого количества приборов и выполняемых заданий их порядок определяется путем формирования критического пути на графе, с вершинами которого связаны длительности выполнения заданий. При увеличении количества приборов либо числа выполняемых заданий такой подход является трудно реализуемым. Также в [16] формулируются правила упорядочивания для левого (I_1) и правого (I_2) списков заданий (для задачи $F2|\cdot|\overline{t_{max}}$): SPT – правило, определяющее не убывание длительностей выполнения заданий в последовательностях; LPT – правило, определяющее не возрастание длительностей выполнения заданий в последовательностях. Рассматривается задача $FL|block|\overline{t_{max}}$ (задача при нулевом хранилище для заданий перед каждым прибором). Для решения указанной задачи предложены три метода: 1) посредством определения критического пути на графе длительностей выполнения заданий; 2) по правилу SPT (либо LPT); 3) при рассмотрении задачи в общем виде используется правило "*ProfileFitting*" (*PF*), предусматривающее, что упорядочивание заданий реализуется на основе значений параметра, учитывающего длительности их выполнения.

В работе [17] предложены различные эвристические правила, используемые при определении порядка выполнения заданий в одно машинных и многомашинных системах. Для одно приборной задачи эвристические правила учитывают директивные сроки окончания выполнения заданий и моменты времени их поступления в систему, комплексные эвристические правила учитывают параметры: срочность выполнения заданий, директивные сроки, длительности выполнения и так далее. В качестве метаэвристических методов решения одно приборной задачи построения расписаний рассматриваются: поиск в окрестностях, генетические алгоритмы, метод имитации отжига. Для реализации метода поиска в окрестности формулируются различные способы формирования новых решений: «попарный обмен» (обмен позициями двух заданий); сдвиг блока заданий в последовательности выполнения, предусматривающий его перемещение в конец либо в начало последовательности на одну позицию. Применение эвристик, сформулированных для одно машинной задачи, при построении расписаний выполнения заданий в последовательных многомашинных системах осуществляется, исходя из предположения об одинаковом порядке реализации действий с ними на приборах.

В работах [18-20] исследуются различные методы получения решений задачи построения расписаний для КС, в частности, МВГ и способы улучшения его процедуры. Совершенствование вычислительной процедуры МВГ связано использованием дополнительных способов формирования перестановок (решений по порядку выполнения заданий), используемых на этапе ветвления МВГ с целью улучшения значений критерия. К таким способам в соответствии с [18,

19] относятся: алгоритм Simulated Annealing, генетические алгоритмы, метод муравьиной колонии, эвристические алгоритмы (в частности, фронтальный алгоритм). Каждый из этих способов позволяет получить на текущей итерации ветвления заведомо лучшие решения. Стандартный подход МВГ модифицируется с применением указанных способов генерации перестановок, обеспечивающих увеличение скорости улучшения значений критерия.

В работе [20] предлагается модификация подхода, использующего генетические алгоритмы (ГА), с целью повышения их эффективности. Первая модификация предполагает реализацию бинарного турнирного отбора, в котором участвуют как родительская особь, так и результирующая, полученная в ходе выполнения операторов кроссоверинга и мутации. Вторая модификация предполагает усложнение ГА с целью распределения заданий по четному количеству приборов. Третья модификация ГА предполагает реализацию распределения заданий по нечетному количеству приборов. Рассмотрению применения ГА к решению задачи построения расписаний выполнения заданий в GRID-системах посвящены работы [21,22]. При этом учитывается наличие ограничений на ресурсы, необходимые заданиям. При формировании новых решений по распределению заданий по приборам определяется их допустимость с точки зрения возможности выполнения каждого задания на назначенном ему приборе.

Селективно-перестановочный метод построения расписаний рассмотрен в [23]. Для формирования нового решения используется распределительная матрица, значение каждого элемента которой представляет собой количество заданий определенного типа, закрепленных за соответствующими приборами. Первым столбцом матрицы является столбец-клиент, соответствующий приборам, загруженным в меньшей степени, последним столбцом– столбец-донор, соответствующий приборам, загруженным в большей степени. Из столбца-донора удаляется задание, а в столбец-клиент оно добавляется. Если перестановка, улучшающая значение критерия, была найдена, то полученное решение фиксируется, матрица вновь приводится к каноническому виду (упорядочивается), процесс поиска повторяется. На основе изложенного метода одиночных перестановок сформулирован метод мультиперестановок, предполагающий исключение группы разнотипных заданий на столбце-доноре (на одном приборе) и добавление заданий на столбце-клиенте (на другой прибор). Аналогом метода одиночных и мультиперестановок, является метод «Крона», рассмотренный в [24,25]. Способ формирования решений, связанный с исключением заданий из столбца с максимальной длительностью выполнения и включение заданий в столбец с минимальными длительностями выполнения [24,25], является близким к способу формирования мультиперестановок.

Применению метода муравьиной колонии при построении расписаний посвящена работа [26]. Метод муравьиной колонии реализует моделирование нескольких искусственных аналогов муравьев, программно представленных в виде совокупности агентов. Метод формирования

новых решений предполагает, что на каждой итерации исследуются все возможные обмены заданий в текущей последовательности и идентифицируются пара, которая дает наибольшее уменьшение целевой функции. Способы идентификации заданий для реализации обмена могут быть детерминированными либо стохастическими. Полученное локально оптимальное решение фиксируется и итерации продолжаются по аналогии.

Эвристические правила построения расписаний выполнения ЕЗ на приборах КС (в случае $L \geq 3$) рассмотрены в [27]. К правилам относятся: правило выполнения первой кратчайшей операции; правила минимальной и максимальной остаточных трудоемкостей выполнения заданий; правило выравнивания загрузки приборов. Сравнение эффективности применения эвристик при решении указанных задач (количество приборов и заданий, значения параметра t_{li}) с точки зрения значений критерия позволяет выбрать лучшее из рассматриваемых правил.

Проведенный анализ существующих методов построения расписаний выполнения заданий позволил определить их основные типы: аналитические методы определения точных решений задачи (в том числе динамическое программирование), методы сокращенного перебора, приближенные методы решения, эвристические и метаэвристические алгоритмы.

Аналитический метод – метод Джонсона – обеспечивает формирование оптимальных расписаний для ограниченного количества приборов ($L = 2$). Допускается сведение двух приборной задачи без задержек выполнения заданий к задаче коммивояжера с получением точного решения. Задача с количеством приборов $L \geq 2$ является *NP*-трудной и ее точное решение не может быть найдено за ограниченное (полиномиальное) время. Также *NP*-трудными являются двух приборные задачи ($L = 2$), в которых заданы директивные сроки выполнения заданий и определенные виды критериев. Применение метода динамического программирования и метода ветвей и границ ограничено размерностью задачи, так как ее увеличение обуславливает: увеличение числа состояний системы, что затрудняет идентификацию лучших решений при их обходе (в динамическом программировании); увеличение числа ветвлений в дереве решений, что также затрудняет идентификацию лучших решений (в МВГ). Применение МВГ в его модифицированном варианте для решения задач построения расписаний ограничивается упрощающими предпосылками о равных длительностях выполнения заданий на приборах, а также о кратности количества заданий числу приборов.

Использование метаэвристических алгоритмов позволяет получить решения задачи построения расписаний выполнения заданий, однако в силу особенностей алгоритмов возможно попадание в «ловушку» локального экстремума, а также стохастический характер большинства из них не гарантирует получение решений, приближающихся к оптимальным, при различных значениях входных параметров. При этом модификации алгоритмов сложны для реализации и приводят к росту интервала времени, затрачиваемого на построение расписаний.

Сформулированные эвристические правила позволяют получать решения поставленной задачи, однако степень приближения этих решений к оптимальному определена быть не может. При этом в своем большинстве эвристические правила позволяют реализовать распределение заданий по параллельно действующим приборам, а не формировать расписания для КС. Таким образом, задача построения расписаний выполнения заданий в КС в общем виде (при отсутствии каких-либо ограничивающих предпосылок) является *NP*-трудной (при $L \geq 2$). Использование метаэвристических методов не гарантирует получение решений, приближающихся к оптимальному (в силу их стохастического характера).. В силу этого актуальным является совершенствование численных методов построения расписаний выполнения ЕЗ в КС. Цель совершенствования методов построения расписаний выполнения ЕЗ в КС состоит в снятии ограничений: на размерность задачи, на значения параметров, на порядок выполнения заданий на приборах, а также в получении результатов, являющихся лучшими по сравнению с известными метаэвристическими алгоритмами.

1.3. Обоснование актуальности разработки методов математического моделирования влияния возмущающих воздействий и методов построения динамических расписаний выполнения заданий в конвейерных системах

Формирование динамических расписаний является реакцией на возмущающие воздействия, влияющие на ход процесса выполнения ЕЗ на приборах КС, предусмотренный статическим расписанием. Построение динамических расписаний позволяет осуществить адаптацию многостадийных процессов выполнения ЕЗ в КС к возмущающим воздействиям с целью компенсации их влияния. Возмущающими воздействиями являются: 1) поступление в КС заданий в моменты времени $d_i > 0$, их приоритеты равны или превышают приоритеты заданий, для которых сформировано статическое расписание; 2) отказы обрабатывающих приборов КС и их последующее восстановление.

Так как задачи построения статических расписаний многостадийных процессов выполнения заданий в общем виде являются *NP*-трудными, тогда для построения расписаний реализации действий с заданиями на приборах КС используются численные методы оптимизации решений. Построение динамических расписаний предполагает повторную активизацию процедур определения порядков выполнения заданий на приборах КС, реализующих указанные алгоритмы для новых составов множеств заданий и приборов. Поэтому задача построения динамических расписаний многостадийных процессов выполнения заданий в КС является *NP*-трудной, для ее решения требуется привлечение численных методов оптимизации решений.

В настоящее время имеется ряд результатов исследований по построению методов оптимизации динамических расписаний выполнения ЕЗ в параллельных (многостадийных/конвейерных и распределенных) системах. Результаты исследований в этом направлении представлены в работах [29-50]. С точки зрения подходов, реализуемых в этих работах, методы построения динамических расписаний объединены в следующие группы: 1) методы, в которых рассматриваются периодические и апериодические задания (в том числе поступающие в моменты времени $d_i > 0$); 2) методы построения динамических расписаний, использующие метаэвристические алгоритмы (в частности, ГА); 3) методы построения динамических расписаний, использующие эвристические правила; 4) методы построения динамических расписаний, предусматривающие анализ статистических характеристик поступающего потока заданий и определение эвристических правил, которые обеспечивают формирование расписаний с лучшими характеристиками для этих потоков заданий. Анализ методов построения динамических расписаний рассмотрен с точки зрения их объединения в рассмотренные группы.

В работе [29] рассмотрен способ построения расписаний выполнения заданий двух типов: 1) периодических, для которых моменты времени их поступления в систему являются известными заранее, также как и директивные сроки окончания их выполнения; 2) апериодических, для которых моменты времени их поступления в систему не известны, формируются динамически, также как и директивные сроки завершения выполнения, которые становятся известными в моменты времени их поступления. Способ построения расписаний процессов выполнения периодических заданий предполагает реализацию эвристического правила, предусматривающего определение моментов времени начала реализации действий с ними таким образом, чтобы они максимально сдвигались к директивным срокам. В расписаниях, сформированных с использованием этого эвристического правила, в работе приборов формируются простои, которые заполняются выполнением апериодических заданий с учетом их директивных сроков.

Работа [30] посвящена построению расписаний выполнения заданий спутникового мониторинга подстилающей поверхности группой приборов. При построении статического расписания все задания распределяются по параллельно действующим приборам. Построение статического расписания для заданий с $d_i = 0$ реализуется с использованием дискретного программирования с учетом директивных сроков окончания их выполнения. Для построения динамического расписания реализована эвристическая процедура, предполагающая вставку новых поступающих заданий в интервалы времени простоев приборов, полученные в сформированном статическом расписании. То есть определяются интервалы времени простоев приборов и с учетом длительностей выполнения поступивших заданий определяются приборы, в интервалы времени простоев которых может быть назначена реализация действий с ними.

В работах [31,32] решается задача построения расписаний выполнения периодических заданий, которые разделяются на две категории: а) задания, окончание выполнения которых должно жестко соответствовать их директивным срокам; б) задания, окончание выполнения которых может не соответствовать директивным срокам, реализация действий с ними на приборах системы может быть прервана выполнением заданий первого типа (периодические и «мягкие» апериодические задания с жесткими и не жесткими ограничениями). Исследуется применение эвристик: EDL – ранний срок как можно позже, RLP – задания первого типа как можно позже. Выполнение заданий «сдвигается» к их директивным срокам, в результате могут быть образованы простои приборов, которые заполняются заданиями второго типа. Построение расписаний выполнения заданий с жестким и не жесткими ограничениями реализуется таким образом, чтобы уменьшить количество прерываний заданий второго типа.

Таким образом, особенностями задач рассматриваемого типа являются: 1) задание директивных сроков окончания выполнения заданий; 2) построение расписаний (с использованием методов оптимизации или эвристических правил) предусматривает назначение заданий на приборы системы таким образом, что формируются интервалы времени простоев этих приборов; 3) зафиксированные в расписаниях простои приборов «заполняются» выполнением апериодических и поступивших в моменты времени $d_i > 0$ заданий.

Работы [33-38] посвящены применению метаэвристических алгоритмов для построения динамических расписаний. В [33] рассматривается применение ГА для построения динамических расписаний выполнения заданий на одном приборе. Для каждого задания i-го типа заданы директивные сроки окончания выполнения D_i и моменты времени поступления $d_i \geq 0$. Для поступившего задания (в момент $d_i > 0$) определяется множество заданий, которые являются выполненными либо выполняемыми к моменту времени $d_i > 0$, и задания, которые не начинали выполняться к этому моменту времени. Для заданий второго вида и заданий, поступивших в моменты времени $d_i > 0$, формируются расписания выполнения на одном приборе.

В работе [34] рассматривается способ построения расписаний выполнения заданий в мультикластере, предусматривающий первоначальное их распределение между кластерами и последующее распределение их между приборами каждого кластера с использованием ГА. Распределение заданий по кластерам и назначение заданий на устройства в кластерах реализуется с использованием эвристической процедуры с учетом директивных сроков. При построении расписаний выполнения заданий на одном из кластеров используется двумерная схема кодирования в ГА. Рассмотренный в [34] способ построения динамических расписаний предусматривает, что при поступлении в систему новых заданий определяются задания, обработанные к моменту времени $d_i > 0$, и задания, выполнение которых не было начато к моменту

$d_i > 0$. Реализуется повторное распределение заданий по кластерам, их распределение по приборами упорядочивание их выполнения на приборах.

Метод распределения заданий, поступающих в систему для выполнения в различные моменты времени, для которых заданы директивные сроки окончания, по параллельным приборам рассмотрен в работе [35]. Алгоритм построения расписаний реализует распределение заданий по очередям к обрабатывающим приборам, используя для этого ГА, и последующее их упорядочивание в очередях с точки зрения директивных сроков. В результате реализуется совместное использование ГА и эвристических правил упорядочивания, формируемые составы очередей выполнения заданий обеспечивают минимальное количество запаздываний.

Работы [36, 37] являются близкими с работой [35] и предусматривают повторную активизацию процедуры ГА для построения расписания в случае поступления новых заданий в моменты $d_i > 0$. Рассматриваемый в [36, 37] метод предполагает, что в моменты времени $d_i > 0$ реализуется формирование нового состава множества заданий, выполняемых в системе. Из этого множества исключаются задания, выполненные к моменту времени $d_i > 0$, либо выполняемые в этот момент времени, и добавляются задания, поступившие в систему. Динамические свойства расписания обеспечиваются последовательным запуском процедуры построения решений по порядкам прохождения заданиями приборов в системе, оперирующей при каждом запуске с обновленным составом множества заданий.

Использованию других метаэвристических алгоритмов (в частности, метода роя частиц) для построения динамических расписаний посвящена работа [38]. Динамические свойства расписаний обеспечиваются решением последовательности оптимизационных задач при фиксации событий, связанных с поступлением новых заданий.

Работы [39-47] посвящены применению эвристических правил при построении динамических расписаний выполнения заданий. В работе [39] задача построения расписаний решается путем применения эвристического правила, использующего значения функции приоритета. Функция приоритета представляет собой правило определения значений приоритета для рассматриваемых заданий. Эвристическое правило предусматривает выбор следующего выполняемого задания для освободившегося прибора в соответствии со значением приоритета. При построении расписания рассматриваются несколько видов функций приоритета, параметрами которых являются: моменты времени поступления заданий, длительности выполнения заданий, директивные сроки окончания выполнения заданий, относительная значимость заданий. В [39] реализуется применение рассматриваемого подхода для построения расписаний выполнения заданий в одно приборных системах, его использование для решение задач *JobShop* или *FlowShop* в работе не рассматривается. В [40] в качестве приоритета используется функция полез-

ности, значение которой рассчитывается для каждого из заданий, для которых определяется их принадлежность одному из трех классов: активные онлайн (приложение работает и взаимодействует с клиентом), неактивные онлайн (приложение работает, но с пользователем не взаимодействует), оффлайн (приложение запущено, но не функционирует и не взаимодействует с клиентом). Наряду с классом, которому принадлежит рассматриваемое задание, при расчете полезности используются параметры: коэффициент использования процессора и задержка времени планирования. Задания могут динамически переходить из одного класса в другой, что приводит к изменению значений полезности и их приоритетов. В [40] введен способ классификации заданий, способ определения значений функции полезности (приоритетов заданий) и последующего динамического распределения заданий между обрабатывающими приборами. В [41] предложена обобщенная формула, с использованием которой выполняется расчет значений приоритетов заданий, на основе которых реализуется упорядочивание их выполнения на приборах (в том числе для поступивших новых заданий). Рассматриваемый метод реализует эвристический подход к построению расписаний и используется для управления выполнением заданий в одно приборных системах либо системах с параллельно действующими приборами.

В работе [42] рассматривается способ распределения заданий по обрабатывающим приборам при условии представления программы в виде графа управления. Каждой вершиной графа соответствует вес, определяемый на основе длительности выполнения вычислений в процедуре, сопоставленной с этой вершиной. Каждой дуге графа соответствует вес, характеризующий длительность обмена информацией между взаимодействующими процедурами. Использование рассмотренного в [42] подхода для управления динамической нагрузкой связано с введением в граф новых вершин, соответствующих процедурам, назначаемым на приборы. Увеличение количества вершин в графе управления выполнением заданий и усложнение топологии связей между заданиями приводит к затруднениям при формировании расписания.

В работе [43] рассмотрен подход к построению динамических расписаний, предполагающий решение с некоторой периодичностью статических детерминированных задач. Метод динамического построения расписаний основан на периодическом обзоре состояния системы и решении статических задач для имеющихся в текущем состоянии заданий. В этом случае построение динамических расписаний представляет собой последовательность решения статических подзадач, каждая из которых решается в соответствии с информацией о состоянии системы. Описываемый в [43] подход рассматривается применительно к решению задач построения динамических расписаний для двух приборных систем. С целью определения порядка выполнения заданий в КС использованы эвристики «первый пришел – первым обслужен», «кратчайшее общее время обработки в первую очередь», а также правило Джонсона определения порядков выполнения заданий в двух приборных системах.

В [44] рассматривается применение различных эвристических правил для построения динамических расписаний выполнения заданий в одно приборной системе. В основу положена эвристика SPT (Shortless Peer Time): «наикратчайшая длительность обработки – первой». В случае поступления в систему для выполнения новых заданий реализуется определение заданий, выполненных или выполняемых к моменту $d_i > 0$, которые исключаются из планирования. Для остальных заданий реализуется один из следующих подходов: 1) последовательность выполнения заданий в статическом расписании не изменять, определять позиции в последовательности поступивших заданий; 2) формировать порядок выполнения заданий, включая поступившие, в соответствии с эвристикой SPT.

Применение эвристических правил для динамического планирования выполнения запросов в распределенных БД рассмотрено в [45]. В работе рассматриваются наряду с эвристическим правилом «наибольшее время выполнения – в первую очередь» также правила, использующие оценку размера раздела БД, к которому реализуется запрос, а также правила, использующие директивные сроки окончания выполнении запросов.

В [46] при планировании используются знания экспертов (эвристические правила), оформленные в виде дерева решений. Процедура планирования предполагает обход дерева решений, в котором при выборе следующего узла интерпретируются определенные эвристические правила, соответствующие знаниям экспертов. Реализуется следующий порядок действий при принятии решений по расписаниям выполнения заданий: 1) выбор технологического процесса выполнения задания; 2) выбор операций, которые могут реализовать требуемый технологический процесс; 3) выбор ресурсов, которые будут обеспечивать реализацию операций. Динамическое планирование, обеспечивающее построение расписания при учете событий, наступивших в системе, предполагает повторное формирование дерева решений для новых составов множеств заданий и доступных ресурсов, его обход в соответствии с правилами. При большом количестве заданий (сложных технологических процессах), большом количестве ресурсов рассмотренный подход предполагает формирование и обход дерева решений со значительным количеством вершин, что приведет к увеличению времени поиска решений.

Графовая модель процесса выполнения заданий в виде гибридных автоматов положена в основу метода построения динамических расписаний, рассмотренного в работе [47]. Сформированная в [47] модель процесса выполнения заданий предполагает указание значений параметров, определяющих период между поступлениями новых заданий, и длительностей интервалов времени их выполнения на каждом приборе системы в каждом режиме. Граф (гибридный автомат) является моделью системы выполнения заданий (с параллельно функционирующими приборами) и используется при интерпретации расписания реализации действий с ними на приборах. Применение данного способа интерпретации расписаний выполнения заданий и

оценки оптимальности каждого решения возможно при малом количестве приборов, выполняемых заданий, а также незначительном числе режимов функционирования системы.

В работах [48-50] рассматривается подход к исследованию эффективности различных эвристических правил с использованием имитационных моделей функционирования системы с параллельными обрабатывающими приборами при условии задания различных статистических характеристик потока заданий. Распределение заданий по приборам реализуется с использованием эвристических правил. Для анализа целесообразности применения той или иной эвристики при распределении динамически поступающих заданий используется имитационная модель функционирования системы. Каждая из эвристик, в соответствии с которой реализуется распределение по приборам динамически поступающих заданий, характеризуется значением критерия, позволяющего определить эффективность ее использования. В результате статистическим характеристикам потока заданий, формируемым моделью, ставится в соответствие правило планирования, обеспечивающее минимизацию значений введенных критериев.

Таким образом, для моделирования влияния возмущающих воздействий на ход процесса выполнения заданий в одно и много приборных системах используются следующие способы:

– математическая модель, позволяющая определять задания, выполненные и выполняющиеся к моменту поступления новых заданий в систему; однако введенные в этой модели условия позволяют реализовать учет только одного вида возмущающих воздействий – поступление в систему в моменты времени $d_i > 0$ для выполнения новых заданий, приоритеты которых равны приоритетам заданий, выполняющихся в системе;

– модель процесса выполнения заданий в КС в виде графа управления; динамические свойства расписаний учитываются в модели путем введения новых вершин и обхода графа для идентификации порядка выполнения заданий; использование данного подхода ограничено количеством вершин в графе и количеством дуг, определяющих передачу данных;

– модель процесса выполнения заданий в КС в виде гибридного автомата, которая позволяет интерпретировать процесс выполнения заданий, соответствующий сформированному расписанию, и не является способом построения этого расписания; использование данной модели связано с наличием ограничений на количество вершин и связей между ними.

Недостатки существующих методов построения динамических расписаний выполнения заданий определены следующим образом:

– методы построения динамических расписаний ориентированы на решение только одного вида задач, связанных с учетом возмущающих воздействий в виде поступления заданий в моменты времени $d_i > 0$; методы, учитывающие возмущающие воздействия других видов, не разработаны;

– методы построения динамических расписаний ориентированы на решение задач для одно приборных систем или систем с параллельными приборами; методы построения динамических расписаний процесса выполнения заданий в КС не разработаны;

– методы построения динамических расписаний, предполагающие определение порядков выполнения периодических и апериодических заданий, предусматривают указание директивных сроков, что не является приемлемым для рассматриваемых задач;

– методы построения динамических расписаний, использующие ГА, не позволяют получать решения, приближающиеся к оптимальным, для различных значений параметров (в силу стохастического характера ГА и возможности попадания в «ловушку» локального экстремума);

– методы построения динамических расписаний, использующие эвристические правила, обеспечивают получение решений, лучших, чем решения без оптимизации, ноне позволяют реализовать приближение к оптимальным решениям;

– методы построения динамических расписаний, основывающиеся на применении эвристических правил для потока заданий с фиксируемыми статистическими характеристиками, не позволяют формировать лучшие решения для задач в общем виде, у которых характеристики потока заданий не соответствуют полученным при имитационном моделировании.

В силу сказанного использование существующих моделей влияния возмущающих воздействий ограничено размерностью задач, модели не соответствуют рассматриваемой системе, существующие модели рассматривают только один вид возмущающих воздействий – поступление в КС в моменты $d_i > 0$ новых заданий, приоритеты которых равны приоритетам выполняемых заданий. В связи с этим разработка новых методов математического моделирования возмущающих воздействий, влияющих на ход процесса выполнения ЕЗ в КС, является актуальной. Актуальна разработка численных методов построения динамических расписаний реализаций действий с заданиями на приборах КС. Решение этих задач обеспечивает возможность адаптации многостадийных процессов выполнения ЕЗ в КС к возмущающим воздействиям разных видов и снижение влияния этих воздействий на ход процесса. Таким образом, решение научной задачи состоит в разработке новых методов математического моделирования влияния возмущающих воздействий на ход процесса выполнения ЕЗ в КС, предусмотренный статическим расписанием, методов оптимизации статических и динамических расписаний, что обеспечит снятие ограничений на размерность задач, на значения параметров, расширение множества воздействий, с учетом которых оптимизируются порядки действий с ЕЗ в КС.

1.4. Обоснование актуальности разработки методов математического моделирования и методов построения расписаний выполнения пакетов заданий в конвейерных системах

В соответствии с введенными выше обозначениями i соответствует идентификатору типа заданий, выполняемых в КС ($i=\overline{1,n}$), n^i–количеству заданий i-го типа. Выполнение заданий в случае $n^i \geq 2$ ($i=\overline{1,n}$) предполагает формирование из них ПЗ. При выполнении ПЗ в КС предусматривается переналадка приборов с выполнения заданий одного типа на выполнение заданий другого типа. Тогда под ПЗ подразумевается совокупность заданий одного типа, выполняемых без переналадки КС на выполнение заданий другого типа. В случае включения в пакет всех $n^i \geq 2$ заданий i-го типа такой пакет является фиксированным. В результате декомпозиции обобщенной задачи построения расписаний выполнения наборов заданий разных типов в КС определены подзадачи оптимизации составов пакетов и расписаний их выполнения в КС. Решение задачи построения расписаний выполнения ПЗ в КС обеспечивается оптимизацией решений по составам пакетов и оптимизацией расписаний выполнения пакетов.

Развитие современных методов математического моделирования процессов выполнения ПЗ в много приборных обрабатывающих системах и методов построения расписаний процессов выполнения ПЗ представлено в работах [7, 9,51-75]. Математические модели процессов выполнения ПЗ и методы построения расписаний их выполнения, рассмотренные в этих работах, могут быть классифицированы следующим образом:

– математические модели процессов выполнения ПЗ и методы построения расписаний выполнения ПЗ в химической, фармацевтической, нефтяной промышленности, в которых технологические процессы являются непрерывным [9,51-55];

– математические модели процессов выполнения ПЗ и методы построения расписаний выполнения ПЗ, составы которых не оптимизируются и включают все задания, входящие в соответствующие их наборы, поступающие в систему (математические модели и методы построения расписаний выполнения фиксированных ПЗ) [7,56-58];

– математические модели процессов выполнения ПЗ и методы построения расписаний выполнения ПЗ на одном приборе, предполагающие оптимизацию их (ПЗ) составов [59];

– математические модели процессов выполнения ПЗ и методы построения расписаний выполнения ПЗ на параллельных приборах или на одном приборе с параллельно функционирующими устройствами, предполагающие оптимизацию их (ПЗ) составов [60-72];

– математические модели процессов выполнения ПЗ и методы построения расписаний выполнения ПЗ в системах различных типов, включающие оптимизацию их составов [73-75].

В работах [9, 51-55] рассмотрены методы моделирования и построения расписаний процессов выполнения ПЗ в системах *FlowShop* и *JobShop*, реализующих непрерывные технологические процессы получения продуктов производства. Под выполнением ПЗ в этом случае подразумевается обработка в системе партий материалов с целью получения продукции. Потоковая система предполагает наличие различных приборов, для которых должны быть сформированы маршруты движения исходных материалов, определены объемы партий материалов (размеры ПЗ), запускаемых в производство, а также порядок выпуска продукции. Количество продукции разного вида, которое должно быть получено, является заданным (определяется потребностями рынка), в соответствии с технологией производства определяются размеры обрабатываемых партий материалов (составы ПЗ), запускаемых в обработку, и порядок действий с ними на приборах системы. Маршруты движения партий материалов определяются в процессе оптимизации. За счет оптимизации маршрутов реализуется совмещение выпуска продукции различных видов с целью снижения энергетических и временных затрат.

Математические модели процессов обработки партий материалов формируются на основе технологических схем производства продуктов. Модели являются многоиндексными и многопараметрическими, учитывающими размеры и состояние партий материалов, состояние ресурсов, смену состояний материалов и ресурсов в процессе производства, а также характеризующими процессы производства: начало выполнения заданий определенных типов в некоторых временных интервалах, порядок обработки партий материалов, размеры партий материалов, обрабатываемых в системе в течение некоторых временных интервалов и так далее. Для множества допустимых решений вводится система ограничений: 1) распределения; 2) пропускной способности; 3) материального баланса; 4) на остатки ресурсов, которые характеризуют свободные ресурсы в каждый момент времени; 5) на переналадку устройств (наличие интервала времени на очистку). Для решения сформулированной задачи построения расписаний процессов выполнения ПЗ применено смешанное целочисленное программирование. Использование смешанного целочисленного программирования позволяет найти решение задач ограниченной размерности (3-5 продуктов, получаемых с использованием 2-3 приборов). При большей размерности задачи ее решение с использованием указанного подхода становится не возможным [9, 51,52].

Методы решения задачи построения расписаний в непрерывном производстве (обработка партий материалов) также изложены в работах [53, 54]. В рассмотрение вводятся параметры, характеризующие обрабатывающие узлы, задания на обработку партий материалов, а также ограничения на предшествование стадий обработки партий, ограничения на имеющиеся ресурсы, ограничения на потребление материалов, на их баланс и так далее. Решение формируется в

виде бинарных переменных, соответствующих назначению партий материалов на приборы, и целочисленных переменных, соответствующих количеству материалов в партиях.

Анализ рассмотренного подхода к моделированию процессов обработки партий материалов и построению расписаний реализации действий с ними на обрабатывающих приборах показал, что: 1) его применение возможно только для непрерывных технологических процессов; 2) модели являются многоиндексными и многопараметрическими, содержат большое количество ограничений; 3) на получение решений требуются значительные временные затраты; 4) возможно получение решений задач малой размерности.

Развитием [9,51-54] является работа [55], в которой рассматривается метод планирования обработки партий материалов в непрерывном производстве, учитывающий неопределенности во входных данных. Задача переформулируется как детерминированная и для ее решения применена многошаговая адаптивная робастная оптимизация. Задача в рассматриваемой постановке является *NP*-трудной, поэтому реализовано ее упрощение, предполагающее применение к временным переменным задачи аффинных правил, позволяющих интерпретировать их как параметры. Это обеспечивает определение решения задачи за ограниченное время.

Рассмотрению методов построения расписаний выполнения фиксированных ПЗ посвящены работы [7, 56-59]. Для решения задачи построения расписаний выполнения ПЗ на одном приборе в [7] введена формула, определяющая значения приоритета для каждого пакета на основе значений длительностей выполнения заданий и длительностей переналадок приборов, которые используются для упорядочивания фиксированных пакетов. В [7] предложен способ определения составов ПЗ и расписаний их выполнения на параллельно действующих приборах, основывающийся на аппарате динамического программирования (ДП), что ограничивает размерность решаемой задачи. В [56] рассматривается задача построения расписаний процесса выполнения ПЗ на одном обрабатывающем приборе, состоящем из параллельно действующих устройств. Составы ПЗ формируются с точки зрения детерминированного спроса (не оптимизируются и рассматриваются как фиксированные), а выполнение ПЗ на приборе (на параллельно действующих устройствах) упорядочивается в соответствии с убыванием спроса.

Решению задачи определения порядка выполнения фиксированных ПЗ на одном приборе, состоящем из параллельно действующих устройств, посвящены работы [57,58]. В них рассматриваются два альтернативных подхода к построению расписаний выполнения ПЗ: на основе значений приоритета пакетов, на основе построения полного графа выполнения ПЗ (в котором все вершины попарно связаны [76,77]) и определения на нем кратчайших путей между вершинами. В случае реализации первого подхода выполнение ПЗ упорядочивается по не возрастанию значений приоритета. При реализации второго подхода для всех узлов, соответствующих операциям с ПЗ на обрабатывающем приборе, реализуется поиск кратчайших путей на полном

неориентированном графе из дополнительного (*0*-го узла) до каждой его вершины. В соответствии с найденными таким образом путями формируется порядок выполнения ПЗ.

В [59] рассматривается решение задачи оптимизации составов ПЗ, выполняемых на одном приборе, с учетом директивных сроков D_i, вводимых для отдельных *i*-х заданий. Задания *i*-х типов упорядочиваются с точки зрения их директивных сроков, после чего из них формируются пакеты с учетом директивных сроков заданий, входящих в них, и пропускной способности обрабатывающего прибора. Задания, запаздывающие с выполнением, включаются в последний пакет. Таким образом, рассмотренный метод позволяет формировать составы ПЗ, обрабатываемые на одном приборе, с учетом заданных для них директивных сроков.

Определение составов ПЗ с учетом директивных сроков рассматривается в работе [60]. Построение расписаний реализуется с использованием эвристического правила, предполагающего, что в пакеты объединяются изделия, у которых директивные сроки окончания их выпуска не превышают момент времени окончания выполнения соответствующего пакета. При построении расписаний используется метод вставки, предполагающий выбор какого-либо из пакетов и размещение его в последовательности выполнения на одном из приборов.

Работа [61] посвящена решению задач построения расписаний процессов выполнения ПЗ на параллельно действующих приборах. Особенностью задачи является задание директивных сроков D_i для *i*-х выполняемых заданий ($i = \overline{1,n}$). Все задания с точки зрения длительностей выполнения являются разнотипными, поэтому объединение их в пакеты реализуются с точки зрения директивных сроков. Условие перераспределения заданий по пакетам предполагает, что в решениях *S* и *S'* может быть выделен некоторый ПЗ с индексом *i*. Задания по отношению к *i*-му пакету перераспределяются из пакетов, ему предшествующих, в пакеты, следующие за ним. В результате задания из некоторого ПЗ могут быть распределены по другим пакетам, а количество ПЗ будет уменьшено. Упорядочивание ПЗ на параллельно действующих приборах осуществляется в соответствии с директивными сроками окончания их выполнения.

В работе [62] рассматривается решение задачи распределения заданий по пакетам и назначения сформированных ПЗ на параллельно действующие приборы с определением очередности их выполнения. Определение составов ПЗ реализуется с использованием эвристического подхода, названного "Apparent tardiness cost" («Издержка видимой задержки» (ИВЗ)). Этот подход предусматривает вычисление для задания значения ИВЗ, учитывающего вес задания, длительность выполнения, среднюю длительность выполнения заданий, не распределенных по приборам, момент времени поступления. Задания сортируются по не убыванию значения ИВЗ, после чего количество заданий, соответствующее размеру пакета, закрепляется за незанятым прибором. Сформированные ПЗ, назначенные для выполнения на приборы, упорядо-

чиваются в очередях обработки с использованием ГА. Метод, предложенный в [62], реализует распределение заданий по пакетам на основе параметра ИВЗ и не оптимизирует их состав.

В работе [63] также рассматривается применение эвристического подхода при определении составов ПЗ, обрабатываемых на одном устройстве с параллельно действующими приборами. Эвристическое правило формирования ПЗ предполагает, что в пакет включаются задания с близкими значениями длительностей их выполнения. Задания предварительно сортируются по времени выполнения, а затем распределяются по пакетам с учетом ограничений на вес и размер. В работе [64] также развивается эвристический подход, однако эвристические правила используются для формирования новых решений по составам ПЗ и расписаниям их выполнения в чередующихся окрестностях локально оптимального решения. Каждое эвристическое правило позволяет формировать одну из чередующихся окрестностей с определенной метрикой. Поиск лучшего решения в окрестностях позволяет выполнить приближение к оптимальному решению по составам ПЗ и расписаниям их выполнения. Рассмотренный способ реализует стохастический поиск локально оптимальных решений, что не гарантирует получения лучшего результата.

Эвристическое правило определения составов ПЗ, выполняемых на параллельных приборах, используется в методе, рассмотренном в [65]. Для рассматриваемой модели выполнения ПЗ определено отношения предшествования между заданиями, поступающими в систему, характеризующее порядок их активизации. Формирование ПЗ предполагает реализацию правила: для каждого момента времени планирования в новый формируемый пакет включаются доступные не пакетированные задания, которые не связаны отношением предшествования с не пакетированными заданиями. Сформированные ПЗ упорядочиваются в очереди на выполнение на параллельных машинах.

Рассмотрению способа формирования ПЗ с использованием функции стоимости, характеризующей эффективность применения прибора, состоящего из параллельных обрабатывающих устройств, посвящена работа [66]. Размеры ПЗ ограничены, в пакетах размещаются разнотипные задания, близкие с точки зрения длительности выполнения. Для каждого момента времени t определяется состав ПЗ, обозначенного как B_t, который характеризуется значением стоимости использования системы $CF(B_t)$. Пакет B_t с максимальным значением $CF(B_t)$ передается для выполнения на прибор. Данный способ формирования ПЗ может быть применен только при незначительном количестве заданий в очереди на выполнение, иначе длительность формирования оптимальных составов ПЗ (с учетом критерия $CF(B_t)$) будет значительной.

Работы [67,68] также посвящены рассмотрению эвристических правил формирования ПЗ, выполняемых на параллельных приборах. В [67] рассматривается правило пакетной совместимости (BCLPT), которое предполагает: 1) сортировку заданий по не возрастанию длительно-

стей; 2) в последовательности определяются задания i_1 и i_1+1, длительности выполнения которых связаны введенным условием с длительностью выполнения первого задания; если условие выполняется, то все задания из последовательности до (i_1+1)-го включаются в пакет; 3) для оставшихся в последовательности заданий, начиная от (i_1+1)-го, вновь проверяются введенные условия и формируется новый пакет; 4) если условия не выполняются, то все рассматриваемые задания включаются в один пакет. Последовательность выполнения ПЗ определяется либо с использованием динамического программирования, либо с использованием предложенного в [67] алгоритма.

В работе [68] в качестве критерия оптимальности решений используется сумма момента времени окончания выполнения всех ПЗ и штрафа за отказ в обслуживании заданий. Отказ в выполнении задания связан с ограничениями мощности параллельных приборов и срока выполнения заданий. Эвристические правила, рассмотренные в [68], предусматривают формирование различных множеств отклоняемых заданий и для каждого множества не отклоненных заданий формирование пакетов с использованием соответствующих условий.

Использованию метаэвристических алгоритмов при формировании решений по составам ПЗ, выполняемых на параллельных машинах, посвящены работы [69,70]. В [69] рассматривается задача построения расписания выполнения ПЗ на одном обрабатывающем приборе, состоящем из параллельно действующих устройств. Для определения составов ПЗ используются генетические алгоритмы. Выбор наилучшего решения осуществляется с учетом требования минимизации простоев устройств прибора при выполнении заданий в пакетах. При распределении заданий по пакетам в [70] используется алгоритм муравьиной колонии (МК), позволяющий группировать задания, имеющие приближенно одинаковую длительность выполнения. Реализация алгоритма МК позволяет на основе текущего локально оптимального решения осуществить обмен заданиями между пакетами с целью уменьшения простоев приборов при выполнении заданий каждого пакета. В силу стохастического характера ГА и метода МК они не могут гарантировать получение решений, приближающихся к оптимальным, при различных значениях входных параметров.

В отличие от работ, рассмотренных выше, в [71] решается задача построения расписаний выполнения заданий на параллельных машинах с использованием частично целочисленного линейного программирования (ЧЦЛП). В результате определяются значения бинарных переменных, характеризующих местоположение ПЗ в последовательности их выполнения на обрабатывающих приборах, и значения целочисленных переменных, соответствующие составам ПЗ. В [71] отмечается, что решение задачи построения расписаний с использованием приведенных модели и метода возможно только в случае ее малых масштабов (ограниченные количества за-

даний и приборов). Аналогичный метод, использующий ЧЦЛП, рассмотрен в [72]. Решение задачи построения расписаний предполагает определение значений целочисленных и бинарных переменных, соответствующих составам ПЗ и моментам времени начала их выполнения в системе. В силу того, что для решения задачи используется аппарат ЧЦЛП, размерность задачи является ограниченной (2-3 заказа, 2-3 задания в заказе, 2-3 устройства).

В [73] рассматривается модель формирования составов ПЗ с точки зрения экономических показателей при учете спроса на продукцию, но без учета технологических параметров процесса выполнения заданий. Размер ПЗ определяется с точки зрения стоимости производства. Распределение по оборудованию на предприятиях при формировании ПЗ не учитывается. Комплексное планирование предполагает формирование решений двух подзадач: среднесрочного планирования (распределение выполнения заданий (ПЗ) по обрабатывающим приборам (предприятиям, выпускающим продукцию)) и составление расписаний выполнения заданий на технологическом оборудовании предприятий. Распределение заданий по пакетам реализуется отдельно (при среднесрочном планировании) от распределения выполнения ПЗ на обрабатывающие приборы (не учитываются параметры технологического процесса выполнения заданий). Формирование расписаний выполнения ПЗ реализуется с использованием эвристических правил. Для решения задачи среднесрочного планирования используется аппарат ЧЦЛП, что ограничивает ее размерность. В тоже время при среднесрочном планировании не учитываются технологические особенности процесса выполнения заданий.

Работа [74] рассматривает вопросы построения расписаний процессов выполнения заданий в составе пакетов в системе *JobShop*. С использованием эвристических правил реализуется изменение составов ПЗ. При реализации рассмотренных эвристических правил случайным образом формируются новые ПЗ, в которые включаются случайным образом выбранные задания из других пакетов (перераспределение заданий между пакетами). Также случайным образом реализуется перераспределение ПЗ между приборами и определение новых позиций пакетов в последовательностях их выполнения на этих приборах. Сформированное решение по составам ПЗ, их распределению по обрабатывающим приборам, по порядкам реализации действий с ними на приборах интерпретируется с использованием дизъюнктивного графа, являющегося моделью процесса выполнения ПЗ. Граф использован только для интерпретации расписания, которое модифицируется в соответствии с эвристическими правилами.

В [75] развивается подход к планированию выполнения ПЗ на основе имитационного моделирования. Рассматривается имитационная модель технологического процесса, в которой учтены его особенности. Размеры партий материалов являются задаваемыми в качестве входных параметров модели. Определение маршрутов движения партий материалов и расписаний обработки реализуется с использованием правил. Каждый вариант решения (размеры партий,

маршруты их движения, расписание обработки) характеризуется своим значением критерия. Использование имитационной модели позволяет реализовать выбор составов партий и эвристических правил, обеспечивающих эффективные маршруты и расписания их выполнения.

В итоге для многостадийных процессов выполнения ПЗ в рассмотренных работах реализуется формирование их моделей следующих видов:

– многопараметрических и многоиндексных моделей непрерывного производства с большим количеством ограничений, которые позволяют распределять партии материалов, сформированные с учетом спроса на продукцию, по обрабатывающим приборам (модель 1);

– математических моделей выполнения фиксированных ПЗ на одном или параллельно действующих приборах, которые позволяют определять моменты времени окончания реализации действий с ними, соответствующие расписаниям (модель 2);

– графовых моделей, каждой вершине в которых соответствует реализация действий на приборе; обход графа с определением минимального пути между вершинами позволяет идентифицировать расписание выполнения ПЗ минимальной длительности (модель 3);

– математических моделей выполнения заданий на единственном обрабатывающем приборе и на параллельных приборах с учетом директивных сроков завершения выполнения действий с ними (модель 4);

– математических моделей выполнения ПЗ разных составов на параллельных приборах, которые позволяют определять моменты времени окончания действий с ними (модель 5);

– многопараметрических многоиндексных моделей процесса выполнения ПЗ, на основе которых оптимизируются их составы с использованием ЧЦЛП, что обуславливает наличие ограничений на размерность задачи (модель 6);

− графовых моделей, в которых вершинам сопоставлены операции с заданиями на приборах, а разные типы дуг (дизъюнктивные и конъюнктивные) позволяют определять порядок реализации действий с разными ПЗ на каждом из приборов (дизъюнктивные дуги), либо порядок реализации действий с каждым из ПЗ на разных приборах (конъюнктивные дуги); обход графа позволяет идентифицировать эффективность реализации сформированного предварительно расписания выполнения ПЗ (модель 7).

Таким образом, разработанные математические модели процесса выполнения ПЗ на приборах в обрабатывающих системах предполагают рассмотрение непрерывного процесса производства (что не соответствует рассматриваемой задаче), процесса выполнения фиксированных ПЗ (составы которых не оптимизируются), процесса выполнения ПЗ при условии указания для заданий директивных сроков завершения (не соответствует рассматриваемой задаче), процесса выполнения заданий разных составов на одном или параллельно действующих приборах (не соответствует типу рассматриваемой системы), процесса выполнения ПЗ, состоящих из от-

дельных заданий, составы которых оптимизируются с использованием ЧЦЛП (ограничивает размерность задачи оптимизации), использование графовых моделей, что также приводит к значительному интервалу времени поиска решения. В итоге математические модели процесса выполнения ПЗ в КС к настоящему времени являются не разработанными. Также отсутствуют модели процессов выполнения ПЗ с учетом формирования комплектов результатов и при ограничении на длительности интервалов времени функционирования КС. По этим причинам разработка методов математического моделирования многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС является актуальной.

Построение расписаний многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС, предусматривающее определение решений по составам пакетов и порядкам их выполнения на приборах, осуществляется на основе рассмотренных моделей с использованием следующих методов:

– ЧЦЛП на основе модели 1 для распределения ПЗ, сформированных в соответствии со спросом на продукцию определенных видов, по ресурсам обрабатывающей КС; ЧЦЛП для оптимизации составов ПЗ из единичных заданий и расписаний их выполнения на параллельно действующих приборах (модель 6); в силу значительных вычислительных затрат использование ЧЦЛП возможно при малой размерности решаемой задачи;

– методов формирования составов ПЗ на основе значений функций приоритета и эвристических правил, задаваемых различным образом (модели 2 и 5);

– методов определения составов ПЗ на основе значений директивных сроков окончания выполнения заданий (модель 4);

– методов стохастического определения решений по составам ПЗ и расписаниям их выполнения на основе эвристических правил, реализующих подход с формированием чередующихся окрестностей (модель 5), а также реализующих интерпретацию процесса выполнения ПЗ на основе дизъюнктивного графа (модель 7);

– методов определения составов ПЗ и расписаний их выполнения на основе эвристических правил с учетом отношения предшествования (модель 5);

– методов обхода полного графа, предусматривающих определение порядка выполнения фиксированных ПЗ (модель 2).

В силу сказанного использование ЧЦЛП для оптимизации составов ПЗ и расписаний их выполнения при отсутствии ограничений на количество заданий и количество обрабатывающих приборов не позволяет получить решение за ограниченное время. Использование функций приоритетов, различных эвристических правил, методов стохастической оптимизации не гарантирует получение оптимальных решений при различных значениях входных параметров. Использование метода оптимизации составов ПЗ на основе директивных сроков позволяет получить решения, соответствующие узкой постановке задачи. Использование методов опреде-

ления расписаний для фиксированных ПЗ, основывающихся на поиске путей на графах, приводит к значительным временным затратам при большом количестве заданий и приборов в КС.

В силу сказанного разработка новых методов построения расписаний многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС, включающих методы определения составов пакетов и расписаний реализации действий с ними на обрабатывающих приборах, является актуальной. В тоже время является актуальной разработка методов оптимизации расписаний процессов выполнения ПЗ в КС при требовании формирования комплектов результатов и ограничении на длительности интервалов времени функционирования КС.

Таким образом, решение научной задачи, состоящей в разработке новых методов математического моделирования процессов выполнения ПЗ в КС и методов построения расписаний многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС, призвано исключить ограничения на размерность, обеспечить получение решений, соответствующих типу рассматриваемой системы (КС), исключить введение специальных параметров (директивных сроков) на основе которых строятся решения, обеспечить получение результатов, являющихся лучшими, чем результаты известных метаэвристических алгоритмов, обеспечить получение решений при введении дополнительных особенностей процессов (при ограничении на ресурсы и условии формирования комплектов).

Выводы по главе 1

По материалам главы 1 сформулированы следующие выводы:

– эффективная реализация многостадийных процессов выполнение заданий в КС обеспечивается построением расписаний осуществления действий с ними на приборах этих систем;

– существующие методы построения точных решений по статическим расписаниям выполнения единичных заданий в КС имеют ограничения, связанные с размерностью задачи, ограничения на значения длительностей выполнения заданий, ограничения на порядки выполнения заданий на приборах; так как задача построения статических расписаний является *NP*-трудной, существующие методы обладают указанными недостатками, то совершенствование методов построения статических расписаний выполнения ЕЗ в КС является актуальным;

– существующие математические модели влияния возмущающих воздействий на ход процесса выполнения единичных заданий позволяют рассматривать поступление в систему для выполнения заданий в моменты времени $d_i > 0$, приоритеты которых равны приоритетам выполняемых заданий; влияние на ход процесса выполнения заданий других видов возмущающих воздействий в существующих моделях данного вида не учитывается; существующие модели не соответствуют типу рассматриваемой системы; в связи с этим разработка нового метода мате-

матического моделирования влияния возмущающих воздействий на ход процесса выполнения единичных заданий в КС является актуальной;

– для построения динамических расписаний процессов выполнения заданий с учетом поступления новых заданий в моменты времени $d_i > 0$ используются метаэвристические алгоритмы, эвристические правила, использующие при формировании решений директивные сроки окончания выполнения заданий; данные методы не гарантируют получение решений, приближающихся к оптимальным; поэтому разработка методов построения динамических расписаний выполнения заданий при учете возмущающих воздействий является актуальной;

– математические модели процессов выполнения ПЗ, обеспечивающие оптимизацию решений по составам ПЗ и расписаниям реализации действий с ними на приборах КС, являются многопараметрическими с большим количеством ограничений, поиск решений с их использованием осуществляется с привлечением ЧЦЛП, поэтому оптимизация расписаний многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС за ограниченное время не возможна; применение моделей процесса выполнения ПЗ в виде графов также затруднено в силу ограничений на количество вершин графа и дуг, их соединяющих; модели процесса выполнения ПЗ учитывающие директивные сроки окончания выполнения заданий обеспечивают получение решений только одного класса задач; в силу сказанного разработка нового метода математического моделирования процессов выполнения ПЗ в КС является актуальной;

– использование ЧЦЛП для получения решений по составам ПЗ ограничено размерностью задачи; метод построения расписаний с использованием графов также обладает ограничениями на размерность задачи; методы построения расписаний процессов выполнения ПЗ на одном или параллельно действующих приборах с использованием директивных сроков окончания выполнения заданий обеспечивают получение решений задач только двух этих типов;

– в силу того, что задача построения расписаний процессов выполнения ПЗ в КС является *NP*-трудной, существующие методы обладают недостатками, не позволяющими получить решение за ограниченной время или не позволяющими получить решения, приближающиеся к оптимальному, тогда разработка методов оптимизации расписаний многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС является актуальной и призвана исключить ограничения на размерность задач, обеспечить получение решений, соответствующих типу рассматриваемой системы, исключить введение специальных параметров на основе которых строятся решения, обеспечить получение результатов, являющихся лучшими, чем известные метаэвристические алгоритмы, обеспечить получение решений при ограничениях на ресурсы и условии формирования комплектов результатов.

ГЛАВА 2. ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ РАСПИСАНИЙ МНОГОСТАДИЙНЫХ ПРОЦЕССОВ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЙ В КОНВЕЙЕРНЫХ СИСТЕМАХ И КЛАССИФИКАЦИЯ ЗАДАЧ ПОСТРОЕНИЯ РАСПИСАНИЙ

2.1. Информационная модель системы построения расписаний многостадийных процессов выполнения заданий в конвейерных системах

Снижение времени получения результатов выполнения заданий связано с параллельной реализацией действий с ними на обрабатывающих приборах, функционирующих совместно, то есть с параллельным выполнением заданий. Выполнение заданий в многостадийных системах может быть организовано в соответствии с классификацией систем, рассмотренной в [6-8]:

1) системы *FlowShop* предполагают организацию выполнения потока заданий на приборах, образующих определенную строго заданную их последовательность, на каждом приборе в такой системе реализуется определенный этап выполнения заданий; выполнение заданий предполагает прохождение ими всех приборов в установленном порядке; так как способ выполнения заданий предусматривает осуществление на каждом приборе из последовательности определенной стадии реализации действий с ними, поэтому такие системы относятся к конвейерным(принципы конвейеризации рассмотрены в [3-5]);

2) система *OpenShop* предполагает выполнение заданий на каждом приборе из их множества, при этом порядок выполнения операций приборами является произвольным (то есть за каждым из приборов закреплена определенная операция, которая должна быть реализована с заданиями при их выполнении, при этом отношение предшествования между операциями не задано (порядок выполнения операции является произвольным и должен быть определен));

3) система *JobShop* предполагает, что последовательности операций, которые должны быть реализованы с заданиями, являются заданными, однако выполнение операций из этой последовательности не является строго закрепленным за обрабатывающими приборами (различные операций могут быть реализованы на одном приборе); в этом случае задача состоит в закреплении выполнения операций (из их последовательности) за каждым из приборов.

В соответствии с принципами организации КС, рассмотренными в [1-5], выполнение заданий в этих системах предполагает определение стадий реализации действий с ними и закрепление стадий за обрабатывающими приборами. Через *i* обозначен тип заданий ($i = \overline{1,n}$), через n^i – количество заданий *i*-го типа, через *l*обозначен номер прибора, входящего в состав КС ($l = \overline{1,L}$). Тогда индекс *i* соответствует определенному способу (технологии, алгоритму) выполнения заданий в составе КС. Таким образом, задается строгое соответствие между типом

задания и способом (технологией, алгоритмом) его выполнения в КС. Однократная реализация указанного способа обеспечивает выполнение одного задания *i*-го типа. В случае, если в состав КС входит *L* приборов, то способ (технология, алгоритм) выполнения заданий должен быть разделен на *L* стадий, каждая из которых реализуется на назначенном ей приборе.

Совершенствование методов построения расписаний выполнения заданий предваряется синтезом информационной модели соответствующей системы, на основе которой могут быть получены новые виды решаемых задач. Решение новых видов задач построения расписаний многостадийных процессов выполнения заданий в КС является развитием теории расписаний и ее методов.

Для синтеза информационной модели системы построения расписаний процессов выполнения заданий использованы методы теории систем и системного анализа [78-81], предполагающие теоретико-множественное описание систем. Теоретико-множественное описание систем [78-81], реализуемое в информационной модели, предполагает задание вида входных данных, вида решений, а также вида критериев оптимизации решений и вида ограничений.

Для решения задачи построения расписаний многостадийных процессов выполнения заданий должно быть сформировано множество расписаний, среди которых осуществляется выбор лучшего решения. Обозначим множество возможных расписаний выполнения заданий в КС, формируемых системой, через $Sh_в$.

Выполнение заданий в КС осуществляется с использованием их ресурсов. В частности, основными ресурсами вычислительных систем, выделяемыми выполняемым программам, обрабатывающим данные, являются процессорное время и объем оперативной памяти (ОП) каждого прибора КС, соответствующий адресному пространству процессов [82, 83]. Так как для выполнения поступающих на вход системы заданий могут быть выделены не все имеющиеся в ее распоряжении ресурсы, а некоторый их объем, тогда в рассмотрение вводятся ограничения на используемые ресурсы, позволяющие идентифицировать на основе множества возможных расписаний $Sh_в$ множество допустимых расписаний, обозначенное как $Sh_д$. Выбор расписаний в множестве $Sh_д$ реализуется с использованием различных критериев.

Для систем выполнения заданий различают внешние и внутренние цели их функционирования. В рассмотрение введено множество всех возможных критериев, обозначенное как *Kr*, с использованием которых реализуется выбор лучших расписаний в множестве $Sh_д$. В соответствии с понятиями внутренней и внешней целей функционирования системы множество *Kr*представлено в виде: $Kr = Kr_1 \cup Kr_2$, где Kr_1– подмножество критериев, соответствующих внешним целям функционирования системы, Kr_2 – подмножество критериев, соответствующих внутренним целям. Для рассматриваемой системы внешние цели функционирования связаны с выполнением заданий, внутренние цели связаны с эффективным использованием имеющихся

ресурсов КС. Таким образом, в множестве Sh_∂ допустимых расписаний реализации действий с заданиями на приборах КС выбираются лучшие решения с точки зрения критериев, входящих в множество $Kr = Kr_1 \cup Kr_2$. Тогда система построения расписаний многостадийных процессов выполнения заданий в КС может быть представлена в виде кортежа:

$$Sys = \langle Sh_\partial, Kr \rangle. \tag{2.1}$$

Обозначим тип задачи построения расписаний через z_h, а множество задач, решаемых в системе через Zd ($z_h \in Zd$, $h = \overline{1,Kz}$). Понятие информационной модели системы, введенное в [78-81], предполагает теоретико-множественное описание системы, основывающееся на анализе входов и выходов, способов преобразования ее входных данных в результаты (при этом должны быть учтены особенности этого преобразования). Тип задачи $z_h \in Zd$, решаемой при построении расписаний, определяется видом поступающих на вход КС заданий. В тоже время тип задачи построения расписаний выполнения заданий определяется видом критерия, используемого при выборе лучшего решения. Таким образом, задача построения расписаний является способом преобразования входных данных в соответствующие результаты с учетом критерия оптимизации решений (в описание задачи z_h входит указание вида критерия, используемого при определении лучшего решения). Тогда при описании системы построения расписаний набор вида $\langle Sh_\partial, Kr \rangle$ может быть заменен на множество Zd задач z_h.

Решение задачи построения расписаний процессов выполнения заданий в КС предполагает, что в множестве задач Zd выделяется задача $z_h \in Zd$, решение которой определяется с учетом имеющихся ресурсов КС. В этом случае для построения информационной модели необходимо выполнить переход от описания системы в виде (2.1) к описанию системы моделью вида:

$$Sys =< Nres, Zd >, \tag{2.2}$$

где *Nres*– множество наборов параметров, характеризующих ресурсы, используемые системой при выполнении заданий, Zd – множество задач, решаемых системой.

Обозначим через e индекс ресурса системы, используемого ею при выполнении заданий ($e = \overline{1,E}$). Основными ресурсами являются: время функционирования приборов КС – время, в течение которого система реализует выполнение поступающих на ее вход заданий ($e = 1$), объем буфера, выделяемого для хранения результатов выполнения заданий перед началом реализации действий с ними на каждом приборе КС ($e = 2$). Количество ресурсов системы, используемых ею при выполнении заданий, является ограниченным. Ресурс $e = 1$ обладает свойством

непрерывности, ресурс $e = 2$ – свойством дискретности. Ресурс $e = 1$ выделяется на каждом из приборов одному выполняемому заданию, ресурс $e = 2$ разделяется на каждом приборе между несколькими заданиями (ПЗ)[8], находящимися в очереди на выполнение.

Внутренней целью функционирования КС при выполнении заданий является эффективное использование ее ресурсов. Тогда для оценки оптимальности формируемых решений в рассмотрение должны быть введены критерии, соответствующие имеющимся в системе ресурсам. Ограничения, определяющие объем ресурсов, используемых системой при выполнении заданий, связаны с указанием: 1) интервалов времени функционирования приборов КС, в течение которых реализуются действия с заданиями, и количества этих интервалов; 2) объемов буферов на приборах, выделяемые для хранения результатов выполнения заданий.

Для ресурса *e*-го вида ($e = \overline{1,2}$) в рассмотрение введен следующий набор параметров:

$$Res_e = < Nr_e, L, \{ Vr_l^e \mid l = \overline{1,L} \} >, \tag{2.3}$$

где Nr_e – идентификатор ресурса системы (номер ресурса системы), L – количество приборов КС, ресурсы которых формируют общие ресурсы системы; Vr_l^e – количество *e*-го ресурса, имеющегося на каждом *l*-м приборе КС. Описание ресурсов предполагает задание множества наборов параметров вида (2.3), обозначенное через *Nres*, которое представлено в форме:

$$Nres = \{ Res_e \mid e = \overline{1,E} \}. \tag{2.4}$$

Производительности приборов (параметр Vr_l^1) и объемы действий, выполняемых на каждом *l*-м приборе с заданиями *i*-го типа, позволяют идентифицировать трудоемкости выполнения заданий, характеризуемые параметром длительности, обозначенным как t_{li} .

Обозначим множество ограничений, используемых в задаче z_h для идентификации множества допустимых решений Sh_∂, через Q_h . Через Q_h^e обозначим множество ограничений, связанных с использованием *e*-го ресурса ($e = \overline{1,E}$) в задаче z_h . В этом случае $Q_h^e \subseteq Q_h$. Так как основными ресурсами в рассматриваемых системах являются время, в течение которого система реализует выполнение поступающих на ее вход заданий ($e = 1$), и объем буфера, выделяемого для хранения результатов выполнения заданий перед началом реализации действий с ними на каждом приборе системы ($e = 2$), тогда классификация решаемых в системе задач, связанных с выполнением заданий, осуществляется с учетом множеств ограничений Q_h^e .

Для описания заданий, выполняемых в КС, в рассмотрение введены обозначения: v_{li} – трудоемкость выполнения задания i-го типа на l-м приборе КС (количество реализуемых действий с заданием i-го типа на l-м приборе), d_i – время поступления задания i-го типа в систему для выполнения, D_i – директивный срок окончания выполнения заданияi-го типа; tm_i – технологический маршрут выполнения заданий i-го типа ($tm_i \in TM$), ds_i – дисциплина выполнения заданий i-го типа ($ds_i \in Ds$), pr_i – правила выполнения заданий i-го типа ($pr_i \in Pr$), prt_i – приоритет выполнения заданий i-го типа в системе ($prt_i \in Prt$), $t_i^{lн}$ – интервал времени первоначальной наладки l-го прибора на выполнение задания i-го типа, t_{ik}^{l} – интервал времени переналадки l-го прибора с выполнения задания i-го типа на выполнения задания k-го типа. Тогда задание i-го типа характеризуется набором параметров вида:

$$x_i = < i, V_i, tm_i, ds_i, pr_i, T_i^{н}, \{ T^l \mid l = \overline{1,L} \} >, \qquad (2.5)$$

где V_i – вектор трудоемкостей выполнения заданий i-го типа на l-х приборах КС; $T_i^{н}$ – вектор значений интервалов времени наладки l-х приборов ($l = \overline{1,L}$) на выполнение заданий i-го типа; T^l – матрицы интервалов времени переналадки l-х приборов ($l = \overline{1,L}$) с выполнения заданий i-го типа на выполнение заданий k-го типа ($t_{ik}^{l} > 0$ при $i \neq k$, $t_{ik}^{l} = 0$ при $i = k$).

Если в качестве входных параметров для системы построения расписаний указаны значения $n^i \geq 2$, то определение решения предполагает оптимизацию составов ПЗ и порядка реализации действий с ними на приборах КС. Дополнительным условием при построении расписаний процессов выполнения заданий в КС является требование формирования комплектов из результатов. Для задач построения расписаний, особенностью которых является необходимость формирования комплектов из результатов выполнения заданий, требуется определение в качестве входных данных составов комплектов различных типов. Типу комплекта соответствует его состав по количеству результатов выполнения заданий различных (i-х) типов ($i = \overline{1,n}$), входящих в этот комплект. В общем случае предполагается, что в комплект одного типа входят результаты выполнения заданий всех n типов. Для формализации способа задания составов комплектов в рассмотрение введены обозначения: $g^{ком}$ – количество типов комплектов, которые формируются из результатов выполнения заданий; матрица W, значения элементов w_{ig} которой равны количеству результатов выполнения заданий i-го типа, которые должны вхо-

дить в один комплект g-го типа ($(n \times g^{ком})$– размер матрицы W). Параметры $g^{ком}$ и W образуют кортеж $W_h^{ком} =< g^{ком}, W >$ (соответствует задаче z_h).

Если определены наборы вида (2.5), то входными данными, на основе которых выполняется решение задачи z_h, является множество наборов вида $< x_i, n^i, d_i, D_i, prt_i >$. Обозначим множество входных данных, используемых в задаче $z_h \in Zd$, через X_h. Вид множества X_h следующий:

$$X_h = [\{ < x_i, n^i, d_i, D_i, prt_i > | \, i = \overline{1, n_h} \}, W_h^{ком}] , \qquad (2.6)$$

где n_h – количество типов заданий, для которых реализуется построение расписаний в соответствии с X_h в задаче $z_h \in Zd$. Обозначим через Y_h множество результатов, формируемых системой построение расписаний выполнения заданий при решении задачи z_h. Тип задачи $z_h \in Zd$, решение которой должно быть выполнено в системе, определяется видом входной информации, поступающей в систему – множеством X_h, видом ограничений на множество решений задачи (множеством Q_h), видом критерия Kr_h, используемым при выборе лучшего расписания из множества допустимых в задаче $z_h \in Zd$. Типу решаемой в системе задачи $z_h \in Zd$ соответствует кортеж параметров вида:

$$z_h =< X_h, Y_h, Q_h, Kr_h > . \qquad (2.7)$$

Выражения (2.2)-(2.7) представляют собой информационную модель системы построения расписаний процессов выполнения заданий разных типов в КС, поступающих на вход системы, при различном количестве заданий и виде критериев, наличии ограничений на используемые системой ресурсы. Синтез информационной модели системы построение расписаний процессов выполнения заданий в КС представлен в работе [84].

2.2.Классификация задач построения расписаний многостадийных процессов выполнения заданий в конвейерных системах

Для решения задач построения расписаний многостадийных процессов выполнения заданий в КС (без ограничений на количество приборов, на количество типов заданий, при наличии ограничений на используемые при выполнении заданий ресурсы системы, при условии формирования ПЗ и комплектов из результатов выполнения) применена декомпозиция обобщенной

цели (функции) системы на совокупность иерархически упорядоченных подцелей (подфункций), каждая из которых реализуется на соответствующем уровне иерархии рассматриваемой системы [78, 85-88]. Результаты декомпозиции предполагают, что обобщенная функция системы построения расписаний процессов выполнения заданий реализуется совокупностью отдельных подсистем, каждая из которых выполняет решение своей задачи оптимизации решений, и сформированные подфункции являются иерархически упорядоченными, что предполагает наличие определенного порядка формирования решений [78, 85-88]. С целью определения новых задач теории расписаний для процессов выполнения заданий в КС, решение которых возможно с использованием иерархического подхода, сформирована их классификация. Эта классификация является развитием известной классификации задач теории расписаний [7, 8, 28]. Рассмотренная информационная модель системы построения расписаний является основой для формирования с использованием иерархического подхода [78, 85-88] классификации задач построения расписаний выполнения заданий в КС.

В соответствии с [7, 8, 28] типы задач построения расписаний могут быть представлены в виде: $\alpha|\beta|\gamma$, где параметр α соответствует типу обрабатывающей системы (*Open-Shop, Flow-Shop, Job-Shop* и т.д.), β соответствует типу решаемой задачи и характеризует ее особенности (одинаковые или разные длительности выполнения, различные времена поступления заданий в систему, задание директивных сроков и т.д.); $\gamma-$ вид критерия оптимизации для определения лучшего решения. Рассмотренная классификация развивается в [7] с учетом формирования ПЗ и расписаний. Указание необходимости формирования ПЗ реализуется во втором поле модели $\alpha|\beta|\gamma$ (задания каждого типа входят в один пакет и обслуживаются последовательно; задания распределяются по пакетам различных составов, задания, входящие в один пакет, выполняются последовательно, момент времени окончания выполнения заданий, входящих в пакет, совпадает с моментом времени окончания выполнения пакета; задания распределяются по пакетам различных составов, задания, входящие в один пакет выполняются параллельно, момент времени окончания выполнения пакета совпадает с моментом времени окончания выполнения задания с самой большой длительностью и т.д.).

Дальнейшее развитие указанной классификации основывается на представлении системы построения расписаний в виде иерархически упорядоченных подсистем, каждая из которых выполняет решение определенной подзадачи оптимизации решений. Обоснование классификации задач построения расписаний многостадийных процессов выполнения заданий в КС базируется на анализе вида входных данных, вида критериев, вида ограничений на ресурсы, используемые системой при выполнении заданий, на результатах декомпозиции обобщенной функции системы на совокупность иерархически упорядоченных функций подсистем.

Через d_i обозначены моменты времени поступления в систему заданий для выполнения. При $d_i = 0$ $(i = \overline{1,n})$ все задания в количестве $\sum_{i=1}^{n} n^i$ поступают в систему одновременно и системой формируется статическое расписание. При $d_i > 0$ реализуется возмущающее воздействие, влияющее на ход процесса выполнения заданий, предусмотренный статическим расписанием, связанное с поступлением в систему новых заданий. С целью адаптации многостадийного процесса выполнения заданий к возмущающим воздействиям, связанным с поступлением в систему в моменты времени $d_i > 0$ новых заданий, реализуется построения динамических расписаний. Другим видом возмущающих воздействий, влияющих на ход процесса выполнения заданий, являются отказы обрабатывающих приборов КС и их последующее восстановление. Для отказов приборов в рассмотрение введены параметры: $t^l_{отк}$ – моменты времени отказов l-х приборов КС, $T_{отк}$ – множество значений $t^l_{отк}$, $t^l_{восст}$ – длительности восстановления l-ых приборов КС после отказов. Формирование динамических расписаний, учитывающих влияние возмущающего воздействия, связано с типизацией вида отказа и с определением длительности $t^l_{восст}$ интервала времени восстановления прибора.

Для уменьшения мощности множества Zd введены допущения для множеств TM, Ds:

1) система реализует решение задач построения расписаний выполнения заданий для одного технологического маршрута, который предполагает последовательное использование всех приборов КС, при этом маршрут выполнения заданий является единственным и одинаковым для каждого их типа; приборы образуют последовательную цепочку; маршрут предполагает прохождение всеми заданиями последовательно всех приборов КС ($|TM| = 1$);

2) дисциплины обслуживания ds_i $(i = \overline{1,n},\ ds_i \in Ds)$ заданий i-х типов в КС директивно устанавливают, что при поступлении заданий на ее вход реализуется последовательное их выполнение на каждом приборе; выполнение заданий на каждом приборе КС реализуется в соответствии с условиями: последующий прибор КС может приступить к выполнению задания i-го типа в случае, если выполнение этого задания завершено на предшествующем приборе, выполнение задания на l-ом приборе может быть начато только в том случае, если этот прибор завершил выполнение задания, занимающего предшествующую позицию в последовательности π^l, задание считается выполненным, если оно снято с последнего (L-го) прибора ($|Ds| = 1$).

Множество правил выполнения заданий Pr позволяет определить способы реализации действий с ними в обрабатывающих системах (в КС). Правила выполнения заданий i-ых типов pr_i для различных значений параметров d_i, параметра приоритета prt_i и задаваемых значений

параметров $t^l_{отк}$, $t^l_{восст}$ для *l*-х приборов КС формулируются следующим образом: 1) при построении статических расписаний выполнения заданий, для которых $d_i = 0$ ($i = \overline{1,n}$), прерывания реализации действий с заданиями невозможны; 2) при поступлении в систему в моменты времени $d_i > 0$ заданий *i*-х типов, таких, что $prt_i = prt_{i'}$ ($prt_{i'}$ – приоритеты заданий, выполняемых в КС в соответствии с сформированным расписанием) прерывание выполнения заданий в статическом и динамическом расписаниях не реализуется; 3) при поступлении в систему в моменты времени $d_i > 0$ заданий *i*-х типов, таких, что $prt_i > prt_{i'}$ (где $prt_{i'}$ – приоритеты заданий, выполняемых в КС в соответствии с сформированным расписанием) реализуется прерывание выполнения заданий в формируемом динамическом расписании; 4) отказ *l*-го прибора в момент времени $t^l_{отк}$ обуславливает прерывание выполнения задания *i*-го типа, необходим учет простоя прибора в течение интервала $t^l_{восст}$.

В соответствии с [85-99] особенностями иерархических систем и способа принятия решений в них являются: возможность декомпозиции функций систем (декомпозиции обобщенной задачи, решаемой системой, на подзадачи, решаемые на ее уровнях, иерархическая упорядоченность уровней системы, каждый из которых решает определенную подзадачу), наличие приоритета принятия решений, определяющего очередность их формирования от вышестоящих уровней к нижестоящим, наличие взаимосвязи критериев оптимальности решений на каждом уровне от функционирования других уровней. Типы задач z_h определены в зависимости от: вида входных данных X_h (2.5), (2.6), вида ограничений q^e_h ($q^e_h \in Q^e_h, Q^e_h \subseteq Q_h$), правил выполнения заданий pr_h, реализуемых отказов и восстановления приборов КС. Для типизации задач z_h в их классификации в рассмотрение введено обозначение: $z^{type,qc}_{lev}$, где *lev* – количество уровней иерархии подсистем оптимизации решений при построении расписаний, *type*– тип расписания, которое формируется при решении задачи (статическое или динамическое, выполнения ЕЗ, выполнения ПЗ, выполнения ПЗ с формированием комплектов), *qc* (*quantity of criterion*) – количество критериев на каждом уровне иерархии, с использованием которых реализуется поиск лучшего решения в системе.

В результате декомпозиции обобщенных функций систем построения расписаний на совокупность иерархически упорядоченных подфункций, реализуемых на соответствующих уровнях принятия решений, получена классификация задач построения расписаний (декомпозиция выполнена с точки зрения реализации иерархического подхода к построению расписаний осуществления действий с ЕЗ либо ПЗ в КС [85-99]). Сформированная классификация задач обобщена в виде таблицы (Таблица 2.1). При отсутствии ограничений на используемые

Таблица 2.1– Классификация задач построения расписаний выполнения заданий в конвейерных системах

Ресурсы / Задания			Отсутствие ограничений на ресурсы $Q_1=\varnothing;\ Q_2=\varnothing$		Наличие ограничений на ресурсы $Q_1\neq\varnothing;\ Q_2\neq\varnothing$ (при $T_{отк}=\varnothing$)		
			$T_{отк}=\varnothing$	$T_{отк}\neq\varnothing$	$Q_1\neq\varnothing;$ $Q_2=\varnothing$	$Q_1=\varnothing;$ $Q_2\neq\varnothing$	$Q_1\neq\varnothing;$ $Q_2\neq\varnothing$
$n^i=1$ $(i=\overline{1,n})$	$d_i=0$ $(i=\overline{1,n})$	$ptr_i=ptr_j\ (i=\overline{1,n-1};)$	z_1^{ce1}	$(z_1^{\partial e1})^{отк}$	z_2^{ce1}	z_2^{ce1}	z_3^{ce1}
		$ptr_i\neq ptr_j$ $(i=\overline{1,n-1};\ j=\overline{i+1,n})$	z_1^{ce1}	$(z_1^{\partial e1})^{отк}$	z_2^{ce1}	z_2^{ce1}	z_3^{ce1}
	$d_i\geq 0$ $(i=\overline{1,n})$	$ptr_i=ptr_j$ $(i=\overline{1,n-1};\ j=\overline{i+1,n})$	$(z_1^{\partial e1})_{пост}$	$(z_1^{\partial e1})_{пост}^{отк}$	$(z_2^{\partial e1})_{пост}$	$(z_2^{\partial e1})_{пост}$	$(z_3^{\partial e1})_{пост}$
		$ptr_i\neq ptr_j\ (i=\overline{1,n-1};\ j=\overline{i+1,n})$	$(z_1^{\partial e1})_{пост}^{прт}$	$(z_1^{\partial e1})_{пост}^{прт,отк}$	$(z_2^{\partial e1})_{пост}^{прт}$	$(z_2^{\partial e1})_{пост}^{прт}$	$(z_3^{\partial e1})_{пост}^{прт}$
$n_i\geq 2$ $(i=\overline{1,n})$	$d_i=0$ $(i=\overline{1,n})$	$ptr_i=ptr_j, g^{ком}=0\ (i=\overline{1,n\quad 1};\ j=\overline{i+1,n}),$	$z_2^{сп1}$	$(z_2^{\partial n1})^{отк}$	$z_3^{сп1}$	$z_3^{сп1}$	$z_4^{сп1}$
		$ptr_i=ptr_j,\ g^{ком}\geq 0$ $(i=\overline{1,n-1};\ j=\overline{i+1,n}),$	$z_2^{спк1}$	$(z_2^{\partial пк1})^{отк}$	$z_3^{спк1}$	$z_3^{спк1}$	$z_4^{спк1}$
		$ptr_i\neq ptr_j$ $(i=\overline{1,n-1};\ j=\overline{i+1,n})$	$z_2^{сп1}$	$(z_2^{\partial n1})^{отк}$	$z_3^{сп1}$	$z_3^{сп1}$	$z_4^{сп1}$
	$d_i\geq 0$ $(i=\overline{1,n})$	$ptr_i=ptr_j$ $(i=\overline{1,n-1};\ j=\overline{i+1,n})$	$(z_2^{\partial n1})_{пост}$	$(z_2^{\partial n1})_{пост}^{отк}$	$(z_3^{\partial n1})_{пост}$	$(z_3^{\partial n1})_{пост}$	$(z_4^{\partial n1})_{пост}$
		$ptr_i\neq ptr_j$ $(i=\overline{1,n-1};\ j=\overline{i+1,n})$	$(z_2^{\partial n1})_{пост}^{прт}$	$(z_2^{\partial n1})_{пост}^{прт,отк}$	$(z_3^{\partial n1})_{пост}^{прт}$	$(z_3^{\partial n1})_{пост}^{прт}$	$(z_4^{\partial n1})_{пост}^{прт}$

ресурсы системы классификация задач построения расписаний выполнения заданий сформирована для различных видов множеств $T_{отк}$ ($T_{отк} = \varnothing$, $T_{отк} \neq \varnothing$).

При $Q_h = \varnothing$ и $T_{отк} = \varnothing$ типы задач $z_h \in Zd$ построения расписаний определены следующим образом:

1) в наборе X_h задачи z_h заданы значения параметров $n^i = 1$ ($i = \overline{1,n_h}$), тогда системой реализуется решение одноуровневой задачи построения расписаний – формирование видов последовательностей π^l, составляющих расписание π; правила pr_h выполнения заданий для задачи z_h соответствуют условиям $d_i = 0$ и $prt_i = prt_{i'}$; тип задач обозначен через z_1^{ce1} – одноуровневая задача построения статических расписаний выполнения ЕЗ с одним критерием; если в качестве входных данных заданы $n^i = 1$, $d_i = 0$, $prt_i \neq prt_{i'}$ ($i = \overline{1,n_h}$), то системой также реализуется решение задачи типа z_1^{ce1};

2) для задачи z_h (при $n^i = 1$) заданы условия $d_i \geq 0$ и $prt_i = prt_{i'}$, тогда в системе реализуется решение задачи формирования динамических расписаний выполнения ЕЗ; тип задач обозначен через $(z_1^{де1})_{пост}$ – одноуровневая задача построения динамических расписаний выполнения ЕЗ при различных моментах времени их поступления и равных приоритетах; при $d_i \geq 0$ и $prt_i \neq prt_{i'}$ тип решаемой задачи обозначен как $(z_1^{де1})_{пост}^{прт}$;

3) входными параметрами для задачи z_h являются: $n^i \geq 2$, $d_i = 0$, $prt_i = prt_{i'}$ ($i = \overline{1,n_h}$, $g^{ком} = 0$); в результате декомпозиции обобщенной функции системы построения расписаний на функции подсистем определены задачи, решаемые на уровнях иерархии: подсистема первого уровня – оптимизация составов выполняемых ПЗ, подсистема второго уровня – оптимизация расписаний выполнения ПЗ в КС; тип задачи обозначен как $z_2^{сп1}$ – двухуровневая задача построения статических расписаний выполнения ПЗ;

4) параметрами для задачи z_h являются: $n^i \geq 2$, $d_i = 0$, $prt_i = prt_{i'}$, $g^{ком} \geq 1$ ($i = \overline{1,n_h}$, $Q_h = \varnothing$); в этом случае в КС должны быть выполнены ПЗ, из результатов их выполнения формируются комплекты; декомпозиция обобщенной функции системы построения расписаний позволила определить функции подсистем, соответствующие задаче $z_2^{сп1}$ (при формировании комплектов); тип решаемой задачи обозначен как $z_2^{спк1}$; если входные параметры задач

имеют значения $n^i \geq 2$, $d_i = 0$, $prt_i \neq prt_{i'}$ (при $g^{ком} = 0$ либо $g^{ком} \geq 1$), то типы задач аналогичны рассмотренным выше задачам $z_2^{сп1}$ и $z_2^{спк1}$ (обозначены $z_2^{сп1}$ и $z_2^{спк1}$);

5) указание значений $d_i \geq 0$ ($i = \overline{1,n_h}$) для заданий при входных параметрах вида: $n^i \geq 2$, $prt_i = prt_{i'}$, либо $prt_i \neq prt_{i'}$ (при $g^{ком} = 0$ либо $g^{ком} \geq 1$) позволяет модифицировать задачи построения статических расписаний выполнения ПЗ (задачи $z_2^{сп1}$ и $z_2^{спк1}$) путем учета в них динамических свойств, связанных с перестроением расписаний при поступлении в систему в моменты времени $d_i > 0$ ПЗ с различными либо равными приоритетами; тип задачи обозначен как $(z_2^{дп1})_{пост}$ при $d_i > 0$ и $prt_i = prt_{i'}$, $(z_2^{дп1})_{пост}^{прт}$ при $d_i > 0$ и $prt_i \neq prt_{i'}$.

При $T_{отк} \neq \varnothing$ сформированные типы задач $z_h \in Zd$ будут модифицированы в связи с перестроением расписаний выполнения заданий в системе при отказах и восстановлении приборов КС. Установим соответствие между типами задач при $T_{отк} = \varnothing$ и $T_{отк} \neq \varnothing$: $z_1^{се1} \to (z_1^{де1})_{отк}$; $(z_1^{де1})_{пост} \to (z_1^{де1})_{пост}^{отк}$; $(z_1^{де1})_{пост}^{прт} \to (z_1^{де1})_{пост}^{прт,отк}$; $z_2^{сп1} \to (z_2^{дп1})_{отк}$; $z_2^{спк1} \to (z_2^{дпк1})_{отк}$; $(z_2^{дп1})_{пост} \to (z_2^{дп1})_{пост}^{отк}$; $(z_2^{дп1})_{пост}^{прт} \to (z_2^{дп1})_{пост}^{прт,отк}$.

Определение типов задач, для которых задано множество ограничений $Q_h \neq \varnothing$ на используемые ресурсы системы, выполнено в соответствии с анализом видов множеств Q_h^e для каждого *e*-го ресурса ($e = \overline{1,2}$, где $e=1$ – ограничения на длительность функционирования КС, $e=2$ – ограничения на объемы буферов, выделяемых на обрабатывающих приборах для хранения результатов выполнения заданий): ($Q_h^1 \neq \varnothing$, $Q_h^2 = \varnothing$); ($Q_h^1 = \varnothing$, $Q_h^2 \neq \varnothing$); ($Q_h^1 \neq \varnothing$, $Q_h^2 \neq \varnothing$), при этом $T_{отк} = \varnothing$. Если множества Q_h^e ($e = \overline{1,2}$) заданы в виде ($Q_h^1 \neq \varnothing$, $Q_h^2 = \varnothing$), то типы задач построения расписаний выполнения заданий определены следующим образом:

1) при $Q_h^1 \neq \varnothing$ заданы ограничения на длительности интервалов $t^{инт}$ функционирования системы, значения параметров набора X_h вида: $n^i = 1$, $d_i = 0$, $prt_i = prt_{i'}$ ($i = \overline{1,n_h}$); в результате декомпозиции обобщенной функции системы построения расписаний определены иерархически упорядоченные функции, выполняемые подсистемами: верхний уровень реализует оптимизацию составов групп ЕЗ, выполняемых в течение интервалов времени длительности $t^{инт}$, нижний уровень реализует оптимизацию порядка выполнения ЕЗ, входящих в соответствующие группы; решение задачи формирования расписаний выполнения ЕЗ при ограничении на длительности интервалов $t^{инт}$ функционирования системы заменяется решением двухуровневой задачи формирования групп заданий и расписаний выполнения заданий из этих

групп; правила выполнения pr_h соответствуют условиям $d_i = 0$, $prt_i = prt_{i'}$; тип задачи обозначен как $z_2^{се1}$ (двухуровневая задача построения статических расписаний процесса выполнения ЕЗ в КС); если правила выполнения заданий определяются условиями $d_i = 0$, $prt_i \neq prt_{i'}$, то в системе также решается задача $z_2^{се1}$;

2) аналогичным образом формулируются двухуровневые задачи построения динамических расписаний выполнения ЕЗ при условии $Q_h^1 \neq \varnothing$; при значениях $n^i = 1$ ($i = \overline{1,n_h}$) правила выполнения заданий pr_h формируются в соответствии с условиями $d_i \geq 0$, $prt_i = prt_{i'}$ для одной задачи и $d_i \geq 0$, $prt_i \neq prt_{i'}$ ($i = \overline{1,n_h}, i \neq i'$) для другой задачи; типы задач: $(z_2^{де1})_{пост}$ – двухуровневая задача построения динамических расписаний выполнения ЕЗ при разных моментах времени их поступления, $(z_2^{де1})_{пост}^{прт}$ – двухуровневая задача построения динамических расписаний выполнения ЕЗ при разных приоритетах и разных моментах времени поступления;

3) в качестве входных данных для задачи построения расписаний заданы значения параметров набора X_h в виде $n^i \geq 2$, $d_i = 0$, $prt_i = prt_{i'}$ ($i = \overline{1,n_h}, i \neq i'$) и $g^{ком} = 0$ (при $Q_h^1 \neq \varnothing$), тогда системой реализуется построение расписаний выполнения ПЗ в течение интервалов времени $t^{инт}$; декомпозиция обобщенной функции системы на функции, реализуемые подсистемами, позволила получить иерархию оптимизации решений вида: первый уровень – оптимизация решений по составам ПЗ i-х типов ($i = \overline{1,n_h}$), второй уровень – оптимизация решений по составам групп ПЗ, выполняемых в течение интервалов $t^{инт}$, третий уровень – построение расписаний выполнения ПЗ, входящих в группы; тип задачи обозначен как $z_3^{сп1}$;

4) в качестве входных данных для задачи построения расписаний заданы значения параметров набора X_h вида $n^i \geq 2$, $d_i = 0$, $prt_i = prt_{i'}$ ($i = \overline{1,n_h}, i \neq i'$) и $g^{ком} \geq 1$, тогда задача $z_3^{сп1}$ преобразуется в трехуровневую задачу построения статических расписаний выполнения ПЗ в группах при формировании комплектов результатов; тип задачи обозначен как $z_3^{спк1}$; при изменении правил выполнения заданий для задач $z_3^{сп1}$ и $z_3^{спк1}$ в соответствии с условием $prt_i \neq prt_{i'}$ ($i = \overline{1,n_h}, i \neq i'$) типы задач обозначены как $z_3^{сп1}$ и $z_3^{спк1}$;

5) в качестве параметров для задачи z_h заданы $n^i \geq 2$, $d_i \geq 0$, $prt_i = prt_{i'}$ либо $prt_i \neq prt_{i'}$ ($i = \overline{1,n_h}, i \neq i'$), $g^{ком} = 0$ либо $g^{ком} \geq 1$ (при $Q_h^1 \neq \varnothing$), тогда задачи $z_3^{сп1}$ и $z_3^{спк1}$ преобразуются в задачи, связанные с построением динамических расписаний в трехуровневой

системе, которая реализует определение: составов ПЗ, составов групп ПЗ, расписаний выполнения ПЗ, входящих в группы на приборах КС; типы задач обозначены через $(z_3^{\partial n1})_{пост}$, $(z_3^{\partial n1})_{пост}^{прт}$ (либо $(z_3^{\partial nк1})_{пост}$ и $(z_3^{\partial nк1})_{пост}^{прт}$ соответственно.

Особенностью задач, в которых множества ограничений на используемые ресурсы имеют вид $Q_h^1 = \varnothing$, $Q_h^2 \neq \varnothing$, является учет использования двух видов ресурсов: времени функционирования приборов КС ($e = 1$), объема буфера, выделенного на каждом приборе для хранения результатов выполнения заданий на предшествующем приборе ($e = 2$). Выполнение заданий с учетом множества ограничений вида $Q_h^2 \neq \varnothing$ невозможно без использования ресурса времени функционирования системы ($e = 1$), поэтому длительность реализации расписания должна быть минимизирована. При введении множеств ограничений вида $Q_h^1 = \varnothing$, $Q_h^2 \neq \varnothing$ решение задач выполняется с учетом двух видов ресурсов: времени функционирования приборов КС (ограничения для которого не формируются, суммарное время функционирования при выполнении заданий минимизируется), объемов буферов на приборах КС. Для $Q_h^1 = \varnothing$, $Q_h^2 \neq \varnothing$ классификация типов задач построения расписаний определена следующим образом:

1) при значениях параметров $n^i = 1$, $d_i = 0$, $prt_i = prt_{i'}$ ($i = \overline{1, n_h}$) являются заданными ограничения на объемы буферов хранения на обрабатывающих приборах КС (множество $Q_h^2 \neq \varnothing$), поиск решения задачи z_h выполняется в соответствии с требованием эффективного использования ресурса времени функционирования системы и выделяемых для хранения результатов буферов ограниченных размеров; решаемая задача предусматривает определение статического расписания выполнения ЕЗ в иерархической системе построения расписаний: на верхнем уровне формируется решение по расписанию заполнения буферов ограниченного объема, на нижнем уровне – расписания выполнения заданий, соответствующие заполнению буферов; задача обозначена как z_2^{ce1} – двухуровневая задача построения расписаний выполнения ЕЗ; аналогичный тип задачи рассматривается в случае, когда при тех же исходных данных правила выполнения определяются условием $prt_i \neq prt_{i'}$, тип задачи обозначен как z_2^{ce1};

2) при задании значений параметров $n^i = 1$, $d_i \geq 0$, $prt_i = prt_{i'}$ либо $prt_i \neq prt_{i'}$ ($i \neq i'$, $Q_h^2 \neq \varnothing$) системой выполняется решение двухуровневых задач построения динамических расписаний выполнения ЕЗ, типы задач обозначены как: $(z_2^{\partial e1})_{пост}$– двухуровневая задача построения динамических расписаний выполнения ЕЗ при различных моментах времени их по-

ступления; $(z_2^{де1})_{пост}^{прт}$ – двухуровневая задача построения динамических расписаний выполнения ЕЗ при различных моментах времени их поступления и разных приоритетах;

3) при значениях параметров $n^i \geq 2$, $d_i = 0$, $prt_i = prt_{i'}$ либо $prt_i \neq prt_{i'}$ ($i = \overline{1,n_h}$, $i \neq i'$), $g^{ком} = 0$ (при $Q_h^1 = \varnothing$ и $Q_h^2 \neq \varnothing$) реализация обобщенной функции системы связана с решением трех задач в составе иерархии подсистем: формирования составов ПЗ (первый уровень), определение расписаний загрузки результатов выполнения заданий с предшествующих приборов в буферы их хранения на последующих приборах (второй уровень), построения расписаний выполнения ПЗ (третий уровень); тип решаемой задачи обозначен как $z_3^{сп1}$ – трехуровневая задача построения статических расписаний выполнения ПЗ при наличии ограничения на размеры буферов для хранения результатов выполнения заданий; при условии $g^{ком} \geq 1$ тип задачи $z_3^{сп1}$ изменен на $z_3^{спк1}$;

4) при значениях параметров $n^i > 1$, $d_i \geq 0$, $prt_i = prt_{i'}$ либо $prt_i \neq prt_{i'}$ ($i = \overline{1,n_h}$, $i \neq i'$, $Q_h^1 = \varnothing$, $Q_h^2 \neq \varnothing$) системой формируются динамические расписания выполнения ПЗ, связанные с реализацией событий в КС, в этом случае задача $z_3^{сп1}$ трансформируется в задачи $(z_3^{дп1})_{пост}$ и $(z_3^{дп1})_{пост}^{прт}$ (соответственно, $z_3^{спк1}$ в $(z_3^{дпк1})_{пост}$ и $(z_3^{дпк1})_{пост}^{прт}$).

При определении множеств ограничений Q_h^e ($e = \overline{1,2}$) вида: $Q_h^1 \neq \varnothing$, $Q_h^2 \neq \varnothing$, классификация задач построения расписаний выполнения заданий сформирована следующим образом:

1)значения параметров $n^i = 1$, $d_i = 0$, $prt_i = prt_{i'}$ ($i = \overline{1,n_h}$, $i \neq i'$), задача построения расписаний является развитием задачи $z_2^{се1}$; решение задачи построения расписаний определяется в составе трехуровневой иерархической системы: а) подсистемой первого уровня определяются составы групп ЕЗ, выполняемых в течение интервалов $t^{инт}$, б) подсистемой второго уровня определяются расписания размещения результатов выполнения заданий на предыдущих приборах КС в буферах последующих приборов, в) на третьем уровне иерархии реализуется построение расписаний выполнения ЕЗ, входящих в сформированные группы, которое соответствует расписанию размещения результатов в буферах приборов КС; тип решаемой задачи обозначен как $z_3^{се1}$; аналогичный тип решаемой задачи соответствует параметрам $n^i = 1$, $d_i = 0$, $prt_i \neq prt_{i'}$ ($i = \overline{1,n_h}$, $i \neq i'$), при изменении правил выполнения заданий с учетом $prt_i \neq prt_{i'}$ решается задача $z_3^{се1}$;

2) значения параметров $n^i = 1$, $d_i \geq 0$, $prt_i = prt_{i'}$ либо $prt_i \neq prt_{i'}$ ($i = \overline{1,n_h}$, $i \neq i'$), тогда сформированное в задаче z_3^{ce1} статическое расписание модифицируется при поступлении заданий в моменты времени $d_i > 0$ с учетом их приоритетов; исходная задача z_3^{ce1} преобразуется в задачу построения динамических расписаний, тип задачи обозначен как $z_3^{\partial e1}$, а подтипы, соответствующие различным значениям входных параметров, обозначены как $(z_3^{\partial e1})_{пост}$ (при $d_i \geq 0$ и $prt_i = prt_{i'}$) и $(z_3^{\partial e1})_{пост}^{прт}$ (при $d_i \geq 0$ и $prt_i \neq prt_{i'}$);

3) значения параметров $n^i \geq 2$, $d_i = 0$, $prt_i = prt_{i'}$ ($i = \overline{1,n_h}$, $i \neq i'$), $g^{ком} = 0$ (при $Q_h^1 \neq \varnothing$, $Q_h^2 \neq \varnothing$), реализованная декомпозиция обобщенной функции системы позволила сформировать четыре уровня иерархии оптимизации решений при построения расписаний выполнения заданий: первый уровень выполняет формирование решений по составам ПЗ, второй уровень – решения по составам групп ПЗ, выполняемых в течение временных интервалов ограниченной длительности; третий уровень – решения по расписаниям размещения результатов выполнения ПЗ на предыдущих приборов КС в буферах последующих приборов; четвертый уровень – решения по расписаниям выполнения ПЗ из групп на приборах КС; тип задачи $z_4^{сп1}$ – четырех уровневая задача построения статических расписаний выполнения ПЗ в КС;

4) для задачи построения расписаний, значения параметров которой $n^i \geq 2$, $d_i = 0$, $prt_i = prt_{i'}$ ($i = \overline{1,n_h}$, $i \neq i'$), $g^{ком} \geq 1$ (при $Q_h^1 \neq \varnothing$, $Q_h^2 \neq \varnothing$), реализована декомпозиция обобщенной цели функционирования системы, позволившая определить иерархию подсистем, аналогичную задаче $z_4^{сп1}$ (локальные функции подсистем в иерархии аналогичны задаче $z_4^{сп1}$); тип задачи обозначен как $z_4^{спк1}$ – четырех уровневая задача построения статических расписаний выполнения ПЗ при формировании комплектов и учете ограничений на ресурсы;

5) при $n^i \geq 2$, $d_i = 0$, $prt_i \neq prt_{i'}$ ($i = \overline{1,n_h}$, $i \neq i'$), $g^{ком} = 0$ либо $g^{ком} \geq 1$ ($Q_h^1 \neq \varnothing$, $Q_h^2 \neq \varnothing$) системой выполняется решение задач, аналогичных задачам $z_4^{сп1}$ и $z_4^{спк1}$.

Таким образом, на основе теории иерархических систем [78, 85-88] выполнено обоснование подхода к решению задач построения расписаний многостадийных процессов выполнения заданий в КС, который предполагает декомпозицию обобщенной функции системы на совокупность иерархически упорядоченных подфункций, реализуемых подсистемами. Реализация иерархического подхода к оптимизации расписаний выполнения заданий возможна с использованием теории иерархических игр [89-99]. Тип решаемой в системе задачи определяет способ преобразования входных данных в соответствующие им результаты при учете вида крите-

рия и ограничений. Классификация задач построения расписаний выполнения заданий в параллельных системах обработки опубликована в работе [100]. Сформированная классификация задач построения расписаний многостадийных процессов выполнения заданий в КС позволяет определить пути совершенствования методов решения рассмотренных задач (пути совершенствования методов теории расписаний). Классификации задач теории расписаний позволяет сформировать основу для новых методов решения задач построения расписаний многостадийных процессов.

Выводы по главе 2

По материалам главы 2 сформулированы следующие выводы:

– на основе положений теории систем и системного анализа синтезирована информационная модель системы построения расписаний многостадийных процессов выполнения заданий в КС, которая представляет собой теоретико-множественное описание типов решаемых задач и видов используемых ресурсов; типы решаемых задач определяются видом входных данных, видом ограничений на ресурсы, используемые при выполнении заданий, видом критериев оптимизации решений и видом формируемых решений; описание системы предполагает указание видов ресурсов и их количества, которые могут быть выделены с целью выполнения заданий; построенная информационная модель используется при разработке классификации задач построения расписаний многостадийных процессов выполнения заданий в КС;

– существующая классификация задач построения расписаний выполнения заданий позволяет типизировать их в общем виде, что затрудняет ее использование при определении типов задач теории расписаний (не позволяют определять особенности решения задач построения расписаний, связанные с применением иерархического подхода);

– на основе теории иерархических систем и проведенной декомпозиции обобщенных функций системы на совокупность иерархически упорядоченных подфункций (функций подсистем) предложена новая классификация задач построения расписаний выполнения заданий в конвейерных системах; классификация предполагает рассмотрение задач построения расписаний выполнения заданий в виде совокупности иерархически упорядоченных взаимодействующих подзадач, каждая из которых решается на определенном уровне системы; использование введенной классификации задач построения расписаний позволяет определить перспективные задачи теории расписаний и способы их решения.

ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОСТАДИЙНЫХ ПРОЦЕССОВ ВЫПОЛНЕНИЯ ЕДИНИЧНЫХ ЗАДАНИЙ В КОНВЕЙЕРНЫХ СИСТЕМАХ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ РАСПИСАНИЙ МНОГОСТАДИЙНЫХ ПРОЦЕССОВ ВЫПОЛНЕНИЯ ЕДИНИЧНЫХ ЗАДАНИЙ

3.1. Математическое моделирование многостадийных процессов выполнения единичных заданий в конвейерных системах

Построение расписаний многостадийных процессов выполнения заданий в КС предусматривает определение порядка реализации действий с ними на обрабатывающих приборах, то есть формирование оптимального (приближающегося к оптимальному) расписания выполнения единичных заданий (ЕЗ). Реализованный в главе 1 анализ существующих методов построения расписаний выполнении ЕЗ в КС позволил определить их основные типы: аналитические методы и методы определения точных решений задачи, в том числе динамическое программирование, методы сокращенного перебора (метод ветвей и границ), эвристические и метаэвристические алгоритмы. Применение аналитических методов ограничено размерностью задачи. Задача с количеством приборов $L \geq 3$ является *NP*-трудной и ее решение не может быть найдено за ограниченное время.

Использование метаэвристических алгоритмов (ГА, метода «муравьиных колоний», селективно-перестановочного метода) позволяет получить решения задачи построения расписаний выполнения заданий, однако в силу особенностей алгоритмов возможно попадание в «ловушку» локального экстремума, в силу стохастического характера некоторых из них (в частности, ГА) их использование не гарантирует получения решений, приближающихся к оптимальным, при различных значениях входных параметров. Эвристические правила построения расписаний позволяют получить решение поставленной задачи, лучшее, чем решения без оптимизации. Однако эти методы не обеспечивают приближения к оптимальному решению.

Методы построения расписаний многостадийных процессов выполнения ЕЗ в КС широко применяются в различных сферах практической деятельности, в частности, при обработке данных. Вариантом применения указанных методов построения расписаний при обработке данных является решение задачи планирования операций с массивами значений отражательной способности земной поверхности при идентификации наличия на ней негативных природных явлений (НПЯ) и техногенных воздействий на ОС (ТВ на ОС). Идентификация НПЯ и ТВ на ОС на земной поверхности осуществляется в областях произвольного размера, задаваемых пользователями (Приложение 2). Так как на обработку поступают данные ДЗЗ от различных приборов искусственных спутников Земли, соответствующие областям различного размера, то

с точки зрения теории расписаний они интерпретируются как данные разных типов, которые не объединяются в наборы. Тогда возникает задача построения расписаний выполнения заданий на обработку единичных данных в КС (то есть выполнения ЕЗ на обработку данных в КС). Цель обработки состоит в идентификации характеристик подстилающей поверхности для определения на их основе наличия НПЯ и ТВ на ОС.

В силу сказанного совершенствование методов построения расписаний выполнения ЕЗ в КС является актуальным и требует синтеза новых подходов к поиску решений. Совершенствование методов построения расписаний выполнения ЕЗ в КС связано с применением "жадного" подхода в дискретной оптимизации [101-114], предусматривающего разбиение задачи на совокупность подзадач, последовательное решение которых позволит приблизиться к оптимальному решению по порядкам реализации действий с заданиями на приборах.

Выше через *i* обозначен идентификатор типа заданий, d_i – момент времени поступления в систему заданий каждого *i*-го типа ($i = \overline{1,n}$). При построении статических расписаний предполагается, что для всех заданий моменты их поступления в систему одинаковы ($d_i = 0$). Выполнение на каждом *l*-м приборе назначенного ему задания *i*-го типа характеризуется параметром длительности, соответствующим количеству операций с этим заданием на приборе.

Последовательности π^l ($l = \overline{1,L}$) реализации действий с заданиями на приборах в расписании π ($\pi = \{\pi^1, \pi^2, \pi^3, ..., \pi^L\}$ [6-8]) различны, тогда для формализации видов последовательностей π^l введены матрицы P^l ($l = \overline{1,L}$) порядков выполнения заданий на *l*-ых приборах КС (размер матриц $n \times n$). Элемент $p_{ij}^l = 1$, если задание *i*-го типа занимает в последовательности π^l *j*-ю позицию, элемент $p_{ij}^l = 0$, если задание *i*-го типа не занимает в последовательности π^l *j*-ю позицию. При синтезе модели процесса выполнения заданий в КС использованы следующие обозначения: t_{li} – длительность выполнения задания *i*-го типа на *l*-м приборе ($l = \overline{1,L}$) (сформирована матрица *T* длительностей выполнения заданий *i*-х типов на *l*-х приборах КС); t_{ji}^{0l} – момент времени начала выполнения задания *i*-го типа, занимающего в π^l *j*-ю позицию (сформированы матрицы T^{0l} ($l = \overline{1,L}$) моментов времени начала выполнения заданий *i*-х типов на *l*-х приборах КС). Так как в системе выполняются ЕЗ, тогда длительности переналадок приборов с выполнения заданий *i*-го типа на выполнение заданий *i'*-го типа включены в интервалы времени t_{li}. Значения t_{ji}^{0l} элементов матриц T^{0l} ($l = \overline{1,L}$) определяются в соответствии с видом матриц P^l ($l = \overline{1,L}$) следующим образом: элемент $t_{ji}^{0l} \neq 0$, в

случае, если ему соответствует $p_{ij}^{l}=1$. В случае, если $p_{ij}^{l}=0$, то соответствующий ему элемент t_{ji}^{0l} матрицы T^{0l} равен 0 ($t_{ji}^{0l}=0$) . Для *(l=1)*-го прибора КС элементы матрицы T^{01} определяются с учетом матрицы P^{1}:

$$t_{1i}^{01}=0;t_{2i}^{01}=\sum_{h=1}^{n}t_{1h}\cdot p_{h1}^{1};\ t_{3i}^{01}=\sum_{j=1}^{2}\sum_{h=1}^{n}t_{1h}\cdot p_{hj}^{1};t_{4i}^{01}=\sum_{j=1}^{3}\sum_{h=1}^{n}t_{1h}\cdot p_{hj}^{1}$$ и так далее.

В общем виде выражения для определения t_{ji}^{01} имеют следующую форму:

$$t_{ki}^{01}=\sum_{j=1}^{k-1}\sum_{h=1}^{n}t_{1h}\cdot p_{hj}^{1}, \qquad (3.1)$$

при $k>1$,где k – номер позиции заданияi-го типа в последовательности π^{1}.

Для l-го прибора (при $l\neq1$) элементы матрицы T^{01} определяются выражениями вида:

а) первая строка (первая позиция для задания i-го типа, $j=1$):

$$t_{1,i}^{0l}=\sum_{h=1}^{n}p_{i,h}^{l-1}\cdot(t_{h,i}^{0l-1}+t_{l-1,i}), \qquad (3.2)$$

где индекс i типа задания определяется по матрице P^{l} ($l=\overline{1,L}$) как занимающего первую позицию в π^{l} (i-й тип задания, выполняемого в позиции $j=1$ на l-м приборе);

б) j-я строка ($j\neq1$) в матрице P^{l} ($l=\overline{2,L}$) для задания i-го типа:

$$t_{j,i}^{0l}=max\left\{\sum_{h=1}^{n}p_{i,h}^{l-1}\cdot(t_{h,i}^{0l-1}+t_{l-1,i});\sum_{h=1}^{n}(t_{j-1,h}^{0l}+t_{l,h})\cdot p_{h,j-1}^{l}\right\}. \qquad (3.3)$$

Сформированные выражения (3.1)-(3.3) являются моделью многостадийного процесса выполнения ЕЗ в КС. Формируемые значения временных характеристик процесса выполнения заданий являются различными в зависимости от видов сформированных решений, которые представляются в форме: $\{(P^{l},T^{0l})\,|\,l=1,L\}$. Для анализа оптимальности решений формируется вид критерия, учитывающий рассчитываемые с использованием выражений (3.1)-(3.3) значения характеристик процесса выполнения заданий.

Особенностями алгоритма метода определения порядка выполнения заданий, используемого при построении расписаний и реализующего «жадную» стратегию [101-112], являются:

1) добавление в конец всех последовательностей $\pi^l(s-1)$ выполнения заданий, сформированных на предыдущем (*s-1*)-м шаге алгоритма, задания *i*-го типа, позиции которого в последовательностях π^l ($l=\overline{1,L}$) определяются на текущей итерации алгоритма;

2) изменение позиции рассматриваемого задания *i*-го типа в каждой из сформированных последовательностей на текущем *s*-м шаге алгоритма $\pi^l(s)$;

3) вычисление и анализ дискретных градиентов критерия оптимальности [103, 106] (левого либо правого) после реализации каждого шага алгоритма, связанного с изменением в каждой последовательности π^l положения задания на одну позицию ближе к их началу;

4) если изменение позиции рассматриваемого задания *i*-го типа в каждой последовательности π^l ($l=\overline{1,L}$) на одну позицию ближе к их началу не приводит к уменьшению значения критерия, то реализуется изменение положения задания *i*-го типа одновременно в двух последовательностях π^l ($l=\overline{1,L}$), далее в трех последовательностях и так далее (реализуется переход к решению, приближающемуся к оптимальному, в рамках окрестностей с различными метриками).

В соответствии с особенностями алгоритма формирования расписаний выполнения ЕЗ на некотором *s*-м шаге осуществляется решение подзадачи добавления и размещения в последовательностях π^l ($l=\overline{1,L}$) задания одного *i*-го типа. На *s*-м шаге алгоритма осуществляется «жадный» выбор по определению локально оптимального решения (по определению *j*-ых позиций в π^l ($l=\overline{1,L}$) рассматриваемого задания *i*-го типа). На основе локально оптимального решения для задания *i*-го типа формируется решение по определению позиций заданий последующих (*n-i*)-го типов. Каждый последующий «жадный» выбор связан с добавлением в π^l ($l=\overline{1,L}$) задания одного типа, определением его позиций в π^l; решение по размещению задания *i*-го типа формируется на основе последовательностей, полученных для заданий предшествующих (*i-1*)-го типа, порядок выполнения этих заданий в π^l не изменяется.

При учете того, что на каждом *s*-м шаге алгоритма в полученные ранее последовательности π^l добавляется одно задание *i*-го типа, оценка видов последовательностей возможна для текущего количества заданий в них. Не все задания одновременно находятся в последовательностях π^l ($l=\overline{1,L}$), а только их некоторое количество, для которых оцениваются виды последовательностей их выполнения. Внутренняя цель функционирования системы определяет необходимость эффективного использования ресурсов оборудования. В качестве цели, которая учитывается при синтезе критерия, рассматривается внутренняя цель функционирования си-

стемы. Для обоснования вида критерия оптимальности решений выполнены следующие рассуждения:

1) при $\sum_{i=1}^{n} t_{ji}^{0l} p_{i,j}^{l} > \sum_{i=1}^{n} (t_{j-1,i}^{0l} + t_{l,i}) \cdot p_{i,j-1}^{l}$ l-й прибор КС ожидает готовности к выполнению задания в j-ой позиции после выполнения задания в (j–1)-ой позиции; длительность простоев l-го прибора при выполнении текущего количества заданий в последовательности π^l определяется выражением: $\sum_{j=2}^{n} \left[\sum_{i=1}^{n} t_{ji}^{0l} p_{i,j}^{l} - \sum_{i=1}^{n} (t_{j-1,i}^{0l} + t_{l,i}) \cdot p_{i,j-1}^{l} \right]$;

2) для последовательности π^1 простои первого прибора в ожидании готовности заданий к выполнению отсутствуют; суммарные простои всех приборов, связанные с ожиданием готовности заданий к выполнению, определяются выражением: $\sum_{l=2}^{L} \sum_{j=2}^{n} \left[\sum_{i=1}^{n} t_{ji}^{0l} p_{i,j}^{l} - \sum_{i=1}^{n} (t_{j-1,i}^{0l} + t_{l,i}) \cdot p_{i,j-1}^{l} \right]$;

3) простои приборов КС при выполнении заданий связаны также с ожиданием начала реализации действий с ними на l-х приборах ($l = \overline{2,L}$), то есть при условии, что задания занимают первую позицию в последовательностях π^l ($l = \overline{2,L}$); для первого прибора КС ожидание начала выполнения им заданий отсутствует ($t_{1i}^{01} = 0$); для l-го прибора ($l \neq 1$) время ожидания готовности заданий к выполнению в первой позиции в π^l определяется выражением: $\sum_{i=1}^{n} t_{1,i}^{0l} \cdot p_{i1}^{l}$; простои всех l-ых приборов КС ($l = \overline{2,L}$) – выражением $\sum_{l=2}^{L} \sum_{i=1}^{n} t_{1,i}^{0l} \cdot p_{i1}^{l}$.

Суммарные простои всех приборов КС при выполнении текущего количества заданий в последовательностях π^l ($l = \overline{1,L}$) определяются их простоями в ожидании готовности заданий в первой позиции в π^l ($l = \overline{2,L}$), а также их простоями в ожидании готовности заданий в j-х позициях в π^l (при условии, что $j \neq 1$). Тогда вид критерия оптимальности решений по порядкам выполнения заданий в последовательностях π^l ($l = \overline{2,L}$) следующий:

$$f = \sum_{l=2}^{L} \sum_{i=1}^{n} t_{1,i}^{0l} p_{i,1}^{l} + \sum_{l=2}^{L} \sum_{j=2}^{n} \left[\sum_{i=1}^{n} t_{ji}^{0l} p_{i,j}^{l} - \sum_{i=1}^{n} (t_{j-1,i}^{0l} + t_{l,i}) \cdot p_{i,j-1}^{l} \right]. \qquad (3.4)$$

Ограничения на множество решений по порядкам выполнения ЕЗ в π^l ($l = \overline{1,L}$):

– ограничение на количество ЕЗ в каждой позицию в π^l ($l = \overline{1,L}$):

$$\sum_{i=1}^{n} p_{ij}^{l} = 1 \text{ (при } j = \overline{1,n} \text{)};$$

– ограничение на количество позиций в π^l ($l = \overline{1,L}$), которые может занимать каждое ЕЗ:

$$\sum_{i=1}^{n} p_{ij}^{l} = 1 \text{ (при } i = \overline{1,n} \text{)};$$

– ограничение на количество ЕЗ в последовательностях π^l ($l = \overline{1,L}$):

$$\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} p_{ij}^{l} = n.$$

Выражение (3.4), являющееся критерием оптимальности решений, совместно с ограничениями представляют собой модель, в соответствии с которой реализуется определение локально оптимальных расписаний многостадийных процессов выполнения заданий в КС.

3.2. Алгоритм построения расписаний многостадийных процессов выполнения единичных заданий в конвейерных системах

Назовем алгоритм построения расписаний выполнения ЕЗ в КС с использованием жадных стратегий Greedy Scheduler. Алгоритм предполагает последовательное размещение в последовательностях π^l ($l = \overline{1,L}$) заданий всех типов и определение для каждого из них таких *j*-ых позиций в π^l, которые гарантируют минимум критерия (3.4). Каждая итерация жадного алгоритма Greedy Scheduler предполагает размещение в π^l ($l = \overline{1,L}$) одного задания *i*-го типа и определение позиций этого задания в π^l. Определение локально оптимальных решений по размещению одного задания в последовательностях π^l ($l = \overline{1,L}$) предполагает поиск лучшего решения в окрестностях текущего локально оптимального решения [106-108]. Обозначим через *k* метрику окрестности O_k текущего локально оптимального решения $\pi(s)$ (где *s*– индекс итерации алгоритма), в которой выполняется поиск лучшего решения, а через k^{max} – максимальную метрику окрестности текущего локально оптимального решения. Значение метрики *k* окрестности O_k текущего локально оптимального решения $\pi(s)$ определяется выражением вида: $k = \sum_{l=1}^{L} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} | p_{ij}^{l}(s+g) - p_{ij}^{l}(s) | / 2$, где g – индекс промежуточного шага алгоритма, на котором выполняется формирование нового решения $\pi(s+g)$ на основе текущего локально оптимального решения $\pi(s)$. При $k = 1$ положение задания *i*-го типа изменяется в каждой по-

следовательности π^l ($l = \overline{1,L}$), при $k = 2$ – в каждой паре последовательностях π^l ($l = \overline{1,L}$) и так далее.

Алгоритм определения *j*-ых позиций рассматриваемого задания *i*-го типа в последовательностях π^l ($l = \overline{1,L}$) предполагает: 1) размещение задания *i*-го типа в последовательностях π^l ($l = \overline{1,L}$) путем добавления его в конец каждой из них; 2) изменение положения задания в π^l ($l = \overline{1,L}$) на одну позицию ближе к началу последовательностей в соответствии с текущим значением метрики *k* окрестности O_k (в каждой последовательности π^l (при *k=1*), в каждой паре последовательностях π^l (при *k=2*) и так далее (при $k \le k^{max}$) в зависимости от значения метрики *k* окрестности O_k); 3) изменение положения задания *i*-го типа в последовательностях π^l обуславливает изменение значения критерия *f*, при этом направления дискретных градиентов критерия *f* [103], обозначенные как *g*, сопоставляются с группами последовательностей π^l, в которых изменяется положение рассматриваемого задания *i*-го типа (рассматриваются левый $\nabla_g^- f < 0$ либо правый $\nabla_g^+ f \ge 0$ дискретные градиенты критерия f [103]), то есть $\nabla_g^- f(\pi(s)) < 0$ – левый дискретный градиент критерия f, соответствующий расписанию $\pi(s+g)$, сформированному на основе расписания $\pi(s)$, для которого положение задания *i*-го типа в π^l зафиксировано на *s*-м шаге; 4) если выполняется $\nabla_g^- f < 0$ вдоль нескольких направлений *g*, то среди всех *g*, для которых они истинны, выбирается то направление *g'*, для которого $\max\limits_g(\left|\nabla_g^- f(\pi(s)) < 0\right|)$; 5) в тех последовательностях π^l, в которых изменение положения задания *i*-го типа гарантирует выполнение условия $\max\limits_g(\left|\nabla_g^- f(\pi(s)) < 0\right|)$, позиции задания фиксируются (рассматриваемое решение фиксируется как локально оптимальное), после чего действия по определению позиций задания *i*-го типа в последовательностях π^l ($l = \overline{1,L}$) повторяются; 6) если при поиске локально оптимального решения в окрестности O_k с меньшей метрикой *k* такое решение не найдено, то значение метрики увеличивается на 1, после чего положение рассматриваемого задания *i*-го типа изменяется на одну позицию ближе к началу последовательностей π^l ($l = \overline{1,L}$), количество которых соответствует значению метрики *k* (при условии $k \le k^{max}$). С целью синтеза алгоритма формирования статических расписаний выполнения заданий Greedy Scheduler введены обозначения: *i'* – индекс типа задания, позиции *j* которого в последовательностях π^l ($l = \overline{1,L}$) определяются; j^{max} – индекс столбцов матриц

P^l ($l=\overline{1,L}$), в *i'*-е строки которых добавляются значения 1, соответствующие позиции в π^l ($l=\overline{1,L}$) текущего рассматриваемого задания *i'*-го типа (индекс столбца j^{max} соответствует концам последовательностей π^l ($l=\overline{1,L}$), где размещается задание *i'*-го типа); j_l – индексы столбцов матриц P^l ($l=\overline{1,L}$), соответствующие текущим *j*-м позициям в π^l задания рассматриваемого *i'*-го типа; *m* – количество заданий, размещенных в последовательностях π^l ($l=\overline{1,L}$) до текущего *s*-го шага алгоритма; M_s – множество идентификаторов последовательностей π^l, в которых на текущем шаге алгоритма возможно изменение порядка выполнения заданий; N_s^p – множество направлений *g* изменения критерия *f* на *(s+g)*-м шаге алгоритма, в которых выполняется условие $\nabla_g^- f<0$ для сформированных решений $\pi(s+g)$; I – множество типов заданий.

Инициализация параметров алгоритма перед началом его реализации предполагает задание их значений следующим образом: $I=\{1,2,3,..,n\}$; $m=0$; $j^{max}=1$, $s=1$. Также задается значение максимальной метрики k^{max}. Алгоритм Greedy Scheduler определения позиций заданий *i*-ых типов ($i=\overline{1,n}$) в последовательностях π^l ($l=\overline{1,L}$) содержит следующие шаги:

1) определит идентификатор типа задания*i'*, размещаемого в последовательностях π^l ($l=\overline{1,L}$): $i'=min\{i \mid i\in I\}$ (*i'* соответствует индексу строк в матрицах P^l ($l=\overline{1,L}$) и столбцов в матрицах T^{0l} ($l=\overline{1,L}$), значения в которых характеризуют задание этого типа);

2) в *i'* -х строках j^{max}-х столбцов матриц $P^l(s)$ ($l=\overline{1,L}$) задать значения элементов $p^l_{i',j^{max}}=1$ (действия с матрицами $P^l(s)$, связанные с инициализацией элементов j^{max}-х столбцов: $p^l_{i',j^{max}}(s)=1$, $p^l_{h,j^{max}}(s)=0$ при $h=\overline{1,n}$ и $h\neq i'$);

3) инициализировать множество M_s: $M_s=\{1,2,..,L\}$;

4) вычислить значения элементов t^{0l}_{ji} матриц $T^{0l}(s)$ по матрицам $P^l(s)$ ($l=\overline{1,L}$);

5) определить значение критерия $f(s)$ на основе значений элементов матриц $P^l(s)$ и $T^{0l}(s)$ ($l=\overline{1,L}$) (сформированное решение вида $[(P^l(s),T^{0l}(s)) \mid l=\overline{1,L}]$ фиксируется как локально оптимальное $[(P^l,T^{0l}) \mid l=\overline{1,L}]^*=[(P^l(s),T^{0l}(s)) \mid l=\overline{1,L}]$);

6) присвоить индексам j_l ($l=\overline{1,L}$) рассматриваемых столбцов матриц $P^l(s)$ и строк матриц $T^{0l}(s)$ значение j^{max} ($j_l=j^{max}$); если $j^{max}=1$ ($j_l=1$), то перейти на пункт 13;

7) задать значение метрики k окрестности O_k решения $[(P^l, T^{0l}) \mid l = \overline{1,L}]^*$, в которой будет выполняться поиск лучшего решения, равным 1;

8) задать значение g индекса шага формирования промежуточного решения равным 1;

9) в соответствии со значением индекса g и значением метрики k определить группу последовательностях π^l $(l \in M_S)$, в которых будет изменяться положение задания i'-го типа; изменить в последовательностях π^l этой группы порядок выполнения заданий – задание i'-го типа перемещается на одну позицию в начало π^l (действия с матрицами $P^l(s)$ имеют вид: $p^l_{i',j_l-1}(s+g)=1$, $p^l_{i',j_l}(s+g)=0$, $p^l_{h,j_l-1}(s+g)=0$, $p^l_{h,j_l}(s+g)=1$, где h – индексы строк в $P^l(s)$, в которых элементы p^l_{h,j_l-1} в *(j-1)*-м столбце равны *1* до текущего шага алгоритма);

10) вычислить значения элементов t^{0l}_{ji} матриц $T^{0l}(s+g)$ на основе матриц $P^l(s+g)(l=\overline{1,L})$, значение критерия $f(s+g)$ для сформированного решения (в итоге формируются решения $[(P^l(s+g), T^{0l}(s+g)) \mid l = \overline{1,L}]$;

11) модифицировать значение индекса шага g (соответственно, индекса группы последовательностей, в которых изменяется позиция задания i'-го типа, и индекса направления изменения значения критерия f): $g=g+1$; если $g > \left\lfloor \frac{|M_s|}{k} \right\rfloor$ (где $\lfloor . \rfloor$ – операция округления в меньшую сторону), то перейти на пункт 12; если $g \le \left\lfloor \frac{|M_s|}{k} \right\rfloor$, то перейти на пункт 9;

12) вычислить значения левых $\nabla^-_g f(s)$ либо правых $\nabla^+_g f(s)$ дискретных градиентов критерия f для решения $[(P^l, T^{0l}) \mid l = \overline{1,L}]^*$ и каждого решения $[(P^l(s+g), T^{0l}(s+g)) \mid l = \overline{1,L}]$ следующим образом [103]:

а) $\nabla^-_g f(s) = [f(s+g) - f(s)] < 0$, б) $\nabla^+_g f(s) = [f(s+g) - f(s)] \ge 0$;

добавить индексы g групп последовательностей π^l, для которых $\nabla^-_g f(s) < 0$, в множество N^p_s: $N^p_s = N^p_s \cup \{g\}$; если $N^p_s = \varnothing$, то перейти на пункт 15;

13) выбрать в множестве N^p_s направление g', для которого модуль отрицательного левого градиента критерия f наибольший: $g' \to \max\limits_{g}(|\nabla^-_g f(s)|)$ при $\nabla^-_g f(s) < 0$;

14) зафиксировать полученное решение $[P^l(s+g), T^{0l}(s+g) \mid l=\overline{1,L}]$ как локально оптимальное: $[(P^l, T^{0l}) \mid l=\overline{1,L}]^* = [P^l(s+g), T^{0l}(s+g) \mid l=\overline{1,L}]$, модифицировать значение номера шага алгоритма $s = s+g$; модифицировать значения индексов j_l столбцов, идентифицирующих местоположение в π^l рассматриваемого задания i' -го типа в матрицах P^l, соответствующих g'-ой группе последовательностей: $j_l = j_l - 1$; выполнить проверку условия $j_l > 1$ для каждой матрицы P^l ($l \in M_s$); если условие $j_l > 1$ для всех матриц P^l таких, что $l \in M_s$, выполняется, то реализовать переход на пункт 7; если условие $j_l > 1$ для матриц P^l таких, что $l \in M_s$, не выполняется, то соответствующие индексы l исключить из M_s: $M_s = M_s \setminus \{l\}$; если $M_s \neq \varnothing$, то перейти на пункт 7; если $M_s = \varnothing$, то перейти на пункт 16;

15) если $N_s^p = \varnothing$, то модифицировать значение k метрики окрестности O_k: $k = k+1$, если $k > k^{max}$, то перейти на пункт 16; если $k \leq k^{max}$, то перейти на пункт 8;

16) модифицировать множество I: $I = I \setminus \{i'\}$; если для множества I выполняется условие $I = \varnothing$, то перейти на пункт 17; если $I \neq \varnothing$, то перейти на пункт 1;

17) останов алгоритма.

Результаты формирования последовательностей в виде диаграмм Ганта для количества типов заданий $n=5$ и различного числа приборов КС представлены на рисунках 3.1, 3.2.Для определения возможности идентификации локально оптимальных решений с использованием алгоритма Greedy Scheduler, сформулирована и доказана следующая теорема.

Теорема 3.1. Алгоритм Greedy Scheduler обладает свойствами «жадных» алгоритмов (является «жадным» алгоритмом), поэтому его использование позволяет получить локально оптимальные расписания выполнения единичных заданий в КС.

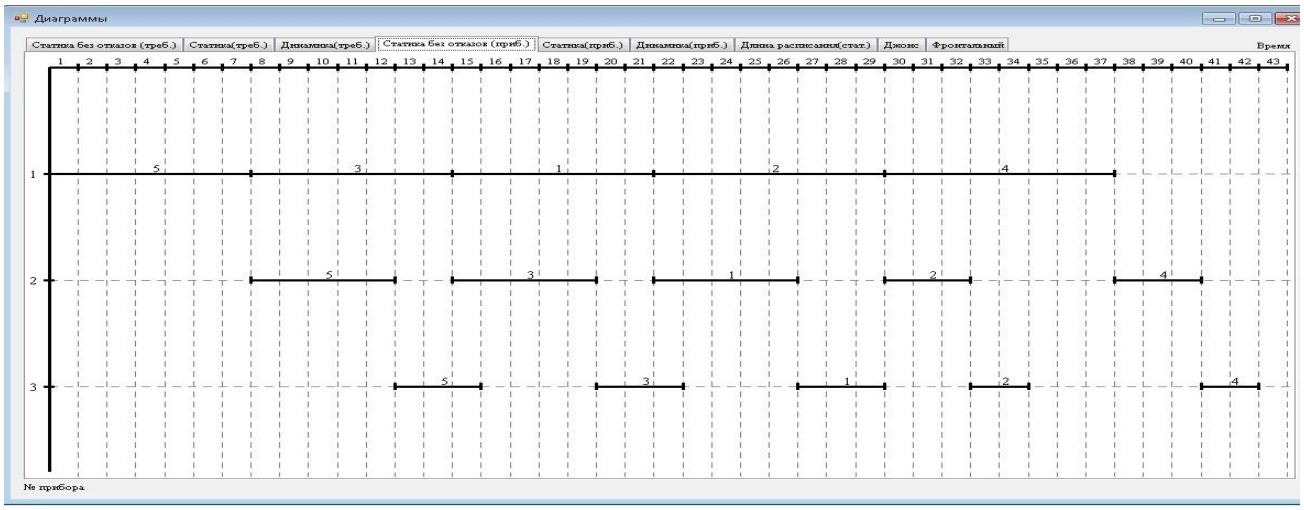


Рисунок 3.1 – Вид последовательностей выполнения ЕЗ в КС при $n=5$ и $L=3$

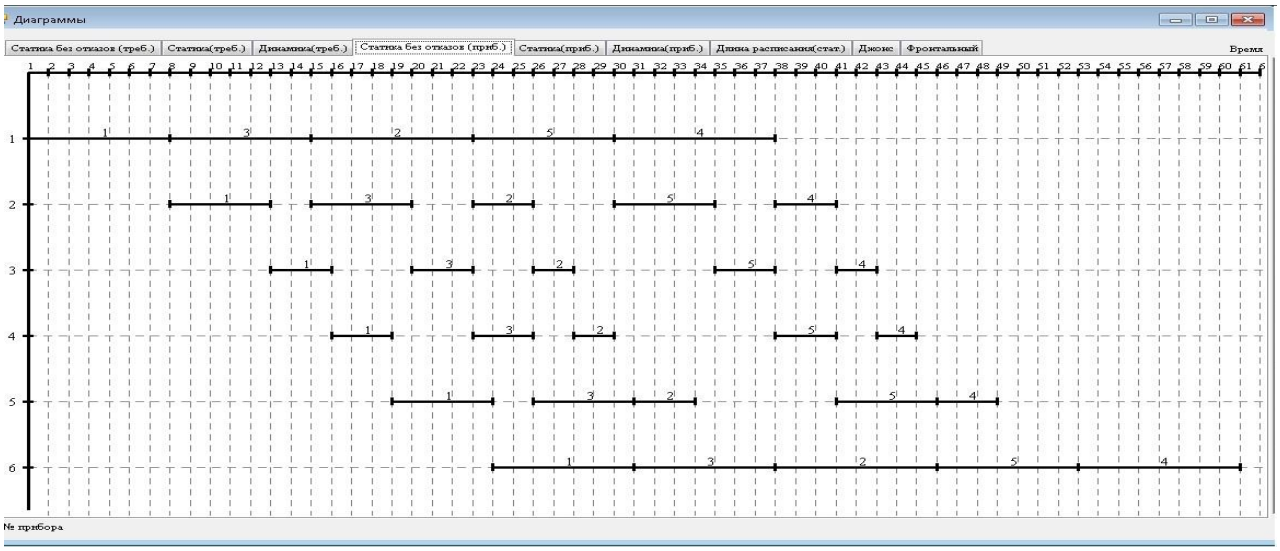


Рисунок 3.2 – Вид последовательностей выполнения ЕЗ в КС при $n=5$ и $L=6$

Доказательство Теоремы 3.1 приведено в **Приложении 1**. При доказательстве использованы положения [103, 114]. Программная реализация метода построения расписаний позволила исследовать получаемые с его использованием решения в сравнении с решениями, полученными другими методами. Решения, полученные с использованием алгоритма Greedy Scheduler, сравниваются с решениями, полученными методом Джонсона [8], фронтальным методом с возрастанием длительностей выполнения заданий [18], ГА [20, 21] и методом отжига [18]. Критерием, используемым при реализации этих исследований, является момент времени окончания выполнения заданий в расписании (критерий имеет вид: $\max\limits_{i,j}(\overline{t_{ji}^{L}})$). Для задачи Джонсона в [8] доказана теорема об одинаковом виде последовательностей выполнения заданий на первом и втором, а также на последнем и предпоследнем приборах КС. Поэтому в случае трех приборов КС последовательности выполнения заданий на них одинаковы. Результаты исследований методов обобщены на графиках, представленных на рисунке 3.3. Анализ результатов показал, что при малом количестве типов заданий (5-15 типов) алгоритм Greedy Schedule гобеспечивает на 3-8% лучшие решения. При увеличении количества типов заданий до 20- 30 алгоритм Greedy Scheduler обеспечивает на 10-15% лучшие решения, чем указанные методы. Выполнено сравнение решений, полученных с использованием предложенного алгоритма и другими метаэвристическими алгоритмами, при этом использован критерий(3.4). Результаты исследований результатов, полученных метаэвристическими алгоритмами и алгоритмом Greedy Scheduler, представлены на рисунках 3.4-3.6.

Анализ результатов показал, что при разном количестве обрабатывающих приборов (трех, шести, девяти приборах КС) для малого количества типов заданий (5-15 типов) разрабо-

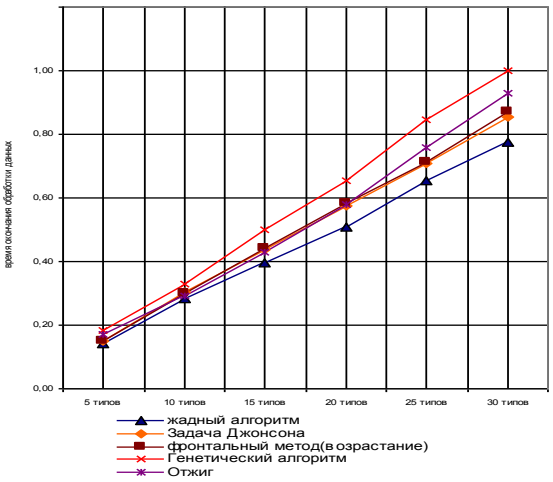


Рисунок 3.3 – Сравнение моментов времени окончания выполнения заданий в решениях, полученных разными методами(для $\max_{i,j}(\overline{t_{ji}^{L}})$)

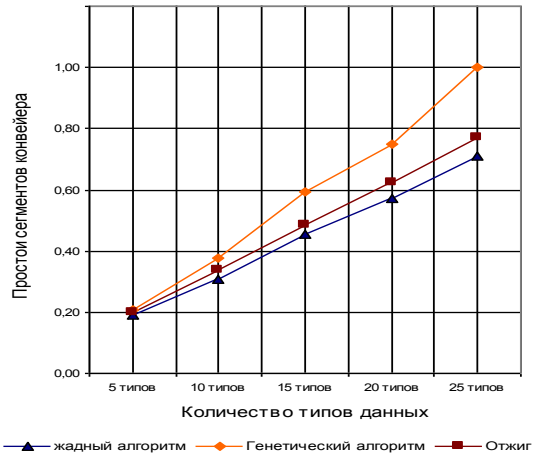


Рисунок 3.4 – Сравнение простоев приборов КС в решениях, полученных разными методами ($L=3$)

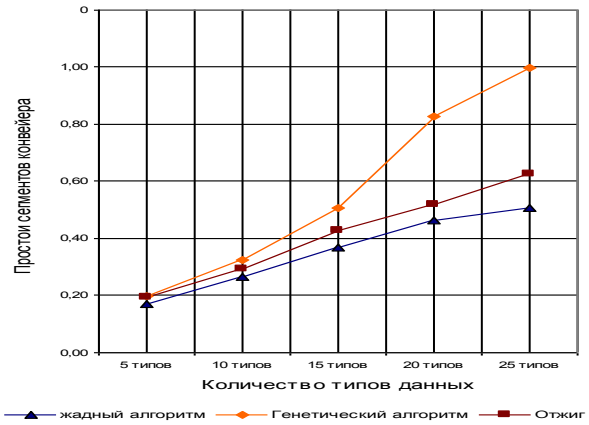


Рисунок 3.5 – Сравнение простоев приборов КС в решениях, полученных разными методами ($L=6$)

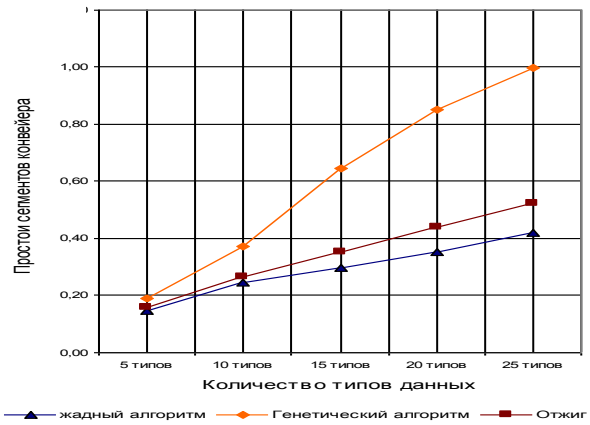


Рисунок 3.6 – Сравнение простоев приборов КС в решениях, полученных разными методами ($L=9$)

ботанный алгоритм обеспечивает большее снижение простоев приборов в сформированных решениях на 8-20% по сравнению с перечисленными метаэвристчиескими алгоритмами. При увеличении количества типов ЕЗ до 20-30, разработанный жадный алгоритм обеспечивает большее снижение на 15-50% простоев приборов КС в сравнении с рассматриваемыми метаэвристические методы. Таким образом, разработанный алгоритм составления расписаний выполнения единичных заданий в КС является более эффективным, чем известные метаэвристические алгоритмы. В тоже время в отличии от задачи Джонсона и фронтального метода построения расписаний этот алгоритм позволяет определять порядок выполнения заданий для большего, чем 2, количества приборов, и при большом количестве типов заданий фиксируется

значительное снижение простоев приборов. Результаты исследований по разработке метода построения статических расписаний выполнения заданий, использующего подход на основе локальной оптимизации, представлены в [115].

3.3. Математическая модель влияния на многостадийные процессы выполнения заданий поступления в систему заданий в моменты времени $d_i > 0$ и метод построения динамических расписаний выполнения заданий в конвейерных системах при различных моментах времени их поступления

Выполненный в главе 1 анализ работ, посвященных методам построения динамических расписаний, показал, что существующие методы предполагают использование: эвристических правил; графов управления, в которые вводятся дополнительные вершины, соответствующие поступающим в моменты $d_i > 0$ заданиям; метаэвристических алгоритмов; подхода на основе анализа директивных сроков окончания выполнения заданий. Указанные алгоритмы обладают недостатками (глава 1), которые обуславливают необходимость разработки новых методов построения динамических расписаний. Модель влияния возмущающих воздействий на запланированный ход процесса выполнения заданий, предусмотренный статическим расписанием, позволяет рассматривать только один их вид – поступление в моменты времени $d_i > 0$ новых заданий, приоритеты которых равны приоритетам заданий в статическом расписании. Разработка методов математического моделирования влияния возмущающих воздействий на ход процесса выполнения заданий в КС и методов построения динамических расписаний, учитывающих различные виды возмущающих воздействий, позволяет уменьшить простои приборов по сравнению со статическими расписаниями, что обеспечивает увеличение эффективности использования ресурсов КС. Реализуется адаптация процессов выполнения ЕЗ в КС к возмущающим воздействиям с целью снижения их влияния. Применение математической модели влияния возмущающих воздействий и метода построения динамических расписаний рассмотрено в Приложении 3 для планирования обработки массивов данных дистанционного зондирования Земли, приоритеты которых равны приоритетам обрабатываемых данных, что показало актуальность их разработки.

Постановка задачи построения расписаний выполнения заданий в КС предполагает, что моменты времени их поступления являются различными ($d_i \geq 0$). Для решаемой задачи являются заданными множества N_1 и N_2 заданий, выполняемых в системе. К множеству N_1 относятся задания n типов, для которых $d_i = 0$ и для которых формируется статическое расписание. Множество N_2 – это задания, поступающие в систему в моменты времени $d_i > 0$. Предполага-

ется, что во второе множество входят задания *k* типов. Общее количество заданий, выполняемых в системе равно (*n*+*k*). Задания множества N_2 упорядочены в соответствии со значениями $d_i > 0$. Решение задачи построения расписаний осуществляется при условии, что параметры $d_i > 0$ считаются детерминированными и определяются при поступлении новых заданий в систему для выполнения.

Особенностью построения динамических расписаний является размещение заданий, поступивших в систему в моменты времени $d_i > 0$ ($i = \overline{n+1,n+k}$), в последовательностях π^l ($l = \overline{1,L}$), которые сформированы при построении статического расписания. Формулировка алгоритма метода построения статических расписаний выполнения заданий с $d_i = 0$ изложена в разделе 3.2. В сформированное статическое расписание добавляются новые задания, поступившие в систему в моменты времени $d_i > 0$. Выбор локально оптимального решения при построении динамических расписаний осуществляется в соответствии критерием (3.4).

Задания, входящие в множество N_2, упорядочены в соответствии со значениями $d_i > 0$:

$$N_2 = \{ i_{n+1}, i_{n+2}, ..., i_{n+k} \mid d_{i_{n+g}} > 0, d_{i_{n+(g-1)}} \le d_{i_{n+g}}, g = \overline{1,k} \}.$$

Обозначение $i_{n+g} \in N_2$ ($g = \overline{1,k}$) соответствует заданию *i*-го типа с $(n+g)$-м порядковым номером в множестве N_2. Дальнейшие рассуждения выполнены для задания одного из типов $i_{n+g} \in N_2$, позиции которого в последовательностях π^l ($l = \overline{1,L}$) определяются. Аналогичные действия выполняются для любого задания $i_{n+g} \in N_2$ ($g = \overline{1,k}$).

Синтезированный в работе метод математического моделирования влияния возмущающих воздействий на ход процесса выполнения заданий, предусмотренный статическим расписанием, предполагает, что в сформированных последовательностях π^l ($l = \overline{1,L}$) реализуется определение заданий, порядок которых не может быть изменен, и определение заданий, для которых порядок выполнения может быть изменен с учетом вида возмущающего воздействия. Метод математического моделирования влияния возмущающих воздействий на ход процесса выполнения ЕЗ в КС предусматривает определение для каждого прибора последовательностей π_1^l и π_2^l, входящих в последовательность π^l ($l = \overline{1,L}$), таких, что:

– в последовательностях π_1^l порядок выполнения заданий не может быть изменен;

– в последовательностях π_2^l порядок выполнения заданий формируется при учете поступивших в моменты времени $d_i > 0$ новых заданий.

Тогда в соответствии с предложенным методом построение математических моделей влияния возмущающих воздействий на ход процесса выполнении ЕЗ в КС, предусмотренный статическим расписанием, предполагает для каждого вида возмущающих воздействий определение условий, которые позволят сформировать последовательности π_1^l и π_2^l. В условиях, позволяющих определить последовательности π_1^l и π_2^l, выполняется учет вида возмущающих воздействий. Таким образом, указанный метод математического моделирования влияния возмущающих воздействий на ход процесса выполнения заданий, предусмотренный статическим расписанием интерпретируется одинаковым образом при построении моделей для каждого вида этих воздействий. Конкретный вид возмущающего воздействия учитывается при синтезе условий определения последовательностей π_1^l и π_2^l, которые образуют математическую модель влияния этого воздействий на многостадийных процесс выполнения ЕЗ в КС.

Для построения дальнейших рассуждений выполнен переход к обозначениям типов заданий и их позиций в последовательностях π^l ($l=\overline{1,L}$) в виде i_j^l, где *j* – позиция задания *i*-го типа в последовательности π^l на *l*-м приборе КС. Формулировка алгоритма построения динамических расписаний предваряется синтезом условий формирования последовательностей π_1^l и π_2^l, входящих в последовательности π^l, вид которых определен при построении статического расписания либо на предыдущих итерациях алгоритма формирования динамического расписания (синтезом математической модели влияния возмущающего воздействия соответствующего вида). Сформированные на (*s-1*)-м шаге алгоритма последовательности выполнения заданий $\pi^l(s-1)$ имеют вид $\pi^l(s-1)=\{i_1^l, i_2^l, ..., i_{n+(g-1)}^l\}_{s-1}$. Тогда вид последовательностей $\pi^l(s)$ с добавленным в них заданием $i_{n+g} \in N_2$ следующий:

$$\pi^l(s)=\pi^l(s-1)\cup\{i_{n+g}\}, \text{ где } \pi^l(s-1)=\{i_1^l, i_2^l, ..., i_{n+(g-1)}^l\}_{s-1},$$
$$\pi^l(s)=\{i_1^l, i_2^l, ..., i_{n+(g-1)}^l, i_{n+g}^l\} \ (g=\overline{1,k}). \qquad (3.5)$$

Выражение (3.5) соответствует начальному виду последовательностей $\pi^l(s)$, в которых в ходе реализации алгоритма определяются позиции задания $i_{n+g} \in N_2$. К моменту времени $d_{i_{n+g}} > 0$ ($i_{n+g} \in N_2$) некоторые задания i_j^l в последовательностях $\pi^l(s-1)$ выполнены, находятся в процессе выполнения, либо находятся в ожидании начала выполнения. Тогда в

последовательностях $\pi^l(s-1)$ реализуется выделение двух последовательности $\pi_1^l(s-1)$ и $\pi_2^l(s-1)$ в соответствии с условиями:

$$\pi_1^l(s-1)=\{ i_1^l, i_2^l, ..., i_{q_l}^l \mid t_{i_j}^{0l} \le d_{i_{n+g}},\ j=\overline{1,q_l} \},\quad (3.6)$$

$$\pi_2^l(s-1)=\{ i_{q_l+1}^l, i_{q_l+2}^l, ..., i_{n+(g-1)}^l \mid t_{i_j}^{0l} > d_{i_{n+g}},\ j=\overline{q_l+1, n+(g-1)} \}.\quad (3.7)$$

Так как i_{n+g} – это идентификатор задания, добавляемого в последовательности $\pi^l(s)$ ($l=\overline{1,L}$) на текущем *s*-м шаге алгоритма, тогда модифицированный вид последовательности $\pi_2^l(s)(l=\overline{1,L})$ следующий:

$$\pi_2^l(s)=\{ i_{q_l+1}^l, i_{q_l+2}^l, ..., i_{n+(g-1)}^l, i_{n+g}^l \mid t_{i_j}^{0l} > d_{i_{n+g}},\ j=\overline{q_l+1, n+(g-1)} \}.\quad (3.8)$$

Выражение (3.6) позволяет определить задания, порядок выполнения которых в последовательностях $\pi^l(s)$ изменен быть не может (момент времени начала их выполнения предшествует моменту времени поступления заданий $i_{n+g} \in N_2$). В последовательностях $\pi_1^l(s)(l=\overline{1,L})$ задание $i_{q_l}^l$ – это правая ее граница, до которой может изменяться позиция задания i_{n+g} ($g=\overline{1,k}$) в последовательности $\pi_2^l(s)$. Выражение (3.7) позволяет определить в последовательностях $\pi^l(s)$ задания, порядок которых может быть изменен с учетом задания $i_{n+g} \in N_2$. Таким образом, рассматриваемое на текущем шаге алгоритма задание i_{n+g} может занимать в последовательностях $\pi_2^l(s)$ любую позицию (если это гарантирует улучшение значения критерия (3.4)) до задания $i_{q_l}^l$, которое является правой границей последовательности $\pi_1^l(s)(l=\overline{1,L})$. Выражения (3.5)-(3.8) являются математической моделью влияния возмущающего воздействия в виде поступления в КС в моменты времени $d_i > 0$ заданий, приоритеты которых равны приоритетам выполняемых заданий, на ход многостадийного процесса реализации действий с ними, предусмотренный статическим расписанием.

Исходной информацией для решения задачи оптимизации положения заданий из множества N_2 в последовательностях $\pi^l(s)(l=\overline{1,L})$ на *s*-м шаге алгоритма являются: 1) тип задания $i_{n+g} \in N_2$, позиции которого в последовательностях $\pi^l(s)(l=\overline{1,L})$ определяются; 2)

момент времени $d_{i_{n+g}} > 0$ поступления задания в систему; 3) расписание $\pi(s-1)$, сформированное на (*s-1*)-м шаге алгоритма, состоящее из последовательностей $\pi^l(s-1)=\{i_1^l, i_2^l, \ldots i_{n+(g-1)}^l\}$ ($l=\overline{1,L}$) (в последовательностях $\pi^l(s-1)$ ($l=\overline{1,L}$) в соответствии с условиями (3.6) и (3.7) определяются последовательности $\pi_1^l(s)$ и $\pi_2^l(s)$). Количество заданий в последовательностях $\pi^l(s-1)$, состоящих из последовательностей $\pi_1^l(s-1)$ и $\pi_2^l(s-1)$, равно *n+(g-1).*

Введем в рассмотрение множества N^l ($l=\overline{1,L}$) – множества типов заданий в последовательностях $\pi_2^l(s-1)$, порядок которых при построении динамического расписания может быть изменен. На основе (3.7) и сформированного вида последовательностей π_2^l для каждого *l*-го прибора КС определяется множество N^l ($l=\overline{1,L}$) заданий, порядок которых в последовательностях π_2^l будет определяться. Множество N^l для *l*-го прибора имеет вид: $N^l=\{i_{q_l+1}^l, i_{q_l+2}^l, \ldots, i_{n+(g-1)}^l\}$. Каждое из сформированных таким образом множеств N^l дополняется заданием (i_{n+g})-го типа, размещаемым в π_2^l ($N^l = N^l \cup \{i_{n+g}\}$, $l=\overline{1,L}$). Построение динамических расписаний для заданий, которые не были выполнены к моменту времени $d_{i_{n+g}} > 0$ поступления задания i_{n+g}, обеспечивается введением в рассмотрение множества N_{np} (*not processed*): $N_{np} = \bigcup_{l=1}^{L} N^l$.

Для синтеза алгоритма построения динамических расписаний предварительно введен в рассмотрение способ формирования последовательностей π_2^l ($l=\overline{1,L}$) и способ определения порядков заданий в них, соответствующих минимальному значению критерия *f*. Расчет значений критерия (3.4) возможен в случае, когда количества заданий в последовательностях π^l ($l=\overline{1,L}$) являются одинаковыми, при этом в π^l размещены задания одинаковых типов. Если проинтерпретировать π^l ($l=\overline{1,L}$) как упорядоченные множества заданий, то для расчета значений критерия (3.4) необходимо, чтобы $|\pi^l| = |\pi^{l'}|$ ($l \neq l'$). Способ формирования последовательностей π_2^l ($l=\overline{1,L}$) предусматривает реализацию двух этапов:

1) размещение в π_2^l ($l=\overline{1,L}$) заданий $i \in N_{np}$ таких, что $i \notin \pi_1^l$ и $i \in \pi_1^{l'}$ (задания *i*-го типа не входят в последовательность π_1^l *l*-го прибора КС, но входят в последовательность

$\pi_1^{l'}$ другого l'-го прибора, $l \neq l'$), определение в π_2^l позиций этих заданий, соответствующих локально оптимальному решению по порядкам их выполнения; таким образом, на первом этапе выполняется определение позиций в π_2^l заданий i –х типов, для которых перед началом построения динамического расписания выполняется условие $i \in \left[N_{np} \cap (\bigcup_{l=1}^{L} \pi_1^l) \right]$;

2) размещение в π_2^l заданий i-х типов, для которых перед построением динамического расписания выполняется условие $(i \in N_{np}) \& (i \notin (\bigcup_{l=1}^{L} \pi_1^l))$, определение позиций этих заданий в последовательностях π_2^l; в итоге на втором этапе в последовательностях π_2^l определяются позиции заданий, для которых выполняется условие $(i \in N_{np}) \& (i \notin (\bigcup_{l=1}^{L} \pi_1^l))$, в том числе для рассматриваемого задания $i_{n+g} \in N_2$.

Для реализации первого этапа формирования последовательностей π_2^l необходимо: а) определить задания i-х типов, для которых $i \in \left[N_{np} \cap (\bigcup_{l=1}^{L} \pi_1^l) \right]$, для этих заданий сформировать начальное решение по порядку их выполнения в последовательностях π_2^l ($l = \overline{1,L}$); б) сформировать порядки выполнения заданий, добавленных в π_2^l, с учетом последовательностей π_1^l ($l = \overline{1,L}$), гарантирующие минимизацию значения критерия (3.4).

С целью синтеза первого этапа алгоритма построения динамических расписаний в рассмотрение введено множество $N_{np}^{'}$ ($N_{np}^{'} = \left[N_{np} \cap (\bigcup_{l=1}^{L} \pi_1^l) \right]$). Формирование начального решения по порядкам выполнения заданий в последовательностях π_2^l предполагает добавление в них заданий, для типов iкоторых выполняются условия: $i \in N_{np}^{'}$ и $i \notin \pi_1^l$ ($l = \overline{1,L}$). Типы заданий $i \in N'_{np}$ упорядочиваются в N'_{np} по возрастанию идентификаторов.

В силу приведенных рассуждений порядок шагов алгоритма, формирующего начальное решение по составам последовательностей π_2^l ($l = \overline{1,L}$) для заданий, типы которых $i \in N'_{np}$, имеет следующий вид (на текущем шаге sрассматривается задание i' -го типа):

1) выбрать из множества $N_{np}^{'}$ тип задания i' , размещаемого в последовательностях π_2^l ($l = \overline{1,L}$) в соответствии с условием: $i' = min\{ i \mid i \in N'_{np} \}$;

2) выполнить для задания i' -го типа проверку условия $i' \in \pi_1^l$ (для всех l, $l = \overline{1,L}$): если для некоторой последовательности π_1^l выполняется условие $i' \in \pi_1^l$, то перейти к следующей последовательности π_1^l; если для некоторой последовательности π_1^l выполняется условие $i' \notin \pi_1^l$, то задание i' -го типа добавить в последовательность π_2^l: $\pi_2^l = \pi_2^l \cup \{ i' \}$;

3) удалить i' -й тип задания, добавленного в π_2^l, из N'_{np} : $N'_{np} = N'_{np} \setminus \{ i' \}$; если $N'_{np} \neq \varnothing$, то перейти на пункт 1; если $N'_{np} = \varnothing$, то останов алгоритма.

В результате сформированы последовательности π_2^l ($l = \overline{1,L}$) одного из следующих видов: 1) $\pi_2^l = \varnothing$, если ни одно из заданий в последовательность π_2^l добавлено не было; 2) $\pi_2^l = \{ i^l_{q_l+1}, i^l_{q_l+2}, \ldots, i^l_{q_l+n_l} \}$, где n_l – количество заданий, которые были добавлены в последовательность π_2^l. Во втором случае ($q_l + 1$) – это номер позиции задания в π^l, которое являются первым в последовательности π_2^l на l-м приборе КС.

На основе начального решения (для заданий, размещенных в последовательностях π_2^l ($l = \overline{1,L}$)) реализуется определение порядков выполнения заданий в них, гарантирующих минимум критерия (3.4). При этом учитываются следующие особенности: последовательности π_2^l содержат задания в порядке возрастания идентификаторов i их типов; после формирования начального решения для последовательностей π_2^l количество заданий в π^l ($l = \overline{1,L}$) одинаково. Для определения порядков выполнения заданий в последовательностях π_2^l на основе сформированного начального решения выполнена повторная инициализация множества N'_{np} следующим образом: $N'_{np} = \bigcup_{l=1}^{L} \pi_2^l$, тогда N'_{np} – это множество типов заданий, порядок которых в последовательностях π_2^l будет определяться. Полученное множество N'_{np} упорядочивается по возрастанию идентификаторов типов заданий $i \in N'_{np}$.

Для определения порядков выполнения заданий на основе сформированных последовательностей π_2^l в начальном решении использован подход к изменению их позиций, предложенный в [109-112] (метод чередующихся окрестностей). В соответствии с [109-112] рассматривается некоторая текущая последовательность π_2^l, в которой на предварительном этапе размещено n_l заданий и реализуется перемещение в ней некоторого рассматриваемого зада-

ния из текущей позиции в новое положение (изменение положения задания в π_2^l), либо взаимная перестановка двух различных ЕЗ в этой последовательности.

Обозначим через j_l позицию рассматриваемого задания i'-го типа в π_2^l ($l = \overline{1,L}$). В начальном решении π рассматриваемое задание i'-го типа занимает в последовательностях π_2^l текущую начальную позицию j_l, которая при поиске лучшего решения будет изменяться.

Для начального решения π по порядкам выполнения заданий в последовательностях π^l может быть определена окрестность O_1, состоящая из решений, отличающихся от исходного решения π тем, что в одной из последовательностей π_2^l рассматриваемое задание *i'*-го типа (если оно входит в эти последовательности) перемещается на одну позицию ближе к началу (изменение позиции j_l задания *i'* -го типа). При одновременном изменении положения задания *i'*-го типа сразу в нескольких последовательностях π_2^l может быть выполнен переход от окрестности O_k с метрикой *k* к окрестности O_{k+1} с метрикой *(k+1)* и так далее к окрестности $O_{k^{max}}$ с метрикой k^{max} (k^{max}– максимальное количество последовательностей π_2^l, в которых одновременно может быть изменена позиция задания *i'*-го типа, максимальная метрика окрестности $O_{k^{max}}$). По аналогии с алгоритмом раздела 3.3 ([115]) на *s*-м шаге алгоритма рассматриваемое задание i'-го типа перемещаются на одну позицию к началу в каждой последовательности π_2^l (при $i' \in \pi_2^l$) либо в каждой группе последовательностей π_2^l, количество которых определяется значением метрики *k*. В формируемых окрестностях O_k реализуется определение решений, улучшающих значения критерия (3.4). Если в окрестностях O_k лучшего решения не найдено, то реализуется переход к следующему типу заданий $i' \in N'_{np}$, позиция j_l которого в π_2^l будет определяться.

В соответствии с выполненными рассуждениями, обосновывающими способ построения решений в окрестностях текущего решения, сформулирован алгоритм определения порядков выполнения заданий, размещенных в π_2^l на первом этапе формирования этих последовательностей, обеспечивающих минимизацию суммарных простоев приборов КС. Расписание $\pi(s)$ характеризуется набором матриц $P^l(s)$, $T^{0l}(s)$ ($l = \overline{1,L}$), начальное решение является текущим локально оптимальным, то есть $[(P^l(s), T^{0l}(s)) \mid l = \overline{1,L}]^*$. В разделе 3.3 в рассмотрение введено обозначение N_s^p для множества направлений, в которых при формировании

новых решений (изменении порядков выполнения заданий в последовательностях π_2^l) гарантируется выполнение условия для левого дискретного градиента критерия (3.4) в виде [103]: $\nabla_g^- f(s) < 0$. Алгоритм определения порядков выполнения заданий в последовательностях π_2^l, для типов *i* которых истинно условие $i \in N_{np}^{'}$, гарантирующих минимум критерия (3.4), имеет следующие шаги:

1) синтезировать начальное решение $[(P^l(s), T^{0l}(s)) \mid l = \overline{1,L}]$ по порядкам выполнения заданий в последовательностях π^l; полученное после размещения в π_2^l заданий *i*-х типов ($i \in \left[N_{np} \cap (\bigcup_{l=1}^{L} \pi_1^l) \right]$) решение задать локально оптимальным: $[(P^l, T^{0l}) \mid l = \overline{1,L}]^* = [(P^l(s), T^{0l}(s)) \mid l = \overline{1,L}]$;

2) выбрать из множества $N_{np}^{'}$ тип задания i', для которого определяются позиции j_l в последовательностях π_2^l: $i' = min\{ i \mid i \in N_{np}^{'} \}$;

3) в соответствии с условием $i' \in \pi_2^l$ ($l = \overline{1,L}$) сформировать множество M_s номеров приборов, в последовательностях π_2^l которых находится задание рассматриваемого типа i' ($l \in M_s$ при $i' \in \pi_2^l$); определить начальные позиции j_l задания i'-го типа в π_2^l ($l \in M_s$);

4) задать значение метрики *k* окрестности O_k решения $[(P^l, T^{0l}) \mid l = \overline{1,L}]^*$, в которой будет выполняться поиск лучшего решения, равным 1;

5) выполнить для каждой последовательности π_2^l (при $l \in M_s$) проверку условия $(q_l + 1) < j_l$; если для некоторых последовательностей π_2^l ($l \in M_s$) условие $(q_l + 1) < j_l$ не выполняется, то исключить их индексы l из множества M_s: $M_s = M_s \setminus \{ l \}$; если $M_s \neq \varnothing$, то перейти на пункт 6; если $M_s = \varnothing$, то перейти на пункт 15;

6) задать значение *g* индекса промежуточного решения равным 1;

7) в соответствии со значением g и значением метрики k определить группу последовательностей (индексов *l* последовательностей), в которых изменяются позиции задания *i'*-го типа на текущем шаге; в последовательностях π_2^l ($l \in M_s$) для данной группы изменить положения задания i'-го типа на одну позицию ближе к их началу (изменение позиций j_l рассматриваемого задания в последовательностях π_2^l ($l \in M_s$) выполняется следующим образом:

$p^l_{i',j_l-1}(s+g)=1$, $p^l_{i',j_l}(s+g)=0$, $p^l_{h,j_l-1}(s+g)=0$, $p^l_{h,j_l}(s+g)=1$, где h – индексы строк в матрицах $P^l(l \in M_S)$, в которых элементы p^l_{h,j_l-1} в (j_l-1)-м столбце равны 1);

8) в соответствии с полученным видом матриц $P^l(s+g)(l=\overline{1,L})$ вычислить значения элементов матриц $T^{0l}(s+g)$ ($l=\overline{1,L}$) (сформировать решение $[(P^l(s+g),T^{0l}(s+g))\,|\,l=\overline{1,L}]$); вычислить значение критерия $f(s+g)$;

9) модифицировать значение индекса шага g (индекса группы последовательностей, в которых изменяются позиции задания i'-го типа, и индекса направления изменения значения критерия f): $g=g+1$; если $g > \left\lfloor \frac{|M_s|}{k} \right\rfloor$ (где $\lfloor\cdot\rfloor$ – операция округления в меньшую сторону), то перейти на пункт 10; если выполняется условие $g \le \left\lfloor \frac{|M_s|}{k} \right\rfloor$, то перейти на пункт 7;

10) для $[(P^l,T^{0l})\,|\,l=\overline{1,L}]^*$ и каждого решения $[(P^l(s+g),T^{0l}(s+g))\,|\,l=\overline{1,L}]$ вычислить значения левых $\nabla^-_g f(s)<0$ либо правых $\nabla^+_g f(s)\ge 0$ дискретных градиентов критерия (3.4) [101]; индексы g групп последовательностей π^l, для которых выполняется условие $\nabla^-_g f(s)<0$, добавить в множество N^p_s: $N^p_s = N^p_s \cup \{g\}$; если $N^p_s=\varnothing$, то перейти на пункт 14;

11) выбрать в множестве N^p_s направление g', для которого модуль градиента $\nabla^-_g f(s)<0$ наибольший: $g' \to max(\left|\nabla^-_g f(s)\right|)$ при $\nabla^-_g f(s)<0$;

12) зафиксировать полученное решение $[(P^l(s+g'),T^{0l}(s+g'))\,|\,l=\overline{1,L}]$ как локально оптимальное: $[(P^l,T^{0l})\,|\,l=\overline{1,L}]^* = [(P^l(s+g'),T^{0l}(s+g'))\,|\,l=\overline{1,L}]$, модифицировать значение номера шага алгоритма $s=s+g$; модифицировать значение индекса j_l столбца, идентифицирующего местоположение в π^l_2 рассматриваемого задания i' -го типа в матрице P^l (матрицах P^l), соответствующих g'-ой группе последовательностей π^l_2: $j_l = j_l - 1$;

13) выполнить проверку условия $(q_l+1)<j_l$ для каждого индекса $l \in M_s$ последовательностей π^l_2; если условие $(q_l+1)<j_l$ не выполняется для соответствующих индексов $l \in M_s$ последовательностей π^l_2 $(l \in M_s)$, то исключить индексы l этих последовательностей из множества M_s: $M_s = M_s \setminus \{l\}$; если $M_s \ne \varnothing$, то перейти на пункт 6; если $M_s=\varnothing$, то перейти на пункт 15;

14) если $N_s^p = \varnothing$ (в окрестности O_k решения $[(P^l, T^{0l}) | l = \overline{1,L}]^*$ лучшее решение не найдено), то модифицировать значение метрики k: $k=k+1$; если $k > k^{max}$, то перейти на пункт 15; если $k \le k^{max}$, то перейти на пункт 6;

15) выполнить модификацию множества N'_{np}: $N'_{np} = N'_{np} \setminus \{i'\}$; если $N'_{np} = \varnothing$, то перейти на пункт 16; если $N'_{np} \neq \varnothing$, то перейти на пункт 2;

16) останов алгоритма.

В результате интерпретации алгоритма в последовательностях π_2^l ($l = \overline{1,L}$) определены позиции заданий i-х типов, для которых перед построением динамического расписания выполнялось условие: $i \in N_{np} \cap (\bigcup_{l=1}^{L} \pi_1^l)$. На втором этапе построения динамического расписания определяются позиции в π_2^l ($l = \overline{1,L}$) заданий i-х типов, для которых перед началом построения динамического расписания выполнялось условие: $i \in N_{np} \,\&\, (i \notin \bigcup_{l=1}^{L} \pi_1^l)$.

Тогда множество N'_{np} типов заданий, с которым оперирует алгоритм при реализации второго этапа построения динамического расписания, инициализируется следующим образом: $N'_{np} = \{i \mid i \in N_{np} \,\&\, (i \notin \bigcup_{l=1}^{L} \pi_1^l)\}$ и $N'_{np} = N'_{np} \cup \{i_{n+g}\}$, где $i_{n+g} \in N_2$ – тип задания с $d_{i_{n+g}} > 0$, для которого реализуется определение позиций в последовательностях π_2^l ($l = \overline{1,L}$). Задания, типы которых принадлежат множеству N'_{np}, полученному после реализации первого этапа алгоритма построения динамического расписания, должны быть добавлены в каждую из последовательностей π_2^l ($l = \overline{1,L}$). Для определения их позиций j_l в последовательностях π^l ($l = \overline{1,L}$) выполнена модификация алгоритма, рассмотренного в разделе 3.2. Отличием модифицированного алгоритма от базового, рассмотренного в разделе 3.2, является то, что добавляемое на каждом шаге алгоритма в последовательности π_2^l ($l = \overline{1,L}$) задание может занять любую позицию в них, начиная с $(q_l + 1)$-ой.

Перед реализацией алгоритма построения динамического расписания для заданий, типы которых $i \in N'_{np}$, элементы множества N'_{np} упорядочиваются по возрастанию идентификаторов типов i. Алгоритм построения динамических расписаний путем размещения в π_2^l ($l = \overline{1,L}$) заданий, типы которых $i \in N'_{np}$, имеет следующий порядок шагов:

1) определить тип задания *i'*, размещаемого в π_2^l ($l=\overline{1,L}$): $i'=min\{\, i \mid i \in N'_{np} \,\}$;

2) разместить задание *i'*-го типа в π_2^l ($l=\overline{1,L}$); в *i'* -ой строке столбца j^{max} матриц $P^l(s)$ задать значения, ему соответствующие: $p^l_{i',j^{max}}=1$, $p^l_{h,j^{max}}=0$ при $h=\overline{1,n}$ и $h \neq i'$;

3) инициализировать множество M_s идентификаторов последовательностей π^l, в которых возможно изменение порядка выполнения заданий: $M_s=\{1,2,..,L\}$;

4) на основе матриц $P^l(s)$ ($l=\overline{1,L}$) вычислить значения элементов матриц $T^{0l}(s)$ ($l=\overline{1,L}$); для матриц $P^l(s)$ и $T^{0l}(s)$ ($l=\overline{1,L}$) определить значение критерия $f(s)$((3.4)); сформированное решение в виде $[(P^l(s),T^{0l}(s)) \mid l=\overline{1,L}]$ зафиксировать как локально оптимальное $[(P^l,T^{0l}) \mid l=\overline{1,L}]^* = [(P^l(s),T^{0l}(s)) \mid l=\overline{1,L}]$;

5) присвоить индексам j_l текущих рассматриваемых столбцов матриц $P^l(s)$ и строк матриц $T^{0l}(s)$ значение j^{max} ($j_l=j^{max}$); выполнить проверку условия $j_l>(q_l+1)$ для каждого индекса $l \in M_s$; если условие $j_l>(q_l+1)$ выполняется для всех индексов $l \in M_s$, то перейти на пункт 6; если условие $j_l>(q_l+1)$ для соответствующих индексов *l* последовательностей π^l ($l \in M_s$) не выполняется, то индексы *l* исключить из множества M_s: $M_s=M_s \setminus \{l\}$; если $M_s \neq \varnothing$, то перейти на пункт 6; если $M_s=\varnothing$, то перейти на пункт 15;

6) задать значение метрики *k* окрестности O_k решения $[(P^l,T^{0l}) \mid l=\overline{1,L}]^*$, в которой будет выполняться поиск лучшего решения, равным 1;

7) задать значение *g* индекса шага текущего промежуточного решения равным 1;

8) в соответствии со значением индекса *g* и значением метрики *k* определить группу последовательностях π^l ($l \in M_s$), в которых будет изменяться положение задания *i'*-го типа; изменить в последовательностях π^l этой группы (при неизменных остальных последовательностях) порядок выполнения заданий таким образом, чтобы задание *i'*-го типа перемещается на одну позицию в начало π^l (выполняемые для этого действия с матрицами $P^l(s)$ имеют вид: $p^l_{i',j_l-1}(s+g)=1$, $p^l_{i',j_l}(s+g)=0$, $p^l_{h,j_l-1}(s+g)=0$, $p^l_{h,j_l}(s+g)=1$, где *h* – индексы строк в матрицах $P^l(s)$, в которых элементы p^l_{h,j_l-1} в *(j-1)*-м столбце равны *1* до выполнения текущего шага алгоритма);

9) вычислить значения элементов матриц $T^{0l}(s+g)$($l=\overline{1,L}$) для текущего (s+g)-го шага алгоритма, значение критерия $f(s+g)$ (сформированное решение имеет вид $[(P^l(s+g),T^{0l}(s+g))|l=\overline{1,L}]$;

10) модифицировать значение индекса шага g (соответственно, индекса группы последовательностей, в которых изменяется позиция задания i'-го типа, и индекса направления изменения значения критерия f): $g=g+1$; если $g>\left\lfloor\frac{|M_s|}{k}\right\rfloor$ (где $\lfloor\cdot\rfloor$– операция округления в меньшую сторону), то перейти на пункт 11; если $g\le\left\lfloor\frac{|M_s|}{k}\right\rfloor$, то перейти на пункт 8;

11) вычислить для решения $[(P^l,T^{0l})|l=\overline{1,L}]*$ и каждого решения $[(P^l(s+g),T^{0l}(s+g))|l=\overline{1,L}]$ значения левых $\nabla_g^- f(s)$ (правых $\nabla_g^+ f(s)$) дискретных градиентов критерия f ; индексы g групп последовательностей π^l, для которых выполняется $\nabla_g^- f(s)<0$ добавить в множество N_s^p: $N_s^p=N_s^p\cup\{g\}$; если $N_s^p=\varnothing$, то перейти на пункт 14;

12) выбрать в множестве N_s^p направление g', для которого модуль отрицательного градиента $\nabla_g^- f(s)<0$ наибольший: $g'\to\max_g(|\nabla_g^- f(s)|)$ при $\nabla_g^- f(s)<0$; полученное решение $[(P^l(s+g),T^{0l}(s+g))|l=\overline{1,L}]$ зафиксировать как локально оптимальное: $[(P^l,T^{0l})|l=\overline{1,L}]*=[(P^l(s+g),T^{0l}(s+g))|l=\overline{1,L}]$;

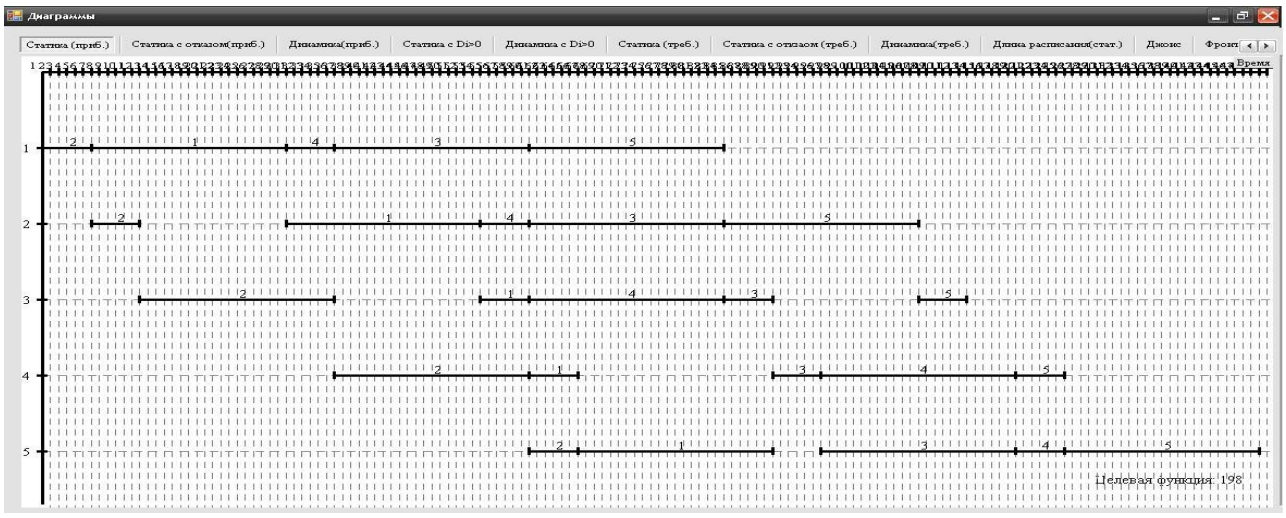
13) модифицировать значение номера шага алгоритма $s=s+g$; модифицировать значения индексов j_l столбцов, идентифицирующих местоположение в π^l рассматриваемого задания i' -го типа в матрицах P^l, соответствующих g'-ой группе последовательностей: $j_l=j_l-1$; выполнить проверку условия $j_l>q_l+1$ для каждого индекса $l\in M_s$; если условие $j_l>q_l+1$ выполняется для всех $l\in M_s$, то перейти на пункт 7; если условие $j_l>q_l+1$ для последовательностей $\pi^l(l\in M_s)$ не выполняется, то индексы l исключить из множества M_s: $M_s=M_s\setminus\{l\}$; если $M_s\neq\varnothing$, то перейти на пункт 7; если $M_s=\varnothing$, то перейти на пункт 15;

14) если $N_s^p=\varnothing$ (в окрестности O_k решения $[(P^l,T^{0l})|l=\overline{1,L}]*$ новое решение, уменьшающее значение критерия f, не найдено), то модифицировать значение метрики k: $k=k+1$; если $k>k^{max}$, то перейти на пункт 15; если $k\le k^{max}$, то перейти на пункт 7;

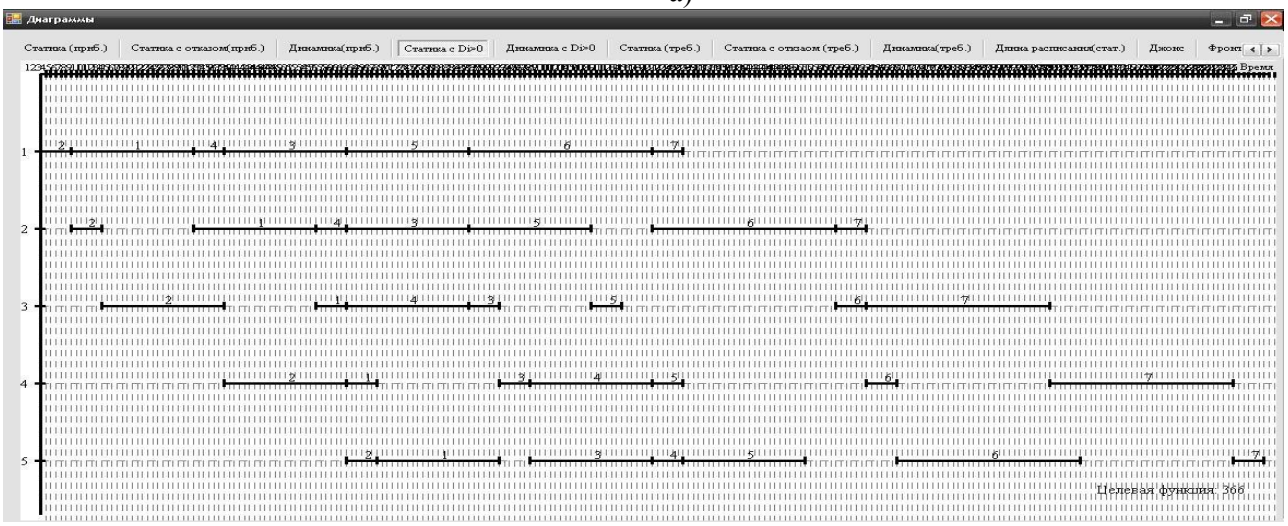
15) модифицировать множество $N'_{пр}$: $N'_{пр} = N'_{пр} \setminus \{ i' \}$;если $N'_{пр} = \varnothing$, то перейти на пункт 16; если $N'_{пр} \neq \varnothing$, то перейти на пункт 1;

16) останов алгоритма.

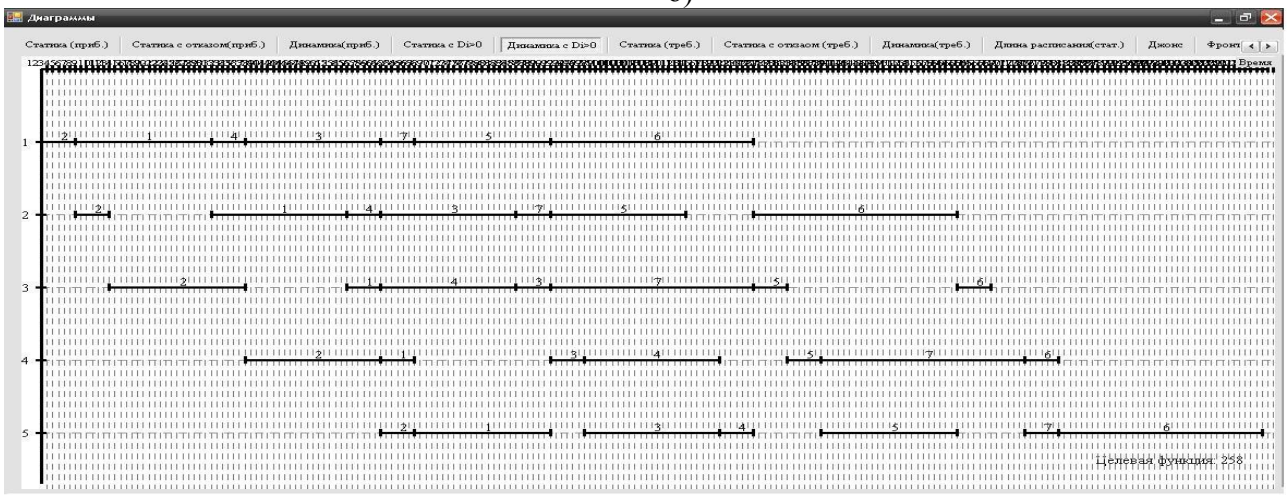
Рассмотренные алгоритмы первого и второго этапов построения динамических расписаний с учетом поступления в систему заданий $i_{n+g} \in N_2$ в моменты времени $d_{i_{n+g}} > 0$ позволяют определить модифицированные виды последовательностей π^l ($l = \overline{1,L}$). Метод построения динамических расписаний реализован программно. Результаты программы в виде диаграмм Ганта представлены на рисунках 3.7 и 3.8. Исследование особенностей построения динамических расписаний с использованием предложенного метода выполнено при задании значений параметров: $min(t_{li})$– минимальная длительность выполнения заданий *i*-х типов ($i = \overline{1,n}$) на *l*-х приборах КС, для которых $d_i = 0$; $max(t_{li}) / min(t_{li})$ – отношение максимальной длительности выполнения заданий *i*-х типов ($i = \overline{1,n}$) на *l*-х приборах КС к минимальной длительности выполнения заданий этих типов; $min(t_{li_{n+g}})$ – минимальная длительность выполнения заданий (i_{n+g})-х типов ($g = \overline{1,k}$) на *l*-х приборах КС, для которых $d_{i_{n+g}} > 0$, $max(t_{li_{n+g}}) / min(t_{li_{n+g}})$ – неоднородность длительностей выполнения заданий (i_{n+g})-х типов ($g = \overline{1,k}$) . Исследования динамических расписаний выполнения ЕЗ в КС предполагают проведение экспериментов по определению: суммарных простоев приборов в случае, если поступающие задания (i_{n+g})-х типов добавляются в статическое расписание без его изменения; суммарных простоев приборов в случае, если для поступающих заданий (i_{n+g})-х типов формируются динамические расписания. Исследования направлены на то, чтобы определить степень уменьшения суммарных простоев приборов КС при реализации динамических расписаний (ДР), сформированных с учетом заданий (i_{n+g})-х типов, по сравнению со статическими расписаниями (СР), в которые добавляются задания (i_{n+g})-х типов без изменения последовательностей π^l. На рисунках 3.9, 3.10 отображены результаты исследований снижения простоев приборов при построении динамических расписаний по сравнению со статическими расписаниями. Снижение общих простоев приборов при построении динамических расписаний по сравнению со статическими расписаниями определяется выражением вида: $(f_{ст} - f_{дин}) / f_{ст}$, где $f_{ст}$ – общие простои приборов КС в статическом расписании с обавлением в них заданий i_{n+g} без изменения вида последовательностей π^l ($l = \overline{1,L}$), $f_{дин}$ – простои приборов при



а)

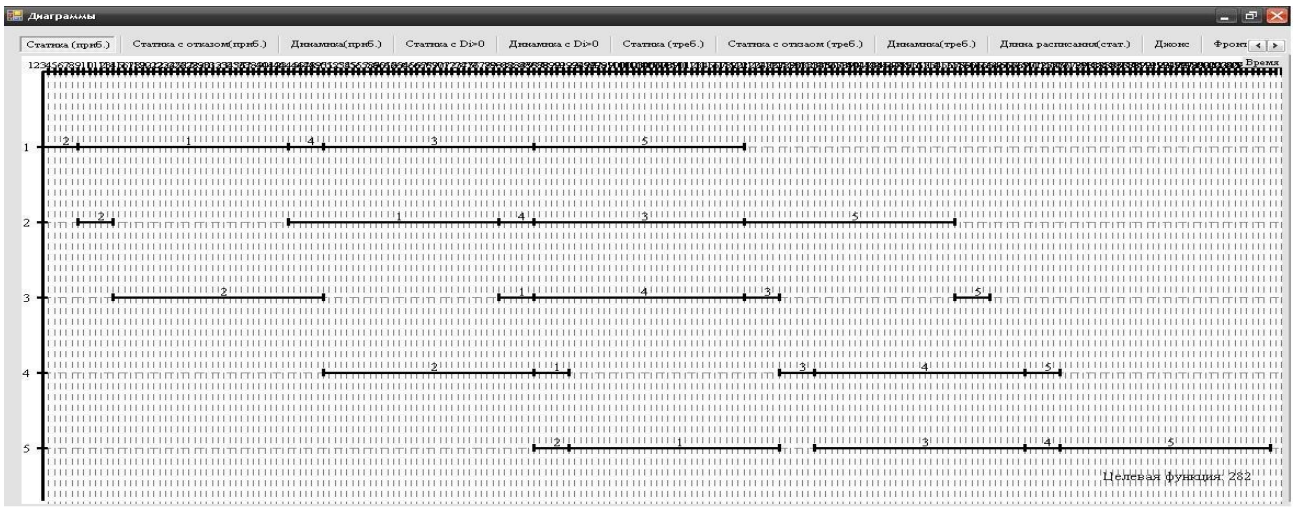


б)

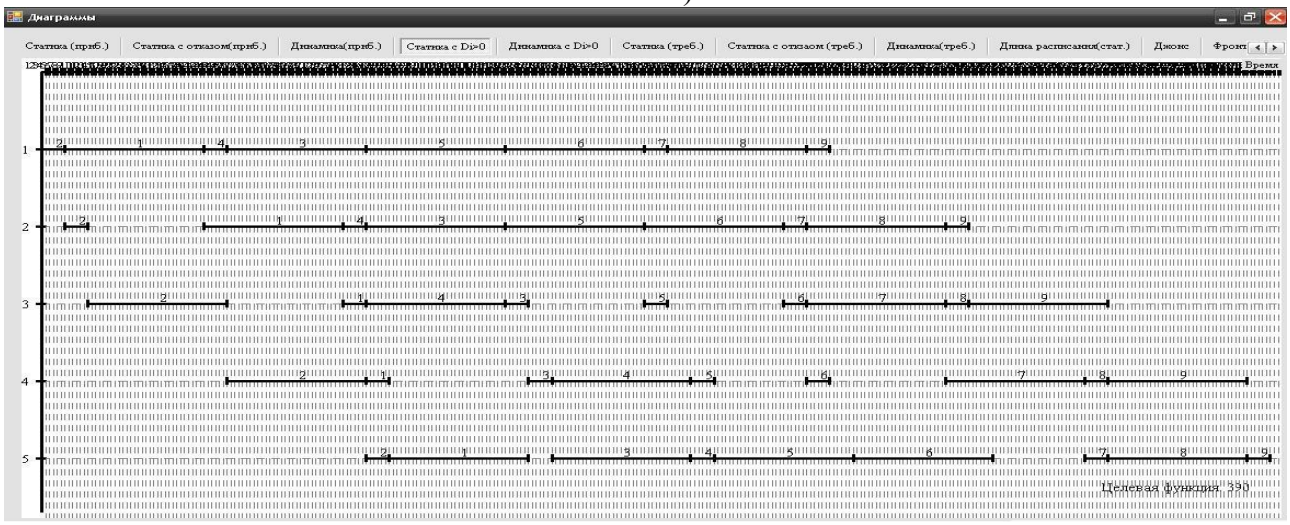


в)

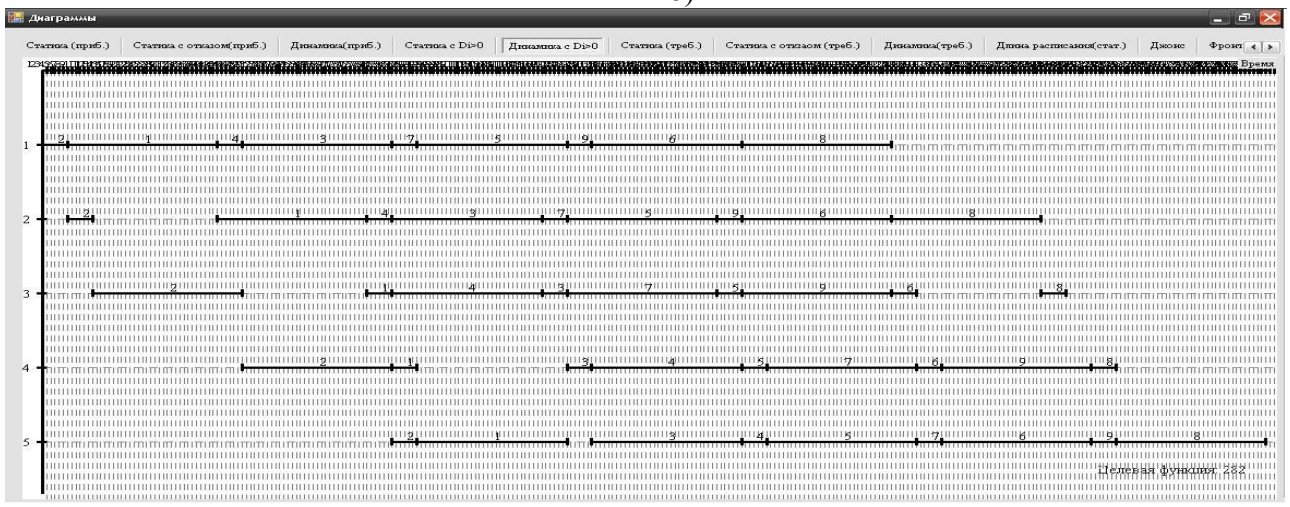
Рисунок 3.7– Результаты функционирования программы построения динамических расписаний при $n=5$, $L=5$, $k=2$: а) статическое расписание для заданий с $d_i=0$ ($i=\overline{1,n}$); б) статическое расписание, дополненное заданиями с $d_{i_{n+g}}>0$ ($g=\overline{1,2}$); в) динамическое расписание, сформированное на основе статического, для заданий с $d_{i_{n+g}}>0$ ($g=\overline{1,2}$)



а)

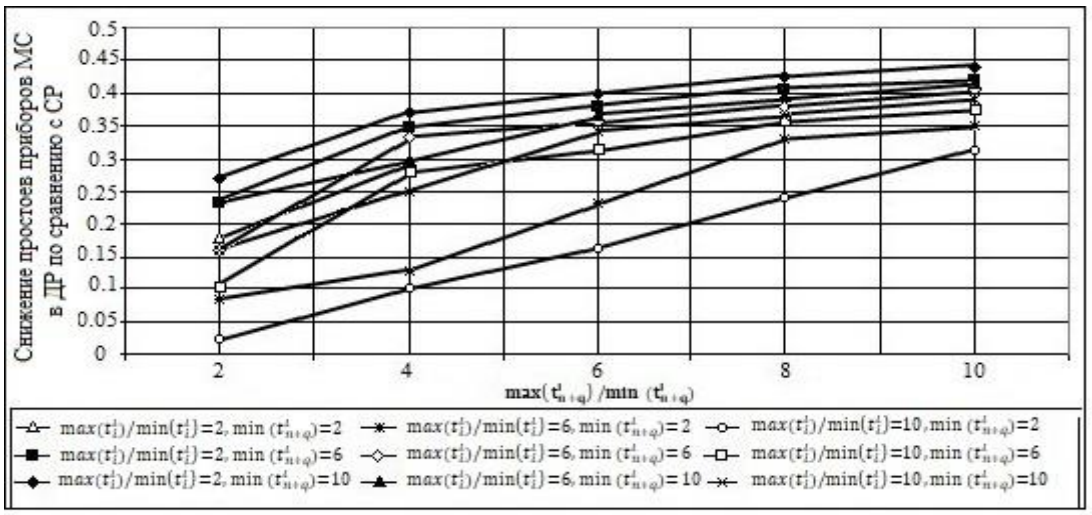


б)

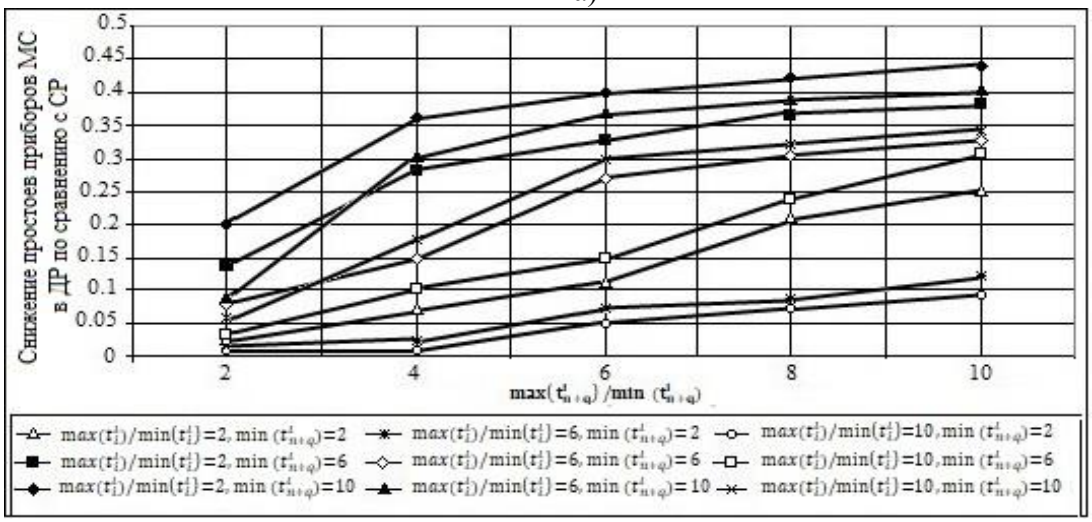


в)

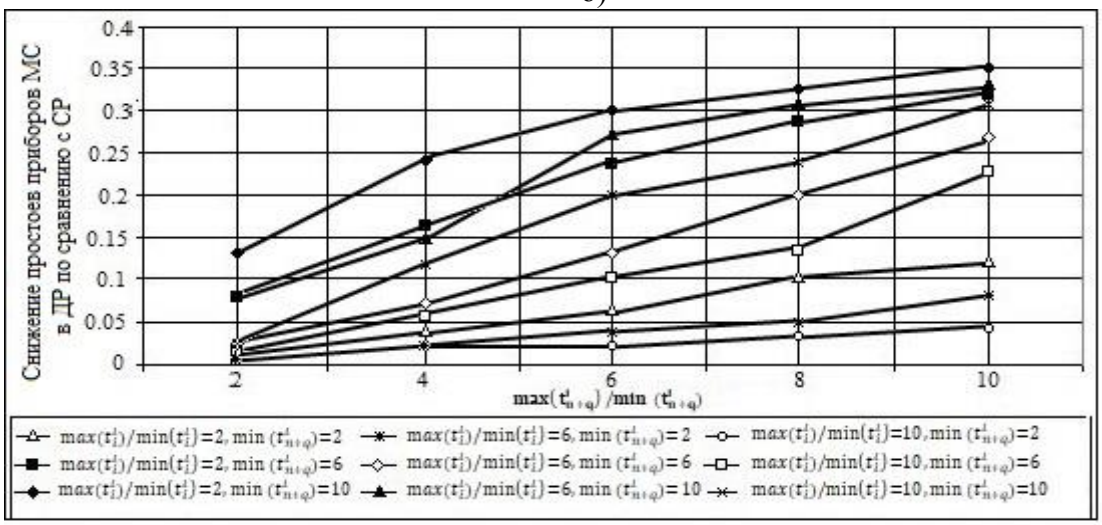
Рисунок 3.8 – Результаты функционирования программы построения динамических расписаний при $n=5$, $L=5$, $k=4$: а) статическое расписание для заданий с $d_i=0$ ($i=\overline{1,n}$); б) статическое расписание, дополненное заданиями с $d_{i_{n+g}}>0$ ($g=\overline{1,4}$); в) динамическое расписание, сформированное для заданий с $d_{i_{n+g}}>0$ ($g=\overline{1,4}$)



а)

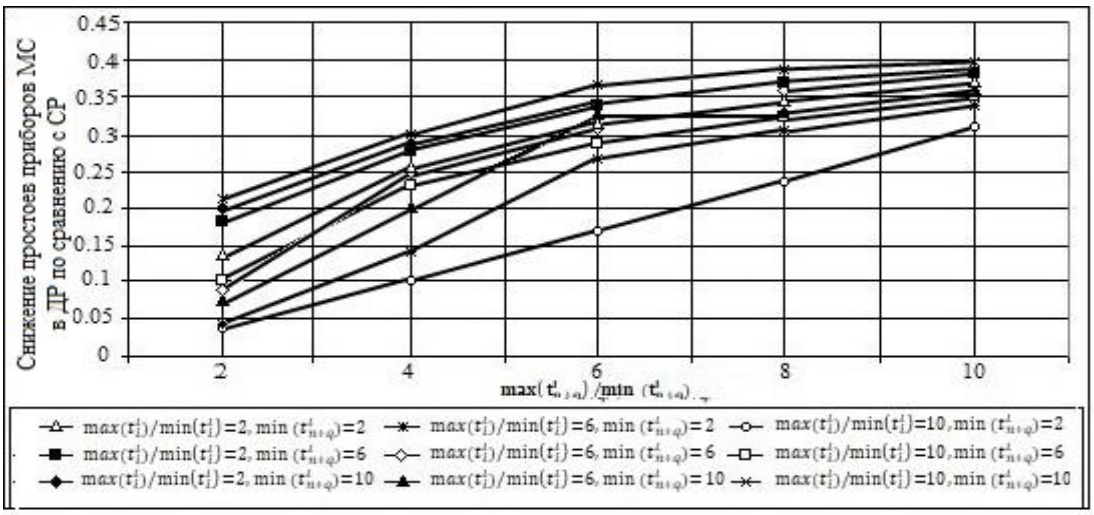


б)

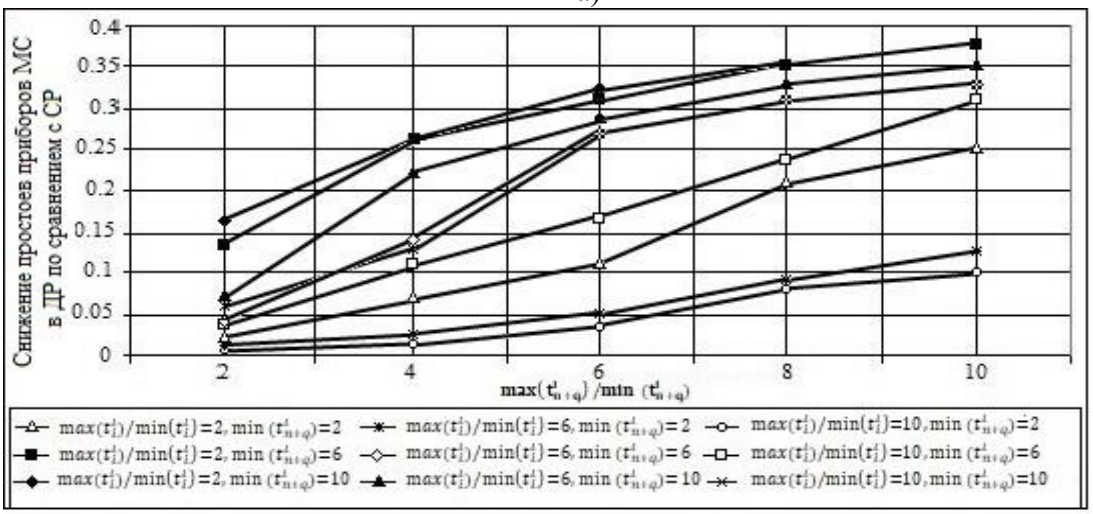


в)

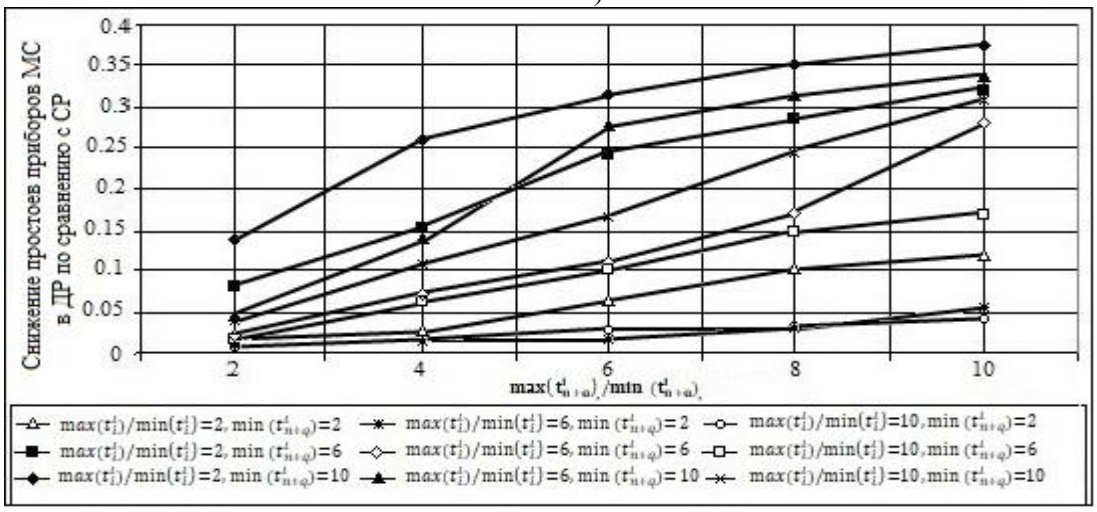
Рисунок 3.9– Снижение простоев приборов КС при построении динамических расписаний при различных моментах времени поступления заданий ($g = \overline{1,2}$) по сравнению со статическими расписаниями: а) для расписаний при $min(t_{li}) = 2$ ($i = \overline{1,n}$); б) для расписаний при $min(t_{li}) = 6$ ($i = \overline{1,n}$); в) для расписаний при $min(t_{li}) = 10$ ($i = \overline{1,n}$)



а)



б)



в)

Рисунок 3.10– Снижение простоев приборов КС при построении динамических расписаний при различных моментах времени поступления заданий ($g = \overline{1,4}$) по сравнению со статическими расписаниями: а) для расписаний при $min(t_{li}) = 2$ ($i = \overline{1,n}$); б) для расписаний при $min(t_{li}) = 6$ ($i = \overline{1,n}$); в) для расписаний при $min(t_{li}) = 10$ ($i = \overline{1,n}$)

построении динамического расписания (определяется отношение разности простоев без модификации СР и простоев после построения ДР к суммарным простоям приборов в СР).

Анализ полученных результатов позволил сформулировать особенности построения динамических расписаний процесса выполнения заданий на приборах КС:

1) максимальное снижение простоев приборов при построении динамического расписания фиксируется в случае, когда неоднородность длительностей выполнения заданий, для которых $d_i = 0$, является минимальной (значение отношения $max(t_{li})/min(t_{li}) = 2$); при этом длительность выполнения заданий, для которых $d_{i_{n+g}} > 0$, является максимальной ($min(t_{li_{n+g}}) = 10$); суммарные простои приборов в динамическим расписаний снижены на 14 -45% по сравнению с простоями приборов при реализации статического расписания;

2) увеличение неоднородности длительностей выполнения заданий, для которых $d_{i_{n+g}} > 0$, от $max(t_{li_{n+g}})/min(t_{li_{n+g}}) = 2$ до $max(t_{li_{n+g}})/min(t_{li_{n+g}}) = 10$ (при неизменных значениях показателя неоднородности длительностей выполнения заданий, для которых $d_i = 0$) обуславливает снижение простоев приборов в динамическом расписании на 20-25% по сравнению со статическим;

3) при незначительной неоднородности длительностей выполнения заданий с $d_i = 0$ ($max(t_{li})/min(t_{li}) = 2$) изменение значения $min(t_{li_{n+g}})$ от 2 до 10 обуславливает увеличение степени снижения простоев приборов КС для динамического расписания (снижение простоев приборов КС при $min(t_{li_{n+g}}) = 2$ является менее значительным, чем при $min(t_{li_{n+g}}) = 10$); при значительной неоднородности длительностей выполнения заданий с $d_i = 0$ ($max(t_{li})/min(t_{li}) = 10$) изменение значения $min(t_{li_{n+g}})$ от 2 до 10 обуславливает уменьшение степени снижения простоев приборов для динамического расписания;

4) увеличение количества заданий с $d_{i_{n+g}} > 0$ от 2 до 4 обуславливает уменьшение степени снижения простоев приборов КС в динамическом расписании на 5-10%.

Анализ результатов моделирования позволил сделать выводы о том, что использование метода построения динамических расписаний обуславливает сокращение суммарных простоев приборов КС на 5-45 % в зависимости от значений входных параметров задачи. Результаты исследований по синтезу метода построения динамических расписаний с учетом различных моментов времени поступления заданий в КС при одинаковых приоритетах с выполняющимися заданиями представлены в работе [116].

3.4. Математическая модель влияния на многостадийные процессы выполнения заданий поступления в систему в моменты времени $d_i > 0$ высоко приоритетных заданий и метод построения динамических расписаний выполнения заданий при различных моментах времени их поступления и разных приоритетах

В главе 1 выполнен анализ работ, посвященных математическим моделям учета влияния возмущающих воздействий на ход процесса выполнения заданий в КС, предусмотренный статическим расписанием, и методам построения динамических расписаний. Анализ работ показал, что в таких моделях и методах рассматриваются только возмущающие воздействия в виде поступления в систему в моменты времени $d_i > 0$ новых заданий, приоритеты которых равны приоритетам заданий в статическом расписании. Поэтому разработка математической модели влияния возмущающих воздействий в виде поступления в КС в моменты времени $d_i > 0$ высоко приоритетных заданий, методов построения динамических расписаний выполнения заданий в КС при учете данного вида воздействий является актуальной. Применение разработанных модели и метода позволяет адаптировать многостадийные процессы выполнения ЕЗ в КС к возмущающим воздействиям рассматриваемого вида.

Синтезированные в разделе 3.3 математическая модель и метод формирования динамических расписаний позволяют учитывать возмущающие воздействия, связанные с поступлением в моменты времени $d_i > 0$ заданий, приоритеты которых равны приоритетам заданий, выполняемых в соответствии со статическим расписанием. Дополнительным видом возмущающих воздействий, влияющих на ход процесса выполнения заданий, является поступление в систему в моменты времени $d_i > 0$ заданий с более высоким приоритетом, чем у выполняемых заданий (задание i'-го типа, поступающее для выполнения в момент времени $d_{i'} > 0$, обладает более высоким приоритетом, чем задания, поступающие для выполнения в момент времени $d_i = 0$). Если l-й прибор КС приступил к выполнению задания i-го типа, то действия с ним на этом приборе должны быть прерваны выполнением задания i'-го типа (для которого $d_{i'} > 0$ и оно имеет более высокий приоритет, чем приоритет задания i-го типа). Обозначим через R_i приоритеты заданий, для которых время поступления в систему $d_i = 0$ $(i = \overline{1,n})$. Так как задание некоторого i-го типа имеет более высокий приоритет, чем R_i, поступает в КС в момент времени $d_i > 0$ и его выполнение прерывает реализацию действий на приборах с заданиями i-х типов (с $d_i = 0$), тогда для задания с $d_i > 0$ и максимальным приоритетом введем обозначение i_{np}, а приоритет задания i_{np} обозначим как $R_{i_{np}}$.

В разделе 3.3 рассмотрен метод математического моделирования влияния возмущающих воздействий на ход процесса выполнения ЕЗ, предусмотренный статическим расписанием. Он предполагает, что в сформированных последовательностях π^l ($l=\overline{1,L}$) реализуется определение заданий, порядок которых не может быть изменен, и заданий, для которых порядок выполнения может быть изменен с учетом вида возмущающих воздействий. Метод математического моделирования влияния возмущающих воздействий на ход процесса выполнения ЕЗ в КС предусматривает определение для каждого прибора последовательностей π_1^l и π_2^l, входящих в последовательность π^l таких, что: 1) в последовательностях π_1^l порядок выполнения заданий не может быть изменен; 2) в последовательностях π_2^l порядок выполнения заданий формируется при учете поступивших в моменты времени $d_i > 0$ новых заданий с высоким приоритетом. В соответствии с этим методом построение математических моделей влияния возмущающих воздействий на ход процесса выполнении ЕЗ в КС, предусмотренный статическим расписанием, предполагает для рассматриваемого вида возмущающих воздействий определение условий, которые позволяют сформировать последовательности π_1^l и π_2^l.

Особенностью решаемой задачи является формирование двух множеств выполняемых в системе заданий. К множеству N_1 относятся задания n типов, для которых выполняется два условия: 1) время поступления заданий в систему $d_i = 0$ ($i=\overline{1,n}$); 2) приоритеты заданий являются одинаковыми, $R_i = R_{i'}$ (где $d_i = 0$, $d_{i'} = 0$). Множество N_2 – это задания i_{np}, поступающие в систему в моменты времени $d_{i_{np}} > 0$, приоритеты этих заданий превышают приоритеты R_i заданий i-х типов ($i=\overline{1,n}$): при $d_i = 0$ ($i=\overline{1,n}$) и $d_{i_{np}} > 0$ имеем $R_{i_{np}} > R_i$.

Синтез математической модели влияния возмущающего воздействия указанного вида на ход многостадийного процесса выполнения заданий, предусмотренный статическим расписанием, реализован для случая, когда в некоторый момент времени $d_{i_{np}} > 0$ в КС поступает одно задание i_{np} с приоритетом $R_{i_{np}}$. Условием поступления в систему для выполнения нового задания i_{np} с приоритетом $R_{i_{np}} > R_i$ является окончание выполнения предыдущего задания i_{np} с $R_{i_{np}} > R_i$.

По аналогии с рассмотренными в разделами 3.1. и 3.3 моделями расписание представляется в виде совокупности последовательностей π^l ($l=\overline{1,L}$) выполнения заданий на l-х приборах КС следующим образом: $\pi = \{\pi^1, \pi^2, \pi^3, ..., \pi^L\}$. Последовательность π^l ($l=\overline{1,L}$) содер-

жит задания, поступившие в систему моменты времени $d_i = 0$ (n типов заданий с приоритетом R_i). Выполнение задания i_{np} с $d_{i_{np}} > 0$ и приоритетом $R_{i_{np}}$ на l-х приборах КС прерывает реализацию действий с заданиями, входящими в последовательности π^l, поэтому для задания i_{np} позиции в π^l ($l = \overline{1,L}$) не определяются. Степень оптимальности формируемых расписаний характеризуется значениями критерия (3.4).

Для реализации дальнейших рассуждений выполнен переход к обозначениям заданий i-х типов и их позиций в последовательностях π^l ($l = \overline{1,L}$) в виде i_j^l, где j – позиция задания i-го типа в рассматриваемой последовательности π^l. Через $t_{i_j}^{0l}$ обозначим момент времени начала выполнения задания i_j^l в j-ой позиции в последовательности π^l, через $\overline{t_{i_j}^l}$ – момент времени окончания выполнения задания i_j^l в j-ой позиции в последовательности π^l. Поступление в систему задания i_{np}, имеющего приоритет $R_{i_{np}} > R_i$, обуславливает прерывание им выполнения заданий i_j^l на приборах КС. В момент времени $d_{i_{np}} > 0$ поступления задания i_{np} в систему ($l=1$)-й прибор КС немедленно приступает к его выполнению, прерывая выполнение задания i_j^1. В момент $\overline{t_{i_{np}}^{l-1}}$ $(l = \overline{2,L})$ происходит окончание выполнения задания i_{np} на (l-1)-м приборе, на l-ом приборе прерывается выполнение задания i_j^l для реализации задания i_{np}. Прерывания выполнения заданий i_j^l на l-х приборах КС (в моменты времени $\overline{t_{i_{np}}^{l-1}}$ при $(l = \overline{2,L})$) продолжаются до полного окончания выполнения задания i_{np} в системе. В этом случае выполнение задания i_j^l, реализация действий с которым прерывается на l-м приборе поступлением задания i_{np}, представляется двумя стадиями (интервалами времени): $(t_{li_j})_1$ – интервал времени реализации первой стадии выполнения, $(t_{li_j})_2$ – интервал времени реализации второй стадии выполнения задания i_j^l. В силу того, что значение $d_{i_{np}} > 0$ определяется в момент поступления задания i_{np}, длительности $t_{li_{np}}$ выполнения задания i_{np} на l-х приборах КС известны, тогда могут быть определены моменты времени $t_{i_{np}}^{0l}$ начала выполнения задания i_{np} на каждом l-м приборе:

$$t_{i_{np}}^{0l} = t_{i_{np}}^{0l-1} + t_{l-1,i_{np}}, \quad \overline{t_{i_{np}}^{l-1}} = t_{i_{np}}^{0l}, \quad t_{i_{np}}^{01} = d_{i_{np}}. \qquad (3.9)$$

Таким образом, моменты времени $t_{i_{np}}^{0l}$ начала выполнения задания i_{np} на *l*-х приборах КС вычисляются по (3.9), а не определяются в результате формирования расписания. При фиксированных длительностях $t_{li_{np}}$ выполнения задания i_{np} на *l*-х приборах КС моменты времени прерывания выполнения заданий i_j^l на них также являются вычисляемыми по (3.9).

В том случае, если для $t_{i_{np}}^{01}$ выполняется условие $t_{i_{np}}^{0l} \in [t_{i_j}^{0l}, \overline{t_{i_j}^l}]$ (где $t_{i_j}^{0l}$ – момент времени начала выполнения на *l*-м приборе задания i_j^l, прерываемого заданием i_{np}, $\overline{t_{i_j}^l}$ – момент времени окончания выполнения задания i_j^l, прерываемого заданием i_{np}), тогда при построении динамического расписания длительность t_{li_j} выполнения задания i_j^l на *l*-м приборе КС и момент времени окончания его выполнения модифицируются следующим образом:

$$(t_{li_j})' = t_{li_j} + t_{li_{np}}, \quad (\overline{t_{i_j}^l})' = \overline{t_{i_j}^l} + t_{li_{np}}. \qquad (3.10)$$

В том случае, если выполняется условие $t_{i_{np}}^{0l} \in [\overline{t_{i'_{j-1}}^l}, t_{i_j}^{0l}]$ (где $\overline{t_{i',j-1}^l}$ – момент времени окончания выполнения задания *i'*-го типа в *(j-1)*-ой позиции в π^l, $t_{i_j}^{0l}$ – момент времени начала выполнения задания *i*-го типа в *j*-ой позиции в π^l, $[\overline{t_{i'_{j-1}}^l}; t_{i_j}^{0l}]$ – интервал простоя *l*-го прибора в ожидании готовности задания i_j^l к выполнению), то модифицируется момент времени $t_{i_j}^{0l}$ начала выполнения задания i_j^l: $(t_{i_j}^{0l})' = max\{\overline{t_{i_j}^{l-1}}, \overline{t_{i_{np}}^l}\}$.

Возможность изменения последовательностей π^l ($l = \overline{1,L}$) выполнения заданий в случае поступления в систему задания i_{np} комментирует рисунок 3.11. На рисунке 3.11а) представлено исходное статическое расписание. Влияние поступившего в систему задания i_{np} (*i=6*) на запланированный ход процесса выполнения заданий отображено на рисунке 3.11б). Изменение хода процесса выполнения заданий путем построения динамического расписания представлено на рисунке 3.11в). Для решения задачи определения порядков выполнения заданий с различными приоритетами (при $d_{i_{np}} > 0$) в π^l выделяются последовательности π_1^l и π_2^l.

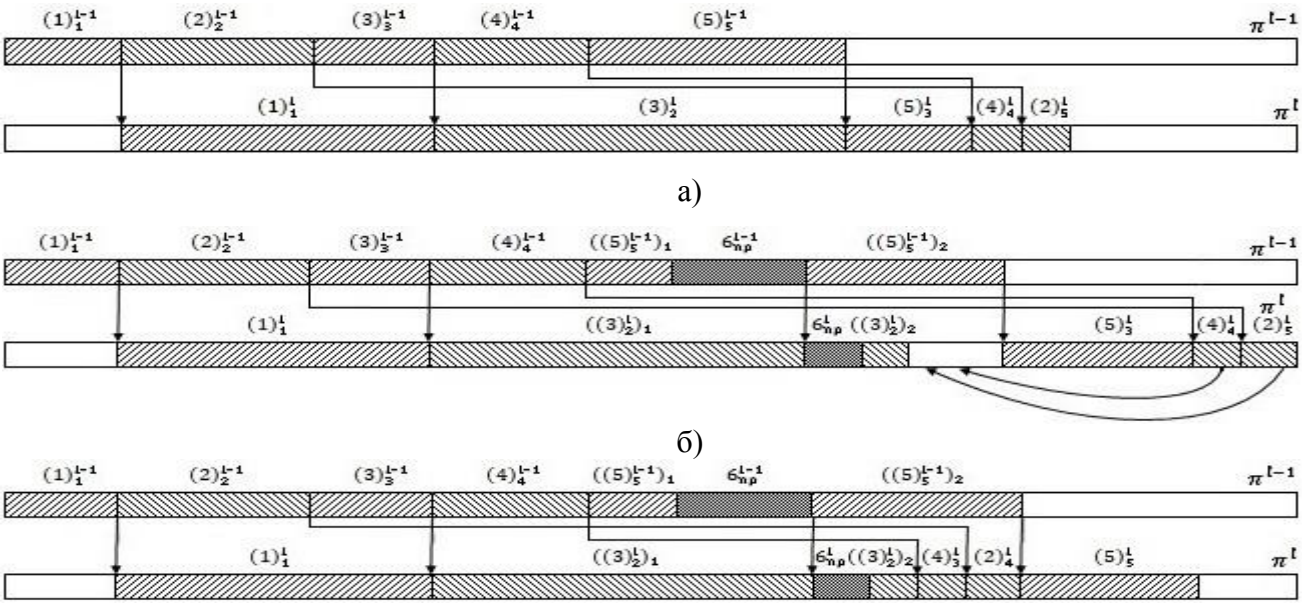


Рисунок 3.11 – Виды последовательностей π^{l-1} и π^{l} в статическом и динамическом расписаниях, сформированном при поступлении задания i_{np} для выполнения

а) вид последовательностей π^{l-1} и π^{l} в статическом расписании до поступления задания i_{np};

б) возможность изменения последовательности π^{l} при поступлении задания i_{np} ;

в) вид последовательностей π^{l-1} и π^{l} в результате построения динамического расписании после поступления задания i_{np} для выполнения.

Последовательность π_1^l образуют задания, выполненные и выполняемые к моменту поступления задания i_{np} в систему, но выполнение которых на *l*-м приборе будет закончено до поступления задания i_{np} на этот прибор (π_1^l образуют задания, порядок выполнения которых в π^l не может быть изменен). Для определения заданий, входящих в последовательности π_1^l ($l=\overline{1,L}$), синтезированы условия, в которых использованы значения моментов времени начала выполнения заданий i_j^l на *l*-х приборах и моментов времени окончания выполнения заданий i_j^l на *l*-х приборах (соответственно, $t_{i_j}^{0l}$ и $\overline{t_{i_j}^l}$ ($l=\overline{1,L}$)), значения $t_{i_{np}}^{0l}$ ($l=\overline{1,L}$), вычисляемые по (3.9):

–задания $i_j^l \in \pi_1^l$, выполненные к моменту $d_{i_{np}} > 0$:

$$t_{i_j}^{0l} < d_{i_{np}};\ \overline{t_{i_j}^l} < d_{i_{np}}; \qquad (3.11)$$

–задания $i_j^l \in \pi_1^l$, выполняемые к моменту времени $d_{i_{np}} > 0$, но их выполнение будет завершено к моменту $t_{i_{np}}^{0l}$ (до поступления задания i_{np} для выполнения на *l*-й прибор КС):

$$t_{i_j}^{0l} < d_{i_{np}};\ \overline{t_{i_j}^l} < t_{i_{np}}^{0l}; \tag{3.12}$$

–задания $i_j^l \in \pi_1^l$, выполняемые к моменту $d_{i_{np}} > 0$, но их выполнение к моменту $t_{i_{np}}^{0l}$ (к поступлению задания i_{np} на *l*-й прибор КС) завершено не будет:

$$t_{i_j}^{0l} < d_{i_{np}};\ t_{i_{np}}^{0l} \le \overline{t_{i_j}^l}\ . \tag{3.13}$$

При истинности условий $t_{i_j}^{0l} < d_{i_{np}}$, $t_{i_{np}}^{0l} \le \overline{t_{i_j}^l}$ длительность выполнения задания i_j^l будет модифицирована в соответствии с (3.10). Обозначив через $i_{q_l}^l$ задание, которое является «последним» в π_1^l («граница» последовательности заданий, для которых выполняются условия (3.11)-(3.13)), последовательности π_1^l можно представить в следующем виде:

$$\pi_1^l = \{ i_1^l, i_2^l, \ldots, i_{q_l}^l \}, \pi_1^l = \{ i_1^l, i_2^l, \ldots, i_{q_l}^l, i_{np}^l \},\ \pi_1^l = \{ i_1^l, i_2^l, \ldots, (i_{q_l}^l)_1, i_{np}^l, (i_{q_l}^l)_2 \}, \tag{3.14}$$

где i_j^l ($j = \overline{1, q_l}$) – задания, порядок которых в π^l не может быть изменен, задание $i_{q_l}^l$ – «граница» между последовательностями π_1^l и π_2^l.

Для задания $i_{q_l}^l$ истинны условия: его выполнение начато ранее момента $d_{i_{np}} > 0$ поступления задания i_{np} в систему ($t_{i_{ql}}^{0l} < d_{i_{np}}$); его выполнение не окончено к моменту $t_{i_{np}}^{0l}$ ($t_{i_{np}}^{0l} < \overline{t_{i_{ql}}^l}$), либо окончание выполнения этого задания совпадает с поступлением задания i_{np} на *l*-й прибор ($t_{i_{np}}^{0l} = \overline{t_{i_{ql}}^l}$); выполнение задания $i_{q_l}^l$ должно быть прервано в момент $t_{i_{np}}^{0l}$ при переходе на *l*-м приборе к выполнению задания i_{np}. Выполнение задания $i_{q_l}^l$ состоит из двух стадий $(i_{q_l}^l)_1$ и $(i_{q_l}^l)_2$, длительность его выполнения $t_{l,i_{q_l}}$ в динамическом расписании модифицируются в соответствии с (3.10). Для заданий i_j^l, включаемых в последовательности π_2^l, выполняется условие $d_{i_{np}} < t_{i_j}^{0l}$ и одно из указанных ниже условий:

– выполнение задания i_j^l завершается раньше поступления задания $i_{пр}$ для выполнения на l-й прибор КС:

$$t_{i_j}^{0l} < t_{i_{пр}}^{0l} \; ; \; \overline{t_{i_j}^{l}} \le t_{i_{пр}}^{0l} \; (\text{при } d_{i_{пр}} < t_{i_j}^{01}); \qquad (3.15)$$

– выполнение задания i_j^l на l-ом приборе будет прервано поступлением для выполнения задания $i_{пр}$ на этот прибор:

$$t_{i_j}^{0l} \le t_{i_{пр}}^{0l} \; ; \; \overline{t_{i_j}^{l}} > t_{i_{пр}}^{0l} \; (\text{при } d_{i_{пр}} < t_{i_j}^{01}); \qquad (3.16)$$

– выполнение задания i_j^l начинается после завершения выполнения задания $i_{пр}$ на l-м приборе:

$$\overline{t_{i_{пр}}^{l}} < t_{i_j}^{0l} \; . \qquad (3.17)$$

Выражения (3.15)-(3.17) и $d_{i_{пр}} < t_{i_j}^{01}$ определяют условия для заданий $i_j^l \in \pi_2^l$, порядок которых в π_2^l ($l = \overline{1,L}$) может быть изменен с учетом размещения в этих последовательностях заданий $i_{пр}$. Последовательности π_2^l ($l = \overline{1,L}$) формируются с учетом следующих особенностей размещения в них задания $i_{пр}$: 1) задание $i_{пр}$ не прерывает выполнение заданий i_j^l в последовательности π_2^l, а следуют за одним из заданий $i_j^l \in \pi_2^l$ (в соответствии с условиями (3.15) и (3.17)); 2) задание $i_{пр}$ прерывает выполнение задания i_j^l в последовательности π_2^l (в соответствии с условиями (3.16)). Тогда последовательности π_2^l ($l = \overline{1,L}$) (с учетом приведенных особенностей для первого и второго случая) имеют вид:

$$\pi_2^l = \{ i^l_{q_l+1}, i^l_{пр}, i^l_{q_l+2}, i^l_{q_l+3}, .., i^l_n \}, \pi_2^l = \{ i^l_{q_l+1}, i^l_{q_l+2}, \ldots, (i^l_j)_1, i^l_{пр}, (i^l_j)_2, i^l_{j+1}, i^l_{j+2}, .., i^l_n \}. \qquad (3.18)$$

Выражения (3.11)-(3.18) представляют собой математическую модель влияния возмущающих воздействий, представляющих собой поступление в КС заданий $i_{пр}$ с высоким приоритетом в моменты времени $d_{i_{пр}} > 0$.

Позиции заданий i-ых типов, входящих в последовательности π_2^l, определяются с точки зрения минимизации критерия (3.4) при выполнении условия $q_l + 1 \le j \le n$. Позиции для задания $i_{пр}$ в последовательностях π_1^l и π_2^l не определяются, для этого задания вычисляются

значения моментов времени $t_{i_{np}}^{0l}$ ($l=\overline{1,L}$) по (3.9). Если для заданий i_j^l, входящих в π_1^l либо в π_2^l, выполняется условие вида $t_{i_{np}}^{0l} \in [t_{i_j}^{0l}, \overline{t_{i_j}^l}]$, то длительности их выполнения модифицируются в соответствии с выражением (3.10). Альтернативным условием, используемым при модификации временных параметров выполняемых заданий, является условие вида $t_{i_{np}}^{0l} \in [\overline{t_{i'_{j-1}}^l}, t_{i_j}^{0l}]$, при выполнении которого модифицируется момент времени $t_{i_j}^{0l}$ начала выполнения задания в j-ой позиции: $(t_{i_j}^{0l})' = max\{\overline{t_{i_j}^{l-1}}, \overline{t_{i_{np}}^l}\}$.

Построению динамического расписания для выполнения задания i_{np} предшествует построение статического расписания для заданий i-х типов с $d_i = 0$ ($i=\overline{1,n}$). Для этого используется рассмотренный в разделе 3.2 метод построения расписаний выполнения заданий в КС. Перед построением динамического расписания выполняется реализация следующих предварительных этапов: 1) для сформированных в статическом расписании последовательностей π^l ($l=\overline{1,L}$) в соответствии с выражениями (3.11)-(3.13) и (3.15)-(3.17) реализуется определение для каждого l-го прибора КС последовательностей π_1^l и π_2^l ($l=\overline{1,L}$); 2) с учетом значений $d_{i_{np}} > 0$ и $t_{li_{np}}$ реализуется определение моментов времени $t_{i_{np}}^{0l}$ начала выполнения задания i_{np} на каждом l-м приборе КС; 3) для заданий $i_{q_l}^l \in \pi_1^l$ (где $i_{q_l}^l$ – «граничные» задания для последовательностей π_1^l), для которых выполняется условие вида $t_{i_{np}}^{0l} \in [t_{i_{q_l}}^{0l}, \overline{t_{i_{q_l}}^l}]$ реализуется модификация значений $t_{li_{q_l}}$; 4) для заданий i_j^l, для которых $t_{i_{np}}^{0l} \in [\overline{t_{i'_{j-1}}^l}, t_{i_j}^{0l}]$, модифицируются значения $t_{i_j}^{0l}$.

Для реализации алгоритма построения динамического расписания использованы множества N^l ($l=\overline{1,L}$) типов заданий, порядок которых в последовательностях π_2^l ($l=\overline{1,L}$) оптимизируется. Для каждого прибора КС в соответствии с условиями (3.15)-(3.17) определяется состав множества N^l ($l=\overline{1,L}$) заданий в π_2^l. Также используется множество N_{np} типов заданий, для которых в ходе построения динамического расписания будут определены позиции в последовательностях π_2^l ($l=\overline{1,L}$): $N_{np} = \bigcup_{l=1}^{L} N^l$.

Для синтеза метода оптимизации динамических расписаний при поступлении заданий i_{np} с $d_{i_{np}} > 0$ и $R_{i_{np}} > R_i$ необходимо ввести в рассмотрение способ оптимизации порядков

выполнения заданий в последовательностях π_2^l ($l = \overline{1,L}$). По аналогии с разделом 3.3 алгоритм формирования последовательностей π_2^l ($l = \overline{1,L}$) состоит из двух этапов:

– размещение в последовательностях π_2^l ($l = \overline{1,L}$) заданий *i*-х типов ($i \in N_{np}$) таких, что $i \notin \pi_1^l$ и $i \in \pi_1^{l'}$ ($l \neq l'$) и определение в π_2^l позиций этих заданий, обеспечивающих лучшее решение; определяются позиции в π_2^l заданий *i*-х типов, для которых перед началом построения динамического расписания выполняется условие $i \in N_{np} \cap (\bigcup_{l=1}^{L} \pi_1^l)$;

– размещение в π_2^l заданий *i*-х типов, для которых $(i \in N_{np}) \& (i \notin (\bigcup_{l=1}^{L} \pi_1^l))$, определение позиций этих заданий в π_2^l, обеспечивающих лучшее решение.

Алгоритмы реализации указанных этапов оптимизации расписаний выполнения заданий КС аналогичны следующим алгоритмам, рассмотренным в разделе 3.3:

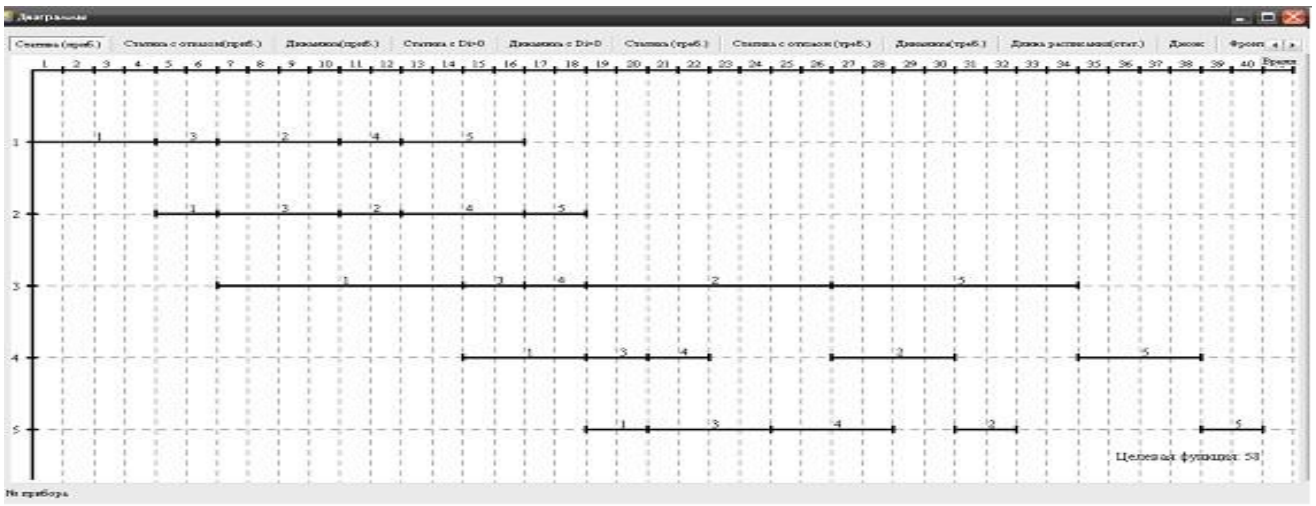
– алгоритму определения позиций в последовательностях π_2^l заданий *i*-х типов, для которых перед началом построения динамического расписания выполняется условие $i \in N_{np} \cap (\bigcup_{l=1}^{L} \pi_1^l)$, обеспечивающих минимум критерия (3.4);

– алгоритму определения позиций в последовательностях π_2^l заданий *i*-х типов, для которых перед началом построения динамического расписания выполняется условие $(i \in N_{np}) \& (i \notin (\bigcup_{l=1}^{L} \pi_1^l))$, обеспечивающих минимум критерия (3.4).

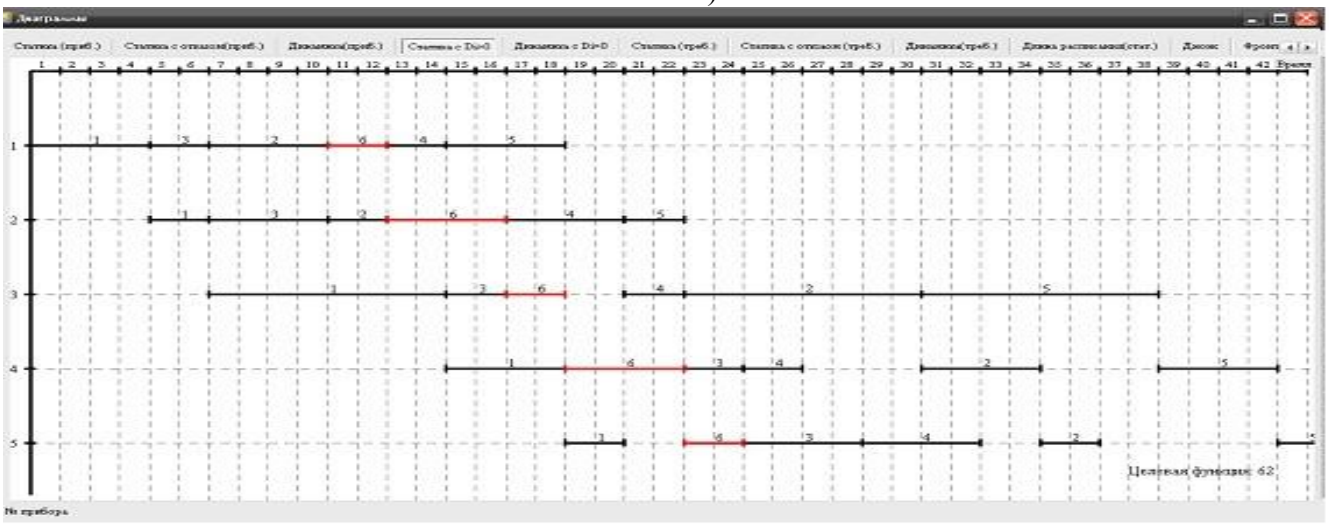
Реализация каждого шага алгоритмов первого либо второго этапов построения динамических расписаний связана с определением вида матриц P^l ($l = \overline{1,L}$) и последующим расчетом значений элементов t_{ji}^{0l} матриц T^{0l} ($l = \overline{1,L}$). В силу того, что значения $t_{i_{np}}^{0l}$ рассчитаны предварительно, значения элементов t_{ji}^{0l} матриц T^{0l} ($l = \overline{1,L}$) рассчитываются на каждом шаге алгоритма, тогда для задания i_{np} и всех заданий i_j^l в последовательностях π_2^l на каждом шаге алгоритма реализуется проверка условия $t_{i_{np}}^{0l} \in [t_{i_j}^{0l}, \overline{t_{i_j}^{l}}]$. В случае его истинности реализуется модификация значений t_{li} длительностей выполнения заданий i_j^l на *l*-х приборах с использованием выражения (3.10) и значений $t_{i_j}^{0l}$ для всех заданий, следующих за рассматриваемым в π_2^l на текущем приборе. После этого модифицируются значения $t_{i_j}^{0l}$ начала вы-

полнения остальных заданий в π_2^l (значения элементов t_{ji}^{0l} матриц T^{0l} ($l = \overline{1,L}$)). Для задания i_{np} и всех заданий i_j^l в последовательностях π_2^l на каждом шаге алгоритма выполняется проверка условия вида: $t_{i_{np}}^{0l} \in [\overline{t_{i'_{j-1}}^l}, t_{i_j}^{0l}]$, где задание i'-го типа занимает в последовательности π_2^l *(j-1)*-ю позицию, предшествующую заданию i_j^l. При его истинности реализуется модификация значений $t_{i_j}^{0l}$ для заданий i_j^l, для которых это условие выполняется.

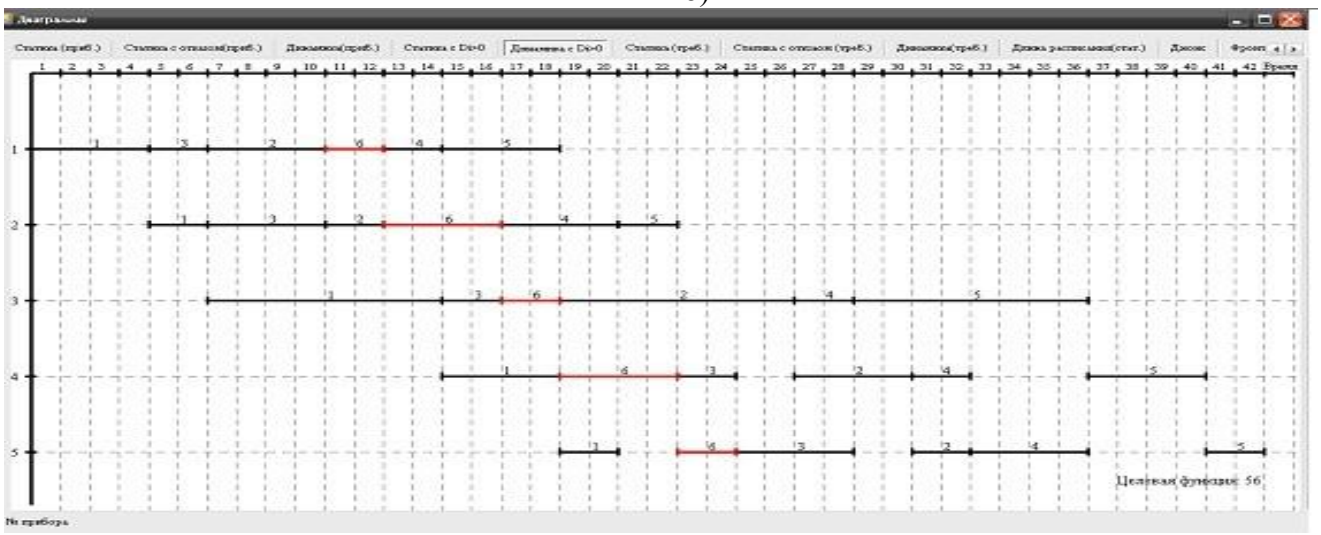
Метод построения динамических расписаний с учетом поступления в КС заданий i_{np} реализован программно. Результаты функционирования программы в виде диаграмм Ганта представлены на рисунках 3.12 и 3.13. Рисунки содержит вид исходного статического расписания, вид расписания после добавления в него задания i_{np}, вид динамического расписания, сформированного при учете задания i_{np}. Исследование эффективности применение метода построения динамических расписаний выполнено при задании значений параметров: $min(t_{li})$ – минимальная длительность выполнения заданий i-х типов на l-х приборах КС, для которых $d_i = 0$; $max(t_{li}) / min(t_{li})$ – отношение максимальной длительности выполнения заданий i-х типов ($i = \overline{1,n}$) на l-х приборах КС ($l = \overline{1,L}$) к минимальной длительности выполнения заданий этих типов; $min(t_{li_{np}}) / min(t_{li})$ –отношение минимальной длительности выполнения заданий i_{np} на l-х приборах КС к минимальной длительности выполнения заданий i-х типов ($i = \overline{1,n}$); $max(t_{li_{np}}) / min(t_{li_{np}})$ – отношение максимальной длительности выполнения заданий i_{np} на l-х приборах КС к минимальной длительности выполнения заданий i_{np}. Исследования выполнены при следующих значениях входных параметров: значения $max(t_{li}) / min(t_{li})$ заданы равными 2, 4, 8, 10; значения $min(t_{li_{np}}) / min(t_{li})$ – равными 1,2,4,8,10; значения $max(t_{li_{np}}) / min(t_{li_{np}})$ – равными 1, 2, 4, 8, 10; количество i-х типов заданий, для которых $d_i = 0$, – равными 5; количество заданий i_{np} – равными 1 и 2. Выполнен расчет степени снижения простоев приборов в динамическом расписании по сравнению со статическим – отношения разности суммарных простоев приборов в случае, когда динамическое расписание не формируется и суммарных простоев приборов в динамическом расписании к суммарным простоям приборов в случае, когда не формируется динамическое расписание: $(f_{ст} - f_{дин}) / f_{ст}$. Результаты исследований снижения простоев приборов в динамических расписаниях по сравнению со статическими представлены на рисунках 3.14, 3.15.



а)

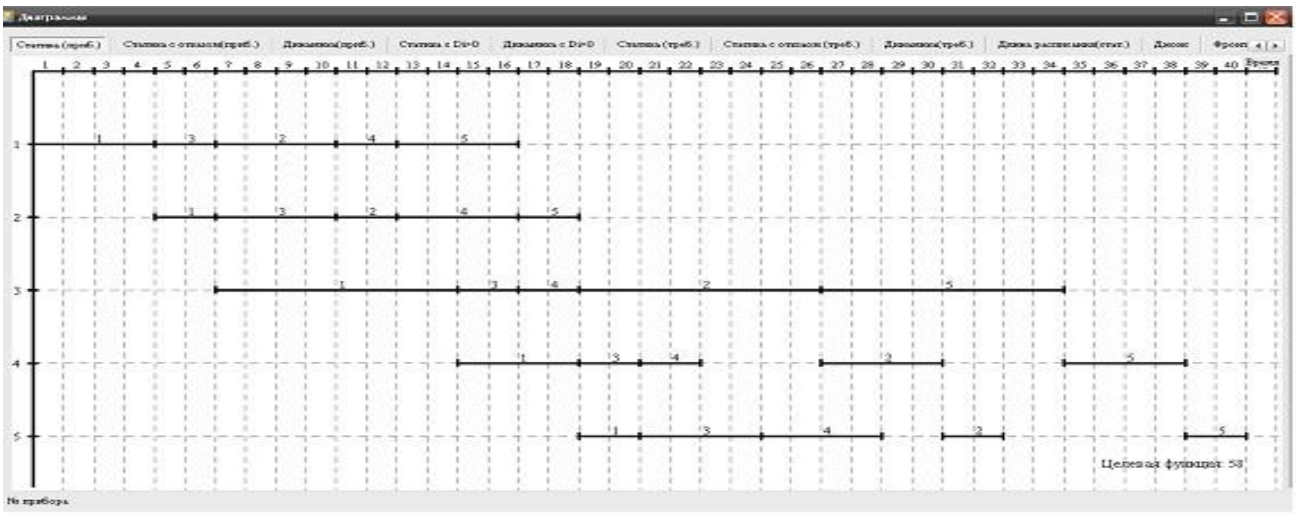


б)

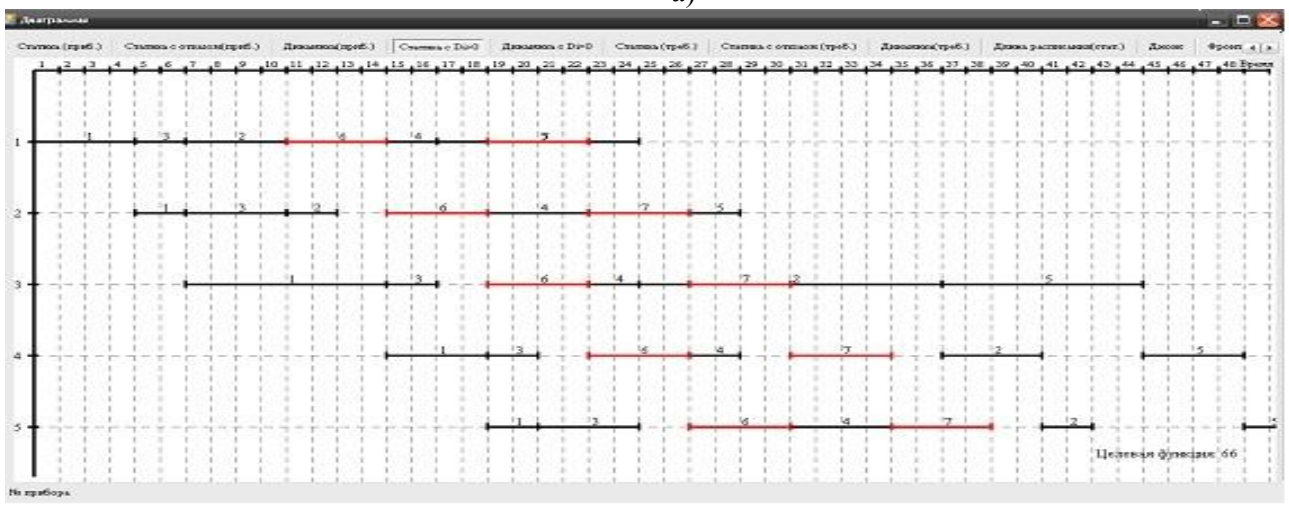


в)

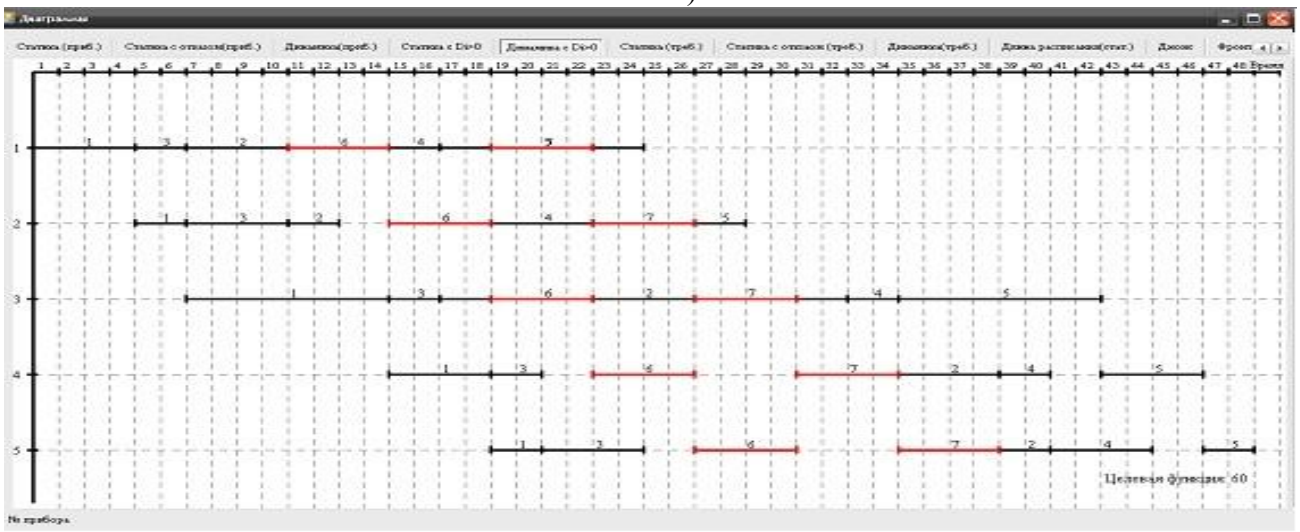
Рисунок 3.12– Результаты функционирования программы построения динамических расписаний при $n=5$, $L=5$, количество заданий i_{np} равно 1: а) статическое расписание для заданий с $d_i=0\,(i=\overline{1,n})$; б) статическое расписание, дополненное заданием i_{np}; в) динамическое расписание, сформированное на основе статического, для задания i_{np}



а)

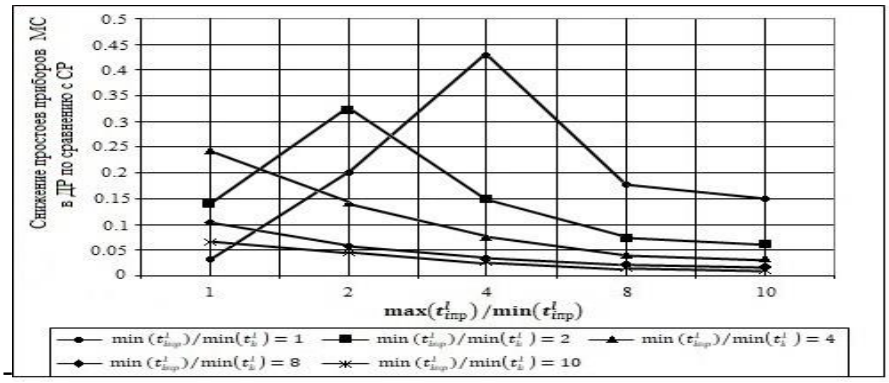


б)

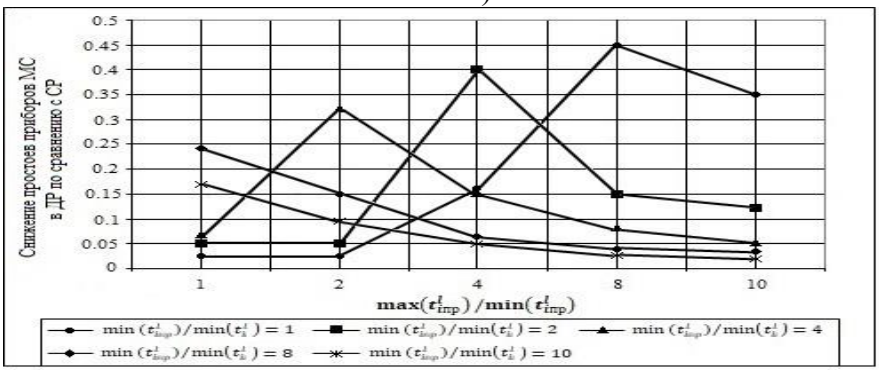


в)

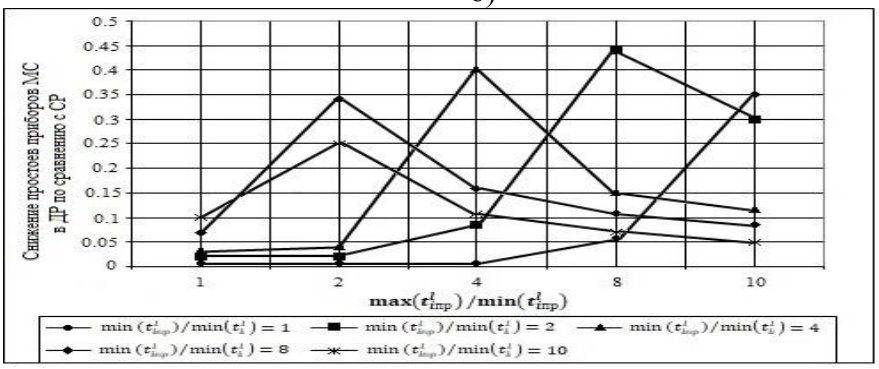
Рисунок 3.13 – Результаты функционирования программы построения динамических расписаний при $n=5$, $L=5$, количество заданий $i_{пр}$ равно 2: а) статическое расписание для заданий с $d_i=0\,(i=\overline{1,n})$; б) статическое расписание, дополненное заданиями $i_{пр}$; в) динамическое расписание, сформированное на основе статического, для заданий $i_{пр}$



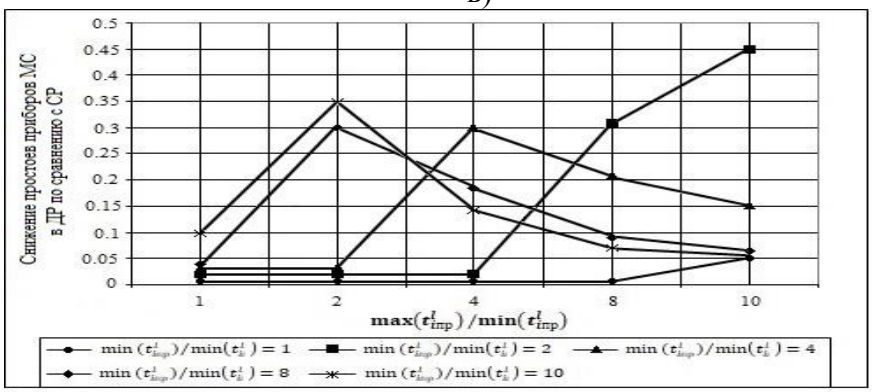
а)



б)

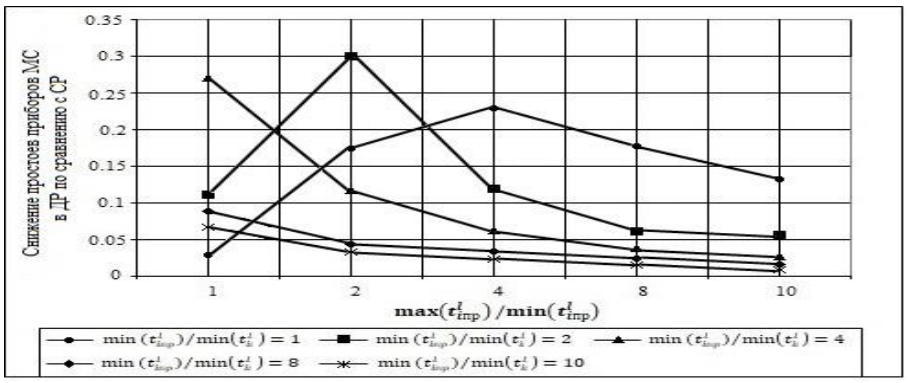


в)

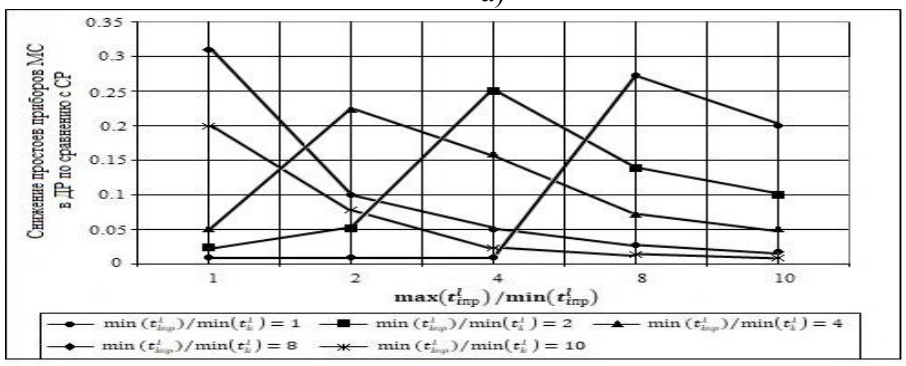


г)

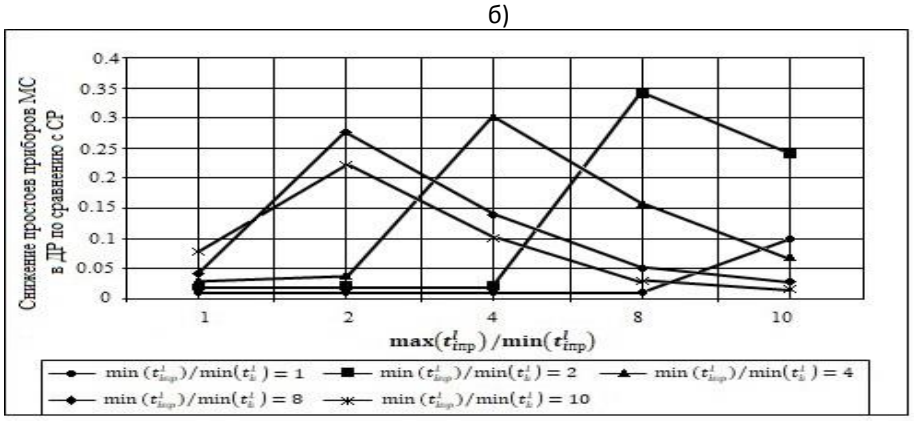
Рисунок 3.14– Снижение простоев приборов в динамическом расписании по сравнению со статическим с учетом поступления задания i_{np} (одно задание i_{np}): а) $max(t_{li}) / min(t_{li}) = 2$; б) $max(t_{li}) / min(t_{li}) = 4$; в) $max(t_{li}) / min(t_{li}) = 8$; г) $max(t_{li}) / min(t_{li}) = 10$



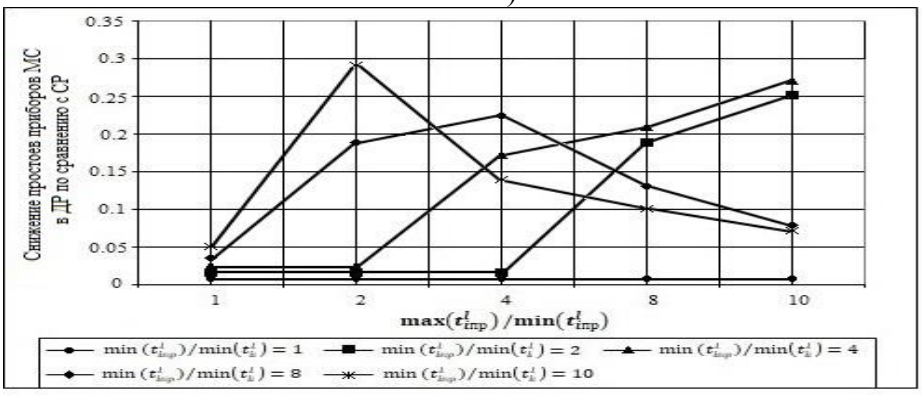
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.15– Снижение простоев приборов в динамическом расписании по сравнению со статическим с учетом поступления задания i_{np} (два задания i_{np}): а) $max(t_{li}) / min(t_{li}) = 2$; б) $max(t_{li}) / min(t_{li}) = 4$; в) $max(t_{li}) / min(t_{li}) = 8$; г) $max(t_{li}) / min(t_{li}) = 10$

Анализ полученных результатов позволил определить следующие особенности построения динамических расписаний процесса выполнения заданий при условии поступления заданий i_{np} с приоритетом $R_{i_{np}} > R_i$ в моменты времени $d_{i_{np}} > 0$:

1) при малых значениях отношения $max(t_{li}) / min(t_{li})$, равных 2 и 4, максимальное снижение простоев приборов КС при построении динамических расписаний получено также при малых значениях отношения $max(t_{li_{np}}) / min(t_{li_{np}})$, равных 2 и 4, и составляет в среднем 35%; увеличение значений отношения $max(t_{li_{np}}) / min(t_{li_{np}})$ приводит к менее значительному снижению простоев приборов в динамическом расписаний (составляет 10-15%);

2) при увеличении параметра неоднородности длительностей выполнения заданий *i*-х типов до значений $max(t_{li}) / min(t_{li}) = 8$ и $max(t_{li}) / min(t_{li}) = 10$ снижение простоев приборов КС определено следующим образом:: снижение простоев приборов является наибольшим при $max(t_{li_{np}}) / min(t_{li_{np}}) = 8$ и $max(t_{li_{np}}) / min(t_{li_{np}}) = 10$) и составляет 40-45%; при малых неоднородностях длительностей выполнения заданий i_{np} (значения отношения $max(t_{li_{np}}) / min(t_{li_{np}})$равны 2 и 4) снижение простоев составляет 30-35%;

3) при увеличении количества заданий i_{np} характер связи между снижением простоев приборов и параметрами неоднородности длительностей выполнения заданий сохраняется.

Анализ полученных результатов показал, что использование метода построения динамических расписаний позволяет в случае поступления в систему для выполнения заданий i_{np} сократить время простоев приборов КС на 20-30 % по сравнению со статическим расписанием, в котором порядок заданий не изменяется. Результаты исследований по синтезу математической модели влияния возмущающих воздействий рассмотренного вида на ход процесса выполнения ЕЗ в КС и метода построения динамических расписаний выполнения заданий в КС с разными моментами времени их поступления в систему и приоритетами опубликованы в работе [117].

3.5.Математическая модель влияния на многостадийные процессы выполнения заданий отказов приборов конвейерной системы и метод построения динамических расписаний выполнения заданий в конвейерной системе с учетом восстановления приборов

Одним из видов возмущающих воздействий, влияющих на ход процесса выполнения заданий *i*-х типов ($i = \overline{1,n}$), реализуемый в соответствии со статическим расписанием, являются зафиксированные отказы обрабатывающих приборов КС и их последующее восстановление.

Отказ *l*-го прибора КС прерывает выполнение задания некоторого *i*-го типа, после чего прибор простаивает, находясь в состоянии восстановления после отказа. В общем виде значение длительности восстановления прибора после отказа является случайным. Однако тип отказа и соответствующая ему длительность восстановления могут быть идентифицированы по совокупности признаков, характеризующих состояние отказавшего прибора. Для идентификации вида отказа и соответствующей ему длительности восстановления прибора в состав современных обрабатывающих систем включены подсистемы контроля их параметров, на основе значений которых делается вывод о состоянии приборов и о виде отказа. Тогда длительность восстановления прибора, соответствующая типу отказа, является величиной, заданной в качестве входных данных при построении динамических расписаний. Формирование динамических расписаний предполагает перестроение статических расписаний с учетом момента времени наступления отказа прибора КС и длительности восстановления прибора. Построение динамических расписаний обеспечивает адаптацию многостадийных процессов выполнения заданий в КС к возмущающим воздействиям рассматриваемого вида, что обеспечивает снижение их влияния на ход процесса, предусмотренный статическим расписанием.

Постановка задачи построения расписаний предполагает, что выполнение заданий на некотором *l* -м приборе прерывается в связи с его отказом и прибор простаивает в течение времени восстановления. Для рассуждений отказ *l*-го прибора интерпретирован как поступление на него для выполнения задания $i_{вос}$ (восстановление прибора после отказа), имеющего наивысший приоритет ($R_{i_{вос}} > R_i$, где R_i – приоритеты заданий *i*-ых типов ($i = \overline{1,n}$), для которых сформировано статическое расписание). Момент времени наступления отказа *l*-го прибора сопоставим с моментом времени поступления задания $i_{вос}$ для выполнения на прибор. Он обозначен как $t^{0l}_{i_{вос}}$, а длительность восстановления прибора после отказа обозначена $t_{li_{вос}}$.

Так как при отказе *l*-го прибора происходит прерывание выполнения задания $i^l_{q_l}$ (задания *i*-го типа в q_l-й позиции в π^l), тогда выполнение этого задания представлено состоящим из двух стадий: $(i^l_{q_l})_1$ и $(i^l_{q_l})_2$ с длительностями выполнения $(t_{li_{q_l}})_1$ и $(t_{li_{q_l}})_2$ соответственно. В силу того, что момент времени $t^{0l}_{i_{вос}}$ отказа прибора является случайным, то случайными являются длительности $(t_{li_{q_l}})_1$ и $(t_{li_{q_l}})_2$ стадий выполнения задания $i^l_{q_l}$. Тогда длительность заключительной стадии выполнения задания $i^l_{q_l}$ будет определена следующим

образом: $(t_{li_{ql}})_2 = t_{li_{ql}} - (t_{li_{ql}})_1$, при этом $(t_{li_{ql}})_1 = t^{0l}_{i_{вос}} - t^{0l}_{i_{ql}}$, $(\overline{t^{l}_{i_{ql}}})_1 = t^{0l}_{i_{вос}}$, где $(\overline{t^{l}_{i_{ql}}})_1$ – момент времени окончания первой стадии выполнения задания $i^l_{q_l}$. Условие $(t^{0l}_{i_{ql}})_2 = \overline{t^{l}_{i_{вос}}}$ является необходимым, так как начало реализации второй стадии выполнения задания $i^l_{q_l}$ на l-м приборе совпадает с окончанием его восстановления. Восстановление прибора после отказа в течение интервала $t_{li_{вос}}$ приводит к изменению значений параметров $t^{0l}_{i_j}$, $\overline{t^{l}_{i_j}}$ выполняемых заданий в последовательностях π^l ($l = \overline{1,L}$). При реализации отказа возможны простои $(l+1)$-го, $(l+2)$-го и других приборов КС, связанные с восстановлением l-го прибора. Сформулированные утверждения прокомментированы с рисунком 3.16.

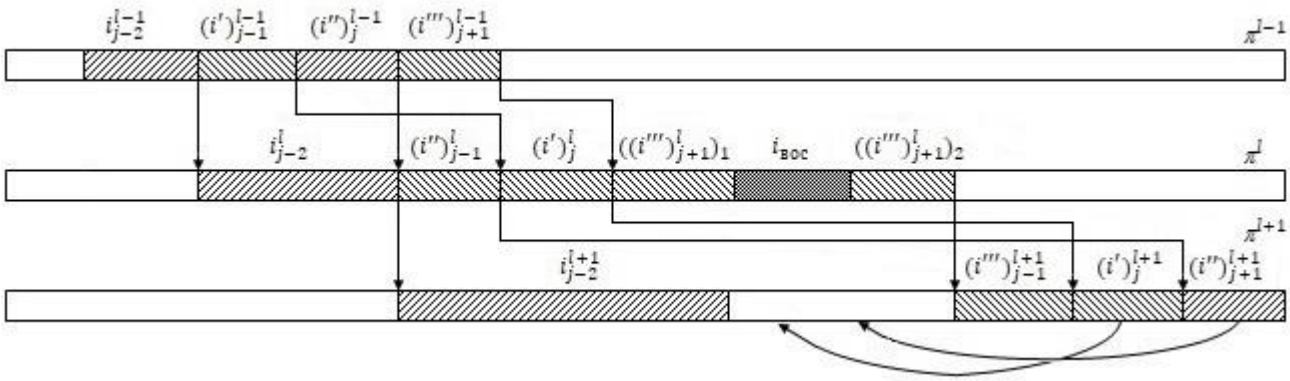


Рисунок 3.16 – Вид последовательностей с простоем (*l+1)*-го прибора в результате отказа *l*-го прибора и его восстановления

В соответствии с методом математического моделирования влияния возмущающих воздействий на ход процесса выполнения заданий, предусмотренный статическим расписанием (раздел 3.3), при формировании динамического расписания требуется выделить задания, порядки выполнения которых в последовательностях π^l ($l = \overline{1,L}$) не могут быть изменены, и задания, порядки выполнения которых определяются с учетом длительности восстановления отказавшего прибора. В соответствии с указанным методом математическая модель влияния возмущающих воздействий на ход процесса выполнения ЕЗ в КС представляет собой условия включения заданий в последовательности π^l_1, порядок заданий в которых изменен быть не может, и π^l_2, порядок выполнения заданий в которых оптимизируется при построении динамического расписаний. Вид последовательности π^l в этом случае следующий:

$$\pi^l = \{ i_1^l, i_2^l, .., i_{q_l}^l, i_{q_l+1}^l, i_{q_l+2}^l, ..., i_n^l \}, \quad (3.19)$$

где задания $i_1^l, i_1^l, .., i_{q_l}^l$ входят в последовательность π_1^l, а задания $i_{q_l+1}^l, i_{q_l+2}^l, ..., i_n^l$ – в последовательность π_2^l. Задание $i_{q_l}^l$ является «граничным» для последовательности π_1^l. Для заданий $i_{q_l+1}^l, i_{q_l+2}^l, ..., i_n^l$ в последовательностях π_2^l ($l = \overline{1,L}$) порядки их выполнения изменяются с учетом длительности восстановления отказавшего прибора КС.

Для номера отказавшего прибора введем в рассмотрение обозначение $\hat{l}$. Поступление задания $i_{вос}^{\hat{l}}$ (фиксация отказа прибора) на $\hat{l}$-й прибор приведет к прерыванию выполнения задания $i_{q_{\hat{l}}}^{\hat{l}}$. Вид последовательности $\pi^{\hat{l}}$, в которой размещается задание $i_{вос}^{\hat{l}}$, следующий:

$$\pi^{\hat{l}} = \{ i_1^{\hat{l}}, i_2^{\hat{l}}, .., (i_{q_l}^l)_1, i_{вос}^{\hat{l}}, (i_{q_l}^l)_2, i_{q_l+1}^{\hat{l}}, i_{q_l+2}^{\hat{l}}, ..., i_n^{\hat{l}} \}. \quad (3.20)$$

Для заданий i_j^l (*j*–позиция задания *i*-го типа, $j = \overline{1, q_l - 1}$, $l \neq \hat{l}$) и задания $i_{q_l}^l$, являющегося последним в π_1^l сформулированы условия их принадлежности к π_1^l :

– для заданий i_j^l :

$$t_{i_j}^{0l} < t_{i_{вос}}^{0\hat{l}}; \ \overline{t_{i_j}^l} < t_{i_{вос}}^{0\hat{l}}; \quad (3.21)$$

– для задания $i_{q_l}^l$:

$$t_{i_{q_l}}^{0l} < t_{i_{вос}}^{0\hat{l}}; \ t_{i_{вос}}^{0\hat{l}} < \overline{t_{i_{q_l}}^l}. \quad (3.22)$$

Аналогичные (3.21), (3.22) условия принадлежности заданий $i_j^{\hat{l}}$ ($j = \overline{1, q_{\hat{l}}}$) последовательности $\pi_1^{\hat{l}}$ для отказавшего прибора имеют вид:

– для заданий $i_j^{\hat{l}}$ ($j < q_{\hat{l}}$):

$$t_{i_j}^{0\hat{l}} < t_{i_{вос}}^{0\hat{l}}; \ \overline{t_{i_{q_{\hat{l}}}}^{\hat{l}}} \leq t_{i_{вос}}^{0\hat{l}}; \quad (3.23)$$

– для задания $i_{q_{\hat{l}}}^{\hat{l}}$:

$$t_{i_{q_{\hat{l}}}}^{0\hat{l}} < t_{i_{вос}}^{0\hat{l}}; \ t_{i_{вос}}^{0\hat{l}} \leq \overline{t_{i_{q_{\hat{l}}}}^{\hat{l}}}. \quad (3.24)$$

Если $t^{0\hat{l}}_{i_{вос}} \le \overline{t^{\hat{l}}_{i_{q_{\hat{l}}}}}$, то длительность выполнения задания $i^{\hat{l}}_{q_{\hat{l}}}$ увеличивается на значение $t_{\hat{l}i_{вос}} : (t_{\hat{l}i_{q_{\hat{l}}}})' = t_{\hat{l}i_{q_{\hat{l}}}} + t_{\hat{l}i_{вос}}$.По аналогии с условиями (3.21)-(3.24) принадлежности заданий i^{l}_{j}, $i^{\hat{l}}_{j}$ последовательностям π^{l}_{1} и $\pi^{\hat{l}}_{1}$, введены условия для определения принадлежности заданий i^{l}_{j}, $i^{\hat{l}}_{j}$ ($j = \overline{q_l + 1, n}$) последовательностям π^{l}_{2} и $\pi^{\hat{l}}_{2}$:

– для заданий i^{l}_{j} ($l \neq \hat{l}$):

$$t^{0\hat{l}}_{i_{вос}} < t^{0l}_{i_j} \ (j = \overline{q_l + 1, n}); \tag{3.25}$$

– для заданий $i^{\hat{l}}_{j}$:

$$t^{0\hat{l}}_{i_{вос}} < t^{0\hat{l}}_{i_j} \ (j = \overline{q_{\hat{l}} + 1, n}). \tag{3.26}$$

В соответствии с условиями (3.25)-(3.26) для каждого прибора может быть сформировано множество N^l ($l = \overline{1, L}$) заданий, порядок которых в последовательностях π^{l}_{2} будет переопределяться. Формируемые с учетом (3.25)-(3.26) множества N^l ($l = \overline{1, L}$) имеют вид:

– для *l*-х приборов КС: $N^l = \{ i^{l}_{q_l+1}, i^{l}_{q_l+2}, ..., i^{l}_{n} \}$;

– для $\hat{l}$ -го отказавшего прибора: $N^{\hat{l}} = \{ i^{\hat{l}}_{q_l+1}, i^{\hat{l}}_{q_l+2}, ..., i^{\hat{l}}_{n} \}$.

По аналогии с разделом 3.4 при реализации алгоритма построения динамических расписаний для заданий, которые не были выполнены к моменту времени $t^{0l}_{i_{вос}}$ наступления отказа $\hat{l}$ -го прибора КС, введено множество $N_{пр} : N_{пр} = \bigcup_{l=1}^{N} N^l$.

Модификация длительности $t_{\hat{l}i_{q_{\hat{l}}}}$ выполнения задания $i^{\hat{l}}_{q_{\hat{l}}}$, действия с которым прерываются отказом $\hat{l}$ -го прибора КС, и момента времени $\overline{t^{\hat{l}}_{i_{q_{\hat{l}}}}}$ окончания его выполнения на этом приборе осуществляется с использованием выражений следующего вида:

$$(t_{\hat{l}i_{q_{\hat{l}}}})' = t_{\hat{l}i_{q_{\hat{l}}}} + t_{\hat{l}i_{вос}}, \ (\overline{t^{\hat{l}}_{i_{q_{\hat{l}}}}})' = \overline{t^{\hat{l}}_{i_{q_{\hat{l}}}}} + t_{\hat{l}i_{вос}}. \tag{3.27}$$

Таким образом, выражения (3.19)-(3.27) представляют собой математическую модель влияния отказов приборов КС на ход многостадийного процесса выполнения заданий, предусмотренный статическим расписанием.

Способ формирования вида последовательностей π_2^l ($l = \overline{1,L}$) предусматривает реализацию двух этапов:

– размещение в последовательностях π_2^l заданий *i*-х типов ($i \in N_{np}$) таких, что $i \notin \pi_1^l$ и $i \in \pi_1^{l'}$, где $l \neq l'$ (задания *i'* -х типов не входят в последовательность π_1^l некоторого *l*-го прибора КС, но входят в последовательность $\pi_1^{l'}$ другого *l'*-го прибора) и определение в π_2^l их позиций; на первом этапе определяются позиции в π_2^l заданий i, для которых перед началом построения динамического расписания выполняется условие $i \in N_{np} \cap (\bigcup_{l=1}^{L} \pi_1^l)$;

– размещение в последовательностях π_2^l заданий, для которых перед началом построения динамического расписания выполняется условие $(i \in N_{np}) \& (i \notin (\bigcup_{l=1}^{L} \pi_1^l))$, и определение их позиций в последовательностях π_2^l.

Реализация этапов формирования последовательностей π_2^l ($l = \overline{1,L}$), соответствующих динамическому расписанию, предваряется определением задания $i_{q_{\hat{l}}}^{\hat{l}}$, выполнение которого прерывается отказом $\hat{l}$ -го прибора, модификацией значений $t_{\hat{l} i_{q_{\hat{l}}}}$ и $\overline{t_{i_{q_{\hat{l}}}}^{\hat{l}}}$ для этого задания в соответствии с выражениями (3.27). По аналогии с разделом 3.3 реализация первого этапа формирования последовательностей π_2^l предполагает:

– определение типов *i* заданий, для которых выполняется условие $i \in N_{np} \cap (\bigcup_{l=1}^{L} \pi_1^l)$; для заданий этих типов формируется начальное решение по порядкам их выполнения в π_2^l;

– определение таких порядков выполнения заданий в π_2^l с учетом вида последовательностей π_1^l ($l = \overline{1,L}$), которые являются лучшими с точки зрения введенного критерия (на основе начального решения при учете последовательностей π_1^l ($l = \overline{1,L}$) выполняется определение позиций j заданий *i*-х типов, для которых $i \in N_{np} \cap (\bigcup_{l=1}^{L} \pi_1^l)$).

Реализация второго этапа построения динамического расписания предполагает:

– размещение в последовательностях π_2^l заданий i-ых типов, для которых перед началом построения динамического расписания выполняется условие $(i \in N_{np}) \& (i \notin (\bigcup_{l=1}^{L} \pi_1^l))$;

– определение позиций этих заданий в последовательностях π_2^l, которые обеспечивают лучшее решение с точки зрения введенного критерия (3.4).

Алгоритмы реализации этапов оптимизации решений по порядкам выполнения заданий в последовательностях π_2^l аналогичны алгоритмам, рассмотренным в разделе 3.3:

– алгоритму определения позиций в последовательности π_2^l заданий i-ых типов, для которых выполняется условие $i \in N_{np} \cap (\bigcup_{l=1}^{L} \pi_1^l)$;

– алгоритму определения позиций в последовательности π_2^l заданий i-ых типов, для которых выполняется условие $(i \in N_{np}) \& (i \notin (\bigcup_{l=1}^{L} \pi_1^l))$.

Реализация каждого шага алгоритмов первого либо второго этапов построения динамических расписаний связана с определением матриц P^l ($l = \overline{1,L}$) и последующим расчетом значений элементов t_{ji}^{0l} матриц T^{0l} ($l = \overline{1,L}$). При расчете значений t_{ji}^{0l} для заданий $\{ i_{q_l+1}^l, i_{q_l+2}^l, \ldots, i_n^l \}$ и $\{ i_{q_{\hat{l}}+1}^{\hat{l}}, i_{q_{\hat{l}}+2}^{\hat{l}}, \ldots, i_n^{\hat{l}} \}$, включаемых в последовательности π_2^l и $\pi_2^{\hat{l}}$, учитывается модификация значений параметров $t_{\hat{l} i_{q_{\hat{l}}}}$ и $\overline{t_{i_{q_{\hat{l}}}}^{\hat{l}}}$ для задания $i_{q_{\hat{l}}}^{\hat{l}}$, выполнение действий с которым прервано отказом, реализованная в соответствии с (3.27).

Рассмотренный метод построения динамических расписаний выполнения заданий с учетом отказов приборов КС реализован программно. Результаты формирования расписаний представлены в виде диаграмм Ганта на рисунках 3.17, 3.18. С использованием разработанной программы были проведены исследования особенностей формирования динамических расписаний выполнения заданий в КС с учетом отказов приборов. Снижение простоев приборов в динамическом расписании обусловлено неоднородностью длительностей выполнения заданий на отказавшем приборе и приборе, ему предшествующем, а также неоднородностью длительностей выполнения заданий на отказавшем приборе и приборе, следующим за ним. Длительности выполнения заданий на приборах, не являющихся отказавшим, предшествующим ему и следующим за ним, заданы такими же, как длительности выполнения заданий на приборе,

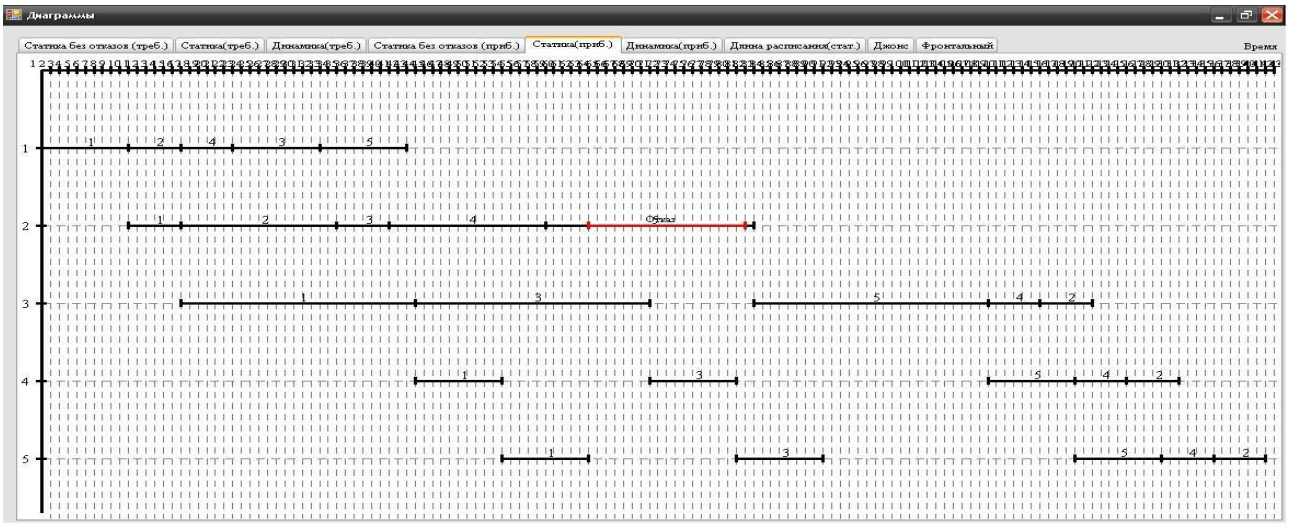


Рисунок 3.17– Вид последовательностей выполнения заданий в статическом расписании при учете отказа прибора КС (отказ (*l=2*)-го прибора, значение критерия – 214)

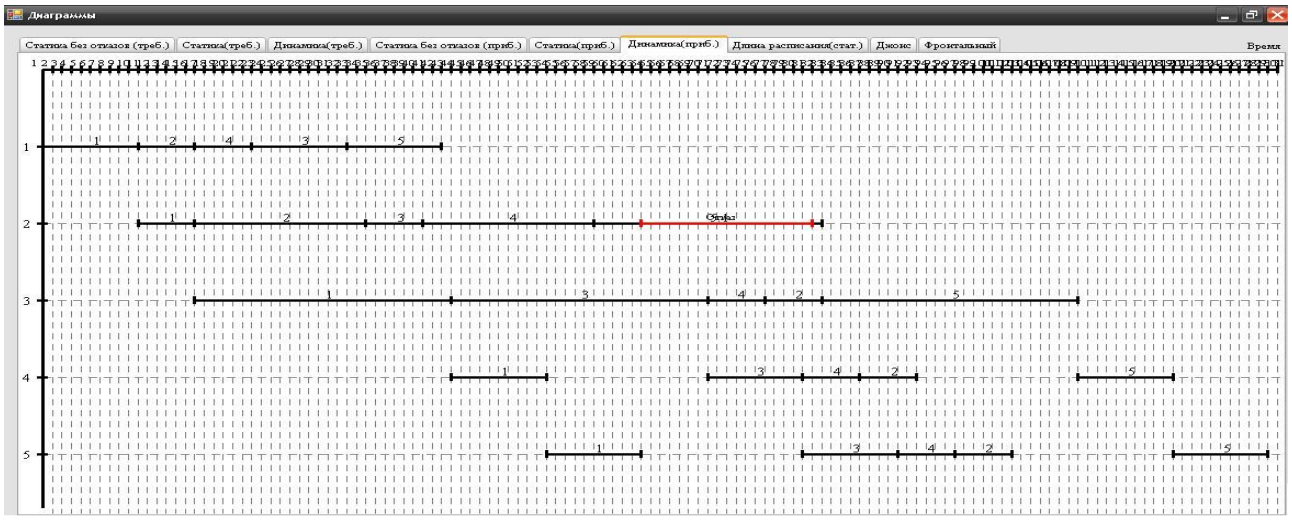


Рисунок 3.18 – Вид последовательностей выполнения заданий в динамическом расписании при учете отказа прибора КС (отказ (*l=2*)-го прибора, значение критерия – 179)

предшествующем отказавшему. При построении динамических расписаний рассматривалась задача с пятью приборами КС (*L=5*) и пятью типами выполняемых заданий (*n=5*). В качестве отказавшего задан второй *(l=2)* прибор КС. В этом случае длительности выполнения заданий на первом, четвертом и пятом приборах задавались одинаковыми. Для определения степени неоднородности длительностей выполнения заданий на отказавшем и предшествующем ему приборах введено отношение $max(t_{2i})/min(t_{li})$, где t_{2i} – максимальная длительность выполнения заданий *i*-х типов на (*l=2*)-м приборе КС, t_{li} – минимальная длительность выполнения заданий *i*-х типов на (*l=1)*-м, ((*l=4*)-м и (*l=5*)-м) приборе КС. Значения этого отношения изменялись от 1,5 до 4 с шагом 0,5. Для определения степени неоднородности длительностей

выполнения заданий на отказавшем и следующем за ним приборе введено отношение $max(t_{3i})/max(t_{2i})$. При проведении экспериментов значения этого отношения изменялись от 2 до 5 с шагом 1. При этом $min(t_{3i}) = min(t_{2i}) = min(t_{li})$.Длительность восстановления отказавшего прибора определяется выражением вида: $t_{2i_{вос}} = k * min(t_{li})$, где k принимает значения 1, 3, 5, 7, 9, 11. Результаты исследований по определению степени снижения простоев приборов КС в динамическом расписании (ДР) по сравнению со статическим расписанием (СР), которая определяется по формуле вида $(f_{ст}-f_{дин})/ f_{ст}$, представлены на рисунках 3.20-3.29.

На основе анализа снижения простоев приборов КС при построении динамического расписания по сравнению со статическим (рисунки 3.19-3.28) сделаны следующие выводы:

– при $max(t_{2i})/min(t_{li}) = 2$, $max(t_{3i})/max(t_{2i}) = 1.5$ и $min(t_{li}) = 3$ (рисунок 3.19) эффективность формирования динамического расписания не изменяется с увеличением длительности восстановления отказавшего прибора (при $t_{2i_{вос}} = k * min(t_{li})$ и $k \in \{3,5,7,9,11\}$); это вызвано тем, что при построении динамического расписания в интервал времени простоя третьего прибора в ожидании окончания восстановления второго размещается только одно задание; количество заданий, размещаемых в интервале простоя третьего прибора при увеличении времени восстановления $t_{2i_{вос}}$ второго прибора, не изменяется (отсутствуют готовые к выполнению задания); при $max(t_{2i})/min(t_{li}) = 2$, $max(t_{3i})/max(t_{2i}) = 1.5$, $min(t_{li}) = 6$ или $min(t_{li}) = 9$ в интервале простоя третьего прибора в ожидании окончания восстановления второго размещается одно задание (при $t_{2i_{вос}} = min(t_{li})$), затем при $t_{2i_{вос}} = 3 * min(t_{li})$ размещаются два задания и при увеличении интервала $t_{2i_{вос}}$ количество заданий, размещаемых в интервале простоя третьего прибора не изменяется; степень снижения суммарных простоев приборов не увеличивается и составляет 20% (рисунок 3.19); аналогичным образом интерпретируется результаты экспериментов при $max(t_{2i})/min(t_{li}) = 3$ и $max(t_{3i})/max(t_{2i}) = 1.5$ (рисунок 3.20), степень снижения суммарных простоев приборов КС в динамическим расписании уменьшается до 17%;

– при $max(t_{2i})/min(t_{li}) = 4$, $max(t_{3i})/max(t_{2i}) = 1.5$, $min(t_{li}) \in \{3,6,9\}$ (рисунок 3.21) в силу того, что задания на втором и третьем приборах КС имеют большую длительность выполнения, простои третьего прибора не могут быть заполнены готовыми к выполнению заданиями; степень снижения простоев приборов КС в динамическом расписании по

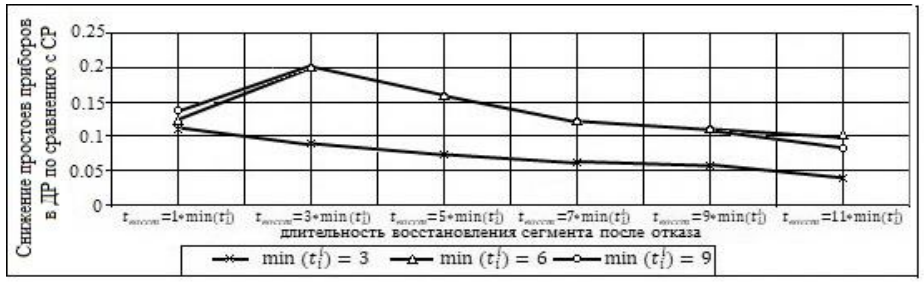


Рисунок 3.19– Снижение простоев приборов в ДР по сравнению с СР при $max(t_{2i})/min(t_{li})=2$ и $max(t_{3i})/max(t_{2i})=1.5$

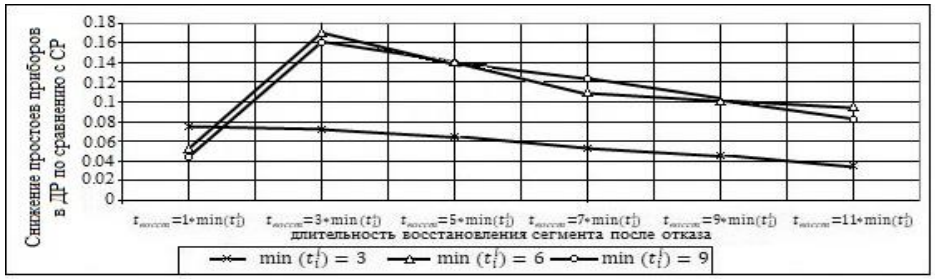


Рисунок 3.20– Снижение простоев приборов в ДР по сравнению с СР при $max(t_{2i})/min(t_{li})=3$ и $max(t_{3i})/max(t_{2i})=1.5$

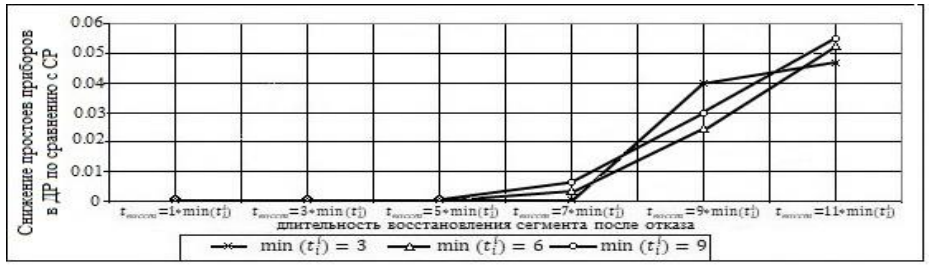


Рисунок 3.21– Снижение простоев приборов в ДР по сравнению с СР при $max(t_{2i})/min(t_{li})=4$ и $max(t_{3i})/max(t_{2i})=1.5$

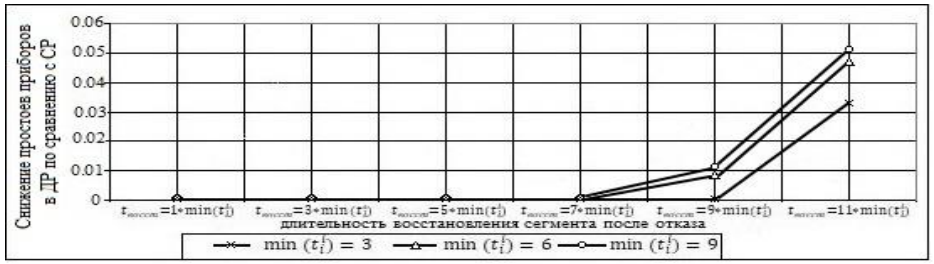


Рисунок 3.22 – Снижение простоев приборов в ДР по сравнению с СР при $max(t_{2i})/min(t_{li})=5$ и $max(t_{3i})/max(t_{2i})=1.5$

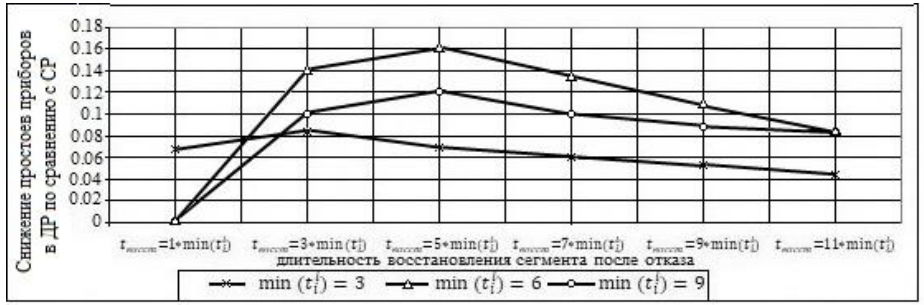


Рисунок 3.23 – Снижение простоев приборов в ДР по сравнению с СР при $max(t_{2i})/min(t_{li})=2$ и $max(t_{3i})/max(t_{2i})=2$

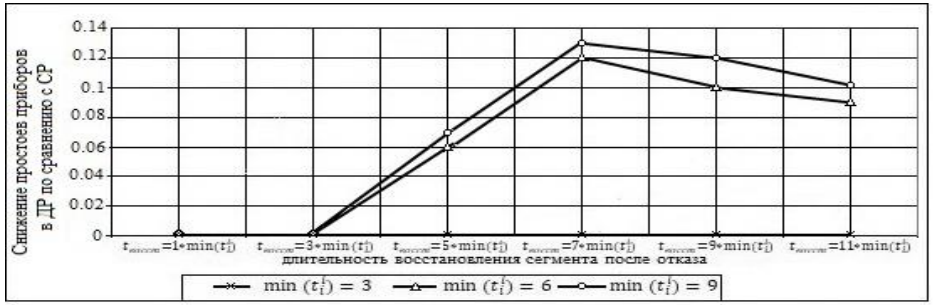


Рисунок 3.24– Снижение простоев приборов в ДР по сравнению с СР $max(t_{2i})/min(t_{li})=3$ и $max(t_{3i})/max(t_{2i})=2$

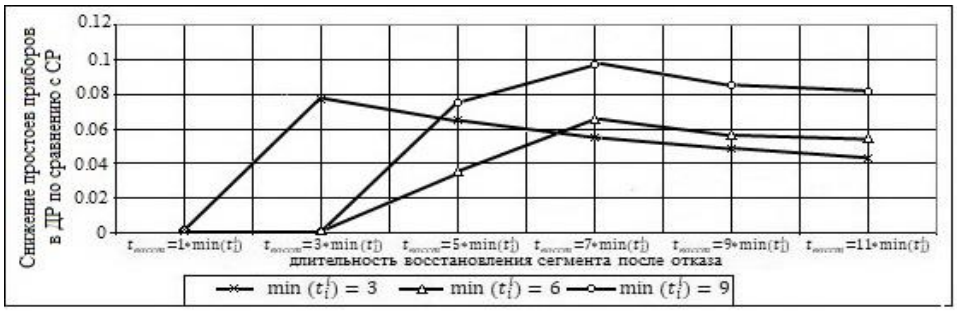


Рисунок 3.25 – Снижение простоев приборов в ДР по сравнению с СР при $max(t_{2i})/min(t_{li})=2$ и $max(t_{3i})/max(t_{2i})=2.5$

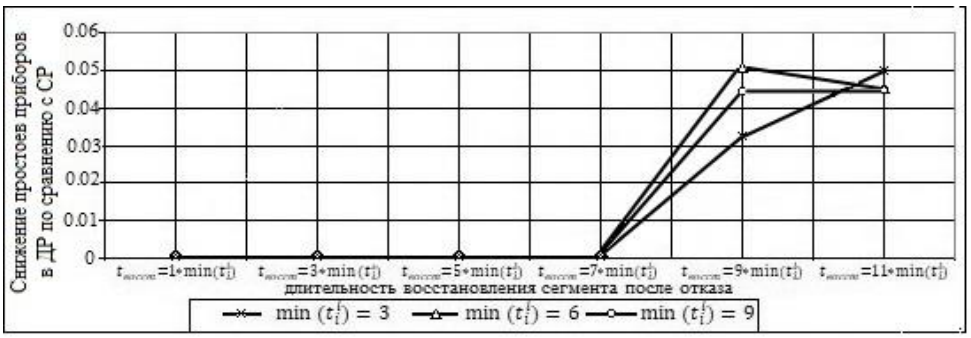


Рисунок 3.26 – Снижение простоев приборов в ДР по сравнению с СР при $max(t_{2i})/min(t_{li})=3$ и $max(t_{3i})/max(t_{2i})=2.5$

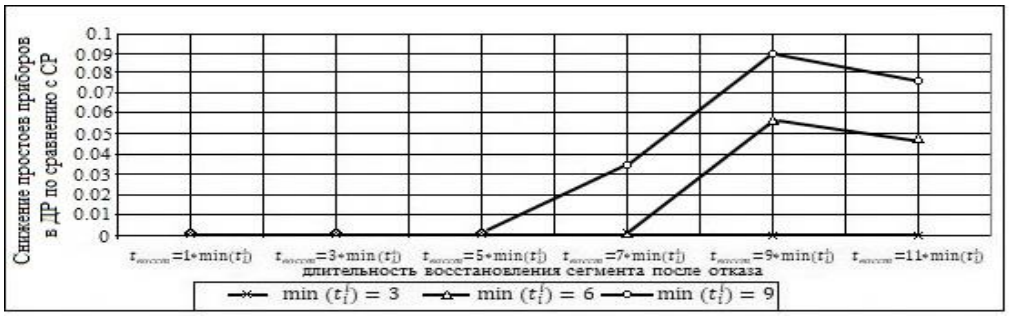


Рисунок 3.27– Снижение простоев приборов в ДР по сравнению с СР при $max(t_{2i})/min(t_{li})=2$ $max(t_{3i})/max(t_{2i})=3$

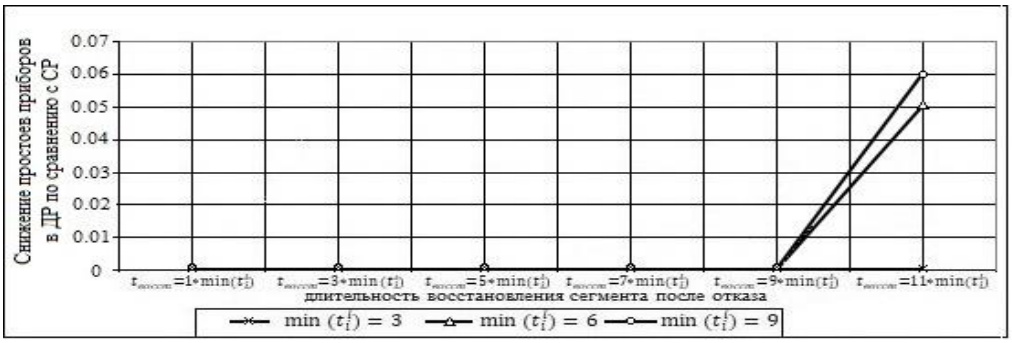


Рисунок 3.28 – Снижение простоев приборов в ДР по сравнению с СР при $max(t_{2i})/min(t_{li})=2$ и $max(t_{3i})/max(t_{2i})=3.5$

сравнению со статическим возрастает при увеличении времени восстановления отказавшего прибора ($t_{2i_{вос}} = 9 * min(t_{li})$ и $t_{2i_{вос}} = 11 * min(t_{li})$), при незначительных длительностях восстановления второго прибора динамическое расписание совпадает со статическим, учитывающим отказ прибора, степень снижения простоев приборов КС в динамическом расписании увеличивается не значительно при больших значениях длительности восстановления $t_{2i_{вос}} = 9 * min(t_{li})$ и $t_{2i_{вос}} = 11 * min(t_{li})$,составляет 7% (рисунок 3.21); результаты аналогичны при $max(t_{2i}) / min(t_{li}) = 5$, $max(t_{3i}) / max(t_{2i}) = 1.5$ (рисунок 3.22);

– при $max(t_{2i}) / min(t_{li}) = 2$, $max(t_{3i}) / max(t_{2i}) = 2$ (рисунок 3.23) снижение простоев приборов в динамическом расписании определяется особенностями, аналогичными экспериментам с параметрами $max(t_{2i}) / min(t_{li}) = 2$, $max(t_{3i}) / max(t_{2i}) = 1.5$;для $min(t_{li}) = 3$ в интервале времени простоя третьего прибора в ожидании восстановления второго размещается одно задание, количество заданий в этом интервале при увеличении времени восстановления не изменяется (отсутствуют готовые к выполнению задания); при $min(t_{li}) = 6$ или $min(t_{li}) = 9$ в интервале простоя третьего прибора в ожидании восстановления второго размещается первоначально одно задание, затем (при увеличении длительности восстановления)– два задания и так далее, после этого степень снижения простоев приборов КС в динамическом расписании не изменяется (максимальное снижение суммарных простоев приборов в динамическом расписании составляет 16%по сравнению со статическим расписанием (рисунок 3.23)); аналогичные рассуждения могут быть применены при анализе результатов экспериментов с параметрами $max(t_{2i}) / min(t_{li}) = 3$, $max(t_{3i}) / max(t_{2i}) = 2$ (рисунок 3.24), степень снижения суммарных простоев приборов в динамическом расписании уменьшается до 15%; для экспериментов с параметрами $max(t_{2i}) / min(t_{li}) = 4$, $max(t_{2i}) / min(t_{li}) = 5$, $max(t_{3i}) / max(t_{2i}) = 2$ построение динамического расписания не приводит к улучшению результатов;

– при $max(t_{2i}) / min(t_{li}) = 2$, $max(t_{3i}) / max(t_{2i}) = 2.5$, $min(t_{li}) \in \{3,6\}$ в силу больших длительностей выполнения заданий на третьем приборе формирование динамического расписания не приводит к значительному снижению простоев приборов КС (рисунок 3.25); то есть отсутствуют готовые к выполнению на этом приборе задания, которые могут быть размещены в интервале времени его простоя в ожидании окончания восстановления второго прибора после отказа; при увеличении длительности восстановления отказавшего прибора реализуется увеличение простоев третьего прибора в ожидании окончания восстановления второго,

которые могут быть заполнены готовыми к выполнению заданиями с большой длительностью, что приводит к улучшению решения (в случае $t_{2i_{вос}} = k * min(t_{li})$ при $k \in \{5,7,9,11\}$ и $min(t_{li}) = 9$)); степень снижения простоев приборов КС в динамическом расписании составляет 10% (рисунок 3.25); аналогичным образом для параметров $max(t_{2i}) / min(t_{li}) = 3$, $max(t_{3i}) / max(t_{2i}) = 2.5$ и $t_{2i_{вос}} = k * min(t_{li})$ (при $k \in \{3,5,7\}$) не фиксируется формирование лучшего динамического расписания, причиной этого является значительные длительности выполнения заданий на третьем приборе КС, что обуславливает отсутствие готовых к выполнению заданий, которые могут быть размещены в интервал времени его простоя, вызванного отказом и восстановлением второго прибора; увеличение времени восстановления отказавшего прибора ($t_{2i_{вос}} = k * min(t_{li})$ при $k \in \{9,11\}$) обуславливает увеличение длительности простоев третьего прибора в ожидании восстановления второго и возможность улучшения расписания выполнения заданий (степень снижения простоев приборов в динамическом расписании составляет 5% (рисунок 3.26)); при $max(t_{2i}) / min(t_{li}) = 4$, $max(t_{3i}) / max(t_{2i}) = 2.5$ и $max(t_{2i}) / min(t_{li}) = 5$, $max(t_{3i}) / max(t_{2i}) = 2.5$ формирование динамического расписания не приводит к улучшению значений критерия;

– при $max(t_{2i}) / min(t_{li}) = 2$, $max(t_{3i}) / max(t_{2i}) = 3$ зафиксировано улучшение решений в случае построения динамического расписания по сравнению со статическим расписанием только при значительных длительностях восстановления второго прибора (при $t_{2i_{вос}} = k * min(t_{li})$ и $k \in \{7,9,11\}$) (рисунок 3.27); это связано с тем, что при больших значениях длительностей выполнения заданий на третьем приборе отсутствовать готовые к выполнению задания, которые могут быть размещены в интервале времени его простоя; максимальная степень снижения простоев в динамическом расписании составляет 9%.

Анализ результатов исследований позволяет сделать вывод о том, что метод реализует улучшение значения критерия в динамическом расписании от 5 до 20% по сравнению со статическим. Результаты исследований по синтезу математической модели учета влияния возмущающих воздействий типа отказов прибора на многостадийный процесс выполнения заданий в КС, синтезу метода построения динамических расписаний многостадийных процессов выполнения заданий в КС с учетом отказов приборов опубликованы в работах [118, 119].

Выводы по главе 3

По материалам главы 3 сформулированы следующие выводы:

– существующие методы определения точных решений задач построения статических расписаний многостадийных процессов выполнения заданий в КС обладают ограничениями, связанных с их (задач) размерностью, ограничениями, накладываемыми на значения параметров и на вид последовательностей выполнения; это не позволяет получать решения задач построения расписаний многостадийных процессов выполнения заданий в общем виде;

– использование в качестве средств определения решений задач построения статических расписаний метаэвристических алгоритмов не позволяет получать гарантированные решения, приближающиеся к оптимальным, при различных значениях входных параметров;

– разработан метод построения статических расписаний выполнения заданий, основывающийся на «жадных» стратегиях оптимизации; использование этого метода позволяет снять ограничения на размерность задач, на вид последовательностей выполнения заданий и на значения их параметров; использование метода построения статических расписаний позволяет получать результаты, лучшие на 15-50%, чем результаты существующих метаэвристических алгоритмов;

– существующие методы построения динамических расписаний ориентированы только на получение динамических расписаний в задачах, связанных с поступлением в систему в различные моменты времени равно приоритетных заданий; использование этих методов для решения задач построения динамических расписаний с учетом поступления высокоприоритетных заданий и с учетом отказов приборов КС не представляется возможным;

– разработан метод математического моделирования влияния возмущающих воздействий разных видов на ход многостадийного процесса выполнения ЕЗ в КС, предусмотренный статическим расписанием; метод построения моделей предусматривает определение заданий, для которых может быть изменен порядок реализации действий с ними в КС с учетом вида возмущающего воздействия, и заданий, для которых порядок реализации действий на приборах не может быть изменен;

– в соответствии с методом математического моделирования влияния возмущающих воздействий на ход процесса выполнения ЕЗ в КС разработаны модели, в которых учитывается влияние воздействий следующих видов: поступление в систему для выполнения в моменты времени $d_i > 0$ заданий, приоритеты которых равны или превышают приоритеты выполняемых заданий; отказы приборов КС и их последующее восстановление;

– разработан метод построения динамических расписаний, учитывающий поступление в КС заданий в моменты времени $d_i > 0$, приоритеты которых одинаковы с приоритетами выполняемых заданий; использование этого метода позволяет на20-40% снизить простои приборов по сравнению со статическими расписаниями, в которых в каждую последовательность выполнения заданий добавлены поступившие задания;

– разработан метод построения динамических расписаний, учитывающий поступление в систему новых заданий в моменты времени $d_i > 0$, приоритеты которых превышают приоритеты выполняемых заданий; использование метода позволяет на30-45% снизить простои приборов КС при построении динамических расписаний по сравнению со статическими расписаниями, в которых порядок заданий в последовательностях их выполнения не изменяется;

– разработан метод построения динамических расписаний, учитывающий отказы и последующее восстановление приборов КС; использование данного метода позволяет до 20% снизить простои приборов КС при построении динамических расписаний по сравнению с использованием статических расписаний, в которых последовательности выполнения заданий не изменяются при учете отказа прибора и его восстановления.

ГЛАВА 4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЫПОЛНЕНИЯ ПАКЕТОВ ЗАДАНИЙ В КОНВЕЙЕРНЫХ СИСТЕМАХ И МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ РАСПИСАНИЙ ПРОЦЕССОВ ВЫПОЛНЕНИЯ ПАКЕТОВ ЗАДАНИЙ

4.1. Математическое моделирование процессов выполнения пакетов заданий в конвейерных системах, модель иерархической игры оптимизации решений при построении расписаний выполнения пакетов заданий в конвейерных системах

Задача построения расписаний многостадийных процессов выполнения пакетов возникает в ситуации, когда в КС реализуются действия с заданиями, входящими в различные их наборы. В набор заданий одного типа включаются задания, которые имеют равные длительности выполнения на приборах КС, а также равные длительности переналадки приборов КС на выполнение заданий этого типа. Решение указанной задачи предполагает, что при учете неоднородностей длительностей выполнения заданий и длительностей переналадок приборов реализуется оптимизация составов ПЗ и расписаний их выполнения в КС. Решение задачи построения расписаний многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС является актуальным для ряда прикладных сфер деятельности (обработка данных в конвейерных системах, обработка деталей в мелкосерийном производстве, восстановление поверхностей цилиндрических деталей узлов и агрегатов технологического и транспортного оборудования). Примеры построения расписаний выполнения ПЗ, предусматривающие оптимизацию их составов и порядка выполнения на приборах КС при обработке данных дистанционного зондирования Земли рассмотрены в Приложениях 2,3, примеры построения расписаний выполнения ПЗ при реализации механической обработки деталей в составе передаточных партий при восстановлении их поверхностей рассмотрены в Приложении 3. Рассмотренные применения разработанных моделей и методов показали актуальность решения указанной задачи в различных областях.

Рассматриваемый подход к решению задачи построения расписаний процессов выполнения ПЗ в КС применяется, в частности, при реализации обработки однотипных данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в Web-ориентированных сервисах мониторинга подстилающей поверхности (Приложения 2,3). В указанных сервисах в случае обнаружение НПЯ и ТВ на ОС на поверхности определение их характеристик осуществляется в областях стандартных размеров, заданных в системе. Типизация обрабатываемых данных ДЗЗ выполняется с учетом вида прибора искусственного спутника Земли, от которого получены данные, и размера области на земной поверхности, в которой идентифицируются характеристики НПЯ и ТВ на ОС. Тогда при одновременной идентификации в этих сервисах характеристик некоторого количества одинаковых НПЯ и ТВ на ОС возникает необходимость обработки наборов массивов

однотипных данных ДЗЗ. В силу неоднородностей длительностей выполнения заданий на приборах КС и неоднородностей длительностей переналадок приборов на выполнение заданий, действия с ними в КС реализуются в составе пакетов. Аналогичным образом, восстановление поверхностей цилиндрических деталей узлов и агрегатов технологического и транспортного оборудования (Приложение 3), возможно только в составе передаточных партий. Формирование составов этих партий с целью эффективного использования ресурсов оборудования и повышения производительности системы является актуальной задачей. Таким образом, построение расписаний процессов выполнения ПЗ в КС, предусматривающее оптимизацию составов пакетов и порядка реализации действий с ними на приборах систем, обеспечивает уменьшение интервала времени на выполнения заданий разных типов из наборов, а также снижение простоев приборов при выполнении заданий.

Выполненный в главе 1 анализ существующих математических моделей процессов выполнения ПЗ в параллельных системах показал, что они не соответствуют: типу рассматриваемой системы (модели для параллельно действующих приборов), виду решаемой задачи (модели выполнения пакетов при заданных директивных сроках, модели выполнения фиксированных ПЗ). Применение многопараметрических моделей процессов при оптимизации составов ПЗ при использовании ЧЦЛП, а также применение графовых моделей процессов выполнения ПЗ ограничено размерностью задач. По этой причине разработка методов математического моделирования процессов выполнения ПЗ в КС является актуальной.

В соответствии с постановкой задачи построения расписаний выполнения ПЗ осуществлена декомпозиция обобщенной функции системы на совокупность иерархически упорядоченных подцелей (функций) ([85,86]), каждая из которых реализуется на соответствующем ей уровне иерархии системы построения расписаний. При разбиении обобщённой цели на подцели имеют место следующие свойства иерархической системы [85,86]: 1) очередность принятия решений – свойство, определяющее необходимость передачи сформированных решений с одного уровня на другой; 2) зависимость степени оптимальности решения на вышестоящем уровне от лучшего решения на нижестоящем уровне; 3) достижение обобщённой цели системы возможно при достижении ее внутренних подцелей (подцелей на каждом уровне иерархии). На основе декомпозиции обобщенной функции системы, реализующей построение расписаний выполнения ПЗ, сформулированы следующие иерархически упорядоченные функции: 1) оптимизация решений по составам ПЗ; 2) оптимизация расписаний выполнения ПЗ в КС.

В силу требования оперативного выполнения ПЗ для оценки оптимальности решений на каждом уровне необходимо анализировать: 1) на верхнем уровне – составы ПЗ с точки зрения времени окончания их выполнения; 2) на нижнем уровне – расписания выполнения ПЗ с учетом использования временного ресурса приборов, характеризуемого суммарными их простоя-

ми. На верхнем уровне обеспечивается достижение внешней цели системы – выполнение ПЗ на интервале времени минимальной длительности. На нижнем уровне обеспечивается достижение внутренней цели системы – эффективного использования ресурсов приборов КС.

Процедура оптимизации составов ПЗ и расписаний их выполнения в КС предполагает определенный порядков построения решений: первоначально определяется решение по составам ПЗ *n* типов, затем для сформированного решения по составам ПЗ определяется решение по расписаниям их выполнения [85]. На основе решения по расписанию выполнения ПЗ в КС осуществляется оценка оптимальности решения по составам пакетов.

С целью моделирования иерархических структур с определенным порядком принятия решений на их уровнях и обменом решениями между уровнями применена теория иерархических игр [89-99]. Использование теоретико-игрового подхода предусматривает закрепление игроков за каждым уровнем оптимизации решений. В этом случае ведущий игрок первого уровня реализует формирование решений по составам ПЗ, ведомый игрок второго уровня – по расписаниям выполнения ПЗ в КС. Порядок взаимодействия игроков следующий: 1) первый ход делает ведущий игрок, определяя составы ПЗ, и передает решение на нижний (второй) уровень; 2) второй ход делает ведомый игрок, формируя расписание выполнения ПЗ, которое является локально оптимальным для текущего решения по составам ПЗ, и передает решение на первый уровень для оценки на его основе оптимальности решения по составам пакетов; 3) игрок первого уровня формирует новое решение по составам ПЗ, передает его игроку второго уровня; оптимизация решений по составам ПЗ на первом уровне реализуется с учетом локально оптимальных расписаний выполнения ПЗ в КС. Игроки реализуют указанный порядок ходов до тех пор, пока не будет получено расписание выполнения ПЗ в КС, состоящее из локально-оптимальных решений, сформированных на каждом из уровней (ситуация равновесия в иерархической игре).

Стратегия поведения ведущего игрока основывается на применении им принципа оптимизма, предусматривающего ожидание от ведомого игрока принятия решений, которые обеспечат минимизацию критерия на первом уровне (выигрышем ведущего игрока на первом уровне является снижение времени окончания выполнения ПЗ в КС). Стратегия поведения ведомого игрока состоит в выборе таких решений, которые обеспечат реализацию принципа благожелательности (ведомый игрок формирует такие решения, которые обеспечат достижение цели ведущим игроком в максимальной степени – максимизируют выигрыш ведущего игрока).

Решения, формируемые игроком нижестоящего уровня, благоприятствуют достижению игроком вышестоящего уровня его цели – минимизации длительности выполнения ПЗ в КС. Минимизируя простои приборов КС при построении расписания выполнения ПЗ ведомый игрок обеспечивает, тем самым, уменьшение длительности выполнения пакетов в КС (реализа-

цию цели ведущего игрока). Решения, формируемые ведущим игроком, являются не зависимыми от решений ведомого игрока.

Организация системы построения расписаний выполнения ПЗ в КС предполагает, что подсистемы, функционирующие на уровнях иерархии, выполняют идентификацию локально оптимальных решений для соответствующих подзадач. Использование аппарата теории иерархических игр предполагает задание на каждом уровне иерархии критерия оптимальности решений. В общем виде задача определения локально оптимальных решений в иерархической игре определена следующим образом [89-99]:

– верхний уровень иерархии (оптимизация составов ПЗ):

$$f_1(x, y^*) \to min\,(max),\ \ x \in N_1\ , \text{при}\ g(x) \le a\ , \tag{4.1}$$

где N_1 – множество решений на верхнем уровне, y^* – локально оптимальное решение, формируемое на нижнем уровне для решения $x \in N_1$ с верхнего уровня, $g(x) \le a$ – ограничения на множество допустимых решений N_1 на верхнем уровне иерархии;

– нижний уровень иерархии (оптимизация расписаний выполнения ПЗ в КС):

$$f_2(x, y) \to min\,(max),\ \ y \in N_2(x), \text{при}\ q(y) \le b, \tag{4.2}$$

где $N_2(x)$ – множество решений на нижнем уровне, определяемое решением x с верхнего уровня, $q(y) \le b$ – ограничения на множество допустимых решений $N_2(x)$ на нижнем уровне.

Равновесие в игре достигается, когда на верхнем уровне определено решение, доставляющее минимум (максимум) критерия, а на нижнем уровне сформировано соответствующее ему расписание [89-99]. Решение задачи оптимизации составов ПЗ и расписаний их выполнения обеспечивается определением ситуации равновесия в иерархической игре. В силу сказанного, совершенствование методов построения расписаний процессов выполнения ПЗ в КС связано с применением теоретико–игрового подхода (теории иерархических игр).

В силу того, что построение расписаний выполнения ПЗ в КС реализуется в составе иерархической системы оптимизации решений, то и в моделях многостадийных процессов выполнения ПЗ должны быть учтены особенности иерархического способа решения задачи. В этом случае метод математического моделирования многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС предусматривает иерархическую (распределенную по уровням) организацию компонент моделей указанных процессов. Таким образом, метод математического моделирования процессов выполнения ПЗ в КС предусматривает организацию их моделей в виде иерархически

упорядоченных и взаимосвязанных компонент. При исследовании многостадийных процессов на каждом из уровней моделей будет интерпретироваться определенная их компонента.

Для синтеза математической модели процессов выполнения ПЗ в КС, модели иерархической игры оптимизации решений по составам ПЗ и расписаниям реализации действий с ними на приборах КС в рассмотрение введены обозначения: n – количество типов заданий; n^i ($i=\overline{1,n}$) – количество заданий каждого типа; m_i – количество ПЗ i-го типа, формируемых на первом уровне в иерархической игре, элементы m_i ($i=\overline{1,n}$) образуют вектор M; A – матрица составов ПЗ, элементы a_{ih} которой – это количество заданий i-го типа в h-м пакете ($h \le m_i$), размер матрицы A – $n \times m$, где $m = \underset{i=1,n}{max}(m_i)$. Если $m_i < m$, то $a_{ih} = 0$ ($h = \overline{m_i + 1,m}$). Вектор $M = (m_1, m_2, .., m_n)^T$ и матрица $A = \|a_{ih}\|_{n \times m}$ образуют кортеж вида *[M,A]* – компоненту модели, соответствующую составам ПЗ. Для формализации вида последовательностей π^l ($l=\overline{1,L}$) расписания π введена матрица P порядка выполнения ПЗ в КС (размер матрицы $n \times n_p$, n_p – количество ПЗ в последовательностях π^l ($n_p = \sum_{i=1}^{n} m_i$)). Элемент $p_{ij}^l = 1$, если ПЗ i-го типа занимает в последовательностях π^l j-ю позицию, в противном случае $p_{ij}^l = 0$. Расписание выполнения ПЗ строится в предположении, что порядок действий с ними на приборах КС одинаков, поэтому достаточно определения одной матрицы P. В рассмотрение введена матрица R – матрица количества заданий i-х типов в пакетах, занимающих в π^l j-е позиции (r_{ij} – количество заданий i-го типа в пакете, занимающем j-ю позицию в π^l, размер матрицы $n \times n_p$).

В рассмотрение введены следующие обозначения: L – количество приборов в КС; t_{li} – длительность выполнения заданий i-го типа на l-м приборе КС ($l=\overline{1,L}$); T – матрица длительностей выполнения заданий i-х типов на l-х приборах КС (размер $L \times n$), $t_{ii'}^l$ – длительность переналадки l-го прибора с выполнения заданий i-го типа на выполнение заданий i'-го типа; t_{ii}^l – время первоначальной наладки l-го прибора на выполнение заданий i-го типа; T^l – матрицы переналадок l-х приборов с выполнения заданий i-го типа на выполнение заданий i'-го типа (размер $n \times n$, $l=\overline{1,L}$), t_{ji}^{nl} – момент времени начала выполнения ПЗ i-го типа, занимающего j-ю позицию в последовательности π^l; t_{jq}^{0l} – момент времени начала выполнения q-го задания в пакете, занимающем в π^l j-ю позицию (q – номер задания в пакете в j-й позиции в

π^l, $q = \overline{1,n_j}$, $n_j = \sum_{h=1}^{n} r_{hj}$, где n_j – количество заданий в пакете в j-й позиции в π^l); T^{0l} – матрицы моментов времени начала выполнения q-х заданий в пакетах, занимающих в π^l j-е позиции (размер $n_p \times max(n_j)$, $l = \overline{1,L}$). Тогда кортеж вида $[P,R,\{T^{0l} \mid l = \overline{1,L}\}]$ – компонента модели, соответствующая расписаниям выполнения ПЗ в КС.

Таким образом, математическая модель многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС представляет собой следующие иерархически упорядоченные компоненты:

– на верхнем уровне компонента вида $[M,A]$, соответствующая составам пакетов;

– на нижнем уровне компонента вида $[P,R,\{T^{0l} \mid l = \overline{1,L}\}]$, соответствующая расписаниям выполнения пакетов на приборах системы.

В соответствии с функциями уровней иерархии подсистем между ними выполняется обмен информацией следующего вида: 1) на вход первого уровня подаются значения количества типов заданий n и значения n^i количества заданий каждого i-го типа ($i = \overline{1,n}$); с выхода уровня на вход второго уровня передаются составы ПЗ в виде $[M,A] \in N_1$; 2) на вход второго уровня – составы ПЗ в виде кортежа $[M,A] \in N_1$; с выхода уровня – локально оптимальное расписание выполнения ПЗ в КС (кортеж вида $[P,R,\{T^{0l} \mid l = \overline{1,L}\}]^* \in N_2([M,A])$).

С учетом введенных обозначений и реализованных рассуждений модель иерархической игры определения составов ПЗ и расписаний их выполнения в КС имеет вид:

– первые уровень:

$$f_1([M,A],[P,R,\{T^{0l} \mid l = \overline{1,L}\}]^*) \to min\,(max),\ [M,A] \in N_1; \qquad (4.3)$$

– второй уровень:

$$f_2([P,R,\{T^{0l} \mid l = \overline{1,L}\}] \to min\,(max),\ [P,R,\{T^{0l} \mid l = \overline{1,L}\}] \in N_2([M,A]), \qquad (4.4)$$

где N_1 и $N_2([M,A])$ – множества решений на первом и втором уровнях иерархии в игре. В соответствии с (4.3), (4.4) оптимальность решения по составам ПЗ оценивается на основе оптимального расписания выполнения пакетов в КС, сформированного на втором уровне.

С использованием матриц P и T^{0l} элементы матрицы T^{nl} определяются следующим образом: $t_{ji}^{nl} = p_{ij} \cdot t_{j1}^{0l}$, где $i = \overline{1,n}$, $j = \overline{1,n}_p$, t_{j1}^{0l} – момент времени начала выполнения первого задания в пакете, занимающем j-ю позицию в π^l на l-ом приборе ($l = \overline{1,L}$). Рассуждения, направленные на формализацию способа определения значений t_{ji}^{nl} и t_{jq}^{0l}, определены в соответствии с заданными видами последовательностей (рисунок 4.1).

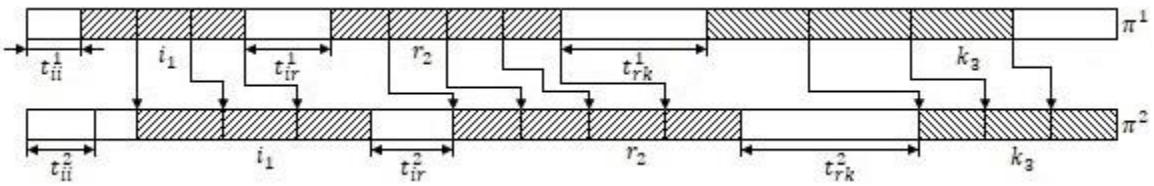


Рисунок 4.1– Виды последовательностей, используемые при формировании выражений для вычисления значений t_{ji}^{n1} и t_{jq}^{01}

Для первого прибора КС выражения для t_{jq}^{01} формируются следующим образом:

– если t_{11}^{01} – время начала выполнения *(q=1)*-го задания в пакете, занимающем первую позицию в последовательности π^1, а t_{1i}^{n1} – время начала выполнения ПЗ *i*-го типа, занимающего в π^l первую позицию, то $\boldsymbol{i = \overline{1,n}}$;

– выражение $\sum_{h=1}^{n} t_{hh}^{1} \cdot p_{h1}$ определяет интервал наладки первого прибора на выполнение ПЗ *i*-го типа в *(j=1)*-ой позиции в π^1, выражение $(q-1)\sum_{h=1}^{n} t_{1h} \cdot p_{h1}$ определяет время выполнения предшествующих *(q-1)*-го задания в пакете, занимающем *(j=1)*-ю позицию в π^1, тогда значение t_{1q}^{0l} начала выполнения *q*-го задания в первом пакете в π^1 ($q = \overline{1,n_1}$, n_1 – количество заданий в пакете, занимающем (*j=1*)-ю позицию в π^1, $n_1 = \sum_{h=1}^{n} r_{h1}$), определяется выражением:

$$t_{1q}^{0l} = \sum_{h=1}^{n} t_{hh}^{1} \cdot p_{h1} + (q-1)\sum_{h=1}^{n} t_{1h} \cdot p_{h1} \ ; \qquad (4.5)$$

– если $t_{i_1 i_2}^{1nep}$ – время переналадки первого прибора КС с выполнения заданий *i*-го типа (первая позиция пакета в π^1) на выполнение заданий другого типа (вторая позиция пакета в π^1), а t_{21}^{0l} – время начала выполнения задания в первой позиции во втором пакете (t_{2i}^{nl} – начало выполнения этого ПЗ *i*-го типа в π^1 ($t_{2i}^{nl} = t_{21}^{0l}$)), то с учетом (4.5) значения t_{2i}^{nl} и t_{21}^{0l} определяются выражением вида:

$$t_{2i}^{n1} = t_{21}^{01} = \sum_{h=1}^{n} t_{hh}^{1} p_{h1} + \sum_{h=1}^{n} t_{1h} r_{h1} + t_{i_1 i_2}^{1nep} \quad , \qquad (4.6)$$

где значение $t_{i_1 i_2}^{lnep}$ определяется следующим образом:

$$t_{i_1 i_2}^{1nep} = t_{i_r i_{r'}}^{1}, \text{ где } \begin{cases} i_r = i \mid p_{i1}^1 = 1, i = \overline{1,n}; \\ i_{r'} = i' \mid p_{i'2}^1 = 1, i' = \overline{1,n}. \end{cases}$$

Выражение $t_{2i}^{n1} = t_{21}^{01} = \sum_{h=1}^{n} t_{hh}^1 p_{h1} + \sum_{h=1}^{n} t_{1h} r_{h1} + t_{i_1 i_2}^{1n\,e\,p}$ позволяет определить момент времени начала выполнения второго в π^1 ПЗ, выражение $(q-1)\sum_{h=1}^{n} t_{1h} \cdot p_{h2}$ – длительность выполнения заданий, предшествующих q-му заданию в пакете в (j=2)-ой позиции в π^1, тогда момент времени начала выполнения q-го задания в пакете, занимающем (j=2)-ю позицию в π^1, определяется следующим образом:

$$t_{2q}^{01} = \sum_{h=1}^{n} t_{hh}^1 \cdot p_{h1} + \sum_{h=1}^{n} t_{1h} \cdot r_{h1} + t_{i_1 i_2}^{1nep} + (q-1)\sum_{h=1}^{n} t_{1h} \cdot p_{h2}, \quad q = \overline{1,n_2}. \tag{4.7}$$

По аналогии с (4.6), (4.7) сформированы выражения для вычисления моментов времени начала выполнения третьего, четвёртого пакетов и q-х заданий в этих пакетах:

$$t_{3i}^{n1} = \sum_{p=1}^{n} t_{hh}^1 \cdot p_{h1} + \sum_{h=1}^{n} t_{1h} \cdot r_{h1} + t_{i_1 i_2}^{1nep} + \sum_{h=1}^{n} t_{1h} \cdot r_{h2} + t_{i_2 i_3}^{1nep};$$

$$t_{3q}^{01} = \sum_{h=1}^{n} t_{hh}^1 \cdot p_{h1} + \sum_{h=1}^{n} t_{1h} \cdot r_{h1} + t_{i_1 i_2}^{1nep} + \sum_{h=1}^{n} t_{1h} \cdot r_{h2}^1 + t_{i_2 i_3}^{1nep} + (q-1)\sum_{h=1}^{n} t_{1h} \cdot p_{h3};$$

$$t_{4i}^{n1} = \sum_{h=1}^{n} t_{hh}^1 \cdot p_{h1} + \sum_{h=1}^{n} t_{1h} \cdot r_{h1} + t_{i_1 i_2}^{1nep} + \sum_{h=1}^{n} t_{1h} \cdot r_{h2} + t_{i_2 i_3}^{1nep} + \sum_{h=1}^{n} t_{1h} \cdot r_{h3} + t_{i_3 i_4}^{1nep};$$

$$t_{4q}^{01} = \sum_{h=1}^{n} t_{hh}^1 \cdot p_{h1} + \sum_{h=1}^{n} t_{1h} \cdot r_{h1} + t_{i_1 i_2}^{1nep} + \sum_{h=1}^{n} t_{1h} \cdot r_{h2} + t_{i_2 i_3}^{1nep} + \sum_{h=1}^{n} t_{1h} \cdot r_{h3} + t_{i_3 i_4}^{1nep} + (q-1)\sum_{h=1}^{n} t_{1h} \cdot p_{h4}.$$

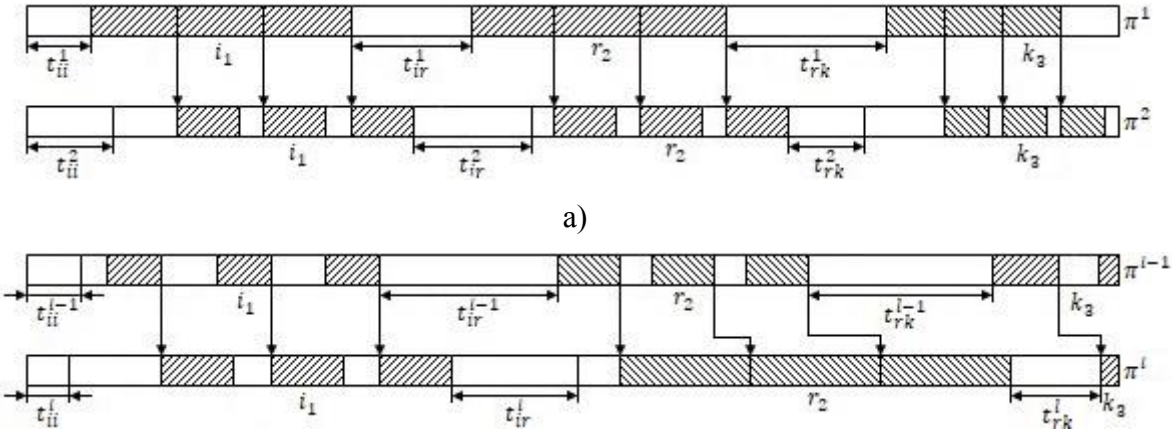
Момент времени начала выполнения ПЗ i-го типа, занимающего j-ю позицию в π^1, определяется выражением вида:

$$t_{ji}^{n1} = t_{j1}^{01} = \sum_{h=1}^{n} t_{hh}^1 \cdot p_{h1} + \sum_{f=1}^{j-1}\sum_{h=1}^{n} t_{1h} \cdot r_{hf} + \sum_{h=1}^{j-1} t_{i_h i_{h+1}}^{1nep}. \tag{4.8}$$

Моменты времени начала выполнения задания в q-ой позиции в пакете в ($j > 1$)-й позиции в π^1:

$$t_{jq}^{01} = \sum_{h=1}^{n} t_{hh}^1 \cdot p_{h1} + \sum_{f=1}^{j-1}\sum_{h=1}^{n} t_{1h} \cdot r_{hf} + \sum_{h=1}^{j-1} t_{i_h i_{h+1}}^{1nep} + (q-1)\sum_{h=1}^{n} t_{1h} \cdot p_{hj} \tag{4.9}$$

Выражение для вычисления $t_{jq}^{0l}\,(q=\overline{1,n_j}, l\geq 2)$ сформированы в соответствии с заданным порядком выполнения ПЗ (рисунок 4.2, при $l\neq 1$).



а)

б)

Рисунок 4.2– Виды последовательностей, используемые при формировании выражений для t_{ji}^{nl} и t_{jq}^{0l}

Для l=2 и j=1 (рисунок 4.2а) имеем:

$$t_{11}^{02}=t_{1i}^{n2}=max(\sum_{h=1}^{n}t_{hh}^{2}\cdot p_{h1};t_{11}^{01}+\sum_{h=1}^{n}t_{1h}\cdot p_{h1});$$

$$t_{12}^{02}=max(t_{11}^{02}+\sum_{h=1}^{n}t_{2h}\cdot p_{h1};t_{12}^{01}+\sum_{h=1}^{n}t_{1h}\cdot p_{h1});$$

…

$$t_{1n_1}^{02}=max(t_{1,n_1-1}^{02}+\sum_{h=1}^{n}t_{2h}\cdot p_{h1};t_{1n_1}^{01}+\sum_{h=1}^{n}t_{1h}\cdot p_{h1}),$$

где $n_1=\sum_{h=1}^{n}r_{h1}$ – количество заданий в пакете, занимающем (j=1)-ю позицию в π^2. Выражения для определения $t_{2q}^{02}\,(q=\overline{1,n_2}, n_2=\sum_{h=1}^{n}r_{h2})$ (второй пакет в π^2 на (l=2)-м приборе) имеют вид:

$$t_{21}^{02}=t_{2i}^{n2}=max(t_{1n_1}^{02}+\sum_{h=1}^{n}t_{2h}\cdot p_{h1}+t_{i_1i_2}^{2nep};t_{21}^{01}+\sum_{h=1}^{n}t_{1h}p_{h,2});$$

$$t_{22}^{02}=max(t_{21}^{02}+\sum_{h=1}^{n}t_{2h}\cdot p_{h2};t_{22}^{01}+\sum_{h=1}^{n}t_{1h}\cdot p_{h2});\ \ldots;$$

$$t_{2n_2}^{02}=max(t_{2,n_2-1}^{02}+\sum_{h=1}^{n}t_{2h}\cdot p_{h2};t_{2,n_2}^{01}+\sum_{h=1}^{n}t_{1h}\cdot p_{h2}).$$

Выражения для t_{3i}^{n2} и t_{3q}^{02} имеют вид:

$$t_{31}^{02} = t_{3i}^{n2} = max(t_{2,n_2}^{02} + \sum_{h=1}^{n} t_{2h} \cdot p_{h2} + t_{i_2 i_3}^{2nep}; t_{31}^{01} + \sum_{h=1}^{n} t_{1h} \cdot p_{h3});$$

$$t_{3q}^{02} = max(t_{3,q-1}^{02} + \sum_{h=1}^{n} t_{2h} \cdot p_{h3}; t_{3q}^{01} + \sum_{h=1}^{n} t_{1h} \cdot p_{h3}), \text{ где } q = \overline{2,n_3}, n_3 = \sum_{h=1}^{n} r_{h3}.$$

На основе сформированных выражений получены выражения для определения t_{jq}^{0l} (с учётом особенностей для t_{11}^{0l} и t_{j1}^{0l}, при $l = \overline{2,L}$, $q = \overline{1,n_j}$, $n_j = \sum_{h=1}^{n} r_{hj}$) в виде:

$$t_{11}^{0l} = t_{1i}^{nl} = max(\sum_{h=1}^{n} t_{hh}^{l} \cdot p_{h1}; t_{11}^{0l-1} + \sum_{h=1}^{n} t_{(l-1),h}^{l} \cdot p_{h1});$$

$$t_{j1}^{0l} = t_{ji}^{nl} = max(t_{j-1,n_{j-1}}^{0l} + \sum_{h=1}^{n} t_{lh} \cdot p_{h,j-1} + t_{i_{j-1} i_j}^{lnep}; t_{j1}^{0l-1} + \sum_{h=1}^{n} t_{(l-1),h} \cdot p_{hj}); \qquad (4.10)$$

. . . . ;

$$t_{jq}^{0l} = max(t_{jq-1}^{0l} + \sum_{h=1}^{n} t_{lh} \cdot p_{hj}; t_{jq}^{0l-1} + \sum_{h=1}^{n} t_{(l-1),h} \cdot p_{hj}).$$

Введенные в рассмотрение иерархически упорядоченные компоненты вида *[M,A]* и $[P,R,\{T^{0l} \mid l = \overline{1,L}\}]$ совместно с выражениями (4.5), (4.8)-(4.10) для расчета временных характеристик образуют математическую модель многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС.

Метод построения расписаний выполнения ПЗ на втором уровне иерархии аналогичен методу построения расписаний выполнения ЕЗ [113] и предполагает добавление рассматриваемого пакета в конец последовательностей π^l ($l = \overline{1,L}$) и определение позиции этого пакета в π^l ($l = \overline{1,L}$), гарантирующей минимум критерия (минимум простоев приборов КС). Критерий оптимальности решений по порядкам выполнения ПЗ характеризует простои приборов КС при реализации действий с текущим количеством пакетов, находящихся в π^l ($l = \overline{1,L}$). В этом случае критерий оптимальности расписаний выполнения ПЗ на нижнем уровне учитывает: а) простои приборов в ожидании начала выполнения ПЗ; б) простои приборов в ожидании готовности заданий при их выполнении внутри пакетов. Суммарные простои всех приборов в ожидании начала выполнения ПЗ в последовательностях π^l определяются выражением $\sum_{l=1}^{L} t_{11}^{0l}$. Значение длительности интервала простоя *l*-го прибора в ожидании начала выполнения ПЗ, занимающего π^l в *j*-ю позицию, определяется выражением вида: $t_{j1}^{0l} - \left[t_{j-1,n_{j-1}}^{0l} + \sum_{h=1}^{n} t_{lh} \cdot p_{h,j-1} \right]$,

где $j>1$, $n_{j-1}=\sum_{h=1}^{n} r_{h,j-1}$ – количество заданий в предшествующем пакете. Простои l-го прибора КС в ожидании начала выполнения ПЗ, занимающих в π^l j-е позиции ($j=\overline{2,n_p}$, где n_p – количество пакетов в π^l) определяется выражением: $\sum_{j=2}^{n_p}\left[t_{j1}^{0l}-\left[t_{j-1,n_{j-1}}^{0l}+\sum_{h=1}^{n} t_{lh}\cdot p_{h,j-1}\right]\right]$.

Суммарные простои всех L приборов в ожидании начала выполнения ПЗ определяется выражением вида:

$$\sum_{l=1}^{L}\sum_{j=2}^{n_p}\left[t_{j1}^{0l}-\left[t_{j-1,n_{j-1}}^{0l}+\sum_{h=1}^{n} t_{lh}\cdot p_{h,j-1}\right]\right]. \qquad (4.11)$$

Простои l-го прибора в ожидании готовности к выполнению q-го ($q=\overline{2,n_j}$) задания в пакете в j-ой позиции в π^l, определяются выражением вида: $t_{jq}^{0l}-\left[t_{j,q-1}^{0l}+\sum_{h=1}^{n} t_{lh}\cdot p_{hj}\right]$ ($q=\overline{2,n_j}$, $j=\overline{1,n_p}$). Это выражение соответствует интервалу времени между окончанием выполнения *(q-1)*-го задания и началом выполнения q-го задания в пакете в j-ой позиции в π^l. Суммарные простои l-го прибора КС в ожидании готовности к выполнению всех заданий в пакете, занимающем j-ю позицию в π^l, вычисляется с использованием выражения:

$$\sum_{q=2}^{n_j}\left[t_{jq}^{0l}-\left[t_{j,q-1}^{0l}+\sum_{h=1}^{n} t_{lh}\cdot p_{hj}\right]\right], \qquad (4.12)$$

где n_j – количество заданий в пакете, занимающем j-ю позицию в π^l. На основе (4.12) общие простои l-го прибора КС в ожидании готовности к выполнению заданий во всех пакетах в π^l определяется выражением: $\sum_{j=1}^{n_p}\sum_{q=2}^{n_j}\left[t_{jq}^{0l}-\left[t_{j,q-1}^{0l}+\sum_{h=1}^{n} t_{lh}\cdot p_{hj}\right]\right]$. Суммарные простои всех приборов КС в ожидании готовности к выполнению заданий в пакетах вычисляются выражением:

$$\sum_{l=2}^{L}\sum_{j=1}^{n_p}\sum_{q=2}^{n_j}\left[t_{jq}^{0l}-\left[t_{j,q-1}^{0l}+\sum_{h=1}^{n} t_{lh}\cdot p_{hj}\right]\right]. \qquad (4.13)$$

Критерий оптимальности расписаний на нижнем уровне иерархии для текущего количества пакетов, размещенных в π^l $(l=\overline{1,L})$, характеризует суммарные простои всех приборов КС

при определении порядка их выполнения. При его формировании учтены: выражение $\sum_{l=1}^{L} t_{11}^{0l}$, выражения (4.11) и (4.13). Тогда критерий оптимальности расписаний выполнения ПЗ в КС имеет вид:

$$\sum_{l=1}^{L} t_{11}^{0l} + \sum_{l=1}^{L}\sum_{j=2}^{n_p}\left[t_{j1}^{0l} - \left[t_{j-1,n_{j-1}}^{0l} + \sum_{h=1}^{n} t_{lh}\cdot p_{h,j-1}\right]\right] + \sum_{l=2}^{L}\sum_{j=1}^{n_p}\sum_{q=2}^{n_j}\left[t_{jq}^{0l} - \left[t_{j,q-1}^{0l} + \sum_{h=1}^{n} t_{lh}\cdot p_{hj}\right]\right]. \quad (4.14)$$

Использование критерия (4.14) позволяет реализовать внутреннюю цель функционирования системы выполнения ПЗ, соответствующую эффективному использованию ее ресурсов.

Критерий на верхнем уровне иерархической игры соответствует внешней цели системы, определяющей эффективное выполнение заданий с точки зрения длительности. Лучшему решению по составам ПЗ должна соответствовать минимальная длительность их выполнения в КС. Если n_p – общее количество ПЗ, выполняемых в КС, определенное на верхнем уровне иерархии в игре (индекс последнего пакета в последовательностях π^l $(l=\overline{1,L})$), n_{n_p} – номер последнего задания в пакете с номером n_p ($n_{n_p} = \sum_{h=1}^{n} r_{h,n_p}$), то $t_{n_p,n_{n_p}}^{0L}$ – момент времени начала выполнения последнего (n_{n_p} -го) задания в этом пакете, а время окончания выполнения этого пакетов на L-м приборе определяется выражением вида: $t_{n_p,n_{n_p}}^{0L} + \sum_{h=1}^{n} t_{Lh}\cdot p_{hn_p}$. Введенное выражение позволяет определить значение момента времени окончания выполнения ПЗ в КС и оно является критерием оптимальности их составов на верхнем уровне игры. На основе полученных выражений синтезирована модель иерархической игры оптимизации решений по составам ПЗ и расписаниям из выполнения в КС в следующем виде:

– верхний уровень:

$$min\ f_1,\ \text{где}\ f_1 = t_{n_p,n_{n_p}}^{0L} + \sum_{h=1}^{n} t_{Lh}\cdot p_{h,n_p}\ ; \quad (4.15)$$

- нижний уровень:

$$min\ f_2, \quad (4.16)$$

$$f_2 = \sum_{l=2}^{L} t_{11}^{0l} + \sum_{l=1}^{L}\sum_{j=2}^{n_p}\left[t_{j1}^{0l} - \left[t_{j-1,n_{j-1}}^{0l} + \sum_{h=1}^{n} t_h^l\cdot p_{h,j-1}\right]\right] + \sum_{l=2}^{L}\sum_{j=1}^{n_p}\sum_{q=2}^{n_j}\left[t_{jq}^{0l} - \left[t_{j,q-1}^{0l} + \sum_{h=1}^{n} t_h^l\cdot p_{hj}\right]\right].$$

Ограничения на множества решений N_1, $N_2([M,A])$ имеют вид:

– ограничение на количество заданий в пакетах (первый уровень игры):

$$\sum_{h=1}^{m_i} a_{ih} = n^i; \quad \sum_{i=1}^{n}\sum_{h=1}^{m_i} a_{ih} = \sum_{i=1}^{n} n^i; \tag{4.17}$$

– ограничение на количество ПЗ i-го типа в последовательностях $\pi^l\ (l=\overline{1,L})$ их выполнения на приборах КС (второй уровень иерархической игры):

$$\sum_{j=1}^{n_p} p_{ij} = m_i; \tag{4.18}$$

– ограничение на общее количество ПЗ в последовательностях $\pi^l\ (l=\overline{1,L})$ их выполнения на приборах КС (второй уровень иерархической игры):

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n_p} p_{ij} = \sum_{i=1}^{n} m_i; \tag{4.19}$$

– ограничение на количество заданий i-го типа в пакетах в последовательностях $\pi^l\ (l=\overline{1,L})$, выполняемых на приборах КС (второй уровень иерархической игры):

$$\sum_{j=1}^{n_p} r_{ij} = \sum_{h=1}^{m_i} a_{ih}; \tag{4.20}$$

– ограничение на общее количество заданий i-х типов ($i=\overline{1,n}$) в пакетах в последовательностях $\pi^l\ (l=\overline{1,L})$, выполняемых на приборах КС (второй уровень иерархической игры):

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n_p} r_{ij} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{h=1}^{m_i} a_{ih}. \tag{4.21}$$

На основе модели (4.15)-(4.21) взаимодействие игроков первого и второго уровней иерархической игры реализуется следующим образом: игрок первого уровня формирует решение по составам ПЗ $[M,A]_S \in N_1$. В соответствии с решением $[M,A]_S$ выбирается решение

$$[P,R,\{T^{0l}\,|\,l=\overline{1,L}\}]^*_S = arg \min_{[P,R,\{T^{0l}\,|\,l=\overline{1,L}\}]_S \in N_2([M,A]_S)} f_2([M,A]_S, [P,R,\{T^{0l}\,|\,l=\overline{1,L}\}]_S)$$ (ре-

шения на втором уровне принадлежат множеству $N_2([M,A]_S)$, соответствующему решению $[M,A]_S \in N_1$). Ответом ведомого игрока на действия ведущего является сформированное им решение $[P,R,\{T^{0l}\,|\,l=\overline{1,L}\}]^*_S$, выбранное среди расписаний, входящих в $N_2([M,A]_S)$. Определение $[M,A]_S^* \in N_1$ реализуется путем решения задачи $\min_{[M,A]_S \in N_1} f_1([M,A]_S, [P,R,\{T^{0l}\,|\,l=\overline{1,L}\}]^*_S)$. То есть локально оптимальное решение по составам пакетов задний, выполняемых в КС, определяется как.

$[M,A]^* = arg \min_{[M,A]_S \in N_1} f_1([M,A]_S, [P,R,\{T^{0l} \mid l = \overline{1,L}\}]^*_S)$. Решения $[M,A]_S^* \in N_1$ и $[P,R,\{T^{0l} \mid l = \overline{1,L}\}]^*_S$ (где $[P,R,\{T^{0l} \mid l = \overline{1,L}\}]^*_S \in N_2([M,A]^*_S)$) соответствуют ситуации равновесия в иерархической игре двух лиц [89-99].

В результате синтезирована двухуровневая модель иерархической игры построения расписаний выполнения ПЗ в КС, с использованием которой оптимизируются решения по составам ПЗ и расписаниям их выполнения в КС. Результаты исследований по синтезу математической модели процессов выполнения ПЗ в КС, модели иерархической игры оптимизации решений по составам ПЗ и расписаниям их выполнения в КС представлены в работах [120-122].

4.2. Метод оптимизации решений по составам пакетов заданий в иерархической игре построения расписаний их выполнения в конвейерных системах

Выполненный в главе 1 анализ существующих методов построения расписаний выполнения ПЗ в параллельных системах позволил определить следующие их недостатки: ограничения на размерность задачи (при использовании ЧЦЛП); не возможность гарантированного получения решений, приближающихся к оптимальному решению, при различных значениях входных параметров (эвристические правила и метаэвристические алгоритмы); не соответствие вида решаемой задачи (формирование составов ПЗ на основе указанных для заданий директивных сроков). В силу того, что задача определения составов ПЗ и расписаний их выполнения является *NP*-трудной ([9], [59-64], [72]), невозможно использовать существующие методы для ее решения в общем виде, разработка новых численных методов построения расписаний выполнения ПЗ в КС является актуальной. Решение задачи оптимизации составов ПЗ и расписаний их выполнения является актуальным при обработке данных и при обработке деталей в мелкосерийном производстве в составе передаточных партий (Приложения 2,3).

В основу разработанного метода определения составов ПЗ, выполняемых в КС, положен подход, реализующий локальную оптимизацию решений. При этом способ определения составов ПЗ использует поиск лучшего решения в рамках окрестностей текущего локально оптимального решения с различными значениями метрик.

Для синтеза метода формирования локально оптимальных решений по составам ПЗ i-х типов ($i = \overline{1,n}$) в рассмотрение введены следующие обозначения: i' – идентификатор типа заданий, составы пакетов которых изменяются на текущем шаге алгоритма; m_i – количество пакетов заданий i'-го типа, составы которых определяются; s– индекс итерации алгоритма поиска лучшего решения в рамках окрестностей с различными значениями метрик текущего локально

оптимального решения; g – индекс шага алгоритма, выполняемого по отношению к шагу s, который соответствует новому формируемому решению, находящемуся в окрестности $prt_{i'}$ ($(s+g)$– номер шага алгоритма по формированию решения в окрестности O_k текущего локально оптимального решения); h' – индекс пакета, состав которого изменяется при реализации алгоритма на текущей итерации; I , I' – множества типов заданий, для которых формируются составы пакетов ($I = \{1,2,..,n\}$); A'– матрица (аналог матрицы составов пакетов A), используемая при определении лучшего решения в окрестности O_k текущего локально оптимального решения; $A_{1i}^{буф}$ и $A_{2i}^{буф}$ (размер матриц $r_{A_i^{буф}} \times m_i^{max}, i = \overline{1,n}$) – матрицы, предназначенные для хранения решений по составам ПЗ i-х типов (в матрицах $A_{1i}^{буф}$ ($i = \overline{1,n}$) хранятся решения по составам ПЗ i-х типов, входящие в окрестность O_k с метрикой k, на основе которых формируются решения, входящие в окрестность O_{k+1} с метрикой ($k+1$); в матрицах $A_{2i}^{буф}$ ($i = \overline{1,n}$) накапливаются решения по составам ПЗ i-х типов, входящие в окрестность O_{k+1}, сформированные на основе решений из окрестности O_k); $r_{A_i^{буф}}$ – количество строк в матрицах $A_{1i}^{буф}$ и $A_{2i}^{буф}$ ($i = \overline{1,n}$); m_i^{max} – количество столбцов в матрицах $A_{1i}^{буф}$ и $A_{2i}^{буф}$ ($i = \overline{1,n}$); n_{p1}^i – количество решений по составам ПЗ i-го типа в матрице $A_{1i}^{буф}$, находящихся в окрестности O_k, используемых при формировании решений в окрестности O_{k+1}; n_{p2}^i – количество решений по составам ПЗ i-го типа в матрице $A_{2i}^{буф}$, сформированных в окрестности O_{k+1}; $q1_i$ – индекс строки (решения по составам ПЗ) в матрице $A_{1i}^{буф}$ ($i = \overline{1,n}$); $q2_i$ – индекс строки (решения по составам ПЗ) в матрице $A_{2i}^{буф}$ ($i = \overline{1,n}$); $q2'_i$ – параметр, предназначенный для хранения номера строки из матрицы $A_{2i}^{буф}$ – номера решения, гарантирующего максимальное по модулю значение левого дискретного градиента $\nabla_g^- f_1(s) < 0$ критерия f_1 [101, 104]; G – максимальное по модулю значение градиента $\nabla_g^- f_1(s) < 0$, достигаемое в окрестностях локально оптимального решения. Значения m_i^{max} и $r_{A_i^{буф}}$ ($i = \overline{1,n}$) определяются следующим образом: $m_i^{mac} = \left\lfloor \frac{n_i}{2} \right\rfloor$, $r_{A_i^{буф}} = \sum_{m_i=2}^{m_i^{max}} \left\lceil \frac{n^i + 1}{m_i} \right\rceil$, где $\lfloor . \rfloor$ и $\lceil \cdot \rceil$ –операций округления в меньшую и в большую сторону.

Для текущего локально оптимального решения по составам ПЗ *i*-х типов рассматриваются два вида окрестностей. Построение решений, включаемых в окрестность первого вида, связано с: а) изменением составов ПЗ каждого *i*-го типа в количестве m_i ($i = \overline{1,n}$) при неизменных составах ПЗ других типов; б) увеличением значения m_i для заданий *i*-го типа в случае, если построение решений путем изменения составов ПЗ этого типа в количестве m_i является невозможным (выполнено условие окончания формирования ПЗ в количестве m_i, либо значение метрики *k* окрестности O_k превышает значение $k^{\max}$ максимальной метрики окрестности) и формированием начального решения для модифицированного значения m_i.

Построение решений, включаемых в окрестность второго вида, предполагает совместное использование сформированных решений по составам ПЗ всех типов (реализуется совместное рассмотрение решений по составам ПЗ, которые хранятся в матрицах $A_{2i}^{буф}$ ($i = \overline{1,n}$)).

С целью построения алгоритма определения локально оптимальных решений по составам ПЗ *i*-х типов ($i = \overline{1,n}$) сформулирован способ изменения их составов. Для обоснования способа формирования решений по составам ПЗ введены следующие условия (условия построения решений по составам ПЗ соответствуют введенным в модели (4.15- 4.21) ограничениям):

– количество заданий i-го типа в пакетах не может быть менее 2 ($a_{ih} \geq 2, h = \overline{1,m_i}$); если при формировании начального решения по составам m_i ПЗ i-го типа для *h*=1 (первый пакет) получено $a_{i1} < 2$, то исследования решений по составам ПЗ этого i-го типа не выполняются (формирование решений по составам ПЗ *i*-го типа прекращается);

– способ формирования начального решения по составам m_i ПЗ i-го типа предполагает, что $a_{ih} = 2$ ($h = \overline{1,m_i}$), элемент a_{i1} определяется как $a_{i1} = n^i - \sum_{h=2}^{m_i} a_{ih}$;

– значения параметра m_i, задаваемые первоначально для заданий всех *i*-х типов ($i = \overline{1,n}$), равны 2 ($m_i = 2$);

– модификация количества ПЗ рассматриваемого i-го типа предполагает, что параметр m_i увеличивается (при определении составов пакетов) до тех пор, пока в начальном решении для $m_{i'}$ выполняется условие $a_{ih} \geq 2$ ($h = \overline{1,m_i}$); при условии $a_{i1} < 2$ (для начального решения при значении m_i) формирование составов ПЗ i'-го типа прекращается;

– формирование решений по составам пакетов предполагает увеличение количества заданий в пакете с индексом $h > 1$ ($h = \overline{2,m_i}$, при неизменном составе других пакетов) и уменьше-

ние количества заданий в пакете с $h=1$ ($a_{i1} = n^i - \sum_{h=2}^{m_i} a_{ih}$); при $a_{i1} \geq a_{ih}$ ($h = \overline{1,m_i}$) модификация составов пакетов продолжается; при $a_{i1} < a_{ih}$ решение по составам ПЗ не рассматривается, оно является аналогичным полученным на предыдущих шагах алгоритма.

В соответствии с рассмотренным способом построения решений по составам ПЗ ограничения, накладываемые на множество N_1 ($[M,A] \in N_1$), имеют вид:

1) ограничение на количество ПЗ i-х типов ($i = \overline{1,n}$): $m_i \geq 2$; $m_i \leq \left\lfloor \frac{n^i}{2} \right\rfloor$, где $\lfloor \cdot \rfloor$ – операция округления в меньшую сторону;

2) ограничение на количество заданий i-х типов в пакетах ($i = \overline{1,n}$):

$a_{i,h} \geq 2$ ($h = \overline{2,m_i}$), $a_{i,1} \geq 2$, $a_{i,1} = n^i - \sum_{h=2}^{m_i} a_{i,h}$, $a_{i,1} \geq a_{i,h}$ ($h = \overline{2,m_i}$);

$a_{i,1} \leq n^i - 2(m_i - 1)\}$; $a_{i,h} \leq \left\lfloor \frac{n^i - 2(m_i - 2)}{2} \right\rfloor$;

3) ограничение на значения количества заданий i-х типов в пакетах:

$a_{i,1} \in \{2,3,..,n^i - 2(m_i - 1)\}, a_{i,h} \in \{2,3,..,\left\lfloor \frac{n^i - 2(m_i - 2)}{2} \right\rfloor\}$ ($h = \overline{2,m_i}$).

На основе введенного условия окончания формирования составов пакетов в количестве $z_4^{спк1}$ сформулирована и доказана ***Теорема 4.1***.

Теорема 4.1. Если для сформированного решения по составам $m_{i'}$ ПЗ i'-го типа выполняется условие $a_{i'1} < a_{i'h'}$ ($h' = \overline{2,m_{i'}}$), то это решение дублирует полученное ранее (оно не рассматривается и не используется для последующего формирования новых решений).

Доказательство. При формировании составов ПЗ определенного i'-го типа идентифицируется количество заданий в каждом из пакетов, при этом порядок следования пакетов значения не имеет. Алгоритм метода формирования составов пакетов предполагает, что для пакета с индексом h' реализуется увеличение количества заданий в нем. При этом количество заданий в остальных h-х пакетах (за исключением $h=1$) остается неизменным. Для пакета с номером $h=1$ количество заданий определяется выражением: $a_{i'1} = n^{i'} - \sum_{h=2}^{m_{i'}} a_{i'h}$. Пусть на $(s-1)$-м шаге алгоритма сформировано решение по составам пакетов $[M, A]$, для которого i'-я строка матрицы A имеет вид: $a_{i'1}(s-1)$, $a_{i'2}(s-1)$, ..., $a_{i'h'}(s-1)$, ..., $a_{i'm_{i'}}(s-1)$. При этом зна-

чения элементов $a_{i'1}(s-1)$ и $a_{i'h'}(s-1)$ такие, что: $a_{i'1}(s-1)=a_{i'h'}(s-1)+2$ ($a_{i'1}(s-1)>a_{i'h'}(s-1)$). При формировании решения по составам пакетов преобразование элементов $a_{i'h}(s-1)$ ($h=\overline{1,m_{i'}}$) выполняется следующим образом: $a_{i'h}(s)=a_{i'h}(s-1)$ ($h=\overline{2,m_{i'}}\ \&\ h\neq h'$), $a_{i'h'}(s)=a_{i'h'}(s-1)+1$, $a_{i'1}(s)=n^{i'}-\sum_{h=2}^{m_{i'}}a_{i'h}(s)$. Получено $a_{i'1}(s)=a_{i'h'}(s)$ при неизменных значениях $a_{i'h}$ ($h\neq h'$). Дальнейшие преобразования $a_{i'h}(s)$ ($h=\overline{1,m_{i'}}$): $a_{i'h}(s+1)=a_{i'h}(s)$ ($h=\overline{2,m_{i'}}\ \&\ h\neq h'$), $a_{i'h'}(s+1)=a_{i'h'}(s)+1$, $a_{i'1}(s+1)=n^{i'}-\sum_{h=2}^{m_{i'}}a_{i'h}(s+1)$. В результате получено: $a_{i'h'}(s+1)=a_{i'1}(s+1)+2$ ($a_{i'1}(s+1)<a_{i'h'}(s+1)$). Тогда $a_{i'1}(s+1)=a_{i'h'}(s-1)$ и $a_{i'h'}(s+1)=a_{i'1}(s-1)$ при неизменных значениях $a_{i'h}$ ($h=\overline{2,m_{i'}}$, $h\neq h'$). Сформированное на *(s+1)*-м шаге решение дублирует решение, полученное на *(s-1)*-м шаге, т.е. при $a_{i'1}(s+1)<a_{i'h'}(s+1)$ формируется решение, которое не интерпретируется. Для случая $a_{i'h'}(s-1)=a_{i'1}(s-1)+1$ рассуждения аналогичны.

Способ модификации составов ПЗ рассматриваемого i'-го типа предусматривает, что на основе решений, находящихся в окрестности O_k первого вида текущего локально оптимального решения с метрикой *k*, формируются решения, входящие в окрестность O_{k+1} с метрикой (*k+1*). Метрика *k* окрестности O_k , содержащей решения по составам ПЗ *i'*-го типа, определяется выражением $k=\sum_{i'=1}^{n}\sum_{h=2}^{m_{i'}}[a'_{i',h}(s+g)-a_{i',h}(s)]$, где $a_{i',h}(s)$– элемент *i'*-й строки матрицы *A*, соответствующей текущему локально оптимальному решению по составам пакетов, $a'_{i',h}(s+g)$– элемент *i'*-ой строки матрицы $A'(s+g)$, соответствующей формируемому решению по составам ПЗ в окрестности O_k , полученному на $(s+g)$-м шаге алгоритма. $A_{1i}^{буф}$

В матрице $A_{1i}^{буф}$ выполняется хранение решений, находящихся в окрестности первого вида O_k , на основе которых формируются решения, входящие в окрестность O_{k+1} , хранящиеся в матрице $A_{2i}^{буф}$. На основе одного решения по составам ПЗ ($q1_i$ -ой строки матрицы $A_{1i}^{буф}$) формируется совокупность решений, хранимых в матрице $A_{2i}^{буф}$, находящихся в окрестности O_{k+1} . Если для $q1_i$ -го решения из матрицы $A_{1i}^{буф}$ выполняется условие $(a_{q1_i,h})_{1i}^{буф}=(a_{q1_i,h+1})_{1i}^{буф}$, то увеличение на 1 значения $(a_{q1_i,h})_{1i}^{буф}$ (при неизменном зна-

чении $(a_{q1_i,h+1})^{буф}_{1i}$), а затем увеличение на 1 значения $(a_{q1_i,h+1})^{буф}_{1i}$ (при неизменном значении $(a_{q1_i,h})^{буф}_{1i}$) обуславливает получение одинаковых решений по составам ПЗ i-го типа. Требуется выполнить переход к элементу $(a_{q1_{i'},h+2})^{буф}_{1i'}$, для которого $(a_{q1_{i'},h})^{буф}_{1i'} \neq (a_{q1_{i'},h+2})^{буф}_{1i'}$ и который увеличивается на 1. Если реализуется $(a_{q1_i,h})^{буф}_{1i} = (a_{q1_i,h+1})^{буф}_{1i}$, то на основе решения, представленного строкой $(A_{q1_{i'}})^{буф}_{1i'}$ матрицы $A^{буф}_{1i'}$, будет получено решение, дублирующее полученное ранее решение в окрестности O_{k+1}. На основе этого условия сформулирована ***Теорема 4.2***, ограничивающая количество решений в окрестности O_{k+1}.

Теорема 4.2. Если при формировании решения по составам $m_{i'}$ ПЗ i'-го типа для элементов $q1_{i'}$-ой строки матрицы $A^{буф}_{1i'}$ выполняется условие $(a_{q1_i,h})^{буф}_{1i} = (a_{q1_i,h+j})^{буф}_{1i}$ ($j = \overline{1,m_i - h}$), то не требуется увеличивать значение элемента $(a_{q1_i,h+j})^{буф}_{1i}$ ($j = \overline{1,m_i - h}$), так как в этом случае будет получено решение, дублирующее сформированное ранее. Требуется выполнить переход к элементу $(a_{q1_i,h+j})^{буф}_{1i}$ ($j = \overline{1,m_i - h}$), для которого $(a_{q1_i,h})^{буф}_{1i} \neq (a_{q1_i,h+j})^{буф}_{1i}$.

Доказательство ***Теоремы 4.2*** строится аналогично доказательству ***Теоремы 4.1.***

Для определения локально оптимальных решений по составам ПЗ i-х типов ($i = \overline{1,n}$) сформулированы: 1) способ формирования решений по составам ПЗ одного i'-го типа, включаемых в окрестности O_{k+1} первого вида, на основе решений, входящих в окрестность O_k (изменение составов пакетов в количестве m_i); 2) способ формирования решений, представляющих собой комбинацию решений по составам ПЗ всех i-х типов ($i = \overline{1,n}$), включаемых в окрестности O_{k+1} второго вида; 3) обобщенный алгоритм локальной оптимизации решений по составам ПЗ. Входными данными алгоритма формирования решений в окрестности O_{k+1} первого вида, получаемых на основе решений из m_i, являются: идентификатор i'-го типа заданий, для которого изменяются составы пакетов; количество $n^{i'}_{p1}$ решений в окрестности O_k; количество ПЗ $m_{i'}$, составы которых изменяются; матрица $A^{буф}_{1i'}$, содержащая решения из O_k.

Алгоритм формирования решений по составам ПЗ i'-го типа в окрестности O_{k+1} первого вида на основе решений из окрестности O_k имеет следующий порядок шагов:

1) инициализировать значения параметров: $q1_{i'}=1$, $n^{i'}_{p2}=0$, $q2_{i'}=0$, $q2'_{i'}=0$, $g=1$;

2) инициализировать номер пакета h', состав которой изменяется, значением 2 ($h'=2$);

3) модифицировать $q2_{i'}$: $q2_{i'}=q2_{i'}+1$; в пакете с индексом h' – увеличить количество заданий на 1; сформировать решение по составам пакетов i'-го типа ($q2_{i'}$-ю строку матрицы $A^{буф}_{2i'}$): $(a_{q2_{i'},h})^{буф}_{2i'}=(a_{q1_{i'},h})^{буф}_{1i'}$ ($h=\overline{2,m_{i'}}$, $h\neq h'$), $(a_{q2_{i'},h'})^{буф}_{2}=(a_{q1_{i'},h'})^{буф}_{1}+1$, $(a_{q2_{i'},1})^{буф}_{2i'}=n^{i'}-\sum_{h=1}^{m_{i'}}(a_{q1_{i'},h})^{буф}_{1i'}$; $n^{i'}_{p2}=n^{i'}_{p2}+1$;

4) проверить условие $(a_{q2_{i'},1})^{буф}_{2i'}<(a_{q2_{i'},h'})^{буф}_{2i'}$; в случае его выполнения сформированное в виде $q2_{i'}$-ой строки $(A_{q2_{i'}})^{буф}_{2i'}$ матрицы $A^{буф}_{2i'}$ решение не интерпретируется (в соответствии с ***Теоремой 1***), тогда $n^{i'}_{p2}=n^{i'}_{p2}-1$, $q2_{i'}=q2_{i'}-1$; перейти на пункт 8 (составы ПЗ i'-го типа в количестве $m_{i'}$ не модифицируются); при условии $(a_{q2_{i'},1})^{буф}_{2i'}\geq(a_{q2_{i'},h'})^{буф}_{2i'}$ задать значение параметра $j=1$ (j– значение шага изменения номера пакета h'), перейти на пункт 5;

5) проверить условие $(h'+j)\leq m_{i'}$; если $(h'+j)\leq m_{i'}$, то проверить условие формирования решения по составам ПЗ i'-го типа в виде $(a_{q1_{i'},h'})^{буф}_{1i'}>(a_{q1_{i'},h'+j})^{буф}_{1i'}$ (в соответствии с ***Теоремой 2***); если условие $(a_{q1_{i'},h'})^{буф}_{1i'}>(a_{q1_{i'},h'+j})^{буф}_{1i'}$ не выполняется, то перейти на пункт 6; при выполнении условия $(a_{q1_{i'},h'})^{буф}_{1i'}>(a_{q1_{i'},h'+j})^{буф}_{1i'}$ модифицировать h': $h'=h'+j$, перейти на пункт 3; если $(h'+j)>m_{i'}$ (сформированы все решения, хранящиеся в матрице $A^{буф}_{2i'}$, с использованием одного решения, хранящегося в $q1_{i'}$-ой строке $(A_{q1_{i'}})^{буф}_{1i'}$ матрицы $A^{буф}_{1i'}$), то перейти на пункт 7;

6) если $(a_{q1_{i'},h'})^{буф}_{1i'}=(a_{q1_{i'},h'+j})^{буф}_{1i'}$ (по ***Теореме 2*** при модификации $(h'+j)$-го ПЗ будет получено решение, дублирующее сформированное ранее) модифицировать j: $j=j+1$; перейти на пункт 5;

7) модифицировать значение $q1_{i'}$ (индекса решения, хранимого в матрице $A^{буф}_{1i'}$ (переход к следующему решению из окрестности O_k, на основании которого формируются новые решения в окрестности O_{k+1})): $q1_{i'}=q1_{i'}+1$; если $q1_{i'}\leq n^{i'}_{p1}$, то перейти на пункт 2; если $q1_{i'}>n^{i}_{p1}$, то перейти на пункт 8;

8) если $n^{i'}_{p2}>1$, то выполнить сравнение решений, хранимых в матрице $A^{буф}_{2i'}$, с точки зрения дублирования ими друг друга (процедура сравнения предполагает формирование копии

матрицы $A_{2i'}^{буф}$; в копии матрицы $A_{2i'}^{буф}$ реализуется упорядочивание элементов каждой $q2_{i'}$-ой строки ($q2_{i'} = \overline{1,n_{p2}^{i'}}$) по не возрастанию их значений, поэлементное сравнение каждой $q2_{i'}$-ой строки ($q2_{i'} = \overline{1,n_{p2}^{i'}-1}$) с другими $q2''_{i'}$-ми строками ($q2''_{i'} = \overline{q2_{i'}+1,n_{p2}^{i'}}$), удаление из матрицы $A_{2i'}^{буф}$ строк с индексами $q2''_{i'}$, которые соответствуют строкам в копии матрицы $A_{2i'}^{буф}$, дублирующих рассматриваемую $q2_{i'}$-ю строку; при удалении $q2''$-ой строки из матрицы $A_{2i'}^{буф}$ реализуется изменение $n_{p2}^{i'} = n_{p2}^{i'} - 1$ и переупорядочивание решений в матрице $A_{2i'}^{буф}$); в результате повторяющиеся решения из матрицы $A_{2i'}^{буф}$ удалены; инициализация $q2_{i'} = 1$; если $n_{p2}^{i'} > 0$, перейти на пункт 10;

9) если $n_{p2}^{i'} = 0$ (не сформированы новые решения в O_{k+1}), то перейти на пункт 15;

10) реализовать исследование решения по составам ПЗ i'-го типа в окрестности O_{k+1} с точки зрения его оптимальности; для этого инициализировать i'-ю строку матрицы A' решением по составам ПЗ, хранимым в $q2_{i'}$-ой строке $(A_{q2_{i'}})_{2i'}^{буф}$ матрицы $A_{2i'}^{буф}$: $(a_{i',h})' = (a_{q2_{i'},h})_{2i'}^{буф}$ ($h = \overline{1,m_{i'}}$); передать решения $[M(s+g), A'(s+g)]$ на второй уровень для определения расписания выполнения ПЗ (исходное решение $A(s)$ не изменяется);

11) получить со второго уровня локально оптимального расписание выполнения ПЗ $[P, R, (T^{0l}) | l = \overline{1,L}]^*$, вычислить с использованием этого решения значение $f_1(s+g)$;

12) для решения $[M(s+g), A'(s+g)]$ вычислить значения левого (правого) дискретных градиентов [101, 104]: $\nabla_g^- f_1(s) < 0$ ($\nabla_g^+ f_1(s) \geq 0$);

13) если $\nabla_g^+ f_1(s) \geq 0$ (решение $[M(s+g), A'(s+g)]$ не лучше, чем решение $[M, A]^*$), то модифицировать значение $q2_{i'}$: $q2_{i'} = q2_{i'} + 1$; если $q2_{i'} \leq n_{p2}^{i'}$ (рассмотрены не все решения из окрестности O_{k+1}), то модифицировать индекс шага алгоритма $g=g+1$, перейти на пункт 10 (переход к анализу следующего решения из O_{k+1}); если $q2_{i'} > n_{p2}^{i'}$, то перейти на пункт 15;

14) если для решения по составам ПЗ i'-го типа ($q2_{i'}$-ой строки $(A_{q2_{i'}})_{2i'}^{буф}$ матрицы $A_{2i'}^{буф}$) реализуется $\nabla_g^- f_1(s) < 0$, то сравнить значение $\nabla_g^- f_1(s)$ и G «глобального» градиента целевой функции f_1 (если $\nabla_g^- f_1(s) < G$, то текущее решение по составу ПЗ i'-го типа является наилучшим среди всех рассматриваемых решений по составам ПЗ n типов в окрестностях O_{k+1} первого вида); если $\nabla_g^- f_1(s) < G$, то значения всех параметров $q2'_i$ ($i = \overline{1,n}$, $i \neq i'$) инициали-

зировать значением 0 : $q2'_i = 0$, сохранить индекс $q2_{i'}$ решения ($q2_{i'}$-ой строки $(A_{q2_{i'}})^{буф}_{2i'}$ матрицы $A^{буф}_{2i'}$): $q2'_{i'} = q2_{i'}$, модифицировать значение G: $G = \nabla^{-}_{g} f_1(s)$; перейти к следующему решению в окрестности O_{k+1}, для этого $q2_{i'} = q2_{i'} + 1$; если $q2_{i'} \le n^{i'}_{p2}$, то $g=g+1$, перейти на пункт 10; если $q2_{i'} > n^{i'}_{p2}$, то перейти на пункт 15;

15) если $q2'_{i'} \neq 0$, то в окрестности O_{k+1} определено решение по составам ПЗ i'-го типа, лучшее, чем текущее локально оптимальное решение $[M,A]^*$, останов алгоритма определения решений по составам ПЗ i'-го типа в окрестности O_{k+1}.

Рассмотренный алгоритм позволяет модифицировать составы ПЗ одного i'-го типа с целью формирования решений, входящих в окрестность O_{k+1} текущего локально оптимального решения. Выходными параметрами алгоритма формирования составов ПЗ являются:

– $n^{i'}_{p2}$ – количество решений по составам ПЗ i'-го типа, входящих в окрестность O_{k+1};

– $q2'_{i'}$ – значение идентификатора строки в матрице $A^{буф}_{2i'}$, соответствующее наилучшему решению по составам ПЗ i'-го типа в окрестности O_{k+1};

– матрица $A^{буф}_{2i'}$, содержащая (при $n^{i'}_{p2} > 0$) решения, входящие в окрестность O_{k+1}.

При $n^{i'}_{p2} > 0$ и $q2'_{i'} = 0$ в окрестности O_{k+1} отсутствует решение, являющееся лучшим, чем текущее локально оптимальное решение $[M,A]^*$. Тогда необходимо сформировать решения в окрестности O_{k+2} первого вида с большей метрикой. Для этого решения из матрицы $A^{буф}_{2i}$ переписываются в матрицу $A^{буф}_{1i}$ и рассмотренная процедура повторяется. Указанный способ определения решений, входящих в окрестность O_k, последовательно применяется ко всем i-м типам заданий ($i = \overline{1,n}$) и предполагает формирование на основе решений из матриц $A^{буф}_{1i}$ новых решений, сохраняемых в матрицах $A^{буф}_{2i}$. Пример реализации алгоритма формирования решений по составам ПЗ i'-го типа, входящих в окрестности O_k с различными значениями метрики k, представлен на рисунке 4.3 для значений параметров $n^{i'} = 16$ и $m_{i'} = 4$.

На рисунке 4.3 представлено дерево, соответствующее виду окрестностей решения *[M,A]** с разной метрикой, сформированных в соответствии с алгоритмом модификации решений по составам ПЗ заданного типа. На этом рисунке использованы следующие обозначения:

1) ____ – решения, исключаемые из рассмотрения в соответствии с ***Теоремой 1***;

2) ……. – решения, которые не формируются в соответствии с ***Теоремой 2***;

3)._._._. – решения, исключаемые из рассмотрения как дублирующие решения в текущей окрестности O_k .

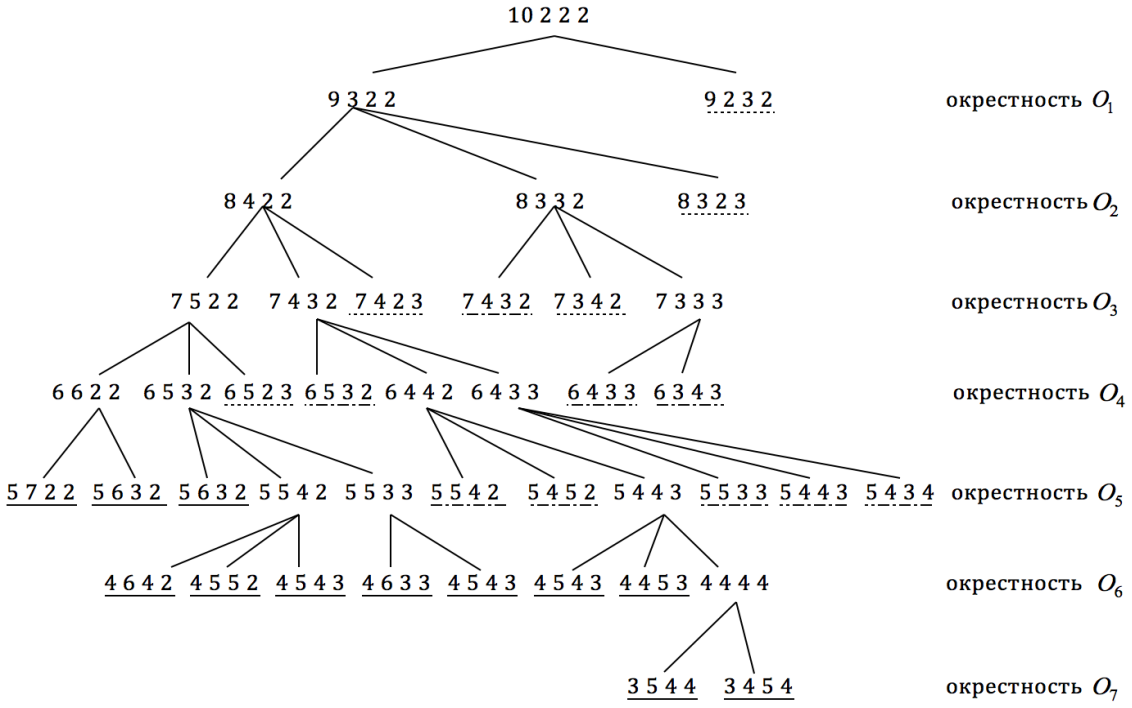


Рисунок 4.3 – Реализация алгоритма формирования решений по составам ПЗ в окрестностях O_k (при $n^{i'}=16$ и $m_{i'}=4$)

В случае, если в окрестности O_{k+1} первого вида не найдено решения, лучшего, чем текущее локально оптимальное решение $[M,A]^*$, то поиск выполняется в окрестности O_{k+1} второго вида. Решения, входящие в окрестность второго вида, формируются путем совместного рассмотрения сформированных решений по составам ПЗ i-х типов, сохраненных в матрицах $A_{2i}^{буф}$ ($i=\overline{1,n}$). Синтез способа формирования решений по составам ПЗ, входящих в окрестность O_{k+1} второго вида, предваряется введением обозначений: G_p, G_{p1} – множества идентификаторов типов заданий, для которых при формировании решений в окрестности O_{k+1} первого вида получено $n_{2p}^i>0$ (элементы этих множеств упорядочиваются по возрастанию), G'_p – множество идентификаторов типов заданий, для которых при формировании решений в окрестности O_{k+1} первого вида получено $n_{2p}^i>0$ (элементы G'_p упорядочиваются по убыванию).

Алгоритм формирования решений по составам ПЗ, входящих в окрестность O_{k+1} второго вида решения $[M,A]^*$, предполагает реализацию следующих шагов:

1) сформировать множества G_p и G_{p1} в виде: $G_p = \{i_j,..,i_k,..\}$, $G_{p1} = \{i_j,..,i_k,..\}$ (типы заданий $i \in G_p$ и $i \in G_{p1}$ такие, что $n^i_{p2} > 0$, $i_j \le i_k$, где *j, k*– порядковые номера идентификаторов типов заданий в множествах G_p и G_{p1}); формирование множества G'_p : $G'_p = \{..,i_k,..,i_j\}$ (типы заданий $i \in G_p$ и $i \in G_{p1}$ такие, что $n^i_{p2} > 0$, $i_j \le i_k$, где *j, k*– порядковые номера идентификаторов типов заданий в множествах G_p и G_{p1});

2) если $G_p \neq \varnothing$, то извлечь из G_p идентификатор *i'*-го типа заданий: $i' = \min_j(i_j \mid i_j \in G_p)$; модифицировать множество G_p: $G_p = G_p \setminus \{i'\}$; задать значение параметра $q_{2i'} = 1$ для рассматриваемого *i'*-го типа заданий; сформировать *i'*-ю строку матрицы *A'* для *i'*-го типа заданий с использованием текущего $q_{2i'}$-го решения по составам ПЗ из матрицы $A^{буф}_{2i'}$ (сформировать *i'*-ю строку матрицы *A'*): $(a_{i',h})' = (a_{q2_{i'},h})^{буф}_{2i'}$ ($h = \overline{1,m_{i'}}$);

3) если $G_p \neq \varnothing$, то перейти на пункт 2;

4) если $G_p = \varnothing$ (при выполнении условия $G_p = \varnothing$ сформирована матрица *A'*, входящая в решение $[M, A']$, представляющая собой комбинацию решений из матриц $A^{буф}_{2i}$, для которых $n^i_{p2} > 0$), то передать решение $[M, A']$ на второй уровень иерархии для формирования на нем решения $[P, R, \{T^{0l} \mid l = \overline{1,L}\}]^*$; получить со второго уровня иерархии решение $[P, R, \{T^{0l} \mid l = \overline{1,L}\}]^*$, соответствующее решению $[M, A']$; определить на основе решения $[P, R, \{T^{0l} \mid l = \overline{1,L}\}]^*$ значение критерия f_1 , соответствующего решению $[M, A']$; для решения $[M, A']$ вычислить левый (правый) дискретный градиент $\nabla^-_g f_1(s)$ ($\nabla^+_g f_1(s)$);

5) если $\nabla^+_g f_1(s) \ge 0$ (решение $[M, A']$ не является лучшим, чем решение $[M, A]^*$, поэтому оно не интерпретируется), то перейти на пункт 6; если $\nabla^-_g f_1(s) < 0$, то сравнить значения $\nabla^-_g f_1(s)$ и *G* («глобального» градиента целевой функции f_1); если $\nabla^-_g f_1(s) < G$ (текущее решение по составам ПЗ *i*-х типов ($i \in G_p$) является лучшим среди рассмотренных решений по составам ПЗ в окрестностях O_{k+1} второго вида), то для всех *i*-х типов заданий ($i \in G_{p1}$) выполняется инициализация параметров $q2'_i$ алгоритма: $q2'_i = q2_i$ (при $i \in G_{p1}$), модифицировать значение G: $G = \nabla^-_g f_1(s)$; перейти на пункт 6;

6) извлечь из G'_p идентификатор *i'*-го типа заданий, для которого изменяется решение по составам пакетов: $i' = \max\limits_{j}(i_j \mid i_j \in G'_p)$; определить позицию (номер) *j'* этого типа заданий в множестве G_{p1}; модифицировать значение параметра $q_{2i'}$ для рассматриваемого *i'*-го типа заданий: $q_{2i'} = q_{2i'} + 1$; если $q_{2i'} \le n_{p2}^{i'}$, то сформировать *i'*-ю строку матрицы *A'*: $(a_{i',h})' = (a_{q2_{i'},h})_{2i'}^{буф}$ $(h = \overline{1,m_{i'}})$, перейти на пункт 8;

7) если $q_{2i'} > n_{p2}^{i'}$, то $G'_p = G'_p \setminus \{i'\}$; если $G'_p \neq \varnothing$, то перейти на шаг 6; если $G'_p = \varnothing$, то перейти на пункт 8;

8) сформировать множества G_p, G'_p в виде: $G_p = \{i_{j'+1},..\}$, $G'_p = \{..,i_k,..,i_j\}$ (множество G_p включает типы заданий, следующие в множестве G_{p1} за текущим рассматриваемым *i'*-м типом (начиная с *(j+1)*-ой позиции), если идентификатор рассматриваемого типа заданий *i'* является «последним» в множестве G_{p1}, то $G_p = \varnothing$, а вид множества G'_p соответствует первоначальному); перейти на пункт шаг 2;

9) останов алгоритма.

На основе способов формирования решений по составам ПЗ *i*-х типов ($i = \overline{1,n}$), входящих в окрестности O_{k+1} первого и второго видов, сформулирован алгоритм метода локальной оптимизации решений по составам пакетов, выполняемых в КС. Алгоритм предполагает формирование решений путем: 1) изменения составов ПЗ каждого типа при неизменных составах пакетов других типов; 2) увеличения количества m_i ПЗ определенных *i*-х типов и задания начального решения по составам этих m_i пакетов; 3) совместного использования полученных составов ПЗ всех *n* типов, определение окрестности решений второго вида при неизменных значениях параметров m_i.

Перед реализацией алгоритма метода определения локально оптимальных решений по составам ПЗ выполняется инициализация множества типов заданий, для которых формируются составы пакетов, в виде: $I = \{1,2,3,..,n\}$, инициализация индекса шага алгоритма *s* (*s=0*) и значения метрики окрестности *k* значением 0. Алгоритм метода определения локально оптимального решения по составам ПЗ *i*-х типов ($i = \overline{1,n}$) содержит следующий порядок шагов:

1) задать для каждого *i*-го типа заданий значения параметров n_{p1}^{i} $(i = \overline{1,n})$ равными 1 ($n_{p1}^{i} = 1$ – количество решений по составам ПЗ *i*-х типов в матрицах $A_{1i}^{буф}$, $i = \overline{1,n}$));

2) сформировать начальное решение по составам ПЗ i-х типов ($i = \overline{1,n}$): а) $m_i = 2$ ($i = \overline{1,n}$); б) инициализировать h-е элементы i-х строк матрицы A: $a_{ih} = 2$ ($h = \overline{2,m_i}$), $a_{i1} = n^i - \sum_{h=2}^{m_i} a_{ih}$; в) проверить условие корректности решений по составам ПЗ i -х типов ($i = \overline{1,n}$): $a_{i1} \geq 2$ и $a_{i1} \geq a_{ih}$ ($h = \overline{2,m_i}$); г) если для какого-либо i-го типа заданий ($i = \overline{1,n}$) в начальном решении условие не выполняется, то для заданий этого типа сформировать фиксированный пакет: $m_i = 1$, $a_{i1} = n^i$, $n^i_{p1} = 0$; модифицировать множество I типов заданий: $I = I \setminus \{ i \}$; инициализировать градиент G критерия f_1 значением 0; инициализировать множество $I' : I' = I$ (результатом является сформированное начальное решение по составам ПЗ: $[M(s), A(s)]$, рассматриваемое как локально оптимальное решение $[M, A]^*$);

3) передать решения $[M(s), A(s)]$ на второй уровень иерархии системы построения расписаний для формирования расписания выполнения ПЗ в КС; получить со второго уровня локально оптимальное расписание для текущего решения по составам ПЗ $[M(s), A(s)]$ в виде $[P, R, \{ T^{0l} \mid l = \overline{1,L} \}]^*$; вычислить значение критерия $f_1(s)$ для решения $[M(s), A(s)]$;

4) определить тип заданий i' , составы пакетов которого изменяются: $i' = min\{ i \mid i \in I' \}$; $I' = I' \setminus \{ i' \}$;

5) инициализировать значение параметра $q1_1$: $q1_{i'} = 1$, а также значения элементов $(a_{q1_{i'}, h})^{буф}_{1i'}$ матрицы $A^{буф}_{1i'}$ для i'-го типа заданий: $(a_{q1_{i'}, h})^{буф}_{1i'} = a_{i'h}$ ($h = \overline{1,m_{i'}}$) (с целью формирования решений в окрестности O_{k+1} текущего локально оптимального решения $[M, A]^*$);

6) для формирования новых решений по составам ПЗ i'-го типа, входящих в окрестность O_{k+1} первого вида, определяемых на основе решений, находящихся в матрице $A^{буф}_{1i'}$, выполнить вызов алгоритма формирования составов пакетов, рассмотренный выше; если после вызова указанного алгоритма для рассматриваемого i'-го типа заданий выполняется условие $n^{i'}_{p2} > 0$ (сформированы новые корректные решения) перейти на пункт 14;

7) если для заданий i'-го типа после формирования решений в окрестности O_{k+1} первого вида получено $n^{i'}_{p2} = 0$ (в окрестности O_{k+1} решения $[M(s), A(s)]^*$ не получены решения, для которых истинно условие корректных составов ПЗ), то модифицировать количество пакетов: $m_{i'} = m_{i'} + 1$; сформировать начальное решение по составам ПЗ i'-го типа в количестве $m_{i'}$:

$n^{i'}_{p2}=1$; $q2_{i'}=1$, $q2'_{i'}=0$, $g=g+1$, инициализировать элементы $(a_{q2_{i'},h})^{буф}_{2i'}$ матрицы $A^{буф}_{2i'}$:

$(a_{q2_{i'},h})^{буф}_{2i'}=2$ $(h=\overline{2,m_{i'}})$, $(a_{q2_{i'},1})^{буф}_{2i'}=n^{i'}-\sum\limits_{h=1}^{m_{i'}}(a_{q2_{i'},h})^{буф}_{2i'}$;

8) проверить корректность сформированного начального решения по составам ПЗ в количестве $m_{i'}$: $(a_{q2_{i'},1})^{буф}_{2i'}\geq 2$; $(a_{q2_{i'},1})^{буф}_{2i'}\geq(a_{q2_{i'},h})^{буф}_{2i'}$ $(h=\overline{2,m_{i'}})$; если условие выполняется, то перейти на пункт 9; если условие корректных составов $m_{i'}$ пакетов для начального решения не выполняется, то модифицировать множество I: $I=I\setminus\{i'\}$ (формирование новых решений по составам ПЗ i'-го типа является невозможным, текущая i'-я строка матрицы A соответствует локально оптимальному решению по составам ПЗ этого типа), перейти на пункт 4;

9) выполнить анализ оптимальности сформированного решения по составам ПЗ в количестве $m_{i'}$ (решение в окрестности O_{k+1} первого вида, при этом задано $n^{i'}_{p2}=q_{2i'}=1$), для этого инициализировать i'-ю строку матрицы A' решением по составам ПЗ, хранимым в строке $(A_{q2_{i'}})^{буф}_{2i'}$ матрицы $A^{буф}_{2i'}$: $(a_{i',h})'=(a_{q2_{i'},h})^{буф}_{2i'}$ $(h=\overline{1,m_{i'}}$ при $q_{2i'}=1)$; передать сформированное решение $[M(s+g),A'(s+g]$ на второй уровень иерархии для определения расписания выполнения ПЗ;

10) получить для рассматриваемого решения $[M(s+g),A'(s+g]$ со второго уровня расписание выполнения ПЗ в виде $[P,R,\{T^{0l}\mid l=\overline{1,L}\}]*$; на его основе определить значение $f_1(s+g)$;

11) для решения $[M(s+g),A'(s+g)]$ вычислить левый $\nabla^{-}_{g}f_1(s)$ (либо правый $\nabla^{+}_{g}f_1(s)$) дискретные градиенты целевой функции f_1 [101];

12) если выполняется условие $\nabla^{+}_{g}f_1(s)\geq 0$ (сформированное решение $[M(s+g),A'(s+g)]$ не является лучшим, чем решение $[M,A]*$ (для количества пакетов $m_{i'}$)), то перейти на пункт 14 (параметр $q2'_{i'}$ не инициализируется);

13) если для сформированного начального решения по составам $m_{i'}$ пакетов (строки $(A_{q2_{i'}})^{буф}_{2i'}$ матрицы $A^{буф}_{2i'}$) выполняется условие $\nabla^{-}_{g}f_1(s)<0$, то сравнить значения $\nabla^{-}_{g}f_1(s)$ и G– градиента целевой функции f_1 (если $\nabla^{-}_{g}f_1(s)<G$, то текущее решение по составам ПЗ i'-го типа является наилучшим среди рассмотренных решений по составам ПЗ в окрестности O_{k+1} первого вида); если $\nabla^{-}_{g}f_1(s)<G$, то значения всех переменных $q2'_i$

($i \in I$) обнулить, инициализировать параметр $q2'_{i'}$ для i'-го типа заданий (сохранить индекс $q2_{i'}$-ой строки $(A_{q2_{i'}})^{буф}_{2i'}$ матрицы $A^{буф}_{2i'}$): $q2'_{i'} = q2_{i'}$; изменить значение G: $G = \nabla^{-}_{g} f_1(s)$, перейти на пункт 14;

14) если $I' \neq \varnothing$, то перейти на пункт 4; если $I' = \varnothing$ (для каждого i-го типа данных ($i \in I$) сформированы новые решения по составам пакетов), то перейти на пункт 15;

15) проверить условие $I = \varnothing$ (при его выполнении отсутствуют i-е типы заданий ($i \in I$), для которых сформированные решения удовлетворяют условию корректного состава пакетов отсутствует возможность анализа новых решений); если $I = \varnothing$, то перейти на пункт 24; если $I \neq \varnothing$, то для i-х типов заданий ($i \in I$) реализуется проверка условия $\exists i \in I : q2'_i \neq 0$ (при выполнении для i'-го типа заданий ($i' \in I$) условия $q2'_{i'} \neq 0$ решение по составам его пакетов (при неизменных составах пакетов заданий других i-х типов ($i \neq i'$, $i \in I$)) обеспечивает максимальное уменьшение значения критерия $f_1(s)$ в рамках окрестности O_{k+1} первого вида); если $\exists i \in I : q2'_i \neq 0$, то перейти на пункт 16; если $\bar{\exists} i \in I : q2'_i \neq 0$ (если для всех i-х типов заданий ($i \in I$) выполняется условие $q2'_i = 0$, то в окрестностях O_{k+1} первого вида не определено решение по составам ПЗ каждого i-го типа, улучшающее $[M, A]^*$), то перейти на пункт 17;

16) сформировать локально оптимальное решение $[M, A]^*$ с учетом составов ПЗ i'-го типа, для которого $q2'_{i'} \neq 0$: инициализировать i'-ой строку матрицы A текущего решения $[M, A]$ значениями элементов $q2'_{i'}$-ой строки $(A_{q2'_{i'}})^{буф}_{2i'}$ матрицы $A^{буф}_{2i'}$: $a_{i'h} = (a_{q2'_{i'},h})^{буф}_{2i'}$ ($h = \overline{1, m_{i'}}$) (в результате получено новое локально оптимальное решение $[M, A]^*$); инициализировать $n^i_{p1} = 1$ ($i = \overline{1, n}$); $I' = I$; перейти на пункт 4;

17) сформировать решения по составам ПЗ i-х типов, включаемых в окрестность O_{k+1} второго вида, путем комбинирования решений по составам ПЗ i-х типов ($i \in I$), находящихся в матрицах $A^{буф}_{2i}$ ($i \in I$); для этого вызвать алгоритм совместного использования составов ПЗ i-х типов, рассмотренный выше, использующий решения, хранящиеся в матрицах $A^{буф}_{2i}$ ($i \in I$), для формирования новых решений в окрестности O_{k+1} второго вида и определяющий лучшее из них в этой окрестности;

18) для i-х типов заданий ($i \in I$) выполнить проверку условий $q2'_i \neq 0$ (при выполнении этих условий в окрестности O_{k+1} второго вида сформировано решение лучшее, чем текущее локально оптимальное решение $[M, A]^*$); если $\bar{\exists} i \in I : q2'_i \neq 0$, то перейти на пункт 20; если

$\exists i \in I : q2'_i \neq 0$ (в окрестности O_{k+1} второго вида сформировано решение, являющееся лучшим, чем решение $[M, A]^*$), то перейти на пункт 19;

19) выполнить формирование нового локально оптимального решения $[M, A]^*$ с учетом составов ПЗ i-х типов, для которых $q2'_i \neq 0$; для каждого i-го идентификатора типа заданий, для которого выполняется условие $q2'_i \neq 0$, инициализировать i-ю строку матрицы A решения $[M, A]^*$ значениями элементов $q2'_i$-ой строки $(A_{q2'_i})^{буф}_{2i}$ матрицы $A^{буф}_{2i'}$: $a_{ih} = (a_{q2'_i, h})^{буф}_{2i}$ при $h = \overline{1, m_i}$ (результат – новое локально оптимальное решение $[M, A]^*$); инициализировать параметры $n^i_{p1} = 1$ ($i \in I$), $I' = I$; перейти на пункт 4;

20) инициализировать множество типов заданий $I' : I' = I$;

21) определить тип заданий i', решения по составам ПЗ которого буферизируются в матрице $A^{буф}_{1i'}$ (перезаписываются из матрицы $A^{буф}_{2i'}$): $i' = min\{ i \mid i \in I' \}$, $I' = I' \setminus \{ i' \}$;

22) инициализировать строки матрицы $A^{буф}_{1i'}$ решениями по составам ПЗ i'-го типа, находящимися в матрице $A^{буф}_{2i'}$, в количестве $n^{i'}_{2p}$: $(a_{q1_{i'}, h})^{буф}_{1i'} = (a_{q2_{i'}, h})^{буф}_{2i'}$ ($h = \overline{1, m_{i'}}$, $q1_{i'} = \overline{1, n^{i'}_{p2}}$, $q2_{i'} = \overline{1, n^{i'}_{p2}}$,), присвоить $n^{i'}_{p1} = n^{i'}_{p2}$ (в результате сформирована матрица $(A)^{буф}_{1i'}$ с решениями, на основе которых будут формироваться решения в окрестности O_{k+1});

23) проверить условие $I' \neq \varnothing$, если $I' \neq \varnothing$, то перейти на пункт 21; если $I' = \varnothing$ (все промежуточные решения по составам ПЗ всех i-х типов ($i \in I$) буферизированы в матрицах $A^{буф}_{1i'}$ с целью дальнейшего формирования новых решений в окрестности O_{k+1} с большей метрикой), то выполнить присваивание $I' = I$, $k=k+1$; перейти на пункт 4;

24) останов алгоритма.

Вычислительная сложность алгоритма определения локально оптимальных решений по составам ПЗ составляет $O(n \cdot (n^i)^2)$. Результаты исследований по синтезу метода определения локально оптимальных решений по составам ПЗ приведены в работах [120-122, 124].

4.3. Метод оптимизации расписаний многостадийных процессов выполнения пакетов заданий в конвейерных системах

Метод оптимизации составов ПЗ взаимодействует с методом формирования расписаний их выполнения в КС. Введенное ранее предположение об одинаковом порядке выполнения ПЗ на всех приборах КС позволяет упростить процедуру построения расписаний. Так как количе-

ство типов заданий ограничено, пакет может содержать не менее двух заданий каждого типа, порядки выполнения заданий на приборах КС являются одинаковыми, тогда является ограниченным количество решений по расписаниям выполнения ПЗ. Для формирования расписаний выполнения ПЗ в системе использован метод поиска лучшего решения в рамках окрестностей текущего локального оптимального решения, реализующий «жадный» подход в оптимизации. Он предусматривает добавление каждого ПЗ *i*-х типов в конец последовательностей $\pi^l (l = \overline{1,L})$ и определение их позиций в π^l, обеспечивающих минимальное значение критерия f_2.

Для обоснования алгоритма определения локально оптимального расписания выполнения ПЗ в последовательностях π^l ($l = \overline{1,L}$) использованы обозначения: $m(s)$ – количество ПЗ, размещенных в последовательностях π^l ($l = \overline{1,L}$) на предшествующих и текущем *s*-м шагах алгоритма; M^p – вектор, элементы m_i^p которого – это количество ПЗ *i*-х типов, размещенных в последовательностях π^l ($l = \overline{1,L}$) на предыдущих и текущем *s*-м шагах алгоритма (размерность вектора *n*); *g*– количество шагов по изменению локально оптимального решения $[P, R, \{T^{0l} \mid l = \overline{1,L}\}]^*$ для получения решения $[P(s+g), R(s+g), \{T^{0l}(s+g) \mid l = \overline{1,L}\}]$, соответствующего новому порядку ПЗ в π^l ($l = \overline{1,L}$); k , k^{max}– метрика и максимальная метрика окрестностей решений по порядкам выполнения ПЗ в КС текущего локально оптимального решения $[P, R, \{T^{0l} \mid l = \overline{1,L}\}]^*$; O_k – окрестность решения $[P, R, \{T^{0l} \mid l = \overline{1,L}\}]^*$; h_i – индекс элемента *i*-ой строки матрицы A, соответствующей составам ПЗ *i*-го типа, который позволяет идентифицировать количество заданий в пакете, добавляемом в последовательности π^l(номер ПЗ *i*-го типа), j_l – индекс текущего столбца матриц $P(s)$ и $R(s)$, в *i*-ой строке которого значения элементов p_{i,j_l} и r_{i,j_l} соответствуют характеристикам рассматриваемого ПЗ *i*-го типа ($p_{i,j_l} = 1$, $r_{i,j_l} = a_{i,h_i}$); j^{max} – индекс столбца матриц $P(s)$ и $R(s)$, в котором первоначально размещаются характеристики ПЗ *i*-го типа при добавлении этого пакетов в последовательности π^l ($p_{i,j^{max}} = 1$, $r_{i,j^{max}} = a_{i,h_i}$).

Вектор M^p используется при определении количества $m(s)$ ПЗ различных типов, размещенных в последовательностях π^l ($l = \overline{1,L}$). Инициализация элементов $m_i^p = 0$ ($i = \overline{1,n}$). Значение количества пакетов $m(s)$, размещенных в π^l ($l = \overline{1,L}$), определяется выражением: $m(s) = \sum_{i=1}^{n} m_i^p$. Выражение для метрики *k* окрестности решения $[P, R, \{T^{0l} \mid l = \overline{1,L}\}]^*$:

$k = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m(s)} | p_{i,j}(s+g) - p_{i,j}(s) | / 2$. Начальное решение $[P(s), R(s), \{T^{0l}(s) | l = \overline{1,L}\}]$ по определению позиции ПЗ *i*-го типа в последовательностях π^l $(l = \overline{1,L})$ формируется путём добавления h_i-го ПЗ *i*-го типа в количестве a_{i,h_i} элементов в конец этих последовательностей. Формирование решения $[P(s+g), R(s+g), \{T^{0l}(s+g) | l = \overline{1,L}\}]$ предполагает изменение положения пакета в π^l относительно его начального положения в решении $[P(s), R(s), \{T^{0l}(s) | l = \overline{1,L}\}]$.

Алгоритм построения локально оптимального расписания выполнения ПЗ реализует «жадный» подход к оптимизации, при котором каждое последующее локально оптимальное решение по размещению одного из пакетов в последовательностях π^l формируется на основе локально оптимальных решений по порядкам выполнения пакетов, полученных на предыдущих шагах. Алгоритм построения локально оптимального расписания выполнения ПЗ рассмотрен с точки зрения размещения в последовательностях π^l $(l = \overline{1,L})$ пакетов некоторого *i*-го типа в количестве m_i и определения их позиций в π^l $(l = \overline{1,L})$, обеспечивающих минимум критерия (4.16). Входными данными являются матрицы $P(s-1)$ и $R(s-1)$, сформированные на предыдущем *(s-1)*-м шаге алгоритма, которые соответствуют порядку выполнения в КС ПЗ предшествующих *(i-1)*-го типа, вектор M^p, каждый *i*-й элемент которого соответствует количеству размещенных в π^l $(l = \overline{1,L})$ ПЗ *i*-х типов. Алгоритм определения позиций ПЗ некоторого *i*-го типа в π^l $(l = \overline{1,L})$ имеет следующий порядок шагов:

1) инициализировать номер пакета h_i (номер элемента в *i*-ой строке матрицы A), задания которого в количестве a_{i,h_i} размещаются в π^l $(l = \overline{1,L})$, значением 1 ($h_i = 1$);

2) матрицах $P(s)$ и $R(s)$ определить номер столбца j^{max}, в котором будут размещаться параметры, соответствующие h_i-му ПЗ рассматриваемого *i*-го типа: $j^{max} = [m(s-1)+1]$ (где $m(s-1) = \sum_{i=1}^{n} m_i^p(s-1)$ – количество ПЗ, добавленных в π^l до *s*-го шага алгоритма);

3) в *i*-ой строке j^{max}-го столбца матриц $P(s)$ и $R(s)$ задать значения, соответствующие размещаемому в π^l $(l = \overline{1,L})$ пакету: $p_{i,j^{max}} = 1$, $r_{i,j^{max}} = a_{i,h_i}$; $p_{h,j^{max}} = 0$, $r_{h,j^{max}} = 0$ при $h = \overline{1,n}$ и $h \neq i$; на основе сформированных таким образом матриц $P(s)$ и $R(s)$ выполнить

расчет значений элементов $t_{jq}^{0l}(s)$ матриц $T^{0l}(s)$ $(l=\overline{1,L})$; зафиксировать решение как локально оптимальное: $[P,R,\{T^{0l}\,|\,l=\overline{1,L}\}]^*=[P(s),R(s),\{T^{0l}(s)\,|\,l=\overline{1,L}\}]$;

4) инициализировать значение g индекса промежуточного шага алгоритма формирования значением 1; инициализировать индекс (номер) текущего рассматриваемого столбца j_l, матриц $P(s)$ и $R(s)$, соответствующего текущей позиции ПЗ в последовательностях π^l $(l=\overline{1,L})$, значением параметра j^{max}: $j_l=j^{max}$;

5) определить для полученного вида матриц $P(s),R(s)$ и матриц $T^{0l}(s)$ $(l=\overline{1,L})$ значение критерия $f_2(s)$ и значения элементов $t_{ji}^{nl}(s)$ матриц $T^{nl}(s)$ $(l=\overline{1,L})$;

6) изменить в π^l $(l=\overline{1,L})$ порядок пакетов так, чтобы рассматриваемый ПЗ i-го типа переместить на одну позицию в начало π^l; вид действий: $p_{i,j_l-1}(s+g)=1$, $p_{i,j_l}(s+g)=0$, $p_{h,j_l-1}(s+g)=0$, $p_{h,j_l}(s+g)=1$ $r_{i,j_l-1}(s+g)=r_{i,j_l}(s+(g-1))$, $r_{i,j_l}(s+g)=0$, $r_{h,j_l}(s+g)=r_{h,j_l-1}(s+(g-1))$, $r_{h,j_l}(s+g)=0$, где h– индекс строки в матрицах $P(s+(g-1))$ и $R(s+(g-1))$, в которой элементы $p_{h,j_l-1}=1$ и $r_{h,j_l-1}=a_{i,h_i}\neq 0$ на $(s+(g-1))$-м шаге алгоритма (в результате формируются матрицы $P(s+g)$, $R(s+g)$); модифицировать индекс j_l : $j_l=j_l-1$;

7) на основе сформированных таким образом матриц $P(s+g)$и $R(s+g)$ выполнить расчет значений элементов $t_{jq}^{0l}(s+g)$ матриц $T^{0l}(s+g)$ $(l=\overline{1,L})$, а также значение критерия $f_2(s+g)$;

8) если $f_2(s)\geq f_2(s+g)$ (значение левого дискретного градиента критерия f_2 $\nabla_g^- f_2(s)<0$), то получено решение лучшее, чем $[P,R,\{T^{0l}\,|\,l=\overline{1,L}\}]^*$, тогда зафиксировать решение $[P(s+g),R(s+g),\{T^{0l}(s+g)\,|\,l=\overline{1,L}\}]$ как локально оптимальное: $[P,R,\{T^{0l}\,|\,l=\overline{1,L}\}]^*=[P(s+g),R(s+g),\{T^{0l}(s+g)\,|\,l=\overline{1,L}\}]$, зафиксировать значение критерия $f_2(s+g)$; модифицировать значение номера шага s: $s=s+g$, значение индекса g шага поиска следующего локального оптимального решения в окрестности текущего $[P,R,\{T^{0l}\,|\,l=\overline{1,L}\}]^*$ задать равным 1, перейти на пункт 6;

9) если $\nabla_g^+ f_2(s) \geq 0$, то проверить выполнение условия $k > k^{max}$; если $k > k^{max}$, то перейти на пункт 10; если $k < k^{max}$ (возможен дальнейший поиск лучшего решения в окрестности O_{k+1} решения $[P, R, \{T^{0l} \mid l = \overline{1,L}\}]^*$), то модифицировать: индекс g ($g=g+1$), значение метрики окрестности $k = k+1$; проверить выполнение условия $j_l \neq 1$ (рассматриваемый пакет не является первым в π^l ($l = \overline{1,L}$)); если $j_l \neq 1$, то перейти на пункт 6, если $j_l = 1$, то перейти на пункт 10;

10) модифицировать счетчик количества размещенных в последовательностях π^l ПЗ i-го типа m_i^p: $m_i^p = m_i^p + 1$; если $m_i^p < m_i$, то модифицировать значение индекса рассматриваемого пакета: $h_i = h_i + 1$; изменить значения шага алгоритма: $s=s+1$; изменить номер столбца матриц P, R, в котором на размещаются значения параметров, характеризующих добавляемый в π^l ПЗ i-го типа: $j^{max} = j^{max} + 1$; перейти на пункт 3;

11) если $m_i^p = m_i$, то останов алгоритма.

Алгоритм формирования расписаний выполнения ПЗ в КС позволяет упорядочить ПЗ всех i-х типов ($i = \overline{1,n}$) в количестве m_i (в каждом из которых a_{i,h_i} заданий ($h_i = \overline{1,m_i}$ при $i = \overline{1,n}$)) в последовательностях π^l $(l = \overline{1,L})$. Результаты исследований по синтезу метода оптимизации расписаний выполнения ПЗ в КС приведены в работах [120-122, 124].

4.4. Применение генетических алгоритмов для оптимизации решений по составам пакетов заданий в иерархической игре построения расписаний их выполнения в конвейерных системах

Формирование решений по составам ПЗ реализуется с учетом требования минимизации общей длительности выполнения пакетов в КС, характеризуемой критерием (4.15). Необходима оценка эффективности разработанного метода определения составов ПЗ по сравнению с другими методами (в частности, ГА), которая характеризуется снижением временных затрат на их (пакетов) выполнение в сравнении с этими методами. Для этого реализовано обоснование применения ГА [125-127] к решению рассматриваемой задачи. С точки зрения иерархической организации подсистем оптимизации решений, метод, использующий ГА для определения их составов, функционирует на верхнем уровне. При поиске решений используется критерий, введенный в разделе 4.1, аналогичный критерию, используемому для определения составов пакетов на основе метода локальной оптимизации решений. Для обоснования способа формирова-

ния решений по составам ПЗ посредством ГА использованы следующие условия, вводимые для одного i-го типа заданий:

– количество заданий i -го типа в пакетах не может быть менее 2 ($a_{ih} \geq 2$, $h = \overline{1,m_i}$);

– минимальное количество m_i пакетов, которые могут быть сформированы из заданий в количестве n^i , составляет две единицы; при этом в один из пакетов включаются два задания (т.е. $a_{i1} = 2$), в состав второго пакета включаются все оставшихся задания (т.е. $a_{i2} = n^i - a_{i1}$);

3) максимальное количество m_i^{max} пакетов, которые могут быть сформированы из заданий в количестве n^i определяется следующим образом: $m_i^{max} = \left\lfloor \frac{n^i}{2} \right\rfloor$.

Количество заданий i-го типа в каждом из m_i пакетов может изменяться от 2 до $n^i - 2$. В случае максимального количества m_i^{max} ПЗ i-го типа в каждом из них может быть по два задания этого типа. Минимальное количество ПЗ равно двум. В случае некоторого начального решения один из пакетов содержит два задания i-го типа, другой $n^i - 2$ соответственно.

С точки зрения ГА [125-127] решение по составам пакетов всех n типов представляет собой одну хромосому. В хромосоме должно быть определено n участков, каждый из которых содержит m_i^{max} генов ($i = \overline{1,n}$). Ген представляет собой информацию о количестве заданий i-го типа в одном из пакетов. Через q_{ih} обозначим значение гена (аллель), соответствующий значению элемента a_{ih} матрицы A составов ПЗ i-го типа ($q_{ih} \in \{0,2,3,..,n^i - 2\}$).

В соответствии с базовым подходом использования генетических алгоритмов [125-127] процесс оптимизации решений предполагает наличие двух стадий: формирование начальной популяции, изменение популяции с целью определения приближенных к оптимальному решений. Генерация начальной популяции предполагает формирование некоторого определенного количества хромосом, которые будут изменяться на второй стадии генетического алгоритма. Если максимальное количество ПЗ каждого типа определяется как $m_i^{max} = \left\lfloor \frac{n^i}{2} \right\rfloor$, то общее количество генов в формируемых хромосомах вычисляется как $\sum_{i=1}^{n} m_i^{max}$. Значения генов q_{ih} ($h = \overline{1,m_i^{max}}$) каждого i-го участка хромосомы ($i = \overline{1,n}$) определяются в соответствии со следующим порядком шагов:

1) значение гена q_{i1} формируется путем выбора случайным образом одного из значений в множестве $\{2,3,..,n^i-2\}$ ($q_{i1} \in \{2,3,..,n^i-2\}$);

2) перед формированием значения очередного *h*-го гена ($h \neq 1, h = \overline{2, m_i^{max}-1}$) выполняется проверка условия $\sum_{h'=1}^{h-1} q_{ih'} > 3$; если данное условие не выполняется (т.е. $\sum_{h'=1}^{h-1} q_{ih'} = 3$), то текущее значение *h*-го гена q_{ih} определяется следующим образом: $q_{ih} = n^i - \sum_{h'=1}^{h-1} q_{ih'}$, после чего формирование *i*-го участка хромосомы (для *i*-го типа заданий) прекращается, выполняется переход на пункт 5; при выполнении условия $\sum_{h'=1}^{h-1} q_{ih'} > 3$ текущее значение *h*-го гена q_{ih} формируется путем выбора случайным образом одного из значений в следующем множестве: $q_{ih} \in \{0,2,3,..,n^i - \sum_{h'=1}^{h-1} q_{ih'}\}$;

3) после формирования значения q_{ih} *h*-го гена выполняется проверка условия $(n^i - \sum_{h'=1}^{h} q_{ih'}) = 1$, означающего невозможность формирования нового ПЗ рассматриваемого типа; если данное условие выполняется, то текущее значение q_{ih} *h*-го гена инкрементируется ($q_{ih} = q_{ih} + 1$), осуществляется переход на пункт 5; в случае не выполнения условия реализуется переход к формированию значения q_{ih} следующего *(h+1)*-го гена, перейти на пункт 2;

4) перед определением значения последнего m_i^{max}-го гена выполняется проверка условия $\sum_{h'=1}^{m_i^{max}-1} q_{ih'} \geq 2$, в случае его выполнения значение $q_{i,m_i^{max}}$ последнего m_i^{max}-го гена в участке хромосомы для *i*-го типа заданий определяется следующим образом: $q_{i,m_i^{max}} = n^i - \sum_{h'=1}^{m_i^{max}-1} q_{ih'}$, реализуется переход на пункт 5; если введенное условие не выполняется, то значение последнего сформированного *h*-го гена, такого, что $q_{ih} \neq 0$, инкрементируется ($q_{ih} = q_{ih} + 1$), а значение m_i^{max}-го гена инициализируется 0 ($q_{i,m_i^{max}} = 0$), перейти на пункт 5;

5) останов алгоритма формирования *i*-го участка хромосомы.

На основе каждой формируемой хромосомы (каждого решения по составам ПЗ, представленного в виде хромосомы) реализуется построение решения $[M, A]$, которое в дальнейшем интерпретируется как одно из решений по составам ПЗ *n* типов. Таким образом, результатом формирования начальной популяции является полученная совокупность решений, которая в

дальнейшем подлежит изменению в соответствии с генетическими операторами. Пример реализации приведенного алгоритма для случая $n^i = 16$ ($i = \overline{1,3}$) представлен на рисунке 4.4.

Рисунок 4.4 – Пример хромосомы, соответствующей составу ПЗ

Генетическим операторами, реализуемыми при определении локально оптимальных решений, являются операторы селекции, кроссинговера (скрещивания), мутации и редукции. С целью устранения возможности попадания в «ловушку» локального экстремума применена стохастическая селекция (селекция на основе рулетки). Оператор кроссинговера не предполагает стохастического определения точек скрещивания родительских хромосом для определения их потомков. Точки скрещивания хромосом имеют для рассматриваемой задачи строго заданное положение, определяемое границами участков этих хромосом, соответствующих различным типа заданий. Стохастический характер кроссинговера заключается только в определении количества точек скрещивания. В отличие от оператора кроссинговера мутация в рассматриваемой задаче носит стохастический характер и предполагает определение: 1) количества типов заданий (соответственно, участков хромосом), для которых будет выполняться мутация генов; 2) местоположение (позиции) h_{i1} и h_{i2} генов, значения которых q_{i,h_1} и q_{i,h_2} подлежат мутации. Под мутацией подразумевается изменение значений q_{i,h_1}, q_{i,h_2} генов в позициях h_1 и h_2, которые формируются случайным образом. При этом реализуется увеличение значения q_{i,h_1} гена в h_{i1}-ой позиции в участке хромосомы, соответствующем i-у типу заданий, и уменьшение значения q_{i,h_2} гена в h_{i2}-й позиции в участке хромосомы, соответствующем этому же типу заданий. Оба значения q_{i,h_1} и q_{i,h_2} изменяются на 2 единицы. Условиями реализации оператора мутации для определяемых случайным образом позиций h_{i1} и h_{i2} генов со значениями q_{i,h_1} и q_{i,h_2} являются: 1) значение q_{i,h_1} в позиции h_{i1} не может быть таким, что $q_{i,h_2} \geq n^i - 3$ (т.к. измененное количество заданий в пакете не может быть равным $n^i - 1$ и n^i); 2) значение q_{i,h_2} в позиции h_{i2} такое, что $q_{i,h_2} \neq 0$ и $q_{i,h_2} \neq 1$, $q_{i,h_2} \neq 3$ (количество заданий в пакете после реализации мутации не может быть равно 1). В случае не выполнения какого-либо из

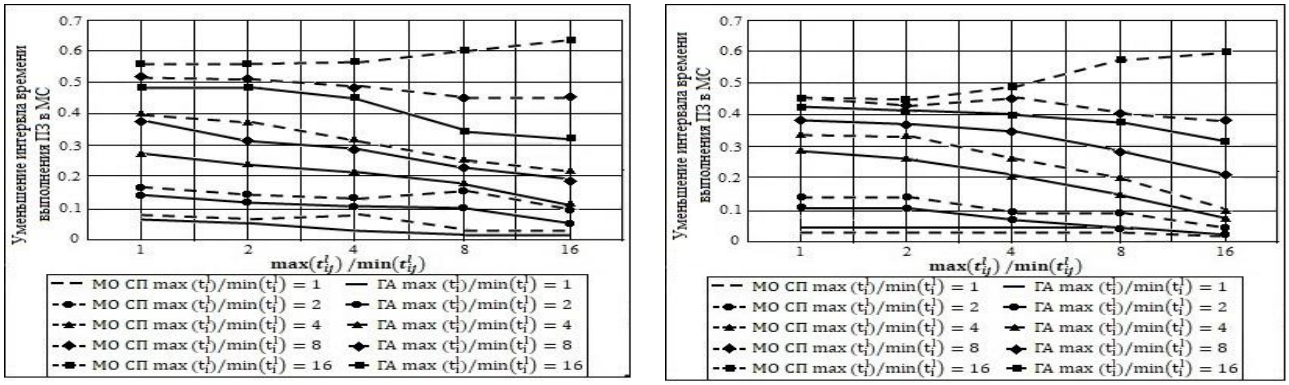
условий реализуется повторная генерация значений h_{i1} и/или h_{i2}. Таким образом, ГА являются способом формирования новых решений на основе имеющихся. Выполняется преобразование каждой полученной хромосомы в решения на верхнем уровне иерархии вида $[M,A]$, каждое из которых передается на нижней уровень с целью формирования расписаний выполнения ПЗ. Полученное для каждого решения по составам пакетов расписание позволяет оценить оптимальность составов пакетов. Результаты применения ГА для оптимизации решений по составам ПЗ в иерархической игре представлены в работе [128].

4.5. Анализ результатов исследований применения метода построения расписаний многостадийных процессов выполнения пакетов заданий в конвейерных системах

Основной компонентой системы построения расписаний многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС является подсистема оптимизации их составов, функционирующая на верхнем уровне. В основу функционирования этой подсистемы положен синтезированный в разделе 4.2 метод определения локально оптимальных решений по составам ПЗ. Поэтому основная цель исследования эффективности применения метода построения расписаний многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС заключается в идентификации уменьшения общих длительностей выполнения пакетов, составы которых сформированы с использованием предложенного метода, по сравнению с фиксированными пакетами и пакетами, сформированными другим методами (ГА) (то есть степени достижения внешней цели при использовании предложенного метода построения расписаний). Для исследования метода определения составов ПЗ в рассмотрение введены следующие обозначения параметров задачи: $max(t_{li})/min(t_{li})$ – отношение максимальной длительности выполнения заданий *i*-х типов ($i=\overline{1,n}$) на *l*-х приборах КС ($l=\overline{1,L}$) к минимальной длительности выполнения заданий этих типов; $max(t_{ij}^{l})/min(t_{ij}^{l})$ – отношение максимальной длительности переналадки приборов КС ($l=\overline{1,L}$) к минимальной длительности переналадки приборов. При исследовании параметр *n* принимал значения 5, 10 (при увеличении значений *n* тенденция снижения общей длительности выполнения всех ПЗ, сформированных предложенным методом, сохраняется), параметр n^{i} ($i=\overline{1,n}$) принимал значения 12, 16, 24. Значения параметра *L* задавались равными 5, 10. При исследованиях значения отношения $max(t_{ij}^{l})/min(t_{ij}^{l})$ задавались равными: 1, 2, 4, 8, 16. Значения отношения $max(t_{li})/min(t_{li})$ задавались равными 1, 2, 4, 8, 16. В качестве характеристики $f_{эмосп}$, определяющей уменьшение общей длительности выполнения всех ПЗ в решении, сформированном с использованием предложенного метода, по сравнению с фиксированными пакетами (эффек-

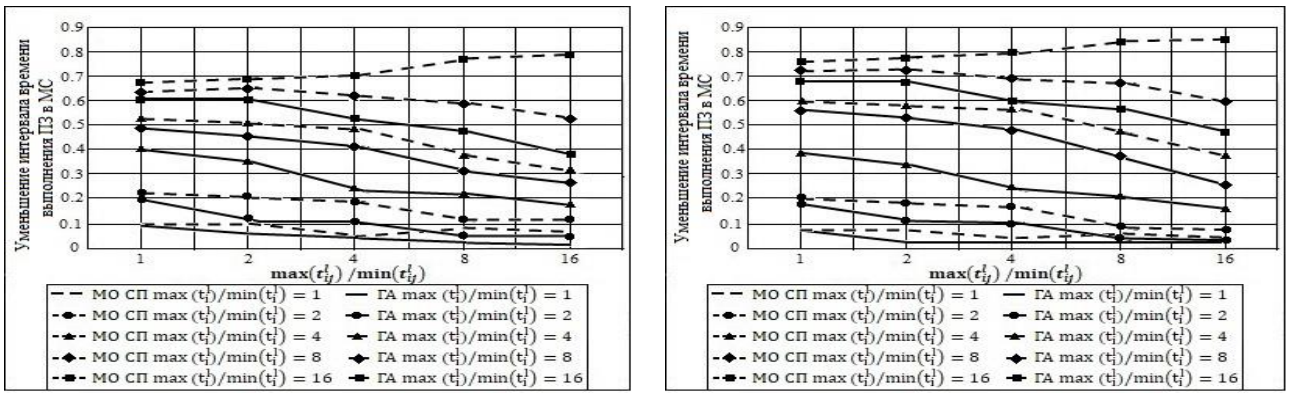
тивность метода оптимизации составов ПЗ – ЭМОСП), вычислялось отношение разности длительностей выполнения фиксированных пакетов и пакетов, сформированных рассмотренным методом, к общей длительности выполнения фиксированных пакетов: ($f_{эмосп} = (f_1^{фикс} - f_1^{мосп}) / f_1^{фикс}$, где $f_1^{фикс}$ – значение критерия f_1, полученное для решения с фиксированными пакетами, $f_1^{мосп}$ – значение критерия f_1, полученное для решений, оптимизированных предложенным методом. Аналогично определялось снижение длительности выполнения ПЗ в решении, сформированном ГА, по сравнению с фиксированными пакетами. Зависимости уменьшения общей длительности выполнения ПЗ по сравнению с фиксированными пакетами, от входных параметров представлены на рисунках 4.5-4.7 (МО СП– метод оптимизации составов ПЗ).

При $n^i = 12$ использование метода позволяет в среднем на 30% уменьшить общую длительность выполнения ПЗ в КС по сравнению с фиксированными пакетами. Сравнение решений, полученных с использованием предложенного метода, с решениями, полученными с использованием ГА, показывает, что значение $f_{эмосп}$ (для предложенного метода оптимизации решений) в среднем на 20% выше, чем значение $f_{эмосп}$ (для ГА). При $n^i = 16$ использование разработанного метода позволяет в среднем на 45% уменьшить общую длительность выполнения ПЗ в КС по сравнению с фиксированными пакетами. Сравнение решений, полученных с использованием предложенного метода, с решениями, полученными с использованием ГА, показывает, что значение $f_{эмосп}$ для предложенного метода оптимизации решений в среднем на 25-30% выше, чем значение $f_{эмосп}$ для ГА. При $n^i = 24$ использование метода позволяет в среднем на 40% уменьшить общую длительность выполнения ПЗ в КС по сравнению с фиксированными пакетами. Сравнение решений, полученных с использованием предложенного метода, с решениями, полученными с использованием ГА, показывает, что значение $f_{эмосп}$ для метода оптими-



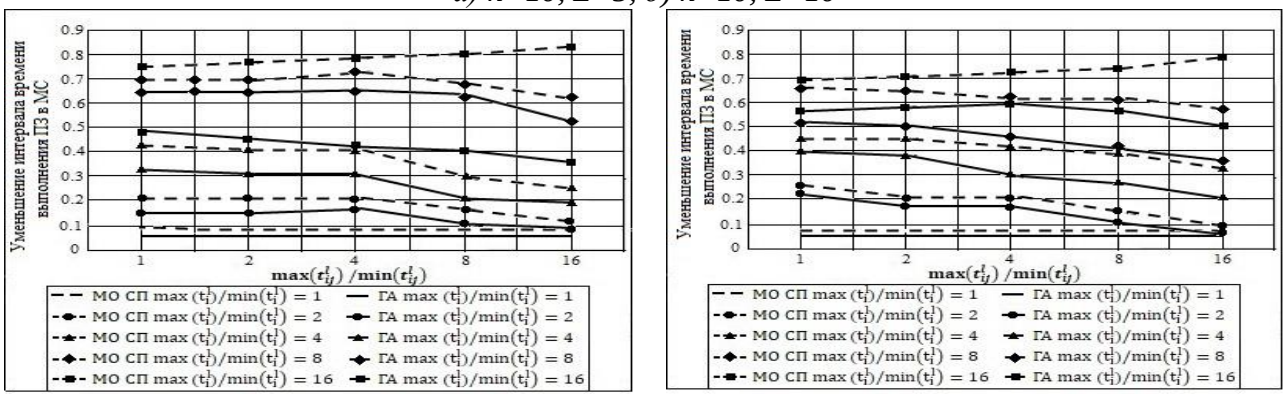
а) *б)*

Рисунок 4.5 – Уменьшение интервалов времени выполнения ПЗ в КС при $n^i = 12$.
а) n=10, L=5, б) n=10, L=10



а) *б)*

Рисунок 4.6– Уменьшение интервалов времени выполнения ПЗ в КС при $n^i = 16$.
а) n=10, L=5, б) n=10, L=10



а) *б)*

Рисунок 4.7 – Уменьшение интервалов времени выполнения ПЗ в КС при $n^i = 24$.
а) n=10, L=5, б) n=10, L=10

зации решений на 20-25% выше, чем значение $f_{эмосп}$ для ГА.

Предложенный способ формирования решений по составам ПЗ, рассмотренный в разделе 4.2, также положен в основу разработанного автором алгоритма метода ветвей и границ (МВГ) для оптимизации решений по их составам [129]. Разработанный алгоритм предусматривает оптимизацию составов ПЗ совместно с использованием эвристического правила для построения расписаний. Формулировка правила предполагает, в последовательностях π^l пакеты упорядочиваются по не убыванию значений длительностей переналадок приборов на выполнение заданий в них. В [129] синтезирована модель процесса выполнения ПЗ в МС, выражения для вычисления верхних и нижних оценок значений критерия (4.15). В алгоритме МВГ [129] процедура ветвления предполагает, что каждой вершине дерева, соответствующей одному из решений по составам ПЗ *i*-го типа и не исключенной из рассмотрения в результате реализации процедуры отсева, ставятся в соответствие все возможные решения по составам пакетов *(i+1)*-го типа, полученные с соответствии с рассмотренным в разделе 4.2 способом. Получены результаты исследований эффективности определения составов ПЗ с использованием МВГ [129]. Анализ результатов [129] позволяет сделать вывод об универсальности разработанного способа

формирования составов ПЗ как при использовании его в приближенных методах, так и в МВГ. Для верификации результатов построения расписаний выполнения ПЗ в КС с использованием рассмотренных методов оптимизации составов пакетов и расписаний их выполнения и МВГ выполнено сравнение значений моментов времени окончания выполнения заданий в составе пакетов, полученных с их использованием, со значениями этих параметров, полученных путем полного перебора множества возможных решений. В частности идентифицируется точность приближения результатов, полученных с использованием рассмотренного метода оптимизации и МВГ, к результатам, поученных в результате полного перебора. С целью сравнения полученные оценки точности приближения представлены в Таблице 4.1.

Выводы по Главе 4

По содержанию главы 4 могут быть сформулированы следующие выводы:

– современные методы определения составов ПЗ предполагают использование ЦЛП (при большой размерности задачи получение ее решения за ограниченное время невозможно), методов формирования пакетов с учетом директивных сроков окончания выполнения заданий (если директивные сроки формирования выполнения заданий не являются заданными, использование данных методов невозможно), эвристических правил (применение правил не позволяет получить решения, приближающиеся к оптимальным);

– для решения задачи построения расписаний многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС обосновано применение аппарата теории иерархических игр; предложен метод математического моделирования процессов выполнения ПЗ в КС, предусматривающий представление их (процессов) моделей в виде совокупности иерархически взаимосвязанных компонент; предложена математическая модель процесса выполнения ПЗ в КС, модель иерархической игры для определения локально оптимальных решений по составам ПЗ и расписаниям их выполнения;

– предложен метод построения расписаний выполнения ПЗ в КС, предусматривающий представление обобщенной задачи в виде иерархически упорядоченных взаимодействующих подзадач, для каждой из которых на соответствующем уровне иерархии определяется локально оптимальное решение;

– предложены способы формирования составов пакетов для начальных решений и модифицированных решений, сформированных на базе текущего рассматриваемого решения; определено условие окончания модификации текущего рассматриваемого решения по составам пакетов с целью получения новых решений и условие уменьшения количества решений в окрестностях текущего локально оптимального решения;

Таблица 4.1 – Сравнение результатов оптимизации решений по составам ПЗ и расписаниям их выполнения с результатами, полученными МВГ и при полном переборе множества решений

$max(t^l_{ii'})/min(t^l_{ii'})$	$max(t_{li})/min(t_{li})$	Значение f_1 при оптимизации МВГ	Значение f_1 при использовании метода локальной оптимизации	Значение f_1 при полном переборе	Точность МВГ	Точность при использовании метода локальной оптимизации
1	2	3	4	5	6	7
$n=3, n^i=6, L=3$						
2	1	32	34	32	1.0	0.94
	2	50	54	50	1.0	0.92
	4	66	72	66	1.0	0.91
	8	121	130	118	0.97	0.9
4	1	34	37	34	1.0	0.91
	2	52	57	52	1.0	0.9
	4	73	80	73	1.0	0.9
	8	125	133	120	0.96	0.89
8	1	42	46	42	1.0	0.91
	2	60	66	60	1.0	0.9
	4	78	84	76	0.98	0.89
	8	130	140	126	0.97	0.89
$n=3, n^i=8, L=3$						
2	1	37	40	37	1.0	0.92
	2	64	70	64	1.0	0.907
	4	80	88	80	1.0	0.9
	8	150	160	144	0.96	0.89
4	1	39	43	39	1.0	0.9
	2	66	72	66	1.0	0.9
	4	82	91	82	1.0	0.89
	8	154	162	146	0.96	0.88
8	1	54	60	54	1.0	0.89
	2	74	82	74	1.0	0.89
	4	106	119	106	1.0	0.88
	8	166	172	154	0.93	0.88

– сформулирован способ формирования новых решений по составам пакетов в окрестностях текущего локально оптимального решения и предложен алгоритм формирования решений в окрестностях текущего локально оптимального решения;

– предложен метод определения локально оптимальных решений по составам ПЗ в окрестностях разных видов, реализуемый на верхнем уровне в иерархической игре построения комплексных расписаний выполнения ПЗ;

– предложен метод построения расписаний выполнения ПЗ, учитывающий условие, предусматривающее, что порядок выполнения ПЗ на всех приборах КС является одинаковым;

– применение предложенного метода определения расписаний выполнения ПЗ в КС (оптимизации составов пакетов и расписаний их выполнения) позволило получить на 20-45% лучшие результаты, чем при выполнении фиксированных ПЗ;

– применение предложенного способа формирования решений по составам ПЗ при построении алгоритма МВГ с целью их оптимизации показало его универсальность как при использовании в приближенных алгоритмах, так и в методах сокращенного перебора (МВГ).

ГЛАВА 5. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЫПОЛНЕНИЯ ПАКЕТОВ ЗАДАНИЙ В КОНВЕЙЕРНЫХ СИСТЕМАХ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ КОМПЛЕКТОВ РЕЗУЛЬТАТОВ И МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ РАСПИСАНИЙ ПРОЦЕССОВ ВЫПОЛНЕНИЯ ПАКЕТОВ ЗАДАНИЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ КОМПЛЕКТОВ

5.1. Математическое моделирование многостадийных процессов выполнения пакетов заданий в конвейерных системах при формировании комплектов результатов, модели иерархических игр оптимизации решений по составам пакетов заданий и расписаниям их выполнения

В ряде практических приложений необходимо осуществлять построение расписаний многостадийных процессов выполнения ПЗ с учетом требования формирования комплектов из результатов реализации действий с заданиями на обрабатывающих приборах КС. В частности, такая задача возникает при реализации мониторинга земной поверхности с использованием спутниковых данных разных типов, объединяемых в пакеты (Приложения 2,3). Например, при реализации мониторинга земной поверхности с использованием данных ДЗЗ возникает необходимость определения значений параметров, характеризующих условия развития и распространения негативных природных явлений (НПЯ) и техногенных воздействий на ОС (ТВ на ОС). Определение условий развития НПЯ и ТВ на ОС реализуется в тех участках земной поверхности, где эти явления были идентифицированы. Каждому типу НПЯ и ТВ на ОС соответствует свой перечень условий распространения. Результаты обработки данных ДЗЗ с целью идентификации условий распространения (развития) одного НПЯ или ТВ на ОС образуют один комплект параметров, характеризующих условия распространения для этого явления (воздействия). Так как в КС реализуется обработка данных ДЗЗ, позволяющая получить результаты для разных НПЯ и ТВ на ОС одного типа (зафиксированных на различных участках земной поверхности), а также результаты для явлений и воздействий разных типов, тогда после обработки требуется формирование определенного количества комплектов разных типов. Тогда комплект – это набор значений параметров, являющихся результатами обработки спутниковых данных разных типов, представляющих собой условия, необходимые для прогнозирования развития определенного типа НПЯ и ТВ на ОС. Также в том случае, если восстанавливаемые в КС детали разных типов, включенные в передаточные партии, входят в состав одинаковых узлов и агрегатов технологического и транспортного оборудования, возникает необходимость построения расписаний их восстановления при условии формирования комплектов (Приложение 3).

По этой причине решение задачи построения расписаний выполнения ПЗ в КС при условии формирования комплектов является актуальным.

Построение расписаний процессов выполнения ПЗ в КС должно быть реализовано таким образом, чтобы обеспечить выполнение требования оперативности выдачи результатов и, как следствие, требования оперативности формирования комплектов результатов. В силу значительных неоднородностей длительностей выполнения заданий на разных приборах КС, а также неоднородностей длительностей переналадок приборов на выполнение заданий разных типов, построение расписаний выполнения заданий предусматривает формирование ПЗ различных составов. В соответствии с выполненной декомпозицией обобщенной функции системы построения расписаний, реализованной в разделе 4.1, решение задачи построения расписаний выполнения ПЗ с учетом формирования комплектов результатов предполагает решение следующих подзадач: 1) оптимизации составов ПЗ, 2) оптимизации расписаний выполнения ПЗ в КС, 3) распределения результатов выполнения ПЗ по комплектам заданных составов.

Альтернативным требованием, учитываемым при решении задачи построения расписаний процессов выполнения ПЗ в КС, является соответствие моментов времени окончания формирования комплектов задаваемым для них директивным срокам. Совместное решение сформулированных задач (определения составов ПЗ, расписаний их выполнения и формирования комплектов) должно гарантировать получение комплектов в заданные для них директивные сроки.

Выполненный в главе 1 анализ математических моделей процесса выполнения ПЗ в КС и методов построения расписаний выполнения ПЗ, показал, что задача построения расписаний с учетом требования формирования комплектов из результатов является не решенной. В связи с этим разработка математических моделей процессов выполнения ПЗ в КС при учете требования формирования комплектов и методов построения расписаний процессов выполнения ПЗ в КС при формирования комплектов из результатов является актуальной.

Используемый метод математического моделирования процессов выполнения ПЗ в КС при формировании комплектов предполагает организацию их (процессов) моделей в виде иерархически взаимосвязанных компонент. Для определения иерархически взаимосвязанных компонент модели процесса выполнения ПЗ в КС использованы обозначения (раздел 4.1): кортеж *[M,A]*– для составов ПЗ, кортеж $[P,R,\{T^{0l} \mid l=\overline{1,L}\}]$ – для расписаний выполнения ПЗ.

В соответствии с декомпозицией обобщенной цели функционирования системы на совокупность иерархически упорядоченных функций подсистем (подфункций, решаемых на уровнях системы построения расписаний выполнения ПЗ), формирование решений осуществляется на уровнях системы следующим образом: первый – решения по составам ПЗ вида *[M,A]*, второй – решения по порядкам выполнения на приборах КС сформированных пакетов в виде

$[P,R,\{T^{0l} \mid l=\overline{1,L}\}]$. Взаимодействие уровней при построении расписаний выполнения ПЗ реализуется по аналогии с задачей главы 4. На первом уровне иерархической игры выполняется решение двух взаимосвязанных задач: а) определения составов ПЗ (решений вида *[M,A]*); б) формирования комплектов из результатов выполнения ПЗ с учетом локально оптимального расписания реализации действий с ними на приборах КС $[P,R,\{T^{0l} \mid l=\overline{1,L}\}]*$.

Построение расписаний процессов выполнения ПЗ в КС при условии формирования комплектов результатов заданных составов предполагает: 1) определение составов ПЗ (решений *[M,A]*); 2) определение порядка выполнения ПЗ на приборах КС $[P,R,\{T^{0l} \mid l=\overline{1,L}\}]*$; 3) распределение результатов по комплектам заданных составов. Метод построения расписаний выполнения ПЗ отличается от метода, изложенного в разделе 4.3, так как порядок выполнения операций с пакетами должен обеспечивать оперативное формирование комплектов.

По аналогии с главой 4 определение решений по составам ПЗ и расписаниям их выполнения, осуществляемое на уровнях иерархии системы построения расписаний, реализуется с использованием теории иерархических игр. Ведущий игрок формирует решения по составам ПЗ, ведомый игрок реализует построение расписаний выполнения ПЗ, составы которых сформированы ведущим игроком, на приборах КС. Взаимодействие игроков при реализации игры аналогично рассмотренному в главе 4 взаимодействию игроков.

Для синтеза модели процесса выполнения ПЗ в КС при условии формирования комплектов из результатов в рассмотрение введены следующие обозначения:. g – идентификатор типа комплекта, который формируется из результатов выполнения заданий в КС, $g^{ком}$ – общее количество типов формируемых комплектов. Результаты выполнения ПЗ всех n типов входят в определенном количестве в составы комплектов каждого типа. Через w_{ig} обозначено количество результатов выполнения ПЗ i-го типа, которые включаются в один комплект g-го типа. В рассмотрение введена матрица W, значения элементов j_l которой равны количеству результатов выполнения ПЗ i-го типа, которые входят в состав одного комплекта g-го типа.

Через $n_g^{ком}$ обозначено количество комплектов g-го типа, которые должны быть сформированы из результатов выполнения ПЗ i-х типов, через h_g – индекс формируемого комплекта g-го типа ($h_g=\overline{1,n_g^{ком}}$). Количество n^i заданий каждого i-го типа, которые будут выполнены в КС, определяется следующим образом: $n^i=\sum_{g=1}^{g^{ком}} n_g^{ком}\cdot w_{ig}$.

Входными данными для системы построения расписаний выполнения ПЗ в КС при формировании комплектов из результатов являются: типы i ($i=\overline{1,n}$) заданий, выполняемых в системе; количество заданий $n^i \geq 2$ каждого i-го типа; количество типов комплектов $g^{ком}$; количество комплектов каждого типа $n_g^{ком}$ ($g=\overline{1,g^{ком}}$); матрица W, элемент w_{ig} которой равен количеству результатов выполнения ПЗ i-го типа, которые должны входить в один формируемый комплект g-ого типа ($i=\overline{1,n};\ \ g=\overline{1,g^{ком}}$), матрица T длительностей выполнения заданий i-ых типов на l-ых приборах КС (t_{li} – длительность выполнения заданий i-ых типов на l-ых приборах КС, $i=\overline{1,n};\ l=\overline{1,L}$); матрицы T^l $(l=\overline{1,L})$ длительностей переналадок l-ых приборов КС с выполнения заданий i-го типа на выполнение заданий i'-го типа ($t_{ii'}^l$ – длительность переналадки l-го прибора с выполнения заданий i-го типа на выполнение заданий i'-го типа). Решениями являются: составы ПЗ i-ых типов ($i=\overline{1,n}$); расписания выполнения ПЗ в КС.

В соответствии с функциями уровней системы построения расписаний процессов выполнения ПЗ в КС между ними выполняется обмен следующей информацией: 1) на вход первого уровня подаются: количество n типов заданий, количество типов комплектов $g^{ком}$, количество комплектов каждого типа $n_g^{ком}$ ($g=\overline{1,g^{ком}}$), количество n^i ($i=\overline{1,n}$) заданий каждого типа, выполняемых в системе; матрица W составов комплектов; с выхода уровня передаются составы ПЗ i-ых типов ($i=\overline{1,n}$) – решение $[M,A]\in N_1$; 2) на вход второго уровня – решение $[M,A]\in N_1$; с выхода уровня – расписание $[P,R,\{T^{0l}\,|\,l=\overline{1,L}\}]^*\in N_2([M,A])$, на основе которого реализуется распределение результатов между комплектами по мере их готовности при окончании выполнения пакетов. На основе распределения результатов выполнения ПЗ по комплектам, соответствующего расписанию $[P,R,\{T^{0l}\,|\,l=\overline{1,L}\}]^*\in N_2([M,A])$, осуществляется оценка оптимальности решения $[M,A]\in N_1$.

В рассмотрение введены обозначения для моментов времени окончания формирования требуемого количества w_{ig} результатов выполнения ПЗ i-го типа (на L-ом приборе КС), включаемых в формируемый h_g-ый комплект g-го типа ($h_g=\overline{1,n_g^{ком}}$, $g=\overline{1,g^{ком}}$) в виде: t_{i,h_g}^g. Момент времени t_{i,h_g}^g равен моменту времени окончания выполнения ПЗ, результаты из которого позволяют закончить формирование i-й компоненты h_g-го комплекта g-го типа, характеризуемой значением w_{ig} (t_{i,h_g}^g соответствует моментам времени окончания выполнения ПЗ i-х

типов, результаты из которых включаются в *i*-ю компоненту h_g-го комплекта *g*-го типа таким образом, чтобы их количество соответствовало значению w_{ig}). Значения t^g_{i,h_g} ($i=\overline{1,n}$, $h_g=\overline{1,n_g^{ком}}$, $g=\overline{1,g^{ком}}$) образуют матрицы T^g моментов времени окончания формирования *i*-ых компонент h_g-ых комплектов *g*-ых типов в количестве w_{ig} (размер матриц $n\times n_g^{ком}$). На верхнем уровне с использованием расписания $[P,R,\{T^{0l}\mid l=\overline{1,L}\}]^*\in N_2([M,A])$, сформированного для решения $[M,A]$, определяются матрицы T^g ($g=\overline{1,g^{ком}}$).

Для каждого h_g-го комплекта *g*-го типа ($g=\overline{1,g^{ком}}$) вводится в рассмотрение параметр, обозначенный как t_{g,h_g}, соответствующий моменту времени окончания его формирования. Значения t_{g,h_g} определяются на основе значений t^g_{i,h_g} : $t_{h_g,g}=\max\limits_i[(t^g_{i,h_g})]$. Так как значения t_{g,h_g} для каждого h_g-го комплекта *g*-го типа ($g=\overline{1,g^{ком}}$) вычисляются на основе значений элементов t^g_{i,h_g} матриц T^g, то эти матрицы характеризуют распределение результатов по комплектам, формируемое на основе расписания $[P,R,\{T^{0l}\mid l=\overline{1,L}\}]^*$.

В соответствии с выполненными рассуждениями в состав модели процессов выполнения ПЗ в КС при условии формирования комплектов входят: иерархически взаимосвязанные компоненты вида *[M,A]* и $[P,R,\{T^{0l}\mid l=\overline{1,L}\}]$, выражения (4.5), (4.8)-(4.10) для расчета значений t^{0l}_{jq} ($j=\overline{1,n_p}$, $q=\overline{1,n_j}$, $l=\overline{1,L}$); выражение для расчета значений t_{g,h_g} ($h_g=\overline{1,n_g^{ком}}$, $g=\overline{1,g^{ком}}$). Модель иерархической игры построения расписаний выполнения ПЗ при условии формирования комплектов результатов имеет следующий вид:

– первые уровень:

$$f_1([M,A],[P,R,\{T^{0l}\mid l=\overline{1,L}\}]^*,\{T^g\mid g=\overline{1,g^{ком}}\})\to min,\quad [M,A]\in N_1\ ; \qquad (5.1)$$

– второй уровень:

$$f_2([M,A],[P,R,\{T^{0l}\mid l=\overline{1,L}\}])\to min,\ [P,R,\{T^{0l}\mid l=\overline{1,L}\}]\in N_2([M,A])\ . \qquad (5.2)$$

Если для h_g -го комплекта g-го типа результаты выполнения ПЗ всех i-х типов в количестве w_{ig} ($i=\overline{1,n}$) подготовлены (сформированы его i-е компоненты), то этот комплект является сформированным. Оперативность формирования каждого h_g -го комплекта g-го типа ($h_g=\overline{1,n_g}$, $g=\overline{1,g^{ком}}$) характеризуется минимальным значением момента времени t_{g,h_g}.

Выполнение ПЗ i-х типов ($i=\overline{1,n}$) в КС начинается в момент времени $d_i=0$. Значение $t_{g,1}$ характеризует интервал времени получения результатов выполнения ПЗ всех n типов с целью формирования первого комплекта g-го типа. Во второй комплект g-го типа могут быть включены результаты выполнения заданий из таких пакетов, для которых $\left[t^{0L}_{j,n_j}+\sum\limits_{h=1}^{n} t^{L}_{h}\cdot p_{h,j}\right]\le t_{g,1}$ (результаты, формирующие i-ю компоненту второго комплекта g-го типа, получены при выполнении пакетов в некоторой j-ой позиции в π^l ($l=\overline{1,L}$) до окончании формирования первого комплекта g-го типа). Таким образом, результаты выполнения заданий i-го типа в пакете в j-ой позиции в π^l ($l=\overline{1,L}$) могут быть распределены по i-м компонентам нескольких комплектов g-ого типа (либо g-х типов, $g=\overline{1,g^{ком}}$). Поэтому интервал времени, затраченный на получение результатов, из которых формируется второй комплект g-го типа, не может быть определен выражением ($t_{g,2}-t_{g,1}$), а характеризуется значением, соответствующим $t_{g,2}$. Аналогичные рассуждения могут быть применены для любого h_g -го комплекта g-го типа. Тогда временные затраты на получение результатов выполнения заданий в пакетах с целью формирования всех h_g -х комплектов ($h_g=\overline{1,n_g^{ком}}$) g-го типа определяются выражением $\sum\limits_{h_g=1}^{n_g^{ком}} t_{g,h_g}$. Оперативность формирования комплектов обеспечивается составами ПЗ, для которых значение, получаемое с использованием приведенного выражения является минимальным. Для всех комплектов g-ых типов необходимо выполнить совместную минимизацию значений временных затрат, связанных с получением результатов выполнения ПЗ, из которых они формируются. Вид выражения, с использование которого реализуется определение суммарных временных затрат на формирование комплектов g-ых типов ($g=\overline{1,g^{ком}}$):

$\sum_{g=1}^{g^{ком}} \sum_{h_g=1}^{n_g^{ком}} t_{g,h_g}$. Данное выражение представляет собой аддитивную свертку ([130-133) критериев, определяющих временные затраты на формирование комплектов g-х типов.

Эффективность применения метода определения составов пакетов для задачи построения расписаний их выполнения в КС при формировании комплектов определяется путем сравнения получаемых решений с решениями для фиксированных пакетов. В случае выполнения фиксированных ПЗ все комплекты формируются одновременно в момент времени окончания выполнения последнего пакета. В этом случае полученное выражение не является приемлемым для определения числовой характеристики решения. Для оценки оптимальности решений предложен способ, позволяющий определить средние временные затраты на формирование комплектов. Выражение для определения средних временных затрат на получение результатов выполнения заданий в пакетах, из которых формируются комплекты, имеет вид $\left(\sum_{g=1}^{g^{ком}} \sum_{h_g=1}^{n_g} t_{g,h_g} \right) / \left(\sum_{g=1}^{g^{ком}} n_g \right)$. Это выражение используется в качестве критерия оптимальности решений по составам ПЗ на верхнем уровне в иерархической игре.

На основе приведенных в главе 4 рассуждений построение расписаний выполнения ПЗ осуществляется с учетом требования минимизации суммарных простоев приборов КС при реализации действий со всеми сформированными пакетами. Тогда модель иерархической игры, позволяющей оптимизировать составы ПЗ и расписания их выполнения с учетом требования оперативности формирования комплектов результатов, имеет следующий вид:

– первые уровень:

$$i = \overline{1,n}, \text{ где } f_1 = \left(\sum_{g=1}^{g^{ком}} \sum_{h_g=1}^{n_g} t_{g,h_g} \right) / \left(\sum_{g=1}^{g^{ком}} n_g \right); \tag{5.3}$$

– второй уровень:

$$i = \overline{1,n}, \tag{5.4}$$

где $f_2 = \sum_{l=1}^{L} t_{11}^{0l} + \sum_{l=1}^{L} \sum_{j=2}^{n_p} \left[t_{j1}^{0l} - \left[t_{j-1,n_{j-1}}^{0l} + \sum_{h=1}^{n} t_{lh} \cdot p_{h,j-1} \right] \right] + \sum_{l=2}^{L} \sum_{j=1}^{n_p} \sum_{q=2}^{n_j} \left[t_{jq}^{0l} - \left[t_{j,q-1}^{0l} + \sum_{h=1}^{n} t_{lh} \cdot p_{hj} \right] \right].$

Ограничения, накладываемые на множества N_1 и $N_2([M,A])$ в рассматриваемой задаче, аналогичны ограничениям (4.17)-(4.21) в задаче построения расписаний процессов выполнения ПЗ в КС (глава 4). Модель (5.3), (5.4) соответствует первой задаче оптимизации решений по составам ПЗ при оперативном формировании комплектов из результатов. Стратегии поведения игроков на каждом уровне аналогичны стратегиям их поведения в иерархической игре оптими-

зации составов ПЗ и расписаний их выполнения (глава 4). Ситуация равновесия в иерархической игре, достигаемая при поиске оптимальных решений по составам ПЗ и расписаниям их выполнения, аналогична ситуации равновесия в игре, рассмотренной в главе 4.

Вторая задача построения расписаний процессов выполнения ПЗ в КС при формировании комплектов результатов предполагает задание директивных сроков для каждого h_g-го комплекта g-го типа ($h_g = \overline{1,n_g^{ком}}$, $g = \overline{1,g^{ком}}$). Решение этой задачи (решение задач оптимизации составов ПЗ, расписаний их выполнения и формирования комплектов результатов) должно гарантировать получение комплектов в задаваемые для них директивные сроки.

Решаемая задача предполагает задание для каждого комплекта директивного срока его формирования, поэтому в рассмотрение введена матрица $D^{ком}$, элемент $d_{g,h_g}^{ком}$ которой представляет собой директивный срок окончания формирования h_g-го комплекта g-го типа ($h_g = \overline{1,n_g^{ком}}$, $g = \overline{1,g^{ком}}$, размер матрицы $g^{ком} \times n_g^{ком'}$, где $n_g^{ком'} = \max\limits_{1 \le g \le g^{ком}} (n_g^{ком})$). При этом для каждого g-го типа комплекта элементы $d_{g,h_g}^{ком}$ матрицы $D^{ком}$ упорядочены в g-ой строке по не убыванию значений моментов времени окончания формирования комплектов: $h_g < h'_g$, если $d_{g,h_g}^{ком} \le d_{g,h'_g}^{ком}$.

Оптимизация составов ПЗ i-ых типов ($i = \overline{1,n}$) вместо фиксированных пакетов позволяет получить лучшее решение с точки зрения формирования комплектов из результатов их выполнения в директивные сроки. Входными параметрами для рассматриваемой задачи построения расписаний выполнения ПЗ при формировании комплектов являются: количество типов заданий n; количество заданий $n^i \ge 2$ каждого i-го типа ($i = \overline{1,n}$); количество типов комплектов $g^{ком}$; количество комплектов каждого типа $n_g^{ком}$ ($g = \overline{1,g^{ком}}$); матрица W составов комплектов; матрица $D^{ком}$ директивных сроков формирования комплектов, а также параметры, характеризующие процесс выполнения заданий разных типов в КС. Решениями являются: решение по составам ПЗ вида *[M,A]*; расписание выполнения ПЗ в КС вида $[P,R,\{T^{0l} \mid l = \overline{1,L}\}]$.

Распределение результатов выполнения ПЗ по комплектам после определения расписаний выполнения ПЗ осуществляется на верхнем уровне для оценки оптимальности решений *[M,A]* по составам ПЗ. Обмен информацией между уровнями в иерархической игре оптимизации составов ПЗ и расписаний их выполнения в КС с учетом формирования комплектов в заданные директивные сроки аналогичен рассмотренной выше иерархической игре построения расписа-

ний выполнения ПЗ в КС при оперативном формировании комплектов. Взаимодействие игроков при реализации ходов в игре, стратегии поведения игроков в игре аналогичны рассмотренным в главе 4.

Комплекты формируются только из результатов, которые получены при окончании выполнения ПЗ. Полное формирование одного комплекта g-го типа предполагает получение (в требуемом количестве) всех результатов выполнения ПЗ, для этого необходимых. Получение результатов выполнения ПЗ, являющихся компонентами комплектов, требуется реализовать к директивным срокам окончания их формирования. При определении локально оптимального решения на первом уровне должно идентифицироваться соответствие сроков окончания формирования комплектов заданным директивным срокам, что отвечает внешней цели функционирования системы. Данное соответствие характеризуется степенью превышения реальных сроков формирования комплектов, определяемым в соответствии с расписанием, директивных сроков. На основе этого условия синтезируется критерий оптимальности решений на верхнем уровне иерархической игры.

Решение задачи построения расписаний выполнения ПЗ при условии формирования комплектов обеспечивается предварительным упорядочиванием идентификаторов g комплектов ($g = \overline{1, g^{ком}}$) в соответствии с их директивными сроками $d^{ком}_{g,h_g}$. Для упорядочивания комплектов в соответствии с директивными сроками в рассмотрение введены обозначения, использование которых позволит синтезировать вид критерия оптимальности и алгоритм упорядочивания идентификаторов типов комплектов: $K^{ком}_y$ – упорядоченное множество идентификаторов типов комплектов; g_y – количество элементов в $K^{ком}_y$ ($g_y = \sum_{g=1}^{g^{ком}} n^{ком}_g$); $D^{ком}_y$ – упорядоченное множество значений директивных сроков окончания формирования h_g -х комплектов ($h_g = \overline{1, n^{ком}_g}$) g-х типов ($g = \overline{1, g^{ком}}$) ($\left|D^{ком}_y\right| = \left|K^{ком}_y\right|$); p– позиция комплекта g-го типа в множестве $K^{ком}_y$ и момента времени ($d^{ком}_{g,h_g}$) в множестве $D^{ком}_y$; g_p – идентификатор типа комплекта, занимающий в множестве $K^{ком}_y$ p-ю позицию; $t^{ком}_{g_p}$ – момент времени окончания формирования комплекта g-го типа, идентификатор которого занимает p-ю позицию в $K^{ком}_y$; $d^{ком}_{g_p}$ – директивный срок окончания формирования комплекта g-го типа, занимающий p-ю позицию в множестве $D^{ком}_y$; tz_{g_p} – запаздывание с формированием комплекта, идентификатор g

типа которого занимает *p*-ю позицию в множестве $K_y^{ком}$. На основе значений элементов матрицы $D^{ком}$ выполняется формирование множеств $K_y^{ком}$ и $D_y^{ком}$ идентификаторов типов комплектов g_p и директивных сроков $d_{g_p}^{ком}$ ($p=\overline{1,g_y^{ком}}$) завершения формирования комплектов. Множества $K_y^{ком}$ и $D_y^{ком}$ имеют вид: $K_y^{ком}=\{ g_p \mid p=\overline{1,g_y} \}$, $D_y^{ком}=\{ d_{g_p}^{ком} \mid p=\overline{1,g_y} \}$. При реализации алгоритма распределения результатов по комплектам определяются моменты времени $t_{g_p}^{ком}$ окончания формирования комплектов *g*-ых типов, занимающих в $K_y^{ком}$ *p*-е позиции, которым соответствуют директивные сроки $d_{g_p}^{ком}$, занимающие в $D_y^{ком}$ *p*-е позиции.

В случае $t_{g_p}^{ком} > d_{g_p}^{ком}$ фиксируется запаздывание с формированием комплекта *g*-го типа относительно его директивного срока $d_{g_p}^{ком}$: $tz_{g_p} = max(0, t_{g_p}^{ком} - d_{g_p}^{ком})$. При вычислении значений tz_{g_p} используется расписание $[P,R,\{T^{0l} \mid l=\overline{1,L}\}]^* \in N_2([M,A])$. В этом случае для всех комплектов *g*-х типов в *p*-х позициях в множестве $K_y^{ком}$ (обозначенных как g_p) общее запаздывание с их формированием определяется выражением $\sum_{p=1}^{g_y} tz_{g_p}$. Это выражение используется в качестве критерия на верхнем уровне иерархической игры оптимизации составов ПЗ и расписаний их выполнения в КС.

На основе выполненных в главе 4 рассуждений оптимизация расписаний выполнения ПЗ на нижнем уровне иерархии осуществляется в точки зрения минимизации суммарных простоев приборов КС при реализации на них действий с сформированными пакетами. Для рассматриваемой задачи оптимизации расписаний выполнения ПЗ предложен метод определения порядка реализации действий с ними на приборах КС. Этот метод предусматривает упорядочивание пакетов в последовательностях π^l ($l=\overline{1,L}$) таким образом, чтобы обеспечить наиболее быстрое формирование комплектов. При этом порядок выполнения ПЗ в последовательностях π^l оптимизируется с точки зрения минимизации суммарных простоев приборов КС.

Модель иерархической игры для оптимизации составов ПЗ и расписаний их выполнения с учетом формирования комплектов в заданные для них директивные сроки имеет вид:

– первый уровень:

$$min\ f_1, \text{ где } f_1 = \sum_{p=1}^{g_y} tz_{g_p}; \qquad (5.5)$$

– второй уровень:

$$min\ f_2, \tag{5.6}$$

где $f_2 = \sum_{l=2}^{L} t_{11}^{0l} + \sum_{l=1}^{L}\sum_{j=2}^{n_p}\left[t_{j1}^{0l} - \left[t_{j-1,n_{j-1}}^{0l} + \sum_{h=1}^{n} t_h^l \cdot p_{h,j-1}\right]\right] + \sum_{l=2}^{L}\sum_{j=1}^{n_p}\sum_{q=2}^{n_j}\left[t_{jq}^{0l} - \left[t_{j,q-1}^{0l} + \sum_{h=1}^{n} t_h^l \cdot p_{hj}\right]\right]$.

Ограничения, накладываемые на множества N_1 и $N_2([M,A])$ в рассматриваемой задаче, аналогичны ограничениям (4.17)-(4.21) в задаче построения расписаний выполнения ПЗ.

Представленные выражения (5.3), (5.4) и (5.5), (5.6) (с учетом ограничений (4.17)-(4.21)) являются математическими моделями иерархических игр для оптимизации составов ПЗ и расписаний их выполнения на приборах КС при условии формирования комплектов результатов, требовании оперативного их формирования и их формировании в указанные директивные сроки. Использование моделей (5.3), (5.4) и (5.5), (5.6) позволяет выполнить оптимизацию составов пакетов и расписаний их выполнения с учетом введенных условий. Результаты исследований по синтезу моделей иерархических игр оптимизации составов пакетов и расписаний их выполнения в КС с учетом формирования комплектов представлены в работах [134-137].

5.2. Способы упорядочивания типов комплектов, определения моментов времени окончания формирования комплектов результатов выполнения пакетов заданий в соответствии с расписаниями

Распределение результатов выполнения ПЗ по комплектам осуществляется с учетом расписаний реализации действий с ними в КС, сформированных для определенного решения по их составам. При распределении результатов по комплектам определяются значения t_{g,h_g} ($h_g = \overline{1,n_g^{ком}}$, $g = \overline{1,g^{ком}}$) и значения критериев, характеризующие решения по составам ПЗ.

На нижнем уровне принятия решений реализуется метод определения порядка выполнения ПЗ, предусматривающий их размещение в последовательностях π^l ($l = \overline{1,L}$) таким образом, чтобы обеспечить наиболее быстрое формирование комплектов g-ых типов ($g = \overline{1,g^{ком}}$).. Тогда для расписания выполнения ПЗ $[P,R,\{T^{0l} \mid l = \overline{1,L}\}]^* \in N_2([M,A])$ на первом уровне реализуется распределение результатов по комплектам по мере окончания реализации действий с пакетами в КС. С целью обеспечения оперативности формирования комплектов из результатов и удовлетворения требования формирования комплектов в заданные директивные сроки введены способы предварительного упорядочивания идентификаторов комплектов.

Для первой задачи использованы обозначения, позволившие сформулировать метод упорядочивания идентификаторов типов комплектов: $K^{ком}$ – исходное множество идентификаторов типов комплектов ($K^{ком}=\{1,2,..,g^{ком}\}$); $K_y^{ком}$ – множество идентификаторов типов комплектов, упорядоченное в соответствии с сложностью их формирования; g' – идентификатор типа комплекта, выделяемый из множества $K^{ком}$ в соответствии с введенным в рассмотрение признаком и добавляемый в множество $K_y^{ком}$; p – позиция идентификатора g'-го типа комплекта, в которой он размещается в множестве $K_y^{ком}$; g_p – идентификатор типа комплекта, занимающий в множестве $K_y^{ком}$ p-ю позицию; $w_g^{отн}$ – параметр, обратный относительной сложности формирования комплекта g-го типа, вычисляемый по формуле $w_g^{отн}=\dfrac{\max\limits_i(w_{ig})-\min\limits_i(w_{ig})}{\max\limits_i(w_{ig})}$ (большее значение $w_g^{отн}$ соответствует «простому» для формирования комплекту, меньшее значение $w_g^{отн}$ соответствует «сложному» для формирования комплекту), $st_{i,h_{g'}}$ – счетчик количества результатов выполнения ПЗ i-го типа, добавленных в $h_{g'}$-ый комплект g'-го типа. Синтезированный способ упорядочивания идентификаторов g типов комплектов реализует формирование множества $K_y^{ком}$ на основе множества $K^{ком}$.

Для первой задачи построения расписаний выполнения ПЗ при формировании комплектов первый этап способа формирования множества $K_y^{ком}$ имеет следующий порядок шагов:

1) сформировать множество $K^{ком}$ в виде: $K^{ком}=\{1,2,..,g^{ком}\}$;

2) задать значение позиции p в множестве $K_y^{ком}$ для рассматриваемого типа комплектов, добавляемого в множество $K_y^{ком}$, равным $g^{ком}$ ($p=g^{ком}$);

3) выбрать среди типов комплектов $g\in K^{ком}$ такой тип g', для которого выполняется условие: $\max\limits_i(w_{ig'})=\max\limits_g\max\limits_i(w_{ig})$;

4) добавить тип комплектов g' в множество $K_y^{ком}$ на позицию p и исключить этот тип из множества $K^{ком}$: $K_y^{ком}=K_y^{ком}\cup\{g'\}$, $K^{ком}=K^{ком}\setminus\{g'\}$;

5) модифицировать значение p позиции типа комплекта g' в множестве $K_y^{ком}$: $p=p-1$; если $K^{ком}=\varnothing$, то перейти на пункт 6; если $K^{ком}\neq\varnothing$, то перейти на пункт 3;

6) останов алгоритма.

В результате реализации рассмотренного алгоритма типы комплектов g упорядочиваются в множестве $K_y^{ком}$ в соответствии с значениями $\max\limits_i(w_{ig})$, множество $K_y^{ком}$ определено в виде $K_y^{ком}=\{g_p \mid p=\overline{1,g^{ком}}\}$, где типы комплектов g_p и g_{p+1} размещаются на p-ой и $(p+1)$-ой позициях в этом множестве в том случае, если $\max\limits_i(w_{ig_p}) \le \max\limits_i(w_{ig_{p+1}})$. После формирования множества $K_y^{ком}$ реализуется дополнительное уточнение p-ых позиций типов комплектов g_p и g_{p+1}, для которых выполняется условие вида: $\max\limits_i(w_{ig_p}) = \max\limits_i(w_{ig_{p+1}})$. Изменение позиций p и $(p+1)$ для типов комплектов g_p и g_{p+1}, для которых $\max\limits_i(w_{ig_p}) = \max\limits_i(w_{ig_{p+1}})$, выполняется в соответствии со следующей последовательностью шагов:

1) в множестве $K_y^{ком}=\{g_p \mid p=\overline{1,g^{ком}}\}$ определить типы комплектов g_p и g_{p+1}, для которых выполняется условие $\max\limits_i(w_{ig_p}) = \max\limits_i(w_{ig_{p+1}})$;

2) для определенных таким образом типов комплектов g_p и g_{p+1} вычислить значения $w_{g_p}^{отн}$ и $w_{g_{p+1}}^{отн}$; если для параметров $w_{g_p}^{отн}$ и $w_{g_{p+1}}^{отн}$ выполняется условие $w_{g_p}^{отн} < w_{g_{p+1}}^{отн}$, то для типов комплектов g_p и g_{p+1} произвести обмен их позициями в множестве $K_y^{ком}$;

3) выполнить действия пунктов 1 и 2 для всех типов комплектов, для которых истинно условие $\max\limits_i(w_{ig_p}) = \max\limits_i(w_{ig_{p+1}})$.

В итоге на основе множества $K_y^{ком}$ вида $K_y^{ком}=\{g_1,g_2,..,g_h,g_{h+1},..,g_{g^{ком}}\}$ формируется новое множество $(K_y^{ком})'=\{g_1,g_2,..,g_{h+1},g_h,..,g_{g^{ком}}\}$. Множество $(K_y^{ком})'$ используется при распределении результатов выполнения ПЗ в КС по комплектам. Распределение результатов выполнения заданий по комплектам предусматривает определение моментов времени t_{i,h_g}^{g} ($i=\overline{1,n}$, $g=\overline{1,g^{ком}}$, $h_g=\overline{1,n_g^{ком}}$) в соответствии с расписанием $[P,R,\{T^{0l} \mid l=\overline{1,L}\}]^*$ и определение моментов времени t_{g,h_g} окончания формирования каждого h_g-го комплекта g-го типа ($h_g=\overline{1,n_g}$, $g=\overline{1,g^{ком}}$). Входными данными в алгоритм распределения результатов по комплектам является множество I типов заданий ($I=\{1,2,..,n\}$), множество $(K_y^{ком})'$ и расписание $[P,R,\{T^{0l} \mid l=\overline{1,L}\}]^* \in N_2([M,A])$. Алгоритм распределения результатов выполнения ПЗ по

комплектам и вычисления значений t^{g}_{i,h_g} ($i=\overline{1,n}$, $g=\overline{1,g^{ком}}$, $h_g=\overline{1,n_g}$) имеет следующий порядок шагов:

1) для всех g-ых типов комплектов ($g=\overline{1,g^{ком}}$) задать значения параметра h_g равным 1 ($h_g=1$); инициализировать множество $(K_y^{ком})''$ следующим образом: $(K_y^{ком})''=(K_y^{ком})'$;

2) инициализировать для каждого i-го типа заданий значение идентификатора h_i ПЗ этого типа, используемого при реализации алгоритма, равным 0 ($h_i=0$);

3) определить индекс i' типа заданий, результаты выполнения которых распределяются по комплектам g-ых типов ($g=\overline{1,g^{ком}}$): $i'=min\{\,i \mid i\in I\,\}$; модифицировать I: $I=I\setminus\{\,i'\,\}$;

4) определить идентификатор g' типа комплектов, в которые будут включаться результаты выполнения ПЗ i'-го типа: $g'=\min\limits_{p}\{\,g_p \mid g_p\in(K_y^{ком})''\,\}$; $(K_y^{ком})''=(K_y^{ком})''\setminus\{\,g'\,\}$; в соответствии с типом комплектов g' идентифицировать значение $n_{g'}^{ком}$ количества комплектов;

5) задать значение счетчика $st_{i',h_{g'}}$ количества результатов выполнения заданий i'-го типа, добавленных в $h_{g'}$-ый комплект g'-го типа, равным 0 ($st_{i',h_{g'}}=0$);

6) определить элемент $r_{i',h}$ в i'-ой строке матрицы R такой, что $r_{i',h}\neq 0$ (при $h=\overline{h_{i'}+1,n_p}$), как следствие, идентифицировать номер h ПЗ i'-го типа, для которого $r_{i',h}\neq 0$;

7) если $r_{i',h}\geq(w_{i'g'}-st_{i'g'})$, то модифицировать значение $r_{i',h}$: $r_{i',h}=r_{i',h}-(w_{i'g'}-st_{i'g'})$; перейти на на пункт 8; если $r_{i',h}<(w_{i'g'}-st_{i'g'})$, то модифицировать значение $st_{i'g'}$: $st_{i'g'}=st_{i'g'}+r_{i',h}$; модифицировать значение $h_{i'}$: $h_{i'}=h$; выполнить переход на пункт 6;

8) вычислить значение $t^{g}_{i',h_{g'}}=t^{0L}_{h,n_h}+\sum\limits_{q=1}^{n}t_{Lq}\cdot p_{q,h}$;

9) модифицировать номер формируемого комплекта g'-го типа: $h_{g'}=h_{g'}+1$; если $h_{g'}\leq n_{g'}^{ком}$, то задать значение $st_{i',h_{g'}}$ равным 0 ($st_{i',h_{g'}}=0$), перейти на пункт 6; если $h_{g'}>n_g^{ком}$, то перейти на пункт 10;

10) если $(K_y^{ком})''=\varnothing$, то выполнить переход на пункт 11; если $(K_y^{ком})''\neq\varnothing$, то задать идентификатор типа комплектов g', в которые будут включаться результаты выполнения зада-

ний i'-го типа: $g' = \min\limits_{p}\{ g_p \mid g_p \in (K_y^{ком})'' \}$; $(K_y^{ком})'' = (K_y^{ком})'' \setminus \{ g' \}$; задать значение $st_{i',h_{g'}}$ равным 0 ($st_{i',h_{g'}} = 0$); перейти на пункт 6;

11) если $I = \varnothing$, то перейти на пункт 12; если $I \neq \varnothing$, то модифицировать идентификатор i' типа заданий, результаты выполнения которых включаются в комплекты: $i' = min\{ i \mid i \in I \}$, $I = I \setminus \{ i' \}$; инициализировать множество $(K_y^{ком})''$: $(K_y^{ком})'' = (K_y^{ком})'$; перейти на пункт 4;

12) останов алгоритма.

В результате реализации рассмотренного алгоритма вычисляются значения элементов t_{i,h_g}^{g} матриц T^g ($g = \overline{1, g^{ком}}$). Значения t_{i,h_g}^{g} элементов матриц T^g ($g = \overline{1, g^{ком}}$) используются для определения моментов времени t_{g,h_g} окончания формирования h_g-х комплектов ($h_g = \overline{1, n_g^{ком}}$) g-х типов и вычисления значений критерия (5.3), характеризующих решения по составам пакетов на верхнем уровне иерархической игры. В алгоритме упорядочивания идентификаторов типов комплектов во второй задаче построения расписаний выполнения ПЗ при условии формирования комплектов использованы обозначения, введенные выше для синтеза алгоритма распределения результатов по комплектам в первой задаче. Рассматриваемый способ реализует формирование упорядоченного множества $K_y^{ком}$ идентификаторов типов комплектов и соответствующего ему множества $D_y^{ком}$. Он имеет следующий порядок шагов:

1) задать значение позиции p в множествах $K_y^{ком}$ и $D_y^{ком}$ для комплекта рассматриваемого типа g' и его директивного срока $d_{g',h_{g'}}^{ком}$ равным 1 ($p = 1$);

3) определить наличие в матрице $D^{ком}$ не нулевых значений элементов $d_{g,h_g}^{ком}$; при отсутствии в матрице $D^{ком}$ не нулевых значений перейти на пункт 7;

4) если существует такой элемент $d_{g,h_g}^{ком}$ матрицы $D^{ком}$, что $d_{g,h_g}^{ком} \neq 0$, то определить элемент $d_{g',h_{g'}}^{ком}$, удовлетворяющий условию $d_{g',h_{g'}}^{ком} = \min\limits_{g} \min\limits_{h_g} (d_{g,h_g}^{ком})$;

5) добавить идентификатор g' типа комплекта в множество $K_y^{ком}$ в p-ой позиции ($K_y^{ком} = K_y^{ком} \cup \{ g' \}$), добавить значение $d_{g',h_{g'}}^{ком}$, соответствующее g'-му типу комплекта, в множество $D_y^{ком}$ в p-ой позиции ($d_{g_p}^{ком} = \min\limits_{g} \min\limits_{h_g} (d_{g,h_g}^{ком})$; $D_y^{ком} = D_y^{ком} \cup \{ d_{g_p}^{ком} \}$);

6) присвоить элементу $d^{ком}_{g',h_{g'}}$ матрицы $D^{ком}$ нулевое значение ($d^{ком}_{g',h_{g'}} = 0$); модифицировать номер позиции *p* элементов в множествах $K^{ком}_y$ и $D^{ком}_y$: $p=p+1$; перейти на пункт 3;

7) окончание алгоритма.

В результате реализации рассмотренного алгоритма типы комплектов g упорядочиваются в множестве $K^{ком}_y$. Множество $K^{ком}_y$ определено в виде $K^{ком}_y = \{ g_p \mid p = \overline{1,g_y} \}$, где для типов комплектов g_p и g_{p+1} выполняются условия $d^{ком}_{g_p} \le d^{ком}_{g_{p+1}}$. После определения на нижнем уровне иерархии решения $[P,R,\{T^{0l} \mid l = \overline{1,L}\}]*$ реализуется распределение результатов по комплектам *g*-х типов с учетом множества $K^{ком}_y$ и определение моментов времени $t^{ком}_{g_p}$ ($p = \overline{1,g_y}$) окончания формирования комплектов *g*-ых типов ($g = \overline{1,g^{ком}}$)). Перед реализацией алгоритма определения моментов времени $t^{ком}_{g_p}$ ($p = \overline{1,g_y}$), множество *I* типов заданий инициализируется в виде: $I = \{1,2,..,n\}$. Алгоритм распределения результатов по комплектам, определения значений $t^{ком}_{g_p}$ ($p = \overline{1,g_y}$), запаздываний $tz^{ком}_{g_p}$ с формированием комплектов в соответствии с решением $[P,R,\{T^{0l} \mid l = \overline{1,L}\}]*$, имеет следующий порядок шагов:

1) положить *I'=I*, $p=1$, $h_g = 1$ ($g = \overline{1,g^{ком}}$);

2) для каждого *i*-го типа результатов положить $h_i = 0$ ($i = \overline{1,n}$);

3) на основе номера позиции *p* в множестве $K^{ком}_y$ определить тип комплекта g', в который будут распределяться результаты выполнения заданий: $g' = g_p$; на основе номера позиции p в $D^{ком}_y$ определить значение директивного срока формирования комплекта: $d^{ком}_{g'} = d^{ком}_{g_p}$;

4) определить тип *i'* результатов выполнения ПЗ, добавляемых в комплект *g'*-го типа: $i' = min\{ i \mid i \in I' \}$; модифицировать *I'*: $I' = I' \backslash \{ i' \}$;

5) положить значение $st_{i',g'}$ равным 0 ($st_{i',g'} = 0$);

6) определить элемент $r_{i',h}$ в *i'*-ой строке матрицы *R* такой, что $r_{i',h} \neq 0$ (при $h = \overline{h_{i'}+1,n_p}$);

7) если $r_{i',h} \geq (w_{i'g'} - st_{i'g'})$, то модифицировать значение $r_{i',h}$: $r_{i',h} = r_{i',h} - (w_{i'g'} - st_{i'g'})$; перейти на пункт 8; если $r_{i',h} < (w_{i'g'} - st_{i'g'})$, то модифицировать значение $st_{i'g'}$: $st_{i'g'} = st_{i'g'} + r_{i',h}$; модифицировать значение $h_{i'}$: $h_{i'} = h$; перейти на пункт 6;

8) вычислить значение $t^{g'}_{i',h_{g'}} = t^{0L}_{h,n_h} + \sum_{q=1}^{n} t_{L,q} \cdot p_{q,h}$;

9) если $I' = \varnothing$, то рассчитать значение $t^{ком}_{g'_p}$ момента времени окончания формирования комплекта g'-го типа: $t^{ком}_{g'_p} = \max_{1 \leq i \leq n}(t^{g'}_{i,h_{g'}})$, времени запаздывания: $tz^{ком}_{g'_p} = max\{0, t^{ком}_{g'_p} - d^{ком}_{g'_p}\}$; если $tz^{ком}_{g'_p} > 0$, то добавить значение $tz^{ком}_{g'_p}$ в критерий f_1: $f_1 = f_1 + tz^{ком}_{g'_p}$; модифицировать значение $h_{g'}$: $h_{g'} = h_{g'} + 1$; перейти на пункт 10; если $I' \neq \varnothing$, то перейти на пункт 4;

10) модифицировать значение p позиции типа комплекта g в $K^{ком}_y$ и директивного срока в $D^{ком}_y$: $p=p+1$; если $p > g_y$, то перейти на пункт 11; если $p \leq g_y$, то $I' = I$, перейти на пункт 3;

11) останов алгоритма.

Результатом реализации рассмотренного алгоритма является значение критерия $f_1(\cdot)$, которое определено на основе решения $[P,R,\{T^{0l} \mid l = \overline{1,L}\}]^*$ и является оценкой оптимальности решения по составам ПЗ *[M,A]* на верхнем уровне иерархической игры. Результаты исследований по обоснованию методов упорядочивания комплектов в задаче определения локально оптимальных составов ПЗ и расписаний их выполнения, а также методов распределения результатов выполнения заданий по комплектам представлены в работах [134-137].

5.3. Метод оптимизации расписаний многостадийных процессов выполнения пакетов заданий в конвейерных системах при формировании комплектов результатов

Построение расписаний процессов выполнения ПЗ в КС реализуется для определенного на верхнем уровне решения *[M,A]* по их составам с учетом требования оперативности формирования комплектов из результатов, либо соответствия моментов времени формирования комплектов директивным срокам. Для рассматриваемой задачи построения расписаний выполнения ПЗ (решений по составам пакетов и расписаниям их выполнения в КС) с учетом формирования комплектов предложен модифицированный метод определения порядка реализации действий с пакетами на приборах КС. Метод предусматривает последовательное добавление в

$\pi^l\,(l=\overline{1,L})$ по одному ПЗ каждого *i*-го типа, определение порядка выполнения этих пакетов, гарантирующего минимум (5.4)/(5.6), затем повторное размещение в $\pi^l\,(l=\overline{1,L})$ следующего ПЗ каждого *i*-го типа, их упорядочивание в $\pi^l\,(l=\overline{1,L})$ и так далее пока все ПЗ не будут добавлены в $\pi^l\,(l=\overline{1,L})$. Для обоснования модифицированного метода построения расписаний выполнения ПЗ в КС при условии формирования комплектов из результатов использованы следующие обозначения: *I'* –множество типов заданий, дублирующее множество типов заданий *I*; n_p – общее количество ПЗ, сформированных на первом уровне иерархии ($n_p=\sum_{i=1}^{n} m_i$), которые будут добавлены в последовательности в $\pi^l\,(l=\overline{1,L})$; m_i^p – количество ПЗ *i*-го типа, которые добавлены в последовательности $\pi^l\,(l=\overline{1,L})$ на предыдущих итерациях алгоритма. Также при реализации алгоритма используется номер столбца j^{max} в матрицах *P* и *R*, в котором будут размещаться параметры, соответствующие рассматриваемому ПЗ некоторого *i*-го типа. Первоначальная инициализация j^{max} выполнена следующим образом: $j^{max}=1$.

Последовательность шагов алгоритма построения расписаний выполнения ПЗ в КС при условии формирования комплектов имеет следующий вид:

1) для каждого *i*-го типа заданий ($i=\overline{1,n}$) идентификаторы (номера) пакетов h_i, задания из которых размещаются в последовательностях $\pi^l\,(l=\overline{1,L})$) в количестве a_{i,h_i}, инициализировать значениями 1 ($h_i=1$); параметры m_i^p ($i=\overline{1,n}$) инициализировать значениями 0 ($m_i^p=0,\ i=\overline{1,n}$); задать идентификатор *s* шага алгоритма равным 1 (*s=1*);

2) определить тип заданий *i'*, пакет которых размещается в последовательностях $\pi^l\,(l=\overline{1,L})$: $i'=min\{\,i\mid i\in I'\,\},\ I'=I'\backslash\{\,i'\,\}$;

3) инициализировать элементы $p_{i,j}$, $r_{i,j}$ матриц *P(s)* и *R(s)* значениями, соответствующими размещаемому в $\pi^l\ (l=\overline{1,L})$ пакету заданий *i'*-го типа с количеством заданий $a_{i',h_{i'}}$; для этого в *i'*-ой строке j^{max}-го столбца матриц *P(s)* и *R(s)* задать значения, соответствующие этому пакету: $p_{i',j^{max}}=1$, $r_{i',j^{max}}=a_{i',h_{i'}}$; $p_{h,j^{max}}=0$, $r_{h,j^{max}}=0$ при $h=\overline{1,n}$ и $h\neq i'$; вычислить значения элементов $t_{jq}^{0l}(s)$ матриц $T^{0l}(s)$ ($l=\overline{1,L}$) на основе матриц *P(s)* и *R(s)*; зафиксировать решение $[P(s),R(s),\{T^{0l}(s)\mid l=\overline{1,L}\}]$ как локально оптимальное: $[P,R,\{T^{0l}\mid l=\overline{1,L}\}]^*=[P(s),R(s),\{T^{0l}(s))\mid l=\overline{1,L}\}]$;

4) задать значение g индекса шага формирования промежуточного решения равным 1; присвоить индексу текущего рассматриваемого столбца j_l матриц $P(s)$ и $R(s)$ значение j^{max} ($j_l = j^{max}$); модифицировать значение j^{max}: $j^{max} = j^{max} + 1$;

5) проверить условие $j_l=1$; если $j_l=1$, то перейти на пункт 12;

6) для полученных матриц $P(s), R(s)$ и матриц $T^{0l}(s)$ ($l = \overline{1,L}$) определить значение критерия $f_2(s)$ (для решения $[P(s), R(s), \{T^{0l}(s)) \mid l = \overline{1,L}\}]$);

7) если $j_l \neq 1$, то выполнить преобразования матриц $P(s)$ и $R(s)$ таким образом, чтобы изменился порядок следования пакетов в π^l ($l = \overline{1,L}$) (изменить позицию ПЗ i'-го типа в π^l ($l = \overline{1,L}$)); выполняемые при этом действия имеют вид: $p_{i',j_l-1}(s+g)=1$, $p_{i',j_l}(s+g)=0$, $p_{h,j_l-1}(s+g)=0$, $p_{h,j_l}(s+g)=1$ (при $h=\overline{1,n}$ и $h \neq i'$); $r_{i',j_l-1}(s+g)=a_{i',h_{i'}}$, $r_{i',j_l}(s+g)=0$, $r_{h,j_l}(s+g)=r_{h,j_l-1}(s+(g-1))$, $r_{h,j_l}(s+g)=0$ при $h=\overline{1,n}$ и $h \neq i'$, где h – индекс строки в матрицах $P(s+(g-1))$ и $R(s+(g-1))$, в которой элементы $p_{h,j_l-1}=1$ и $r_{h,j_l-1} \neq 0$ на $(s+(g-1))$-ом шаге; модифицировать индекс j_l столбца, идентифицирующий местоположение (позицию) пакета в π^l $(l=\overline{1,L})$: $j_l=j_l-1$;

8) вычислить с использованием матриц $P(s+g)$, $R(s+g)$ значения элементов $t_{jq}^{0l}(s+g)$ матриц $T^{0l}(s+g)$ $(l=\overline{1,L})$, а также значение критерия $f_2(s+g)$;

9) проверить условие $f_2(s) > f_2(s+g)$; если $f_2(s) > f_2(s+g)$ (значение левого дискретного градиента целевой функции $\nabla_g^- f_2(s) < 0$, получено решение, лучшее чем $[P, R, \{T^{0l} \mid l = \overline{1,L}\}]^*$), то полученное решение фиксируется как локально оптимальное: $[P, R, \{T^{0l} \mid l = \overline{1,L}\}]^* = [P(s+g), R(s+g), \{T^{0l}(s+g)) \mid l = \overline{1,L}\}]$; модифицировать значение критерия $f_2(s+g)$, модифицировать значение номера шага s: $s=s+g$, задать значение индекса g шага алгоритма поиска следующего локального оптимального решения в окрестности текущего $[P, R, \{T^{0l} \mid l = \overline{1,L}\}]^*$ равным 1; задать значение метрики k окрестности O_k , в которой выполняется поиск локально оптимального решения, равным 1; перейти на пункт 7;

10) если $\nabla_g^+ f_2(s) \geq 0$, то выполнить проверку условия для текущего значения метрики k окрестности O_k: $k < k^{max}$; если $k < k^{max}$, то модифицировать индекс g ($g=g+1$), значение метрики окрестности $k = k+1$ (будет реализован дальнейший поиск лучшего решения в

окрестности O_{k+1} решения $[P, R, \{T^{0l} \mid l = \overline{1,L}\}]^*$), перейти на пункт 7; если $k > k^{max}$, то перейти на пункт 11;

11) выполнить модификацию счетчика количества размещенных в последовательностях π^l $(l = \overline{1,L})$ ПЗ i-го типа $m_{i'}^p$: $m_{i'}^p = m_{i'}^p + 1$; если $m_i^p > m_i$, то исключить i'-ый тип заданий из множества I: $I = I \setminus \{i'\}$; проверить условие $I' \neq \varnothing$; если $I' \neq \varnothing$, то перейти на пункт 2; если $I' = \varnothing$, то проверить $I \neq \varnothing$; если $I \neq \varnothing$, то присвоить $I' = I$, перейти на пункт 2; если $I' = \varnothing$, то перейти на пункт 12;

12) останов алгоритма.

В соответствии с рассмотренным алгоритмом формируются расписания выполнения ПЗ в КС, которые передаются на первый уровень иерархии с целью распределения результатов по комплектам. Сформированное расписание $[P, R, \{T^{0l} \mid l = \overline{1,L}\}]^* \in N_2([M, A])$ соответствует полученному решению по составам ПЗ $[M,A]$.

5.4. Анализ результатов исследований метода построения расписаний выполнения пакетов заданий в конвейерных системах при условии формирования комплектов

Решение задачи построения расписаний выполнения ПЗ при формировании комплектов из результатов обеспечивается применением метода определения локально оптимальных решений по составам ПЗ, рассмотренного в разделе 4.2. Для исследования эффективности применения метода оптимизации составов ПЗ при решении задачи построения расписаний с учетом формирования комплектов используются следующие обозначения для ее (задачи) параметров: n – количество типов заданий; $g^{ком}$ – количество типов комплектов; $n_g^{ком}$ – количество комплектов каждого g-го типа ($g = \overline{1, g^{ком}}$); $max(t_{li}) / min(t_{li})$ – отношение максимальной длительности выполнения заданий i-ых типов ($i = \overline{1,n}$) на l-ых приборах КС ($l = \overline{1,L}$) к минимальной длительности их выполнения; $max(t_{ij}^l) / min(t_{ij}^l)$ – отношение максимальной и минимальной длительностей переналадок приборов; $max(w_{ig}) / min(w_{ig})$ – отношение максимального количества результатов выполнения заданий i-ых типов в комплектах g-ых типов к минимальному количеству результатов выполнения заданий i-ых типов в комплектах g-ых типов ($g = \overline{1, g^{ком}}$) (характеризует неоднородность составов комплектов). Задаваемые при исследовании значения параметров n: 5 и 10; L: 5 и 10; $g^{ком}$: 2; $n_g^{ком}$: 2 и 4. Задача построения распи-

саний характеризуется парой значений параметров вида: ($g^{ком}$,$n_g^{ком}$). С точки зрения кортежа ($g^{ком}$,$n_g^{ком}$) рассматривались задачи, характеризуемые парами значений $g^{ком}$ и $n_g^{ком}$: (2,2), (2,4). Значения отношения $max(w_{ig})/min(w_{ig})$ задавались равными 1, 2, 3. Значения $max(t_{ij}^l)/min(t_{ij}^l)$ задавались равными: 1, 2, 4, 8, 16. Значения $max(t_{li})/min(t_{li})$ задавались равными 1, 2, 4, 8, 16. При исследованиях определялись решения по составам ПЗ, оптимизированным с использованием предложенного в разделе 4.2. метода.

Для первой задачи в качестве параметра, характеризующего эффективность применения метода, определялось отношение разности значений средних интервалов времени окончания формирования комплектов из результатов выполнения фиксированных пакетов и пакетов, составы которых получены рассмотренным методом, к среднему интервалу времени формирования комплектов для фиксированных пакетов: ($f_{эмосп} = (f_1^{фикс} - f_1^{мосп})/f_1^{фикс}$, где $f_1^{фикс}$ – значение критерия f_1, полученное для фиксированных пакетов, $f_1^{мосп}$ – значение критерия f_1, полученное для решений, в которых составы ПЗ оптимизированы). Максимальное снижение временных затрат на формирование комплектов для фиксированных пакетов и пакетов, сформированных с использованием метода оптимизации составов ПЗ, получено для значений $n=5$, $L=5$ и указанных значений параметров. Графики зависимостей значений $f_{эмосп}$ от входных параметров при $n=5$, $L=5$ в сравнении с ГА представлены на рисунках 5.1-5.6 (МО СП– метод оптимизации составов пакетов).

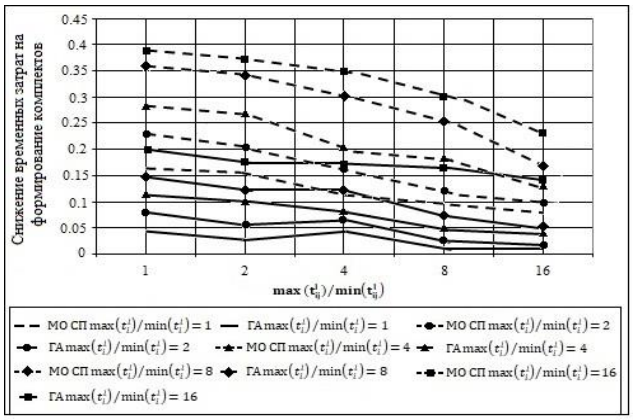


Рисунок 5.1 – Снижение временных затрат на формирование комплектов из результатов выполнения ПЗ оптимизированных составов по сравнению с фиксированными ПЗ при $g^{ком} = 2$, $n_g^{ком} = 2$, $max(w_{ig})/min(w_{ig}) = 1$

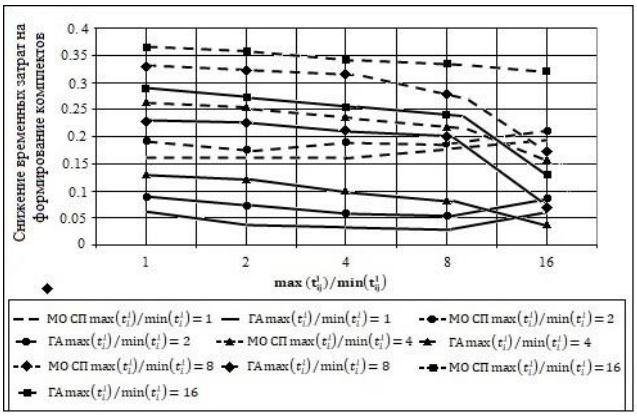


Рисунок 5.2 – Снижение временных затрат на формирование комплектов из результатов выполнения ПЗ оптимизированных составов по сравнению с фиксированными ПЗ при $g^{ком} = 2$, $n_g^{ком} = 2$, $max(w_{ig})/min(w_{ig}) = 2$

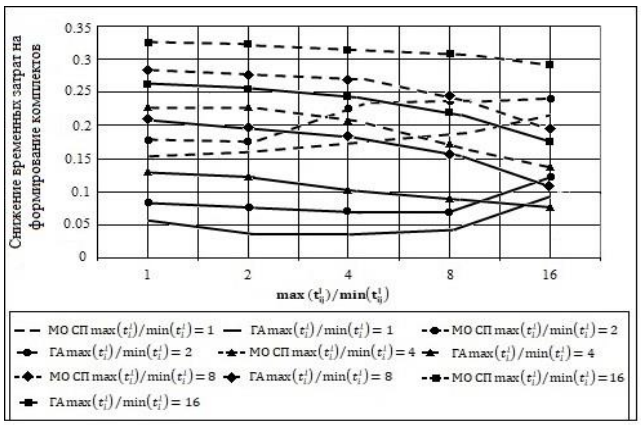


Рисунок 5.3 – Снижение временных затрат на формирование комплектов из результатов выполнения ПЗ оптимизированных составов по сравнению с фиксированными ПЗ при $g^{ком} = 2$, $n_g^{ком} = 2$, $max(w_{ig})/min(w_{ig}) = 3$

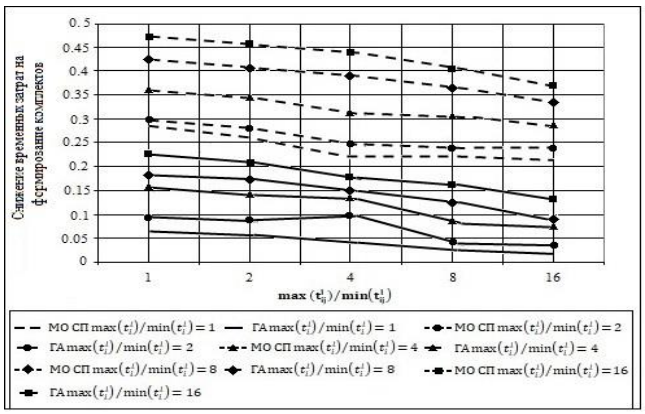


Рисунок 5.4 – Снижение временных затрат на формирование комплектов из результатов выполнения ПЗ оптимизированных составов по сравнению с фиксированными ПЗ при $g^{ком} = 2$, $n_g^{ком} = 4$, $max(w_{ig})/min(w_{ig}) = 1$

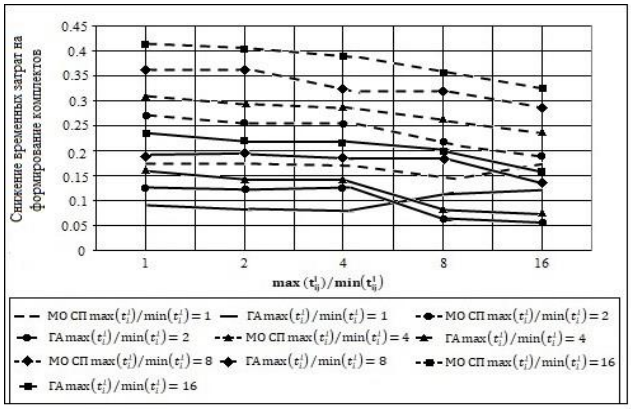


Рисунок 5.5 – Снижение временных затрат на формирование комплектов из результатов выполнения ПЗ оптимизированных составов по сравнению с фиксированными ПЗ при $g^{ком} = 2$, $n_g^{ком} = 4$, $max(w_{ig})/min(w_{ig}) = 2$

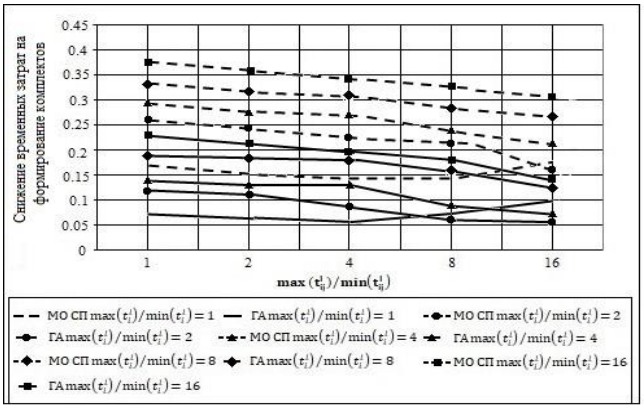


Рисунок 5.6 – Снижение временных затрат на формирование комплектов из результатов выполнения ПЗ оптимизированных составов по сравнению с фиксированными ПЗ при $g^{ком} = 2$, $n_g^{ком} = 4$, $max(w_{ig})/min(w_{ig}) = 3$

Результаты исследований при значениях (*n=5, L=10*), (*n=10, L=5*), (*n=10, L=10*) и указанных значениях входных параметров обобщены в виде Таблицы 5.1 (приведены максимальные значения $f_{эмосп}$, полученные при $max(t_{li})/min(t_{li}) = 16$). При *n=5* и $g^{ком} = 2$ ($n_g^{ком} = 2$ или $n_g^{ком} = 4$) зафиксированы особенности построения расписаний выполнения ПЗ в КС:

– максимальное уменьшение средней длительности формирования комплектов идентифицировано при $max(t_{li})/min(t_{li}) = 16$; при максимальной неоднородности длительностей выполнения заданий на разных приборах КС применение метода оптимизации составов ПЗ позволяет уменьшить среднюю длительность формирования комплектов из результатов в максимальной степени; при этом значения отношения $max(t_{ij}^l)/min(t_{ij}^l)$ являются минимальными

Таблица 5.1 – Максимальное снижение временных затрат на формирование комплектов из результатов выполнения ПЗ– значения $f_{эмосп}$ (оперативное формирование комплектов)

n, L	$max(w_{ig})/min(w_{ig})$					
	1		2		3	
	МО СП	ГА	МО СП	ГА	МО СП	ГА
	$g^{ком}=2,\ n_g^{ком}=2$					
$n=5, L=5$	0,4	0,2	0,37	0,18	0,33	0,15
$n=5, L=10$	0,3	0,18	0,26	0,15	0,25	0,12
$n=10, L=5$	0,24	0,13	0,22	0,11	0,2	0,1
$n=10, L=10$	0,22	0,08	0,2	0,1	0,18	0,08
	$g^{ком}=2,\ n_g^{ком}=4$					
$n=5, L=5$	0,48	0,28	0,41	0,25	0,37	0,23
$n=5, L=10$	0,37	0,25	0,37	0,22	0,35	0,2
$n=10, L=5$	0,34	0,22	0,33	0,2	0,33	0,18
$n=10, L=10$	0,32	0,18	0,29	0,18	0,27	0,12

(равны 1, 2); при увеличении неоднородности длительностей переналадок (увеличении $max(t_{ij}^{l})/min(t_{ij}^{l})$) уменьшение средней длительности формирования комплектов за счет оптимизации составов ПЗ предложенным методом зафиксировано в меньшей степени;

– наибольшее снижение средней длительности формирования комплектов определяется в случае $max(w_{ig})/min(w_{ig})$=1 (при отсутствии неоднородности составов комплектов применение метода является наиболее эффективным).

При $n=10$ и $g^{ком}=2$ ($n_g^{ком}=2$ или $n_g^{ком}=4$) зафиксированы следующие особенности оптимизации решений по составам пакетов:

– в случае малых значений отношения $max(t_{li})/min(t_{li})$, равных 1, 2, 4, при увеличении неоднородности длительностей переналадок (увеличение $max(t_{ij}^{l})/min(t_{ij}^{l})$) фиксируется значительное уменьшение средней длительности формирования комплектов из результатов (при оптимизации ПЗ, в сравнении с фиксированными пакетами);

– при значениях отношения $max(t_{li})/min(t_{li})$, равных 8 и 16, рост неоднородности длительностей переналадок приборов КС обуславливает менее значительное снижение средней длительности формирования комплектов из результатов;

– наибольшее уменьшение средней длительности формирования комплектов из результатов фиксируется при больших значениях отношения $max(t_{li})/min(t_{li})$, равных 8,16; не значительное уменьшение средней длительности формирования комплектов из результатов фиксируется при значения отношения $max(t_{li})/min(t_{li})$, равных 1, 2, 4;

– наибольшее уменьшение средней длительности формирования комплектов из результатов фиксируется в случае $max(w_{ig})/min(w_{ig})=1$; увеличение неоднородности составов комплектов приводит к меньшему снижению средней длительности формирования комплектов.

В итоге метод оптимизации составов ПЗ позволил сформировать решения, которые обеспечивают снижение средней длительности формирования комплектов результатов на 30% по сравнению с решениями, использующими фиксированные пакеты. При $n=10,\ L=10,\ g^{ком}=2$, $n_g^{ком}=4$ и максимальной неоднородности длительностей выполнения заданий (значение $max(t_{li})/min(t_{li})=16$) метод определения составов ПЗ позволяет получать решения, которые обеспечивают снижение средней длительности формирования комплектов результатов на 25% по сравнению с решениями, использующими фиксированные пакеты. При $n=5,\ L=5,\ g^{ком}=2$, $n_g^{ком}=2$ снижение средней длительности формирования комплектов из результатов, равное 40%, получено при максимальной неоднородности длительностей выполнения заданий ($max(t_{li})/min(t_{li})=16$). При $n=10,\ L=10,\ g^{ком}=2$, $n_g^{ком}=2$, неоднородности длительностей выполнения заданий ($max(t_{li})/min(t_{li})=16$) снижение средней длительности формирования комплектов составляет 22 % .

Для исследования метода оптимизации составов ПЗ при решении задачи построения расписаний при условии формирования комплектов в указанные директивные сроки введены дополнительные обозначения параметров: $d_{1,h_g}^{ком}/d_{g^{ком},h_g}^{ком}$ – отношение значений директивных сроков h_g -ых комплектов первого и $g^{ком}$-го типов; отношение $d_{g,1}^{ком}/d_{g,n_g^{ком}}^{ком}$ ($d_{g,1}^{ком}$ – директивный срок для первого комплекта g-го типа, $d_{g,n_g^{ком}}^{ком}$ – директивный срок для последнего $n_g^{ком}$-го комплекта этого же g-го типа). Значение $d_{g^{ком},1}^{ком}$ задавалось равным 100. Значения отношений $d_{1,h_g}^{ком}/d_{g^{ком},h_g}^{ком}$ и $d_{g,1}^{ком}/d_{g,n_g^{ком}}^{ком}$ задавались равными 1.5, 2. В соответствии с указанными значениями параметра $d_{g^{ком},1}^{ком}$, отношений $d_{1,h_g}^{ком}/d_{g^{ком},h_g}^{ком}$, $d_{g,1}^{ком}/d_{g,n_g^{ком}}^{ком}$ для каждой задачи сформированы матрицы $D^{ком}$. Рассматривались задачи, значения параметров ($g^{ком},n_g^{ком}$) в которых равны (2,2) и (2,4). Для задачи, характеризуемой значениями параметров ($g^{ком},n_g^{ком}$) вида (2,2), матрица $D^{ком}$ в соответствии со значениями отношений $d_{1,h_g}^{ком}/d_{g^{ком},h_g}^{ком}=1.5$ и $d_{g,1}^{ком}/d_{g,n_g^{ком}}^{ком}=2$, значением $d_{g^{ком},1}^{ком}=100$ определена в виде:

$$D^{ком} = \begin{pmatrix} 150 & 300 \\ 100 & 200 \end{pmatrix}. \quad (5.7)$$

Для задачи, характеризуемой значениями параметров ($g^{ком}, n_g^{ком}$) вида (2,4), матрица $D^{ком}$ в соответствии со значениями отношений $d_{1,h_g}^{ком} / d_{g^{ком},h_g}^{ком} = 2$ и $d_{g,1}^{ком} / d_{g,n_g^{ком}}^{ком} = 2$, значением $d_{g^{ком},1}^{ком} = 100$ определена в виде:

$$D^{ком} = \begin{pmatrix} 200 & 250 & 350 & 400 \\ 100 & 125 & 175 & 200 \end{pmatrix}. \quad (5.8)$$

Значения элементов $d_{g,h_g}^{ком}$ матриц (5.7) и (5.8) фиксировались в качестве директивных сроков формирования h_g -ых комплектов *g*-ых типов при проведении исследований метода построения расписаний выполнения ПЗ в КС. Для других параметров задачи ($max(t_{li}) / min(t_{li})$, $max(t_{ij}^l) / min(t_{ij}^l), max(w_{ig}) / min(w_{ig'}), g^{ком}$, $n_g^{ком}$) значения указаны выше.

Для рассматриваемой задачи в качестве выходного параметра решения фиксировалось значение суммарного превышения моментами времени формирования h_g -ых комплектов ($h_g = \overline{1, n_g^{ком}}$) *g*-ых типов ($g = \overline{1, g^{ком}}$) указанных для них директивных сроков $d_{g,h_g}^{ком}$. При исследовании метода оптимизации составов пакетов определялись решения для фиксированных ПЗ и ПЗ, составы которых оптимизированы рассмотренным методом. В качестве параметра, характеризующего эффективность использования метода, определялось отношение разности суммарных запаздываний с формированием h_g -ых комплектов ($h_g = \overline{1, n_g^{ком}}$) *g*-ых типов ($g = \overline{1, g^{ком}}$) относительно заданных директивных сроков $d_{g,h_g}^{ком}$ для фиксированных пакетов и пакетов, сформированных в соответствии с предложенным методом, к суммарному запаздыванию с формированием комплектов относительно директивных сроков для фиксированных пакетов: $f_{эмосп} = (f_1^{фикс} - f_1^{мосп}) / f_1^{фикс}$, где $f_1^{фикс}$ – значение критерия f_1 для фиксированных пакетов, $f_1^{мосп}$ – значение критерия f_1 для решений, в которых составы ПЗ оптимизированы с использованием рассмотренного метода. Максимальное снижение суммарного запаздывания с формированием комплектов относительно директивных сроков зафиксировано при *n=5, L=5* и указанных выше значений введенных параметров. Графики зависимостей степени снижения суммарного запаздывания с формированием комплектов относительно директивных сроков $f_{эмосп}$ при *n=5, L=5* в сравнении с ГА представлены на рисунках 5.7-5.12.

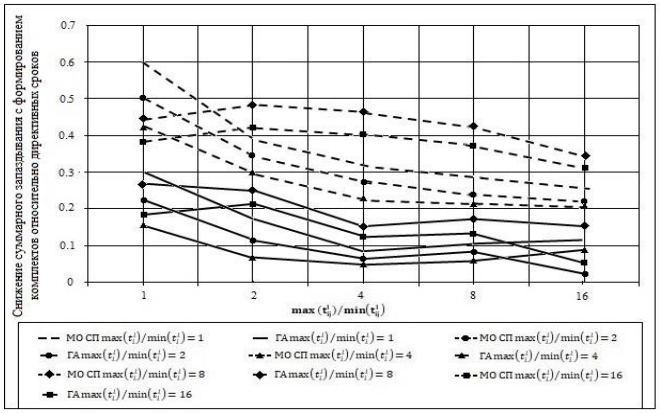


Рисунок 5.7 – Снижение суммарного запаздывания с формированием комплектов относительно директивных сроков (при $g^{ком} = 2$, $n_g^{ком} = 2$, $max(w_{ig}) / min(w_{ig}) = 1$)

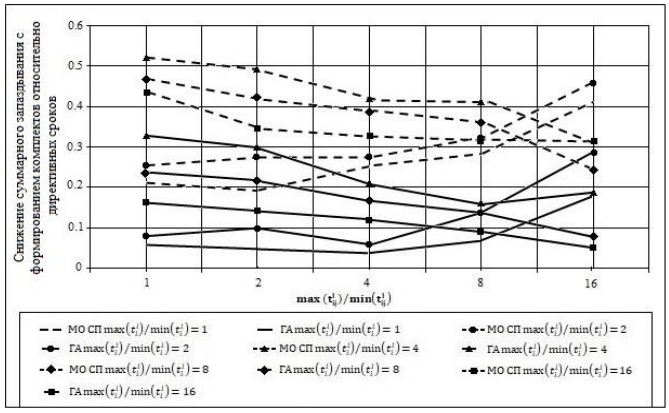


Рисунок 5.8 – Снижение суммарного запаздывания с формированием комплектов относительно директивных сроков (при $g^{ком} = 2$, $n_g^{ком} = 2$, $max(w_{ig}) / min(w_{ig}) = 2$)

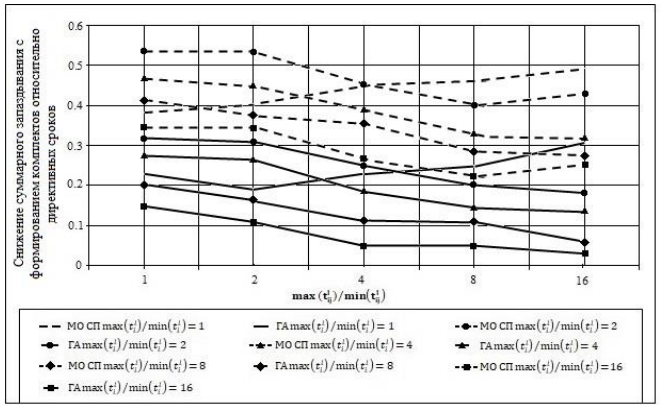


Рисунок 5.9 – Снижение суммарного запаздывания с формированием комплектов относительно директивных сроков (при $g^{ком} = 2$, $n_g^{ком} = 2$, $max(w_{ig}) / min(w_{ig}) = 3$)

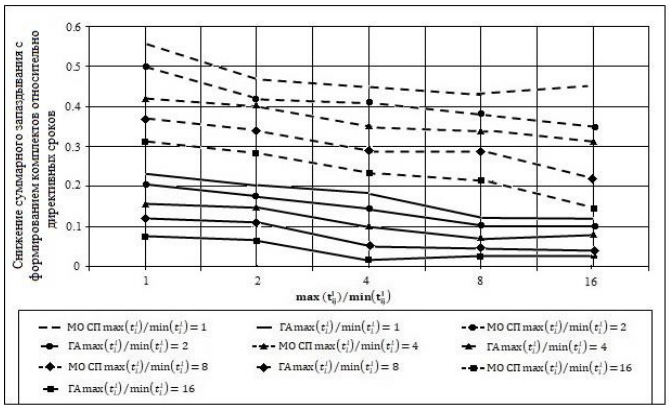


Рисунок 5.10 – Снижение суммарного запаздывания с формированием комплектов относительно директивных сроков (при $g^{ком} = 2$, $n_g^{ком} = 4$, $max(w_{ig}) / min(w_{ig}) = 1$)

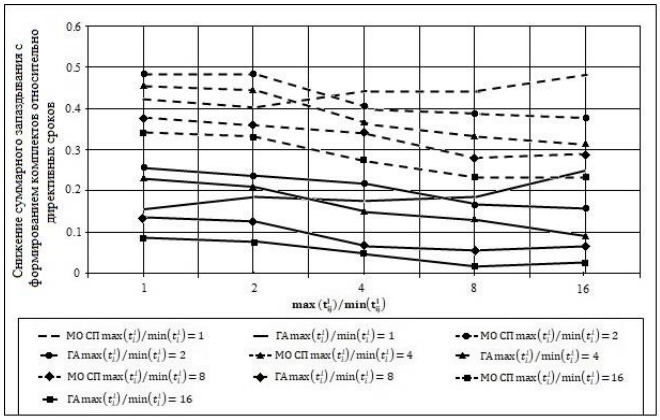


Рисунок 5.11— Снижение суммарного запаздывания с формированием комплектов относительно директивных сроков (при $g^{ком} = 2$, $n_g^{ком} = 4$, $max(w_{ig}) / min(w_{ig}) = 2$)

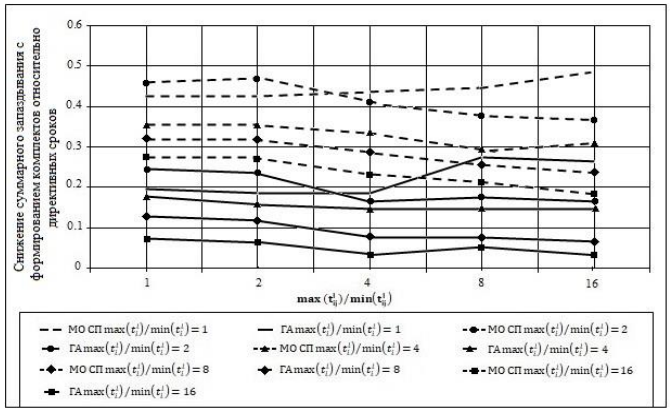


Рисунок 5.12– Снижение суммарного запаздывания с формированием комплектов относительно директивных сроков (при $g^{ком} = 2$, $n_g^{ком} = 4$, $max(w_{ig}) / min(w_{ig}) = 3$)

Анализ результатов исследований при значениях (*n=5, L=10*), (*n=10, L=5*), (*n=10, L=10*) позволил обобщить значения максимального снижения суммарного запаздывания с формированием комплектов относительно заданных для них директивных сроков в виде Таблицы 5.2.

Таблица 5.2 – Максимальное снижение значений суммарного запаздывания с формированием комплектов относительно заданных для них директивных сроков

N, L	$l = \overline{1,L}$					
	1		2		3	
	МО СП	ГА	МО СП	ГА	МО СП	ГА
	$j = \overline{1, q_l - 1}$					
n=5, L=5	0,6	0,36	0,52	0,32	0,52	0,32
n=5, L=10	0,52	0,28	0,48	0,24	0,5	0,25
n=10, L=5	0,38	0,2	0,36	0,16	0,34	0,18
n=10, L=10	0,30	0,16	0,28	0,14	0,32	0,14
	$l \neq \hat{l}$					
n=5, L=5	0,55	0,27	0,48	0,25	0,45	0,25
n=5, L=10	0,45	0,2	0,42	0,17	0,42	0,15
n=10, L=5	0,37	0,16	0,37	0,14	0,36	0,12
n=10, L=10	0,33	0,14	0,32	0,1	0,3	0,1

Анализ результатов исследований показал, что использование рассмотренного метода оптимизации составов ПЗ позволяет снизить суммарное запаздывание с формированием комплектов относительно заданных для них директивных сроков в среднем на 40% по сравнению с фиксированными пакетами. Сравнение значений суммарного запаздывания с формированием комплектов, полученных для решений по составам ПЗ, построенных с использованием рассмотренного метода и ГА, показало, что использование метода позволяет формировать решения, значения $f_{эмосп}$ для которых на 10-30% выше, чем для решений, сформированных с использованием ГА.

Применение метода определения составов пакетов при решении задачи построения расписаний выполнения заданий с учетом формирования комплектов в директивные сроки позволяет в среднем на 40% снизить суммарное запаздывание по сравнению с фиксированными пакетами. Результаты исследований по синтезу метода оптимизации составов ПЗ при построении расписаний их выполнения в КС при формировании комплектов представлены в [136, 137].

Выводы по Главе 5

По содержанию главы 5 могут быть сформулированы следующие выводы:

– задача построения расписаний многостадийных процессов выполнения ПЗ с учетом формирования комплектов из результатов предполагает решение подзадач: оптимизации со-

ставов ПЗ; оптимизации расписаний выполнения ПЗ в КС, распределения результатов выполнения ПЗ по комплектам указанных составов;

– существующие методы решения задачи построения расписаний процессов выполнения ПЗ в КС не учитывают необходимость формирования комплектов из результатов;

– на основе предложенного метода математического моделирования процессов выполнения ПЗ в КС синтезированы математические модели процессов выполнения заданий, включенных в пакеты, в КС, учитывающие требования оперативного формирования комплектов и формирования комплектов в указанные для них директивные сроки;

– предложены модели иерархических игр оптимизации составов ПЗ и расписаний их выполнения, сформированные с учетом условий: оперативного формирования комплектов из результатов и формирования комплектов в соответствии с директивными сроками;

– для решения задачи построения расписаний выполнения ПЗ в КС при формировании комплектов результатов использован метод, предусматривающий представление обобщенной задачи в виде совокупности иерархически упорядоченных взаимодействующих подзадач, для каждой из которых на соответствующем ей уровне определяется локально оптимальное решение;

– для решения задачи распределения результатов, полученных при выполнении заданий в составе пакетов, по комплектам указанных составов предложены методы упорядочивания идентификаторов типов комплектов и идентификаторов комплектов разных типов;

— предложены методы распределения результатов выполнения заданий в КС по комплектам указанных составов и определения моментов времени окончания их формирования;

– с целью построения расписаний выполнения ПЗ предложен метод определения порядка реализации действий с ними на приборах КС;

– применение метода построения расписаний выполнения ПЗ в КС позволяет на 30-40% снизить среднюю длительность формирования комплектов и суммарное запаздывание с формированием комплектов относительно директивных сроков по сравнению с фиксированными пакетами.

ГЛАВА 6. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЫПОЛНЕНИЯ ПАКЕТОВ ЗАДАНИЙ В КОНВЕЙЕРНЫХ СИСТЕМАХ ПРИ ОГРАНИЧЕНИИ НА ВРЕМЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ, МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВОВ ГРУПП ПАКЕТОВ ЗАДАНИЙ И РАСПИСАНИЙ ВЫПОЛНЕНИЯ ПАКЕТОВ ЗАДАНИЙ ИЗ ГРУПП

6.1. Математическое моделирование процессов выполнения пакетов заданий в конвейерных системах при ограничении на время функционирования. Модель иерархической игры оптимизации составов пакетов заданий, групп пакетов заданий и расписаний выполнения пакетов заданий, входящих в группы, в конвейерных системах

Развитием иерархического подхода к построению расписаний выполнения ПЗ, который предполагает формирование решений по их составам и расписаниям выполнения в КС, является решение задачи построения расписаний выполнения ПЗ при ограничении на длительности интервалов времени функционирования систем. В этом случае выполнение ПЗ в КС реализуется в течение интервалов времени заданной длительности. Ограниченным ресурсом, выделение которого должно быть оптимизировано, является время функционирования КС, а составы пакетов и расписания их выполнения должны быть сформированы так, чтобы выделяемый ресурс времени функционирования системы был использован в максимальной степени (общее время простоев приборов КС в течение этих временных интервалов являлось минимальным).

Для выполнения ПЗ требуется сформировать их непересекающиеся множества, с каждым из которых реализуются действия на приборах системы в течение заданных временных интервалов. Тогда для решения задачи построения расписаний выполнения ПЗ в КС требуется выполнить: формирование решений по составам ПЗ; распределение пакетов по их непересекающимся множествам, каждое из которых соответствует одному из интервалов времени задаваемой длительности; определение расписаний выполнения ПЗ в КС, входящих в каждое из этих множеств. Для введенных в рассмотрение непересекающихся множеств ПЗ, выполняемых в течение ограниченных временных интервалов, определено понятие группы пакетов. Таким образом, группа ПЗ – это множество пакетов, выполняемых в течение ограниченного временного интервала. При наличии неоднородностей длительностей выполнения заданий, неоднородностей длительностей переналадок приборов КС на выполнение заданий возникает задача оптимизации составов ПЗ, составов групп ПЗ и расписаний выполнения ПЗ из групп в КС. Это позволит увеличить количество заданий, выполненных в течение этих интервалов, а также снизить общие простои приборов при выполнении ПЗ в группах.

Методы оптимизации составов ПЗ, составов групп ПЗ и расписаний выполнения ПЗ из групп в КС позволяют решать задачи планирования сменно-суточных заданий на обработку передаточных партий деталей в мелкосерийном производстве. В частности, задачи формирования сменно-суточных заданий на восстановление поверхностей цилиндрических деталей узлов и агрегатов технологического и транспортного оборудования в составе передаточных партий (Приложение 3). Также они позволяют решать задачи планирования обработки данных в конвейерных системах в ситуации, когда вычислительные мощности арендуются на ограниченное время (ограниченные временные интервалы) (Приложение 2,.3). В связи с этим разработка метода оптимизации составов групп ПЗ, выполняемых в течение временных интервалов функционирования системы ограниченной длительности, является актуальной.

В соответствии с реализованной декомпозицией общей цели системы построения расписаний определены иерархически взаимосвязанные подфункции (подцели), каждая из которых выполняется на соответствующем уровне. Реализация этих подцелей предполагает определение решений по: составам ПЗ (первый уровень); составам групп ПЗ, выполняемых в течение временных интервалов ограниченной длительности (второй уровень); порядкам выполнения ПЗ, включенных в группы, на приборах КС (третий уровень). При этом в иерархической системе предусмотрен определенный порядок формирования решений, а также обмен решениями между уровнями: решение с вышестоящего уровня передается на нижестоящий для того, чтобы оно было использовано для формирования решения на этом уровне; решение с нижестоящего уровня передается на вышестоящий для оценки оптимальности решения на этом уровне.

С целью моделирования иерархических систем с определенным порядком принятия решений применена теория иерархических игр [89-99]. В этом случае игрок первого уровня (ведущий игрок) реализует формирование решений по составам ПЗ, игрок второго уровня – по составам групп ПЗ; игрок третьего уровня– по расписаниям выполнения ПЗ, входящих в группы, в КС. Порядок взаимодействия игроков следующий:

1) первый ход делает ведущий игрок, определяя составы ПЗ, и передает решение на нижестоящий (второй) уровень;

2) второй ход делает игрок второго уровня, формируя для решения по составам ПЗ решение по составам групп ПЗ, и передает это решение на третий уровень;

3) третий ход делает игрок третьего уровня, формируя расписания выполнения ПЗ, входящих в группы, и передает его на второй уровень для оценки оптимальности решения по составам групп;

4) для решения по составам ПЗ, сформированного ведущим игроком, второй игрок определяет локально оптимальное решение по распределению пакетов по группам, после чего это решение передается первому игроку для оценки оптимальности решения по составам пакетов;

5) игрок первого уровня формирует новое решение по составам ПЗ, передает его игроку второго уровня; оптимизация решений по составам ПЗ на первом уровне реализуется с учетом решений по распределению пакетов по группам, получаемых со второго уровня;

6) действия пунктов 1-5 продолжаются до тех пор, пока не будут получены оптимальные решения по составам ПЗ, по составам групп ПЗ, по порядкам выполнения ПЗ на приборах КС, то есть до тех пор, пока не будет достигнута ситуация равновесия в игре трех лиц.

Стратегии поведения игроков вышестоящих уровней по отношению к игрокам нижестоящих уровней основываются на применении ими принципа оптимизма, предусматривающего ожидание от игрока нижестоящего уровня решений, которые обеспечат максимизацию выигрыша игрока на вышестоящем уровне. Стратегии поведения игроков нижестоящих уровней по отношению к игрокам вышестоящих уровней состоят в выборе решений, которые обеспечат реализацию принципа благожелательности (игрок нижестоящего уровня формирует решения, которые обеспечат достижение цели на вышестоящем уровне в максимальной степени).

Выполнение ПЗ реализуется в течение ограниченных интервалов времени, для которых введены обозначения: t^z – интервал времени, в течение которого реализуется выполнение ПЗ ($z = \overline{1,Z}$). Так как интервалы времени функционирования системы t^z ($z = \overline{1,Z}$) ограничены, тогда не все сформированные пакеты могут быть включены в состав групп.

Количество выполненных в течение интервалов t^z заданий зависит от составов сформированных пакетов, а также от распределения пакетов по группам. Составы групп пакетов является зависящим от составов пакетов. Решения по порядкам выполнения ПЗ каждой из групп на приборах КС являются зависящими от составов пакетов в них. Определение составов ПЗ, распределение пакетов по группам, построение расписаний выполнения пакетов с учетом ограничения на длительность интервалов t^z должно обеспечить выполнение в течение этих интервалов максимального количества заданий (реализация внешней цели системы).

В силу того, что построение расписаний выполнения ПЗ в КС в течение ограниченных временных интервалов реализуется в составе иерархической системы оптимизации решений, то в моделях многостадийных процессов выполнения ПЗ должны быть учтены особенности иерархического способа решения задачи. В этом случае метод математического моделирования многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС предусматривает иерархическую (распределенную по уровням) организацию компонент моделей указанных процессов. Таким образом, метод математического моделирования процессов выполнения ПЗ в КС предусматривает организацию их (процессов) моделей в виде иерархически упорядоченных и взаимосвязанных компонент.

Для формирования компоненты модели, соответствующей составам ПЗ *i*-ых типов ($i=\overline{1,n}$), использованы обозначения: m_i – количество формируемых ПЗ *i*-х типов ($i=\overline{1,n}$), элементы m_i образуют вектор *M*; *A*– матрица, элементы a_{ih} которой – это количество заданий *i*-х типов в *h*-х пакетах ($h \le m_i$). Компонента модели верхнего уровня процесса, соответствующая составам ПЗ, имеет вид кортежа *[M, A]*. Для компоненты модели, соответствующей составам групп ПЗ, введены обозначения: N^z ($z=\overline{1,Z}$) – группа ПЗ, выполняемых в течение одного из интервалов t^z ($z=\overline{1,Z}$); m_i^z – количество ПЗ *i*-го типа в группе N^z; $(A)_i^z$ – вектор количества заданий *i*-го типа в m_i^z пакетах в группе N^z (размер вектора $\left\lfloor \frac{n^i}{2} \right\rfloor$). Включенным в группу N^z ПЗ *i*-го типа соответствует набор параметров вида: $[i, m_i^z, (A)_i^z]_k$, а группа N^z – это множество вида: $N^z = \{[i, m_i^z, (A)_i^z]_k, | k=\overline{1,k_z}\}^z$. Для ПЗ, не включенных в группы N^z, введено множество *Q*: $Q = \{[i, m_i^q, (A)_i^q]_k, | k=\overline{1,k_q}\}$, где m_i^q – количество ПЗ *i*-го типа, не включенных в группы N^z, вектор $(A)_i^q$ – составы пакетов. Тогда компонента модели, соответствующая составам групп ПЗ, имеет вид кортежа: $[\{N^z | (z=\overline{1,Z})\}, Q]$. Расписание выполнения ПЗ, включенных в группы N^z ($z=\overline{1,Z}$), формируется в предположении, что порядок реализации действий с ними является одинаковым на всех приборах КС. Для определения расписаний выполнения ПЗ, включенных в группы N^z ($z=\overline{1,Z}$), в рассмотрение введены: P^z – матрицы порядка выполнения ПЗ групп N^z ($z=\overline{1,Z}$) на приборах КС (размер $k_z \times n_p^z$, где k_z – количество типов заданий в группе N^z, n_p^z – количество ПЗ в последовательностях их выполнения для группы N^z), R^z – матрицы количества заданий *i*-ых типов в ПЗ, включенных в группы N^z ($z=\overline{1,Z}$) и занимающих в последовательностях их выполнения на приборах КС *j*-е позиции, матрицы $(T^{0l})^z$ моментов времени начала выполнения *q*-ых заданий в пакетах, включенных в группы N^z, занимающих *j*-е позиции в последовательностях π^l. Компонента модели процесса выполнения ПЗ в КС при ограничении на длительность интервалов времени их функционирования, соответствующая расписаниям их выполнения на приборах, имеет вид: $\{[P^z, R^z, \{(T^{0l})^z | l=\overline{1,L}\}] | z=\overline{1,Z}\}$. Тогда в математической модели многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС в течение временных интервалов ограниченной длительности заданы следующие ее иерархически упорядоченные компоненты: состав ПЗ в виде *[M,A]*, состав

групп ПЗ в виде $[\{ N^z \mid z = \overline{1,Z} \}, Q]$, расписания выполнения ПЗ из групп на приборах КС в виде $\{[P^z, R^z, \{(T^{0l})^z \mid l = \overline{1,L} \}] \mid z = \overline{1,Z} \}$.

Обозначим через $(m_i^z)_k$ значение параметра m_i^z в k-ом наборе $[i, m_i^z, (A)_i^z]_k \in N^z$, соответствующем составу ПЗ, включенных в группы N^z. Количество ПЗ i-ых типов, включенных в одну группу, будет определено выражением вида $\sum_{k=1}^{k} (m_i^z)_k$. Значения n_p^z – это количество ПЗ в последовательностях $\pi^l (l = \overline{1,L})$ их выполнения для каждой группы N^z, характеризующие размеры матриц P^z и R^z ($z = \overline{1,Z}$), определяются выражением $n_p^z = \sum_{k=1}^{k_z} (m_i^z)_k$. Обозначим как $[(a_h)_i^z]_k$ h-ый элемент вектора $(A)_i^z$, являющегося компонентой k-го кортежа $[i, m_i^z, (A)_i^z]_k$, соответствующего составам ПЗ i-го типа, включенным в группу N^z.

При построении модели процесса выполнения ПЗ, включенных в группы N^z ($z = \overline{1,Z}$) в КС, а также иерархической игры используются параметры, для которых введены обозначения:: $(t_{li})^z$ – длительность выполнения заданий i-го типа на l-ом приборе КС, пакет которых включен в группу N^z ($l = \overline{1,L}$, на основе значений $(t_{li})^z$ сформированы матрицы T^z ($z = \overline{1,Z}$) длительностей выполнения заданий на приборах КС, пакеты которых включены в группы N^z ($z = \overline{1,Z}$)); $(t_{ii'}^l)^z$ – длительность переналадки l-го прибора с выполнения заданий i-го типа на выполнение заданий i'-го типа, пакеты которых включены в группу N^z (на основе значений $(t_{ii'}^l)^z$ сформированы матрицы $(T^l)^z$ ($l = \overline{1,L}$, $z = \overline{1,Z}$) длительностей переналадок). Значения элементов $(t_{jq}^{0l})^z$ матриц $(T^{0l})^z$ ($q = \overline{1,n_j}$, n_j – количество заданий в пакете в j-ой позиции в π^l) моментов времени начала реализации действий с q-ми заданиями в пакетах, включенных в группы N^z и занимающих j-е позиции в π^l, определяются в соответствии с [120].

В соответствии с выполненной декомпозицией обобщенной функции системы на совокупность иерархически упорядоченных подфункций задача построения расписаний процессов выполнения ПЗ в группах решается с использованием теории иерархических игр. Следуя внешней цели функционирования системы, оценка оптимальности решений по составам ПЗ определяется количеством заданий в пакетах, включенных в группы. Для идентификации оптимальных решений по составам ПЗ на верхнем уровне необходим учет решений по составам групп пакетов (со второго уровня) [89-99]. В силу того, что задано ограничение на интервалы

времени функционирования КС, поэтому требуется эффективное использование ее временного ресурса. Тогда при формировании групп пакетов необходимо учитывать требование использования ограниченного ресурса времени функционирования КС в максимальной степени (внутренняя цель ее функционирования).

В соответствии с методами построения расписаний, рассмотренными в главах 4 и 5, определение порядков выполнения ПЗ в КС реализуется посредством построения частичных расписаний реализации действий с ПЗ на приборах, которые формируются путем добавления пакетов в последовательности π^l ($l = \overline{1,L}$) и определения их позиций в π^l.

В силу выполненных рассуждений математическая модель иерархической игры оптимизации решений по составам ПЗ, составам групп ПЗ и расписаниям выполнения ПЗ из групп в КС в принятых выше обозначениях имеет следующий вид [89-99]:

1) первые уровень:

$$f_1([M,A],[\{N^z \mid z = \overline{1,Z}\},Q]^*) \to min(max), \quad (6.1)$$

где $[M,A] \in N_1$;

2) второй уровень:

$$f_2([\{N^z \mid z = \overline{1,Z}\},Q],\{[P^z,R^z,\{(T^{0l})^z \mid l = \overline{1,L}\}] \mid z = \overline{1,Z}\}^*) \to min(max), \quad (6.2)$$

где $[\{N^z \mid z = \overline{1,Z}\},Q] \in N_2([M,A])$;

3) третий уровень:

$$f_3([\{N^z \mid z = \overline{1,Z}\},Q],\{[P^z,R^z,\{(T^{0l})^z \mid l = \overline{1,L}\}] \mid z = \overline{1,Z}\}) \to min(max), \quad (6.3)$$

где $\{[P^z,R^z,\{(T^{0l})^z \mid l = \overline{1,L}\}] \mid z = \overline{1,Z}\} \in N_3([\{N^z \mid z = \overline{1,Z}\},Q])$.

Критерии, используемые при оптимизации решений на уровнях игры, учитывают: 1) третий уровень– эффективность использования временного ресурса КС при размещении рассматриваемого пакета (добавляемого в расписание для соответствующей группы) в последовательностях π^l ($l = \overline{1,L}$) в формируемом частичном расписании; 2) второй уровень – общая эффективность использования ресурса времени КС при выполнении всех ПЗ группах N^z (анализ составов групп пакетов на основе расписания с точки зрения эффективности использования ограниченного ресурса); 3) первый уровень – количество заданий, выполненных в системе в течение интервалов времени функционирования КС ограниченной длительности.

В разделе 4 выполнен синтез критерия оптимальности расписаний выполнения ПЗ на нижнем уровне иерархической игры. С целью определения оптимальных расписаний выполнения ПЗ на приборах КС для каждой из групп N^z ($z = \overline{1,Z}$) сформированный в разделе 4 крите-

рий модифицирован с учетом введенных обозначений, учитывающих выполнение пакетов в группах. Полученный после модификации критерий имеет вид:

$$\left[\sum_{l=2}^{L}[t_{11}^{0l}]^z+\sum_{l=1}^{L}\sum_{j=2}^{n_p^z}\left[[t_{j1}^{0l}]^z-\left[[t_{j-1,n_{j-1}^z}^{0l}]^z+\sum_{h=1}^{k_z}[t_{lh}]^z\cdot p_{h,j-1}^z\right]\right]+\right.$$
$$\left.+\sum_{l=2}^{L}\sum_{j=1}^{n_p^z}\sum_{q=2}^{n_j^z}\left[[t_{jq}^{0l}]^z-\left[[t_{j,q-1}^{0l}]^z+\sum_{h=1}^{k_z}[t_{lh}]^z\cdot p_{hj}^z\right]\right]\right]. \qquad (6.4)$$

Первое слагаемое в (6.4) позволяет определить суммарные простои приборов КС перед началом выполнения заданий в пакете в первой позиции в π^l ($l=\overline{1,L}$). Второе слагаемое определяет простои приборов КС при переходе от выполнения ПЗ в *(j-1)*-ой позиции в π^l к выполнению ПЗ в *j*-ой позиции в π^l. Третье слагаемое определяет суммарные простои приборов, вызванные ожиданием готовности заданий при их выполнении внутри пакетов в группе N^z.

Критерий оптимальности составов групп ПЗ на втором уровне характеризует общую эффективность использования ресурса времени приборов КС при выполнении ПЗ каждой группы N^z (суммарные простои приборов при выполнении пакетов группы N^z в течение интервалов t^z ($z=\overline{1,Z}$)). Суммарные простои приборов при выполнении ПЗ группы N^z характеризуются: 1) суммой длительностей интервалов наладки приборов и возможных их простоев в ожидании начала выполнения заданий в пакете в первой позиции в π^l; 2) суммой длительностей: переналадок приборов КС с выполнения заданий одного типа на выполнение заданий другого типа, простоев приборов в ожидании начала выполнения первого задания в пакете в π^l ($l=\overline{1,L}$); 3) суммой длительностей простоев приборов в ожидании готовности заданий к выполнению внутри пакетов; 4) суммой интервалов времени простоев L приборов после окончания выполнения пакетов в группе N^z в количестве n_p^z (от моментов времени окончания выполнения последнего пакета в последовательностях π^l ($l=\overline{1,L}$) до момента времени t^z). Первые три указанные компоненты определяются соответствующими им слагаемыми в выражении (6.4). Для определения последней из компонент суммарных простоев приборов КС использованы обозначения: n_p^z–количество пакетов, входящих в группу N^z (номер последнего пакета в π^l); $n_{n_p^z}$ – количество заданий, входящих в последний в π^l пакет, $[t_{n_p^z,n_{n_p^z}}^{0l}]^z$ – моменты времени начала выполнения последнего задания в последнем пакете в π^l ($l=\overline{1,L}$). Время окончания выполнения этого пакета на *l*-ых приборах определяется выражением вида:

$[t^{0l}_{n_p^z,n_{n_p^z}}]^z + \sum_{h=1}^{k_z}[t_h^l]^z \cdot p^z_{h,n_p^z}$. Простои l-го прибора после окончания выполнения ПЗ группы N^z определяются выражением вида $[t^{0l}_{n_p^z,n_{n_p^z}}]^z + \sum_{h=1}^{k_z}[t_h^l]^z \cdot p^z_{h,n_p^z}$, а общие простои всех приборов после окончания выполнения пакетов группы N^z вычисляются выражением вида:

$$\sum_{l=1}^{L}\left[t^z - \left[[t^{0l}_{n_p^z,n_{n_p^z}}]^z + \sum_{h=1}^{k_z}[t_h^l]^z \cdot p^z_{h,n_p^z}\right]\right]. \qquad (6.5)$$

С учетом (6.4)-(6.5) выражение для определения суммарных простоев приборов КС при выполнении ПЗ одной из групп имеет вид:

$$\begin{aligned}&\left[\sum_{l=2}^{L}[t^{0l}_{11}]^z + \sum_{l=1}^{L}\sum_{j=2}^{n_p^z}\left[[t^{0l}_{j1}]^z - \left[[t^{0l}_{j-1,n_{j-1}}]^z + \sum_{h=1}^{k_z}[t_{lh}]^z \cdot p^z_{h,j-1}\right]\right]\right] + \\ &+ \sum_{l=2}^{L}\sum_{j=1}^{n_p^z}\sum_{q=2}^{n_j^z}\left[[t^{0l}_{jq}]^z - \left[(t^{0l}_{j,q-1})^z + \sum_{h=1}^{k_z}[t_{lh}]^z \cdot p^z_{hj}\right]\right] + \\ &+ \sum_{l=1}^{L}\left[t^z - \left[[t^{0l}_{n_p^z,n_{n_p^z}}]^z + \sum_{h=1}^{k_z}[t_{lh}]^z \cdot p^z_{h,n_p^z}\right]\right]\Bigg].\end{aligned} \qquad (6.6)$$

Через $(m_i^z)_k$ обозначен параметр m_i^z в k-ом наборе $[i,m_i^z,(A)_i^z]_k \in N^z$, соответствующем составам ПЗ, включенным в группу N^z, через $[(a_h)_i^z]_k$ h-ый элемент вектора $(A)_i^z$, являющегося компонентой k-го кортежа $[i,m_i^z,(A)_i^z]_k$, соответствующего составам ПЗ i-го типа в группе N^z. Количество заданий i-го типа, выполняемых в составе пакетов, включенных в группу N^z, определяется следующим образом: $\sum_{h=1}^{(m_i^z)_k}[(a_h)_i^z]_k$. Количество заданий, выполненных в составе пакетов, включенных в одну группу N^z, определяется выражением: $\sum_{k=1}^{k_z}\sum_{h=1}^{(m_i^z)_k}[(a_h)_i^z]_k$. Количество заданий, выполненных в пакетах, включенных в группы N^z, определяется выражением: $\sum_{z=1}^{Z}\sum_{k=1}^{k_z}\sum_{h=1}^{(m_i^z)_k}[(a_h)_i^z]_k$. Количество заданий, которые требуется

выполнить в КС, определяется выражением: $\sum_{i=1}^{n} n^i$. В качестве критерия оптимальности решений по составам ПЗ на первом уровне игры использовано количество невыполненных заданий:

$$\sum_{i=1}^{n} n^i - \sum_{z=1}^{Z} \sum_{k=1}^{k_z} \sum_{h=1}^{(m_i^z)_k} [(a_h)_i^z]_k . \qquad (6.7)$$

Тогда модель иерархической игры для определения локально оптимальных решений по составам ПЗ, составам групп ПЗ, расписаниям выполнения ПЗ из групп в КС имеет вид:

- первый уровень иерархической игры (определение составов ПЗ):

$$\min f_1, \text{ где } \quad f_1 = \sum_{i=1}^{n} n^i - \sum_{z=1}^{Z} \sum_{k=1}^{k_z} \sum_{h=1}^{[m_i^z]_k} [(a_h)_i^z]_k ; \qquad (6.8)$$

– второй уровень иерархической игры (определение составов групп пакетов N^z):

$$\min f_2 \text{ , где}$$

$$f_2 = \sum_{z=1}^{Z} \left[\sum_{l=2}^{L} [t_{11}^{0l}]^z + \sum_{l=1}^{L} \sum_{j=2}^{n_p^z} \left[[t_{j1}^{0l}]^z - \left[[t_{j-1,n_{j-1}}^{0l}]^z + \sum_{h=1}^{k_z} [t_{lh}]^z \cdot p_{h,j-1}^z \right] \right] + \right.$$

$$+ \sum_{l=2}^{L} \sum_{j=1}^{n_p^z} \sum_{q=2}^{n_j^z} \left[[t_{jq}^{0l}]^z - \left[(t_{j,q-1}^{0l})^z + \sum_{h=1}^{k_z} [t_{lh}]^z \cdot p_{hj}^z \right] \right] + \qquad (6.9)$$

$$\left. + \sum_{l=1}^{L} \left[t^z - \left[[t_{n_p^z, n_{n_p^z}}^{0l}]^z + \sum_{h=1}^{k_z} [t_{lh}]^z \cdot p_{h,n_p^z}^z \right] \right] \right] ;$$

– третий уровень иерархической игры (расписания выполнения ПЗ в группах N^z):

$$\min f_3^z \, (z = \overline{1,Z}), \text{ где}$$

$$f_3^z = \left[\sum_{l=2}^{L} [t_{11}^{0l}]^z + \sum_{l=1}^{L} \sum_{j=2}^{n_p^z} \left[[t_{j1}^{0l}]^z - \left[[t_{j-1,n_{j-1}}^{0l}]^z + \sum_{h=1}^{k_z} [t_{lh}]^z \cdot p_{h,j-1}^z \right] \right] + \right.$$

$$\left. + \sum_{l=2}^{L} \sum_{j=1}^{n_p^z} \sum_{q=2}^{n_j^z} \left[[t_{jq}^{0l}]^z - \left[(t_{j,q-1}^{0l})^z + \sum_{h=1}^{k_z} [t_{lh}]^z \cdot p_{hj}^z \right] \right] \right] ; \qquad (6.10)$$

- ограничение на длительность реализации расписаний выполнения ПЗ в группе N^z:

$$\max_{l=1,L} \left[[t_{n_p^z, n_{n_p^z}}^{0l}]^z + \sum_{h=1}^{k_z} [t_h^l]^z \cdot p_{h,n_p^z}^z \right] \le t^z \text{ , при } z = \overline{1,Z} . \qquad (6.11)$$

В дополнение к введенным в рассмотрение критериям (6.8)-(6.10) и ограничению (6.11) введены ограничения для множеств решений $N_1, N_2([M,A]), N_3([\{N^z \mid (z=\overline{1,Z})\},Q])$:

– ограничение на количество ПЗ и количество заданий в пакетах:

$$\sum_{h=1}^{m_i} a_{ih} = n^i; \quad \sum_{i=1}^{n}\sum_{h=1}^{m_i} a_{ih} = \sum_{i=1}^{n} n^i; \tag{6.12}$$

– ограничение на количество заданий в пакетах, включенных в группы N^z и множество Q:

$$\sum_{z=1}^{Z}\sum_{k=1}^{k_z}\sum_{h=1}^{[m_i^z]_k} [(a_h)_i^z]_k + \sum_{k=1}^{k_q}\sum_{h=1}^{[m_i^q]_k} [(a_h)_i^q]_k = \sum_{i=1}^{n}\sum_{h=1}^{m_i} a_{ih}; \tag{6.13}$$

– ограничение на количество ПЗ i-го типа в последовательностях π^l $(l=\overline{1,L})$ на приборах КС:

$$\sum_{j=1}^{n_p^z} p_{ij}^z = m_i^z; \tag{6.14}$$

– ограничение на общее количество ПЗ в последовательностях π^l $(l=\overline{1,L})$, включенных в каждую из групп N^z $(z=\overline{1,Z})$, выполняемых на приборах КС:

$$\sum_{k=1}^{k_z}\sum_{j=1}^{n_p^z} p_{kj}^z = \sum_{k=1}^{k_z} [m_i^z]_k; \tag{6.15}$$

– ограничение на количество заданий в пакетах в последовательностях π^l $(l=\overline{1,L})$, включенных в каждую из групп N^z $(z=\overline{1,Z})$, выполняемых на приборах:

$$\sum_{k=1}^{k_z}\sum_{j=1}^{n_p^z} r_{kj}^z = \sum_{k=1}^{k_z}\sum_{h=1}^{[m_i^z]_k} [(a_h)_i^z]_k. \tag{6.16}$$

Математическая модель иерархической игры (6.8)-(6.16) используется для определения решений по расписаниям выполнения ПЗ в КС с учетом ограничения на время ее функционирования, состоящих из решений на трех уровнях: первый уровень – по составам ПЗ, второй уровень – по составам групп ПЗ, выполняемых в течение заданных интервалов времени функционирования КС, третий уровень –расписаниям выполнения в КС ПЗ каждой из групп.

На основе модели (6.8)-(6.16) взаимодействие игроков первого и второго уровней реализуется следующим образом: первый игрок формирует решение $[M,A] \in N_1$, которое передается на второй уровень. В соответствии с ним выбирается решение $[\{N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q]^* =$

$$= arg \min_{[\{N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q] \in N_2([M,A])} f_2([\{N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q],\{[P^z,R^z,\{(T^{0l})^z \mid l=\overline{1,L}\}] \mid z=\overline{1,Z}\}^*).$$

Ответом ведомого игрока является сформированное решение $[\{N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q]^*$, выбранное в $N_2([M,A])$. Определение составов ПЗ реализуется путем решения задачи оптимизации на первом уровне $\max\limits_{[M,A]_S \in N_1} f_1([M,A],[\{N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q]^*)$, то есть $[M,A]^* = arg \max\limits_{[M,A]\in N_1} f_1([M,A],[\{N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q]^*)$. Решения $[M,A]^*$ и $[\{N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q]^*$ (где $[\{N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q]^* \in N_2([M,A])^*$) соответствует ситуации равновесия при взаимодействии игроков первого и второго уровней (решения, формирующие ситуацию равновесия, являются решениями игры для первых двух уровней). Аналогичным образом строятся рассуждения для второго и третьего уровней. Решением иерархической игры являются: решение $[M,A]^*$ по составам ПЗ, решение $[\{N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q]^*$ по составам групп, обеспечивающее $[M,A]^* = arg \max\limits_{[M,A]\in N_1} f_1([M,A],[\{N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q]^*)$, решение $\{[P^z,R^z,\{(T^{0l})^z \mid l=\overline{1,L}\}] \mid z=\overline{1,Z}\}^*$ по порядкам выполнения ПЗ на приборах КС, обеспечивающее $[\{N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q]^* = arg \min\limits_{[\{N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q]\in N_2([M,A])} f_1([\{N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q],\{[P^z,R^z,\{(T^{0l})^z \mid l=\overline{1,L}\}] \mid z=\overline{1,Z}\}^*)$.

Результаты исследований по синтезу математической модели многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС при ограничении на длительности интервалов времени их функционирования и модели иерархической игры построения расписаний выполнения ПЗ представлены в [138, 139].

6.2. Метод оптимизации составов групп пакетов заданий, выполняемых в течение заданных интервалов времени функционирования конвейерной системы

Решение рассматриваемой задачи оптимизации составов групп ПЗ N^z ($z=\overline{1,Z}$) предполагает задание интервалов времени t^z ($z=\overline{1,Z}$) функционирования системы для выполнения заданий. На втором уровне иерархии системы построения расписаний реализуется формирование решений по составам групп ПЗ, выполняемых в течение интервалов t^z ($z=\overline{1,Z}$). В соответствии с введенными обозначениями решение, формируемое на втором уровне, имеет вид кортежа $[\{N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q]$ параметров вида: $N^z = \{[i,m_i^z,(A)_i^z]_k, \mid k=\overline{1,k_z}\}^z$ ($z=\overline{1,Z}$) и $Q = \{[i,m_i^q,(A)_i^q]_k, \mid k=\overline{1,k_q}\}$. Метод построения локально оптимальных решений по составам групп N^z ($z=\overline{1,Z}$) предполагает реализацию двух этапов: 1) формирование начальных со-

ставов групп N^z; 2) переход к локально оптимальному решению $[\{ N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q]*$. Формирование начального решения по составам групп N^z предполагает распределение ПЗ, полученных в решении *[M,A]*, по множествам $N^z=\{[i,m_i^z,(A)_i^z]_k, \mid k=\overline{1,k_z}\}^z$ $(z=\overline{1,Z})$ и множеству Q с учетом ограничения на интервалы t^z.

В алгоритме построения начального решения $[\{ N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q]$ использованы следующие обозначения: 1) i' – тип заданий, пакет которых размещается в группах N^z; 2) $m_{i'}$ – i'-ый элемент вектора *M*, соответствующий количеству заданий i'-го типа в пакете, размещаемом в группах N^z $(z=\overline{1,Z})$ и в множестве *Q*; 3) z' – индекс текущей рассматриваемой группы, в которую добавляется пакет i'-го типа; 4) $h^{i'}$ – номер ПЗ i'-го типа, размещаемого в группе $N^{z'}$, число заданий в котором соответствует значению элемента $a_{i'h^i}$ матрицы *A*; 5) I_1^z, I_2^z – множества типов заданий, пакеты которых размещаются в группах N^z $(z=\overline{1,Z})$; 6) NZ, NZ_T – множества номеров групп N^z, в которых пакеты могут быть размещены.

Условие (6.11) включения пакета в группу учитывает возможность выполнения добавленных в π^l $(l=\overline{1,L})$ пакетов в течение заданных интервалов t^z $(z=\overline{1,Z})$. Сформированное на основе (6.11) условие исключения группы из дальнейшего рассмотрения в процессе формирования начального решения имеет вид (интервал t^z полностью заполнен выполнением ПЗ):

$$t^z - \underset{l=1,L}{max}\left[[t^{0l}_{n_p^z,n_{n_p^z}}]^z + \sum_{h=1}^{k_z} [t_h^l]^z \cdot p^z_{h,n_p^z} \right] = 0 \ . \qquad (6.17)$$

Начальная инициализация исходных данных для алгоритма формирования начальных составов групп ПЗ выполнена следующим образом: 1) $i=1$; 2) $k_z=0$ $(z=\overline{1,Z})$; $k_q=0$; 3): $N^z=\varnothing$ $(z=\overline{1,Z})$; $Q=\varnothing$ (кортежи $[i,m_i^z,(A)_i^z]$ и $[i',m_{i'}^q,(A)_{i'}^q]$ будут добавляться в состав множеств); 4) $I_1^z=\{1,2,..,n\}$; 5) $I_2^z=I_1^z$; 6) $NZ=\{1,2,..,Z\}$); 7) $h^i=1$ $(i=\overline{1,n})$ (для каждого *i*-го типа заданий установлен идентификатор пакета, размещаемого в группах N^z $(z=\overline{1,Z})$). Синтезированный алгоритм построения начального решения по составам групп N^z $(z=\overline{1,Z})$ реализует последовательное включение в их состав ПЗ разных типов. Алгоритм формирования начального решения $[\{ N^z \mid (z=\overline{1,Z})\},Q]$ содержит следующие шаги:

1) инициализировать множество NZ_T номеров групп, в которых на данной итерации алгоритма будут размещаться пакеты: $NZ_T = NZ$;

2) инициализировать номер текущей рассматриваемой группы N^z, в которой будут размещаться ПЗ: $z' = min\{ z \mid z \in NZ_T \}$, $NZ_T = NZ_T \setminus \{ z' \}$;

3) определить тип заданий i', пакет которых будет размещаться в группах N^z ($z \in NZ_T$): $i' = min\{ i \mid i \in I_2^z \}$, $I_2^z = I_2^z \setminus \{ i' \}$;

4) для i'-го типа заданий и группы $N^{z'}$ выполнить проверку условия $[i', m_{i'}^{z'}, (A)_{i'}^{z'}] \in N^{z'}$; если $[i', m_{i'}^{z'}, (A)_{i'}^{z'}] \in N^{z'}$, то перейти на пункт 6;

5) если для i'-го типа заданий и группы $N^{z'}$ выполняется условие $[i', m_{i'}^{z'}, (A)_{i'}^{z'}] \notin N^{z'}$, то сформировать набор параметров $[i', m_{i'}^{z'}, (A)_{i'}^{z'}]$, инициализировать значение $m_{i'}^{z'} = 0$, включить набор параметров $[i, m_{i'}^{z'}, (A)_{i'}^{z'}]$ в множество $N^{z'}$, соответствующее решению по составу группы $N^{z'}$: $k_{z'} = k_{z'} + 1$; $k = k_{z'}$, $N^{z'} = N^{z'} \cup \{[i', m_{i'}^{z'}, (A)_{i'}^{z'}]_k \}$;

6) инициализировать значения параметров набора $[i', m_{i'}^{z'}, (A)_{i'}^{z'}]_k \in N^{z'}$: $m_{i'}^{z'} = m_{i'}^{z'} + 1$; $(a_{m_{i'}^{z'}})_{i'}^{z'} = a_{i'h^{i'}}$, используя полученное с первого уровня решение *[M,A]*;

7) передать сформированное решение по составу группы $N^{z'}$ (множество кортежей $N^{z'} = \{[i, m_i^{z'}, (A)_i^{z'}]_k \mid k = \overline{1,k_{z'}} \}$) на третий уровень для формирования соответствующего ему расписания выполнения ПЗ в КС: $[P^{z'}, R^{z'}, \{(T^{0l})^{z'} \mid (l = \overline{1,L})\}^* \in N_3([\{N^z \mid (z = \overline{1,Z})\}, Q])$;

8) получить с третьего уровня иерархии расписание $[P^{z'}, R^{z'}, \{(T^{0l})^{z'} \mid (l = \overline{1,L})]^*$; проверить для расписания $[P^{z'}, R^{z'}, \{(T^{0l})^{z'} \mid (l = \overline{1,L})]^*$ выполнение ограничения (6.11); если ограничение (6.11) выполняется, то $h^{i'} = h^{i'} + 1$, перейти на пункт 9; если ограничение (6.11) не выполняется, то перейти на пункт 11 (для исключения ПЗ i'-го типа из группы $N^{z'}$);

9) проверить для сформированного решения по составу группы $N^{z'}$ выполнение условия (6.17); если ограничение (6.11) выполняется, условие вида (6.17) не выполняется, то перейти на пункт 10; если условие (6.17) выполняется (автоматически выполнено условие (6.11)), то $NZ = NZ \setminus \{ z' \}$ (группа с индексом z' исключается из рассмотрения);

10) проверить условие $h^{i'} > m_{i'}$; если $h^{i'} > m_{i'}$, то $I_1^z = I_1^z \setminus \{ i' \}$ (все ПЗ i'-го типа размещены в группах N^z ($z \in NZ$) и множестве Q, из I_1^z исключается i'-ый тип заданий:

$I_1^z = I_1^z \setminus \{ i' \}$), перейти на пункт 18; если выполняется условие $h^{i'} \le m_{i'}$, то перейти на пункт 18;

11) модифицировать сформированное решение по составу группы ПЗ $N^{z'}$ следующим образом: $(a_{m_{i'}^{z'}})_{i'}^{z'} = 0$; $m_{i'}^{z'} = m_{i'}^{z'} - 1$ (рассматриваемый ПЗ i'-го типа с количеством элементов в нем $a_{i'h^{i'}}$ исключается из группы $N^{z'}$, так как он не может быть в ней размещен);

12) если $m_{i'}^{z'} = 0$, то $N^{z'} = N^{z'} \setminus \{ [i', m_{i'}^{z'}, (A)_{i'}^{z'}]_k \}$, $k_{z'} = k_{z'} - 1$ (из группы $N^{z'}$ исключается набор $[i', m_{i'}^{z'}, (A)_{i'}^{z'}]_k$);

13) если $NZ_T \neq \varnothing$, то определить номер группы $N^{z'}$, в которую может быть включен ПЗ рассматриваемого i'-го типа: $z' = min\{ z \in NZ_T \}$, модифицировать множество NZ_T : $NZ_T = NZ_T \setminus \{ z' \}$, перейти на пункт 4;

14) если $NZ_T = \varnothing$ (рассматриваемый ПЗ i'-го типа (с количеством заданий в нем $a_{i'h^{i'}}$) ни в одну из групп N^z ($z \in NZ$) размещен быть не может), то проверить условие $[i', m_{i'}^q, (A)_{i'}^q] \in Q$ для соответствующего i'-го типа заданий;

15) если $[i', m_{i'}^q, (A)_{i'}^q] \in Q$ для i'-го типа заданий (кортеж параметров $[i', m_{i'}^q, (A)_{i'}^q]$ сформирован на предыдущих итерациях алгоритма), то инициализировать параметры i', $m_{i'}^q$, $(A)_{i'}^q$ значениями, соответствующими рассматриваемому пакету: $m_{i'}^q = m_{i'}^q + 1$, $(a_{m_{i'}^q})_{i'} = a_{i'h^{i'}}$; модифицировать номер ПЗ i'-го типа $h^{i'}$: $h^{i'} = h^{i'} + 1$; перейти на пункт 17;

16) если $[i', m_{i'}^q, (A)_{i'}^q] \notin Q$, то сформировать кортеж параметров вида $[i', m_{i'}^q, (A)_{i'}^q]$: $k_q = k_q + 1$; $k = k_q$; инициализировать значения параметров, входящих в набор: $m_{i'}^q = 1$, $(a_{m_{i'}^q})_{i'} = a_{i'h^{i'}}$; включить сформированный кортеж в множество Q: $Q = Q \cup \{ [i, m_i^q, (A)_i^q]_k \}$; модифицировать номер рассматриваемого ПЗ i'-го типа $h^{i'}$: $h^{i'} = h^{i'} + 1$;

17) проверить выполнение условия $h^{i'} > m_{i'}$; если $h^{i'} > m_{i'}$ (все ПЗ i'-го типа размещены в группах N^z ($z \in NZ$) и множестве Q), то модифицировать множество типов заданий I_1^z: $I_1^z = I_1^z \setminus \{ i' \}$; перейти на пункт 18;

18) если $I_2^z \neq \varnothing$, то инициализировать множество NZ_T идентификаторов групп, в которых могут быть размещены пакеты: $NZ_T = NZ$, перейти на пункт 3;

19) если $I_2^z = \varnothing$ (по одному ПЗ каждого *i*-го типа ($i \in I_1^z$) размещено в группах N^z ($z \in NZ$) и множестве *Q*), то проверить условие $I_1^z \neq \varnothing$ (имеются типы заданий, пакеты которых не размещены в группах N^z ($z \in NZ$)); если $I_1^z \neq \varnothing$, то инициализировать множества I_2^z и NZ_T: $I_2^z = I_1^z$, $NZ_T = NZ$; перейти на пункт 3; если $I_1^z = \varnothing$, то перейти на пункт 20;

20) останов алгоритма.

Формирование локально оптимальных решений $[\{ N^z | (z = \overline{1,Z})\}, Q]^*$ предполагает определение такого состава групп, при котором суммарные простои приборов КС при выполнении ПЗ в них будет минимальными. Тогда поиск локально оптимального решения по составам групп пакетов N^z ($z = \overline{1,Z}$) связан с: 1) определением ПЗ в группах, выполнение которых вызывает значительные простои приборов; 2) исключением определенных таким образом пакетов из групп N^z ($z = \overline{1,Z}$) и размещением в них ПЗ других типов, не вошедших в группы N^z (с учетом (6.11)). Исключение из каждой группы N^z ($z = \overline{1,Z}$) ПЗ *i*-го типа, выполнение которого в КС обуславливает значительные простои приборов, замещение его ПЗ другого *i'*-го типа ($i' \neq i$), не вошедшим в состав групп N^z в решении $[\{ N^z | (z = \overline{1,Z})\}, Q]^*$, позволяет построить новое решение $[\{ N^z | (z = \overline{1,Z})\}, Q]$ по их составам. В результате для решения $[\{ N^z | (z = \overline{1,Z})\}, Q]^*$ будет сформирована окрестность, в которой определяется лучшее решение. Процесс поиска продолжается до тех пор, пока в формируемых окрестностях может быть определено решение, лучшее, чем $[\{ N^z | (z = \overline{1,Z})\}, Q]^*$.

Переход к новому составу группы N^z связан с извлечением из этой группы ПЗ, выполнение которого является причиной неэффективного использования ограниченного временного ресурса системы. Определение извлекаемого из группы N^z пакета выполняется на основе анализа видов последовательностей π^l ($l = \overline{1,L}$), входящих в решение $[P^z, R^z, \{(T^{0l})^z | (l = \overline{1,L})]^*$ для текущего состава группы. Определение условий идентификации ПЗ, исключаемого из текущего состава группы N^z, выполняется на основе заданного вида последовательностей π^l ($l = \overline{1,L}$) (рисунок 4.2). Анализ последовательностей π^l ($l = \overline{1,L}$) позволил определить следующие причины неэффективного использования временного ресурса:

1) наличие неоднородности длительностей выполнения заданий в пакете в *j*-ой позиции в последовательностях π^l и π^{l+1}, которая обуславливает простои приборов в ожидании готовности к выполнению ПЗ; в то же время простои приборов в ожидании готовности пакета к вы-

полнению (в *j*-ой позиции в π^l) являются причиной «сдвига» последовательностей выполнения ПЗ в конец интервала t^z, что обуславливает неэффективное использование временного ресурса приборов на стадии освобождения КС; исключение из группы N^z пакета, находящегося в *j*-ой позиции в π^l, замена его ПЗ другого типа позволяет уменьшить неоднородность длительностей выполнения заданий на приборах и уменьшить простои приборов;

2) реализация переналадки приборов КС на выполнение заданий соответствующего типа (для пакета, занимающего *j*-ю позицию в π^l) обуславливает их простои в ожидании начала выполнения ПЗ, что является причиной «сдвига» последовательности пакетов в конец интервала t^z; в то же время несогласованность моментов времени окончания переналадки *l*-го прибора на выполнение ПЗ *i*-го типа (в *j*-ой позиции) и окончания выполнения задании в первой позиции в этом же пакете на (*l-1*)-ом приборе (при незначительной длительности интервала переналадки *l*-го прибора) обуславливает простои *l*-го прибора в ожидании начала выполнения ПЗ; наличие интервала ожидания прибором начала выполнения ПЗ вместе с интервалом переналадки обуславливает неэффективное использование временного ресурса приборов КС;

3) длительная первоначальная наладка приборов КС на выполнение заданий соответствующих типов (в пакете в первой позиции в последовательностях π^l) обуславливает снижение эффективности использования временного ресурса приборов, с другой стороны обуславливает «сдвиг» пакетов последовательности в конец интервала t^z и, как следствие, неэффективное использование ресурса времени приборов на стадии освобождения КС (простои приборов КС на заключительной стадии выполнения ПЗ в группе N^z).

При определении оптимальных решений по составам групп N^z ($z = \overline{1,Z}$) реализуется анализ степени неэффективного использования временного ресурса приборов КС при выполнении ПЗ, который осуществляется на основе расписания $[P^z, R^z, \{(T^{0l})^z \mid (l = \overline{1,L})]*$, соответствующего этой группе. Идентифицируется (для исключения из группы N^z) не ПЗ определённого *i*-го типа, а ПЗ, занимающий определённую *j*-ю позицию в последовательностях π^l ($l = \overline{1,L}$). Для идентификации пакета, исключаемого из N^z, необходимо определить суммарный интервал времени простоев приборов КС при выполнении заданий в этом пакете.

Для построения рассуждений используем индекс j как номер позиции ПЗ в последовательностях π^l ($l = \overline{1,L}$) при условии, что $j \neq 1$ ($j \in \{2,3,...,n_p^z\}$). Интервал времени простоя *l*-го прибора в ожидании начала выполнения ПЗ, занимающего в π^l j-ю позицию, определяется выражением вида:

$$[t_{j1}^{0l}]^z - \left[[t^{0l}_{j-1,n^z_{j-1}}]^z + \sum_{h=1}^{k_z} [t_{lh}]^z \cdot p^z_{h,j-1} \right]. \qquad (6.18)$$

Так как рассматриваемый пакет располагается во всех последовательностях π^l $(l=\overline{1,L})$ в j-ой позиции, тогда выражение (6.18) используется для расчёта интервалов времени простоев каждого l-го прибора в ожидании начала его выполнения. Общее время простоев приборов КС в ожидании начала выполнения ПЗ, занимающего j-ю позицию в последовательностях π^l, будет вычислено в соответствии с выражением вида:

$$\sum_{l=1}^{L} \left[[t_{j1}^{0l}]^z - \left[[t^{0l}_{j-1,n^z_{j-1}}]^z + \sum_{h=1}^{k_z} [t_{lh}]^z \cdot p^z_{h,j-1} \right] \right],$$

где $j=\overline{2,n_p^z}$. Обозначим номер позиции пакета в π^l, исключаемого из группы N^z, через j_1. Тогда индекс j_1 ПЗ в π^l, выполнение которого в группе N^z вызывает максимальные суммарные простои приборов КС в ожидании начала реализации действий с ним, определяется условием вида:

$$\max_{j=2,n_p^z} \left[\sum_{l=1}^{L} \left[(t_{j1}^{0l})^z - \left[(t^{0l}_{j-1,n^z_{j-1}})^z + \sum_{h=1}^{k_z} [t_{lh}]^z \cdot p^z_{h,j-1} \right] \right] \right]. \qquad (6.19)$$

Интервал времени простоя l-го прибора в ожидании начала выполнения пакетов из группы N^z определяется значением $(t_{11}^{0l})^z$. Общее время простоев всех L приборов в ожидании начала выполнения первого пакета в π^l $(l=\overline{1,L})$ вычисляется выражением вида: $\sum_{l=1}^{L}(t_{11}^{0l})^z$. На основе этого выражения и выражения (6.19) индекс j_1 определяется условиями:

$$j_1 = \begin{cases} 1, \text{если} \quad \sum_{l=1}^{L}(t_{11}^{0l})^z > \max_{j=2,n_p^z} \left[\sum_{l=1}^{L} \left[(t_{j1}^{0l})^z - \left[(t^{0l}_{j-1,n^z_{j-1}})^z + \sum_{h=1}^{k_z} [t_{lh}]^z \cdot p^z_{h,j-1} \right] \right] \right], \\ j', \text{если} \quad \sum_{l=1}^{L}(t_{11}^{0l})^z \le \max_{j=2,n_p^z} \left[\sum_{l=1}^{L} \left[(t_{j1}^{0l})^z - \left[(t^{0l}_{j-1,n^z_{j-1}})^z + \sum_{h=1}^{k_z} [t_{lh}]^z \cdot p^z_{h,j-1} \right] \right] \right]. \end{cases} \qquad (6.20)$$

где j' – номер позиции ПЗ в π^l $(l=\overline{1,L})$, для которой выполняется условие (6.19). Условие (6.20) определяет позицию j_1 ПЗ в π^l $(l=\overline{1,L})$, выполнение которого является причиной максимальных простоев приборов КС при их наладке либо переналадке на выполнение заданий.

Время простоя *l*-го прибора КС при выполнении заданий, входящих в пакет, занимающий *j*-ю позицию в последовательности π^l (простои прибора в ожидании готовности к выполнению заданий, входящих в этот пакет), определяется выражения вида:

$$\sum_{q=2}^{n_j^z}\left[(t_{j,q}^{0l})^z - \left[(t_{jq-1}^{0l})^z + \sum_{h=1}^{k_z}[t_{lh}]^z \cdot p_{h,j}^z\right]\right], \qquad (6.21)$$

где n_j^z – количество заданий в пакете, занимающем *j*-ю позицию в последовательностях π^l $(l=\overline{1,L})$: $n_j^z = \sum_{h=1}^{k_z} r_{hj}^z$. Введём в рассмотрение параметр t_j^z, значение которого соответствует суммарным простоям приборов КС в ожидании готовности к выполнению заданий в пакете, занимающем *j*-ю позицию в последовательностях π^l $(l=\overline{1,L})$. В соответствии с (6.21) значение t_j^z, для каждого *j*-го пакета в π^l (*j*– номер позиции) определяется выражением вида:

$$t_j^z = \sum_{l=1}^{L}\sum_{q=2}^{n_j^z}\left[[t_{jq}^{0l}]^z - \left[[t_{j,q-1}^{0l}]^z + \sum_{h=1}^{k_z}[t_{lh}]^z \cdot p_{hj}^z\right]\right]. \qquad (6.22)$$

Обозначим через j_2 номер позиции пакета в π^l, выполнение которого обуславливает максимальные простои приборов КС в ожидании готовности заданий в нем к реализации действий на приборах КС. Значение индекса j_2 определяет номер пакета, который должен быть исключен из группы N^z для обеспечения более «плотного» расписания выполнения. С учетом (6.22) индекс j_2 соответствует ПЗ, для которого t_j^z определяется выражением:

$$t_{j_2}^z = \max_{j=1,n_p^z}\left[\sum_{l=1}^{L}\sum_{q=2}^{n_j^z}\left[[t_{jq}^{0l}]^z - \left[[t_{j,q-1}^{0l}]^z + \sum_{h=1}^{k_z}[t_{lh}]^z \cdot p_{hj}^z\right]\right]\right]. \qquad (6.23)$$

Выражения (6.20) и (6.23) позволяют идентифицировать (по значению позиции j_1 или j_2 ПЗ) тип заданий и их количество в пакете в группе N^z, выполнение которых обуславливает максимальные простои приборов КС. Идентифицированные таким образом пакеты требуется исключить из группы N^z для замены пакетами из множества *Q*.

Для обоснования метода построения локально оптимальных решений $[\{N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q]^*$ в рассмотрение введены обозначения: 1) *z'*– индекс группы ПЗ, состав которой модифицируется на текущем шаге алгоритма; 2) *p* – индекс условия, в соответствии с которым реализуется

определение ПЗ, исключаемого из группы $N^{z'}$ ($p=1$ соответствует (6.20), $p=2$ соответствует (6.23)); 3) D^z – вектора типов заданий, пакеты которых размещены в группах N^z ($z=\overline{1,Z}$); 4) $j_p^{z'}$ ($p=\overline{1,2}$)– номер позиции ПЗ в π^l расписания $\pi^{z'}$, обработка которого вызывает максимальные суммарные простои приборов, определенные в соответствии с условиями (6.20) и (6.23); 5) $i_p^{z'}$ ($p=\overline{1,2}$) – типы заданий, пакеты которых извлекается из группы $N^{z'}$ (ПЗ $i_p^{z'}$-го типа, занимающий в π^l ($l=\overline{1,L}$) $j_p^{z'}$-ю позицию ($p=\overline{1,2}$), определяемую в соответствии с условиями (6.20) и (6.23)); 6) $r_p^{z'}$ ($p=\overline{1,2}$) – количество заданий в пакете, который извлекается из группы $N^{z'}$ (ПЗ $i_p^{z'}$-го типа, занимающий в π^l ($l=\overline{1,L}$) $j_p^{z'}$-ю позицию ($p=\overline{1,2}$)); 7) w_p ($p=\overline{1,2}$) – счетчик количества ПЗ, которые добавлены в группу $N^{z'}$ вместо исключаемого из нее ПЗ при формировании новых решений; 8) $i^{q'}$ – тип заданий в пакете, входящем в множество Q, который добавляется в группу $N^{z'}$ взамен исключаемого из этой группы ПЗ $i_p^{z'}$-го типа; 9) $r^{q'}$ – количество заданий в пакете $i^{q'}$-го типа, добавляемого в группу $N^{z'}$ взамен исключаемого из нее ПЗ $i_p^{z'}$-го типа; 10) $(i_w^q)_p$ ($w\in\{1,2,..,w_p\}_p$, $p=\overline{1,2}$) – вектора типов заданий в пакетах, добавление которых в группу $N^{z'}$ взамен ПЗ $i_p^{z'}$-го типа ($p=\overline{1,2}$) обеспечивает минимальные отрицательные значения левых дискретных градиентов $(\nabla^- f_2)_p$ критерия f_2 для группы $N^{z'}$; 11) $(r_w^q)_p$ ($w\in\{1,2,..,w_p\}_p$, $p=\overline{1,2}$) – вектора количества заданий в пакетах, добавление которых в группу $N^{z'}$ взамен ПЗ $i_p^{z'}$-го типа ($p=\overline{1,2}$) обеспечивает минимальные отрицательные значения левых градиентов $(\nabla^- f_2)$ критерия f_2; 12) $(\nabla^- f_2)_p$ ($p=\overline{1,2}$)– максимальные по модулю значения левых дискретных градиентов $(\nabla^- f_2)$ критерия f_2, получаемые для решений, в которых реализуется удаление из $N^{z'}$ ПЗ $i_p^{z'}$-ых типов и добавление в $N^{z'}$ заданий $i^{q'}$-ых типов в количестве $r^{q'}$; 13) $(\nabla^- f_2)_G$ – “глобальное” значение левого дискретного градиента $(\nabla^- f_2)$ критерия f_2, которое соответствует наилучшему решению в окрестности текущего локально оптимального решения $[\{N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q]^*$; 14) $z1$– сохраняемый номер группы N^z, обмен пакетами между которой и множеством Q обеспечивает значение $(\nabla^- f_2)_G$; 15) i^z – идентификатор типа заданий в пакете, исключение которого из группы N^z ($z=z1$) обеспечивает значение $(\nabla^- f_2)_G$; 16) r^z – количество заданий в пакете, исключение ко-

торого из группы N^z ($z=z1$) обеспечивает значение $(\nabla^- f_2)_G$; 17) $(i_w^q)_G$ ($w \in \{1,2,..,w_p\}$)– вектор типов заданий в пакетах, добавление которых в одну из групп N^z ($z=\overline{1,Z}$) взамен ПЗ i^z-го типа гарантирует значение $(\nabla^- f_2)_G$; 18) $(r_w^q)_G$ ($w \in \{1,2,..,w_p\}$)– вектор количества заданий в пакетах, добавление которых в одну из групп N^z ($z=\overline{1,Z}$) взамен ПЗ i^z-го типа гарантирует значение $(^-\nabla f_2)_G$; 19) $N_T^{z'}$ – промежуточное решение по составу группы $N^{z'}$, формируемое путем извлечения из неё ПЗ $i_p^{z'}$-ого типа ($p=\overline{1,2}$); 20) $N_p^{z'}$ ($p=\overline{1,2}$) – решения, сформированные на основе промежуточного решения $N_T^{z'}$ по составу группы $N^{z'}$ путем добавления в эту группу ПЗ, входящих в множество Q; 21) H_{i^q}, $H_{i^q}^T$ – множества номеров ПЗ i^q-ых типов, которые могут быть добавлены в группу $N^{z'}$ вместо исключаемого из нее пакета (перед реализацией алгоритма определено k_q множеств H_{i^q}, $\left|H_{i^q}\right| = \left|H_{i^q}^T\right| = m_i^q$).

Алгоритм определения оптимального решения $[\{N^z | (z=\overline{1,Z})\}, Q]^*$ оперирует со значениями индекса p, которым поставлены в соответствие условия (6.20) и (6.23). Тогда алгоритм определения оптимального решения по составам групп пакетов N^z $(z=\overline{1,Z})$ в окрестности решения $[\{N^z | z=\overline{1,Z}\}, Q]^*$ реализует формирование на основе текущих составов каждой группы N^z двух решений, каждое из которых предусматривает исключение из рассматриваемой группы N^z тех ПЗ, выполнение которых обуславливает максимальные простои приборов КС, определяемые условиями (6.20) и (6.23). В результате на основе текущего состава группы N^z будут сформированы два решения, каждое из которых предусматривает дополнение группы N^z ПЗ различных типов, входящими в множество Q. Определение решения по составу группы N^z предполагает, что в нее добавляется в первую очередь тот пакет, размещение которого обеспечивает максимальное уменьшение значения критерия. В случае, если для рассматриваемой группы N^z выполняется условие (6.11), то в нее добавляются пакеты из множества Q. Дополнение группы N^z новыми пакетами из множества Q продолжается до тех пор, пока выполняется условие (6.11). Идентификаторами типов заданий в пакетах, размещаемых в группе N^z, инициализируются элементы векторов $(i_w^q)_p$ ($p=\overline{1,2}$), которые сопоставлены с различными решениями, соответствующими пакетам, исключаемым из группы N^z при учете условий (6.20) ($p=1$) и (6.23) ($p=2$). Количество элементов в каждом векторе равно w_p ($p=\overline{1,2}$). Коли-

чество заданий в этих пакетах используется при инициализации элементов векторов $(r_w^q)_p$ ($p=\overline{1,2}$). Аналогичные действия выполняются для всех групп $N^z(z=\overline{1,Z})$. Локально оптимальным решением является решение, для которого измененный состав пакетов в группе $N^z(z=\overline{1,Z})$ гарантирует максимальное уменьшение значения критерия f_2. Последовательность шагов алгоритма оптимизации составов групп $N^z(z=\overline{1,Z})$ имеет следующий вид:

1) задать номер *z'* группы $N^{z'}$: $z'=1$ (группа $N^{z'}$, состав которой оптимизируется);

2) передать решение по составам групп $N^z(z=\overline{1,Z})$ на третий уровень иерархии, который реализует формирование расписаний $[P^z,R^z,\{(T^{0l})^z|(l=\overline{1,L})]*$ ($z=\overline{1,Z}$); получить расписание $[P^z,R^z,\{(T^{0l})^z|(l=\overline{1,L})]*$ ($z=\overline{1,Z}$), вычислить значение критерия $f_2(s)$;

3) задать значение индекса *p* условия, в соответствии с которым в π^l ($l=\overline{1,L}$) выделяются пакеты с номерами позиций $j_p^{z'}$, равным 1 *(p=1)*; задать значения счетчиков w_p ($p=\overline{1,2}$) равными 1 ($w_p=1$); задать значение $(\nabla^- f_2)_G=0$;

4) на основе множества *Q* вида $Q=\{[i^q,m_i^q,(A)_i^q]_k|k=\overline{1,k_q}\}$ выполнить инициализацию множеств H_{iq} номеров пакетов заданий i^q-ых типов, которые могут быть размещены в группе $N^{z'}$; реализовать для этого следующий порядок шагов: а) инициализировать номер *k* рассматриваемого кортежа параметров в множестве *Q*: *k=1*; б) для *k*-го кортежа выполнить инициализацию значений элементов h_{iq} вектора H_{iq} (в итоге $H_{iq}=\{1,2,..,m_{iq}\}$); в) *k=k+1*, если $k\le k_q$, то перейти на пункт 4б); если $k>k_q$, то перейти на пункт 5;

5) в соответствии с индексом *p* определить позицию $j_p^{z'}$ ПЗ в последовательностях π^l $(l=\overline{1,L})$, выполнение которого вызывает максимальные простои приборов КС (используется решение $[P^{z'},R^{z'},\{(T^{0l})^{z'}|(l=\overline{1,L})]*$); в соответствии с номером $j_p^{z'}$ позиции ПЗ в последовательностях π^l $(l=\overline{1,L})$ по матрице $P^{z'}$ идентифицировать номер строки *i*, для которой $p_{i,j_p^{z'}}^{z'}=1$ при $(i=\overline{1,k_{z'}})$ (значение *i* соответствует номеру элемента вектора $D^{z'}$ типов заданий, пакеты которых включены в состав группы $N^{z'}$); по значению индекса *i* определить тип заданий $i_p^{z'}$, пакет которых исключается из группы $N^{z'}$: $i_p^{z'}=d_i^{z'}$; в соответствии с значением *i*

идентифицировать по матрице $R^{z'}$ количество заданий $r^{z'}_{i,j^{z'}_p}$ в рассматриваемом пакете и выполнить инициализацию параметра $r^{z'}_p$: $r^{z'}_p = r^{z'}_{i,j^{z'}_p}$;

6) в множестве кортежей параметров $N^{z'} = \{[i, m^{z'}_i, (A)^{z'}_i]_k \mid k = \overline{1, k_{z'}}\}$ в соответствии с типом $i^{z'}_p$ идентифицировать кортеж $N_1 = [i^{z'}_p, m^{z'}_{i^{z'}_p}, (A)^{z'}_{i^{z'}_p}] \in N^{z'}$, с которым будут выполняться преобразования; инициализировать решение $N^{z'}_T$, на основании которого будет формироваться решение по составу группы $N^{z'}: N^{z'}_T = N^{z'}$; в решении $N^{z'}_T$ исключить ПЗ $i^{z'}_p$-го типа:

а) в наборе $N_1 = [i^{z'}_p, m^{z'}_{i^{z'}_p}, (A)^{z'}_{i^{z'}_p}]$ для заданий $i^{z'}_p$-го типа, их количества $r^{z'}_p$ определить в векторе $(A)^{z'}_{i^{z'}_p}$ индекс h' пакета такого, что $(a_{h'})^{z'}_{i^{z'}_p} = r^{z'}_p$;

б) переупорядочить элементы вектора $(A)^{z'}_{i^{z'}_p}$; $(a_h)^{z'}_{i^{z'}_p} = (a_{h+1})^{z'}_{i^{z'}_p}$ при $h = \overline{h', m^{z'}_{i^{z'}_p} - 1}$;

в) $m^{z'}_{i^{z'}_p} = m^{z'}_{i^{z'}_p} - 1$; если $m^{z'}_{i^{z'}_p} \neq 0$ (сформировано промежуточное решение $N^{z'}_T$ по составу группы $N^{z'}$), то перейти на пункт 7; если $m^{z'}_{i^{z'}_p} = 0$, то $N^{z'}_T = N^{z'}_T \setminus \{[i^{z'}_p, m^{z'}_{i^{z'}_p}, (A)^{z'}_{i^{z'}_p}]\}$, $k_{z'} = k_{z'} - 1$; перейти на пункт 7;

7) для множества $Q = \{[i^q, m^q_i, (A)^q_i]_k \mid k = \overline{1, k_q}\}$ выполнить инициализацию номера k рассматриваемого кортежа: $k=1$ (параметр k соответствует номеру элемента в векторе D^q типов заданий, пакеты которых включены в множество Q);

8) в соответствии со значением k в множестве D^q определить тип заданий $i^{q'}$, пакеты которых будут размещаться в группе $N^{z'}$: $i^{q'} = d^q_k$; для рассматриваемого типа заданий $i^{q'}$ идентифицировать соответствующее ему множество $H_{i^{q'}}$:

9) если $H_{i^{q'}} \neq \varnothing$, то инициализировать множество $H^T_{i^{q'}}$: $H^T_{i^{q'}} = H_{i^{q'}}$; перейти на пункт 10; если $H_{i^{q'}} = \varnothing$, то перейти на пункт 16;

10) для значения параметра k в множестве Q определить набор параметров $N_2 = [i^{q'}, m^q_{i^{q'}}, (A)^q_{i^{q'}}]_k \in Q$, с которым выполняются преобразования;

11) проверить условие $H^T_{i^{q'}} \neq \varnothing$, если $H^T_{i^{q'}} \neq \varnothing$, то выделить в множестве $H^T_{i^{q'}}$ идентификатор h^q ПЗ $i^{q'}$-го типа, который будет размещаться в группе $N^{z'}$ вместо исключаемого из

нее ПЗ $i_p^{z'}$ -го типа: $h^q = min\{ h_{i^q}^T \mid h_{i^q}^T \in H_{i^q}^T \}$; модифицировать множество $H_{i^{q'}}^T$: $H_{i^{q'}}^T = H_{i^{q'}}^T \setminus \{ h^q \}$; для набора параметров $N_2 = [i^{q'}, m_{i^{q'}}^q, (A)_{i^{q'}}^q] \in Q$ определить в векторе $(A)_{i^{q'}}^q$ в соответствии с индексом h^q количества заданий $r^{q'}$ в пакете: $r^{q'} = (a_{h^q})_{i^{q'}}^q$; если $H_{i^{q'}}^T = \varnothing$, то перейти на пункт 16;

12) проверить условие $i_p^{z'} \neq i^{q'}$, если $i_p^{z'} \neq i^{q'}$, то перейти на пункт 13; если $i_p^{z'} = i^{q'}$, то проверить условие $r_p^{z'} = r^{q'}$; если $r_p^{z'} = r^{q'}$, то перейти на пункт 11; если $r_p^{z'} \neq r^{q'}$, то перейти на пункт 13;

13) модифицировать промежуточное решение $N_T^{z'}$ по составу группы $N^{z'}$, сформировать решение $N_p^{z'}$ – для рассматриваемого $i^{q'}$ -го типа заданий, пакет которых добавляется в группу $N^{z'}$, выполнить следующие действия:

-если ($\exists k \mid i^{z'} = i^{q'}$ при $[i^{z'}, m_i^{z'}, (A)_i^{z'}]_k \in N_p^{z'}$, $k = \overline{1, k_{z'}^p}$), то $m_i^{z'} = m_i^{z'} + 1$; $(a_{m_i^{z'}})_i^{z'} = r^{q'}$;

-если ($\overline{\exists} k \mid i^{z'} = i^{q'}$ при $[i^{z'}, m_i^{z'}, (A)_i^{z'}]_k \in N_p^{z'}$, $k = \overline{1, k_{z'}^p}$), то $i^{z'} = i^{q'}$; $m_i^{z'} = 1$; $(a_{m_i^{z'}})_i^{z'} = r^{q'}$; $k_{z'}^p = k_{z'}^p + 1$; $k = k_{z'}^p$; $N_p^{z'} = N_p^{z'} \cup \{[i^{z'}, m_i^{z'}, (A)_i^{z'}]_k\}$;

14) передать сформированное промежуточное решение $N_p^{z'}$ на третий уровень иерархии для формирования решения $[P^{z'}, R^{z'}, \{(T^{0l})^{z'} \mid (l = \overline{1, L})]*$; получить с третьего уровня расписание $[P^{z'}, R^{z'}, \{(T^{0l})^{z'} \mid (l = \overline{1, L})]*$, соответствующее решению $N_p^{z'}$ по составу группы $N^{z'}$; для решения $[P^{z'}, R^{z'}, \{(T^{0l})^{z'} \mid (l = \overline{1, L})]*$ выполнить проверку ограничения (6.11); если ограничение (6.11) не выполняется, то перейти на пункт 11; если ограничение (6.11) выполняется, то перейти на пункт 15;

15) вычислить значения критерия f_2 для сформированного решения $[\{ N^z \mid z = \overline{1, Z} \}, Q]$, в состав которого входит решение $N_p^{z'}$ по составу группы $N^{z'}$; для полученного значения критерия f_2 вычислить значения левого $(\nabla^- f_2)$ либо правого $(\nabla^+ f_2)$ дискретных градиентов; если для решения $[\{ N^z \mid (z = \overline{1, Z}) \}, Q]$ с входящим в него решением $N_p^{z'}$ выполняется условие $(\nabla^- f_2) < 0$, то сравнить значения $(\nabla^- f_2)$ и $(\nabla^- f_2)_p$ (максимальным по модулю значением $(^-\nabla f_2)_p < 0$, полученным при формировании решений по составу группы $N^{z'}$); если

$(\nabla^- f_2) < (\nabla^- f_2)_p$, то сохранить тип заданий $i^{q'}$ и количество заданий $r^{q'}$ в пакете, добавление которого в группу $N^{z'}$ (в решение $N_p^{z'}$) обеспечивает выполнение условия $(\nabla^- f_2) < (\nabla^- f_2)_p$ (текущее лучшее решение в окрестности решения $[\{ N^z \mid z = \overline{1,Z} \}, Q]^*$): $i_{w_p}^q = i^{q'}$; $r_{w_p}^q = r^{q'}$ ($i_{w_p}^q$ – элемент с индексом w_p вектора $(i_w^q)_p$, предназначенного для хранения типов заданий $i^{q'}$ пакетов, добавляемых в группу $N^{z'}$, $r_{w_p}^q$ – элемент с индексом w_p вектора $(r_w^q)_p$, предназначенного для хранения количества заданий $r^{q'}$ в пакетах, добавляемых в группу $N^{z'}$); выполнить модификацию переменной-флага $p^{z'}$, указывающей на определение лучшего решения, чем решение $[\{ N^z \mid z = \overline{1,Z} \}, Q]^*$: $p^{z'} = 1$; выполнить присваивание $(\nabla^- f_2)_p = (\nabla^- f_2)$, $(\nabla^- f_2) = 0$; перейти на пункт 11;

16) модифицировать индекс *k* кортежа параметров $[i^{q'}, m_{i^{q'}}^q, (A)_{i^{q'}}^q]_k \in Q$: *k=k+1* (реализуется переход к рассмотрению ПЗ нового $i^{q'}$-го типа для добавления их в группу $N^{z'}$); если $k > k_q$, то перейти на пункт 17; если $k \le k_q$, то перейти на пункт 8;

17) проверить условие $p^{z'} = 1$(характеризует наличие лучшего решения в окрестности решения $[\{ N^z \mid z = \overline{1,Z} \}, Q]^*$); если $p^{z'} = 0$ (отсутствует лучшее решение), то перейти на пункт 19; если $p^{z'} = 1$, то сформировать промежуточное локально оптимальное решение $N_T^{z'}$ по составу группы пакетов $N^{z'}$(для этого используются сохраненные значения параметров $i^{q'}$ и $r^{q'}$ (для буферизации использованы вектора $(i_w^q)_p$ и $(r_w^q)_p$, $w = \overline{1,w_p}$)): для текущего значения w_p количества пакетов, добавляемых в группу $N^{z'}$ (w_p – идентификатор последнего элемента в векторах $(i_w^q)_p$ и $(r_w^q)_p$) выполнить инициализацию $i^{q'}$-го типа заданий, пакет которых добавляется в группу $N^{z'}$ при формировании решения $N_T^{z'}$, и количества данных $r^{q'}$ следующим образом: $i^{q'} = i_{w_p}^q$, $r^{q'} = r_{w_p}^q$ ($i_{w_p}^q$ и $r_{w_p}^q$ – последние элементы в векторах $(i_w^q)_p$ и $(r_w^q)_p$); для формирования промежуточного решения $N_T^{z'}$ выполнить следующие действия:

- если ($\exists k \mid i^{z'} = i^{q'}$ при $[i^{z'}, m_i^{z'}, (A)_i^{z'}]_k \in N_T^{z'}$, $k = \overline{1,k_{z'}}$), то $m_i^{z'} = m_i^{z'} + 1$; $(a_{m_i^{z'}})_i^{z'} = r^{q'}$;

-если ($\overline{\exists} k \mid i^{z'} = i^{q'}$ при $[i^{z'}, m_i^{z'}, (A)_i^{z'}]_k \in N_T^{z'}$, $k = \overline{1, k_{z'}}$), то $i^{z'} = i^{q'}$; $m_i^{z'} = 1$; $(a_{m_i^{z'}})_i^{z'} = r^{q'}$; $k_{z'} = k_{z'} + 1$; $k = k_{z'}$; $N_T^{z'} = N_T^{z'} \cup \{[i^{z'}, m_i^{z'}, (A)_i^{z'}]_k\}$;

18) передать решение $[\{N^z \mid z = \overline{1, Z}\}, Q]$ на третий уровень для формирования расписания $[P^{z'}, R^{z'}, \{(T^{0l})^{z'} \mid (l = \overline{1, L})]*$; получить расписание $[P^{z'}, R^{z'}, \{(T^{0l})^{z'} \mid (l = \overline{1, L})]*$; на основе полученного расписания для решения $[\{N^z \mid z = \overline{1, Z}\}, Q]$ проверить условие: $t^z - \underset{l=1,L}{max}\left[[t^{0l}_{n_p^z, n_{n_p^z}}]^z + \sum_{h=1}^{k_z} [t_h^l]^z \cdot p^z_{h, n_p^z} \right] > 0$; если условие выполняется (возможно дополнение группы $N^{z'}$ ПЗ, принадлежащими множеству Q (модификация промежуточного решения $N_T^{z'}$ по составу группы), так как ПЗ $i_{w_p}^q$-го типа в количестве $r_{w_p}^q$ элементов размещен в промежуточном локально оптимальном решении $N_T^{z'}$ по составу группы $N^{z'}$, тогда при исследовании возможности дополнения группы $N^{z'}$ другими пакетами данный пакет рассматриваться не может, поэтому его идентификатор (номер) исключается из соответствующего множества H_{iq}), то в множестве Q определить набор параметров $[i^q, m_i^q, (A)_i^q]_k \in Q$, для которого $i^q = i_{w_p}^q$, в векторе $(A)_i^q$, соответствующем (i^q)-му типу заданий ($i^q = i_{w_p}^q$), определить индекс (номер) h элемента в векторе $(a_h)_i^q$, для которого $(a_h)_i^q = r_{w_p}^q$; исключить определенный таким образом ПЗ i^q-го типа ($i^q = i_{w_p}^q$) из множества H_{iq} : $H_{iq} = H_{iq} \setminus \{h\}$; увеличить номер w_p последнего элемента в векторах $(i_w^q)_p$ и $(r_w^q)_p$: $w_p = w_p + 1$; инициализировать переменную $p^{z'} = 0$; перейти на пункт 7; если $t^z - \underset{l=1,L}{max}\left[[t^{0l}_{n_p^z, n_{n_p^z}}]^z + \sum_{h=1}^{k_z} [t_h^l]^z \cdot p^z_{h, n_p^z} \right] = 0$, то перейти на пункт 19;

19) изменить индекс p условия, с использованием которого определяется ПЗ, исключаемый из группы $N^{z'}$: $p=p+1$; если $p > 2$, то перейти на пункт 20; если $p \le 2$, то инициализировать номер w_p элемента в векторах $(i_w^q)_p$ и $(r_w^q)_p$ для соответствующего индекса p: $w_p = 1$; инициализировать переменную-флаг $p^{z'} = 0$; перейти на пункт 4;

20) сравнить значение $(\nabla^- f_2)_G$ со значениями $(\nabla^- f_2)_p$ ($p=\overline{1,2}$), характеризующими наилучшие варианты решений $[\{ N^z \mid z=\overline{1,Z} \},Q]$, включающие решения $N_p^{z'}$ ($p=\overline{1,2}$) по составу группы $N^{z'}$; если $(\nabla^- f_2)_1 < (\nabla^- f_2)_2$ и $(\nabla^- f_2)_1 < (\nabla^- f_2)_G$, то сохранить типы заданий и количества заданий в пакетах, обмен которыми между группой $N^{z'}$ и множеством Q позволил получить значение $(\nabla^- f_2)$, равное $(\nabla^- f_2)_1$:

а) $z1=z'$; $i^z=i_1^{z'}$; $r^z=r_1^{z'}$ (параметры извлекаемого из группы $N^{z'}$ пакета);

б) $w_G=w_1$, $(i_w^q)_G=(i_w^q)_1$; $(r_w^q)_G=(r_w^q)_1$ (параметры добавляемых в группу $N^{z'}$ пакетов, при $w=\overline{1,w_1}$);

в) $(\nabla^- f_2)_G=(\nabla^- f_2)_1$; перейти на пункт 21; если при $(\nabla^- f_2)_1 < (\nabla^- f_2)_2$ выполняется $(\nabla^- f_2)_1 \geq (\nabla^- f_2)_G$, то перейти на пункт 22 (полученное решение по составу группы $N^{z'}$ не улучшают значение критерия более, чем ранее полученные решения по составам других групп);

21) если условие $(\nabla^- f_2)_1 < (\nabla^- f_2)_2$ не выполняется, то проверить условия вида $(\nabla^- f_2)_2 < (\nabla^- f_2)_1$ и $(\nabla^- f_2)_2 < (\nabla^- f_2)_G$; если оба условия выполняются, то сохранить параметры решений по составу группы $N^{z'}$ следующим образом:

а) $z1=z'$; $i^z=i_2^{z'}$; $r^z=r_2^{z'}$ (параметры извлекаемого из группы $N^{z'}$ пакета);

б) $w_G=w_2$, $(i_w^q)_G=(i_w^q)_2$; $(r_w^q)_G=(r_w^q)_2$ (параметры добавляемых в $N^{z'}$ пакетов);

в) $(\nabla^- f_2)_G=(\nabla^- f_2)_2$, перейти на пункт 22; если при $(\nabla^- f_2)_2 < (\nabla^- f_2)_1$ выполняется условие $(\nabla^- f_2)_2 \geq (\nabla^- f_2)_G$, то перейти на пункт 22;

22) изменить номер рассматриваемой группы пакетов $N^{z'}$, состав которой будет модифицироваться: $z'=z'+1$; если $z'>Z$, то перейти на пункт 23; если $z' \leq Z$, то перейти на пункт 3;

23) проверить условие $(\nabla^- f_2)_G < 0$; если $(\nabla^- f_2)_G < 0$ (в окрестности текущего локально оптимального решения $[\{ N^z \mid (z=\overline{1,Z})\},Q]^*$ получено лучшее решение, значения параметров которого сохранены в переменных $z1$, i^z, r^z – параметры извлекаемого из группы N^z пакета, $(i_w^q)_G$, $(r_w^q)_G$ (при $w=\overline{1,w_G}$) – параметры добавляемых в группу $N^{z'}$ пакетов), то сформировать новое локально оптимальное решение $[\{ N^z \mid z=\overline{1,Z} \},Q]^*$; для этого реализуется следующий порядок шагов:

а) инициализация номера группы пакетов *z=z1*; в группе N^z (*z=z1*), как множестве кортежей $N^z=\{[i,m_i^z,(A)_i^z]_k \mid k=\overline{1,k_z}\}$, в соответствии с типом заданий i^z определить набор $N_1=[i^z,m_{i^z}^z,(A)_{i^z}^z]\in N^z$, с которым будут выполняться преобразования; в исходном решении по составу группы N^z, входящем в текущее локально оптимальное решение $[\{N^z \mid (z=\overline{1,Z})\},Q]^*$, исключить ПЗ i^z-го типа:

– для i^z-го типа заданий и их количества r^z определить для набора $N_1=[i^z,m_{i^z}^z,(A)_{i^z}^z]\in N^z$ в векторе $(A)_{i^z}^z$ индекс h' пакета такого, что $(a_{h'})_{i^z}^z=r^z$;

– переупорядочить элементы вектора $(A)_{i^z}^z$; $(a_h)_{i^z}^z=(a_{h+1})_{i^z}^z$ при $h=\overline{h',m_{i^z}^z-1}$; $m_{i^z}^z=m_{i^z}^z-1$; если $m_{i^z}^z=0$, то $N^z=N^z\setminus\{[i^z,m_{i^z}^z,(A)_{i^z}^z]\}$; $k_z=k_z-1$;

б) дополнить состав множества *Q* ПЗ i^z-го типа в количестве r^z элементов (пакетом, исключенным из группы N^z); действия по размещению рассматриваемого ПЗ i^z-го типа в множестве *Q* реализуются следующим образом:

- если ($\exists k \mid i^q=i^z$ при $[i^q,m_i^q,(A)_i^q]_k\in Q$, $k=\overline{1,k_q}$), то $m_i^q=m_i^q+1$; $(a_{m_i^q})_i^q=r^z$;

-если ($\overline{\exists}k \mid i^q=i^z$ при $[i^q,m_i^q,(A)_i^q]_k\in Q$, $k=\overline{1,k_q}$), тогда $i^q=i^z$; $m_i^q=1$; $(a_{m_i^q})_i^q=r^z$; $k_q=k_q+1$; $k=k_q$; $Q=Q\cup\{[i^q,m_i^q,(A)_i^q]_k\}$;

в) задать индекс *w* в векторах $(i_w^q)_G$ и $(r_w^q)_G$ для ПЗ, добавляемых в группу N^z, равным 1 (*w=1*) (значение w_G количества пакетов, добавляемых в группу N^z, определено в процессе идентификации локально оптимального решения в окрестности $[\{N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q]^*$);

г) инициализировать $i^{q'}$-ый тип заданий, пакет которых добавляется в группу N^z, и количества заданий $r^{q'}$ в добавляемом пакете следующим образом: $i^{q'}=i_w^q$, $r^{q'}=r_w^q$,

д) исключить ПЗ $i^{q'}$-го типа в количестве $r^{q'}$ элементов из множества *Q* следующим образом:

– для $i^{q'}$-го типа заданий и их количества $r^{q'}$ определить набор параметров $N_2=[i^{q'},m_i^{q'},(A)_i^{q'}]\in Q$, в векторе $(A)_i^{q'}$ идентифицировать индекс h' ПЗ такого, что $(a_{h'})_i^{q'}=r^{q'}$;

– переупорядочить элементы вектора $(A)_i^{q'}$; $(a_h)_i^{q'} = (a_{h+1})_i^{q'}$ при $h = \overline{h', m_i^{q'} - 1}$;

– $m_i^{q'} = m_i^{q'} - 1$; если $m_i^{q'} = 0$, то $Q = Q \setminus \{[i^{q'}, m_i^{q'}, (A)_i^{q'}]\}$; $k_q = k_q - 1$;

е) добавить ПЗ $i^{q'}$-го типа в количестве $r^{q'}$ элементов в группу N^z следующим образом:

- если ($\exists k \mid i^z = i^{q'}$ при $[i^z, m_i^z, (A)_i^z]_k \in N^z$, $k = \overline{1, k_z}$), то $m_i^z = m_i^z + 1$; $(a_{m_i^z})_i^z = r^{q'}$;

-если ($\overline{\exists} k \mid i^z = i^{q'}$ при $[i^z, m_i^z, (A)_i^z]_k \in N^z$, $k = \overline{1, k_z}$), тогда $i^z = i^{q'}$; $m_i^z = 1$; $(a_{m_i^z})_i^z = r^{q'}$;

$k_z = k_z + 1$; $k = k_z$; $N^z = N^z \cup \{[i^z, m_{i^z}^z, (A)_{i^z}^z]_k\}$;

ж) изменить значение индекса w для векторов $(i_w^q)_G$ и $(r_w^q)_G$ параметров пакетов, добавляемых в группу N^z: $w = w + 1$; если $w \le w_G$, то перейти на пункт 23г; если $w > w_G$ (новое локально оптимальное решение $[\{N^z \mid z = \overline{1, Z}\}, Q]^*$ сформировано), то перейти на пункт 1; если $(\overline{\nabla} f_2)_G \ge 0$ (в окрестности текущего локально оптимального решения $[\{N^z \mid z = \overline{1, Z}\}, Q]^*$ не найдено лучшего решения), то перейти на пункт 24;

24) останов алгоритма.

Вычислительная сложность рассмотренного метода оптимизации составов групп ПЗ определена как $O(n \cdot n^i \cdot Z)$. Реализация приведенного алгоритма определения локально оптимальных решений по составам групп ПЗ осуществляется с учетом сформированных на третьем уровне расписаний их выполнения. По этой причине реализована разработка метода определения порядков выполнения ПЗ, входящих в каждую из групп N^z, на приборах КС. Метод формирования начального решения по составам групп ПЗ и оптимизации составов групп ПЗ рассмотрены в работах [138-141].

6.3 Алгоритм построения расписаний выполнения в конвейерных системах пакетов заданий, входящих в группы

Формирование расписаний выполнения ПЗ каждой группы N^z ($z = \overline{1, Z}$) предполагает определение на третьем уровне иерархической игры порядков реализации действий с ними на приборах КС (определение последовательностей π^l выполнения ПЗ группы N^z). На третьем уровне системы для формирования расписания выполнения ПЗ группы N^z использован метод поиска лучшего решения в окрестностях текущего локально оптимального решения. Для обос-

нования алгоритма определения порядка выполнения ПЗ на приборах КС использованы следующие обозначения: $n_p^{z'}$ – текущее количество ПЗ, размещенных в последовательностях π^l на предыдущих шагах алгоритма, i' – идентификатор типа заданий, пакет которых размещается в последовательностях π^l (для группы N^z сформирован вектор I^z типов заданий, пакеты которых принадлежат группе N^z , тогда i' – это номер элемента в векторе I^z , который соответствует i -му типу заданий в рассматриваемом пакете, количество элементов в векторе I^z равно k_z), j_l – индекс текущего столбца матриц $P^z(s)$, $R^z(s)$ (на s-м шаге алгоритма), в i'-ой строке которого указаны значения параметров, соответствующих рассматриваемому пакету. Вычисление метрики окрестности решения выполняется в соответствии с выражением вида: $k1 = \sum_{i=1}^{k_z} \sum_{j=1}^{n_p^{z'}} | p_{i,j}^z(s+g) - p_{i,j}^z(s) | / 2$, где g– номер промежуточного решения по построению расписания π^{z*} (решения $[P^z, R^z, \{(T^{0l})^z | (l = \overline{1,L})]*$) для группы N^z . Исходное решение $[P^z(s), R^z(s), \{(T^{0l}(s))^z | (l = \overline{1,L})]$ формируется путём добавления пакета с $(a_h)_i^z$ заданиями i -го типа в конец последовательностей π^l ($l = \overline{1,L}$). Решение $[P^z(s+g), R^z(s+g), \{(T^{0l}(s+g))^z | (l = \overline{1,L})]$ сформированное на основе исходного решения $[P^z(s), R^z(s), \{(T^{0l}(s))^z | (l = \overline{1,L})]$, находится в его окрестности O_{k1}, характеризуемой метрикой $k1$. Формирование решения $[P^z(s+g), R^z(s+g), \{(T^{0l}(s+g))^z | (l = \overline{1,L})]$ предполагает изменение положения рассматриваемого ПЗ в последовательностях π^l относительно положения этого пакета в решении $[P^z(s), R^z(s), \{(T^{0l}(s))^z | (l = \overline{1,L})]$.

Решение по составу группы пакетов N^z, поступающее на третий уровень иерархии системы, для которого формируется расписание π^z, имеет вид $N^z = \{[i, m_i^z, (A)_i^z]_k, | k = \overline{1,k_z}\}$. Инициализация параметров перед началом алгоритма предполагает задание значения индекса k набора вида $[i, m_i^z, (A)_i^z]_k$ равным 1 ($k = 1$), значения индекса столбца j^{max} матриц P^z и R^z, в котором задаются значения параметров, соответствующие размещаемому в π^l ПЗ, равным 1 ($j^{max}=1$, j^{max} – значение индекса столбца матриц P^z и R^z , с которым оперирует алгоритм на s–м шаге алгоритма). Размер матриц P^z и R^z равен $k_z \times n_p^z$, где k_z – количество типов заданий в пакетах, размещаемых в последовательностях π^l , n_p^z – количество пакетов, которые

должны быть размещены в последовательностях π^l: $n_p^z = \sum_{k=1}^{k_z} [m_i^z]_k$, где $[m_i^z]_k$ – параметр m_i^z в соответствующем k-м наборе вида $[i, m_i^z, (A)_i^z]_k \in N^z$.

Алгоритм определения локально оптимальных решений $[P^z, R^z, \{(T^{0l})^z | (l = \overline{1,L})]^*$ по порядкам выполнения ПЗ в последовательностях π^l предполагает добавление в конец этих последовательностей по одному ПЗ, последующее изменение их позиций в этих последовательностях на одну ближе к их началу. Алгоритм определения порядка выполнения ПЗ группы N^z в последовательностях π^l содержит следующие шаги:

1) для заданного значения индекса *k* набора параметров вида $[i, m_i^z, (A)_i^z]_k \in N^z$ определить *i*-ый тип заданий, пакеты которых размещаются в последовательностях π^l; для *i*-го типа заданий с использованием вектора I^z (вектор типов заданий, пакеты которых входят в группу N^z) определить номер *i'* типа этих заданий в векторе I^z, который соответствует индексу (номеру) строки в матрицах P^z, R^z; инициализировать индекс *h*, определяющий номер элемента вектора (A_i^z) (номер пакета, задания из которого размещаются в π^l), значением 1;

2) инициализировать элементы *i'*-ой строки j^{max}-го столбца матриц $P^z(s)$, $R^z(s)$, соответствующие размещаемому в последовательностях π^l $(l = \overline{1,L})$ пакету в количестве $(a_h)_i^z$ заданий, значениями параметров: $p_{i',j^{max}} = 1$, $r_{i',j^{max}} = (a_h)_i^z$); инициализировать элементы j^{max}-го столбца матриц $P^z(s)$, $R^z(s)$: $p_{k,j^{max}} = 0$ ($k \neq i'$), $r_{k,j^{max}} = 0$, ($k \neq i'$), $k = \overline{1,k_z}$);

3) выполнить вычисление на основе матриц $P^z(s)$ и $R^z(s)$ значений элементов матриц $(T^{0l}(s))^z$ $(l = \overline{1,L})$ (элементы матриц $(T^{0l}(s))^z$ вычисляются в порядке с *l=1* до *l=L*);

4) для матриц $P^z(s)$, $R^z(s)$ и матриц $(T^{0l}(s))^z$ вычислить значение критерия $f_3^z(s)$; решение $[P^z(s), R^z(s), \{(T^{0l}(s))^z | (l = \overline{1,L})]$ зафиксировать как локально оптимальное $[P^z, R^z, \{(T^{0l})^z | (l = \overline{1,L})\}]^* = [P^z(s), R^z(s), \{(T^{0l}(s))^z | (l = \overline{1,L})\}]$;

5) если $j^{max} = 1$ (добавляемый в последовательности π^l ПЗ занимает первую в π^l позицию), то перейти а пункт 13;

6) инициализировать значение g индекса шага текущего промежуточного решения значением 1, присвоить индексу текущего рассматриваемого столбца j_l матриц $P^z(s)$ и $R^z(s)$ (текущей позиции j_l рассматриваемого ПЗ в π^l) значение $j^{max}(j_l = j^{max})$;

7) изменить в π^l $(l=\overline{1,L})$ порядок пакетов так, чтобы ПЗ i-го типа перемещался на одну позицию в начало π^l; действия с матрицами $P^z(s)$, $R^z(s)$ имеют вид: $p_{i',j_l-1}(s+g)=1$, $p_{i',j_l}(s+g)=0$, $p_{k',j_l-1}(s+g)=0$, $p_{k',j_l}(s+g)=1$, $r_{i',j_l-1}(s+g)=r_{i',j_l}(s+(g-1))$, $r_{i',j_l}(s+g)=0$, $r_{k',j_l-1}(s+g)=0$, $r_{k',j_l}(s+g)=r_{k',j_l-1}(s+(g-1))$ где k' – индекс строки в матрице $P^z(s+(g-1))$, в которой элемент p_{k',j_l-1} в $(j_l\text{-}1)$-ом столбце равен 1 (на $(s+(g-1))$-ом шаге алгоритма предыдущая позиция для рассматриваемого пакета, которую он занимает на $(s+g)$-ом шаге); в результате формируются матрицы $P^z(s+g)$ и $R^z(s+g)$; модифицировать индекс j_l столбца, идентифицирующий местоположение в π^l $(l=\overline{1,L})$ ПЗ: $j_l = j_l - 1$;

8) с использованием матриц $P^z(s+g)$ и $R^z(s+g)$ вычислить значения элементов матриц $(T^{0l}(s+g))^z$ $(l=\overline{1,L})$, а также значение критерия $f_3^z(s+g)$; определить значения левого $\nabla^- f_3^z(s)$ (правого $\nabla^+ f_3^z(s)$) дискретных градиентов критерия f_3^z;

9) если $(\nabla^- f_3^z(s)<0)$, то решение $[P^z(s+g),R^z(s+g),\{(T^{0l}(s+g))^z\,|(l=\overline{1,L})\}]$ проинтерпретировать как локально оптимальное: $[P^z,R^z,\{(T^{0l})^z\,|(l=\overline{1,L})\}]^* = [P^z(s+g),R^z(s+g),\{(T^{0l}(s+g))^z\,|(l=\overline{1,L})\}]$; модифицировать значение s: $s=s+g$, значение индекса g шага задать равным 1; перейти к шагу 7;

10) если $\nabla^+ f_3^z(s)\geq 0$, то проверить выполнение условия $k1<k1^{max}$ ($k1^{max}$ – значение максимальной метрики окрестности решения $[P^z,R^z,\{(T^{0l})^z\,|(l=\overline{1,L})\}]^*$); если $k1<k1^{max}$, то модифицировать индекс g промежуточного шага поиска решения: $g=g+1$, модифицировать значение метрики $k1$ окрестности: $k1=k1+1$; если $j_l\neq 1$ (рассматриваемый пакет не является первым в π^l), то перейти на пункт 7; если $j_l=1$, то перейти на пункт 12; если $k1=k^{max}$, то перейти на пункт 12;

12) модифицировать значения $m_i^z = m_i^z - 1$, $h = h + 1$; если $m_i^z > 0$, то $s=s+1$; $j^{max} = j^{max} + 1$; перейти на пункт 2;

14) если $m_i^z = 0$ (для заданного значения индекса k набора вида $[i, m_i^z, (A)_i^z]_k$ все ПЗ i-го типа размещены в последовательностях π^l), то модифицировать индекс (номер) k кортежа параметров: $k=k+1$; если $k \le k_z$, то перейти на пункт 1;

15) если $k > k_z$ (все ПЗ i-х типов из наборов $[i, m_i^z, (A)_i^z]_k \in N^z$ $(k = \overline{1, k_z})$ размещены в последовательностях π^l $(l = \overline{1,L})$ расписания π^z для группы N^z), то останов алгоритма.

Реализация алгоритма формирования расписаний выполнения ПЗ одной из групп N^z позволяет осуществить упорядочивание действии с ними в последовательностях π^l $(l = \overline{1,L})$. Сформированные расписания $[P^z, R^z, \{(T^{0l})^z \mid (l = \overline{1,L})\}]^*$ для каждой из групп N^z $(z = \overline{1,Z})$ передаются на второй уровень для оценки решения $[\{N^z \mid z = \overline{1,Z}\}, Q]$ по их составам.

6.4. Анализ результатов исследований метода построения расписаний выполнения пакетов заданий в конвейерных системах в течение интервалов времени ограниченной длительности

Эффективность использования метода построения расписаний выполнения ПЗ в КС в течение интервалов времени ограниченной длительности определяется эффективностью использования метода оптимизации решений по составам групп ПЗ. С целью исследования эффективности применения метода оптимизации решений по составам групп N^z $(z = \overline{1,Z})$ выполнено сравнение результатов, получаемых с его использованием, с результатами для фиксированных групп ПЗ и результатами, формируемыми метаэвристическим алгоритмами (ГА). Исходное решение по составам ПЗ имеет вид *[M,A]*. По группам должны быть распределены ПЗ первого типа в количестве m_1, второго типа в количестве m_2 и так далее ПЗ n-го типа в количестве m_n. При сопоставлении гену в хромосоме одного ПЗ размер хромосомы равен $\sum_{i=1}^{n} m_i$. Для каждого i-го типа заданий в хромосоме выделяется участок из m_i генов. Каждому h_i-му гену в участке хромосомы для i-го типа заданий соответствует ПЗ, имеющий номер h_i и принадлежащий одной из групп N^z $(z = \overline{1,Z})$ или множеству Q. Составы ПЗ i-го типа, которые сопоставляются с h_i-ми генами, входящими в i-ый участок хромосомы, определяются значениями элементов

$(a_h)_i^z$ в векторах $(A)_i^z$, принадлежащих наборам параметров вида $[i, m_i^z, (A)_i^z]_k$, которые входят в разные группы N^z ($z = \overline{1,Z}$). Значение гена q_{h_i} в участке хромосомы, сопоставленном с ПЗ *i*-го типа, равно либо номеру группы N^z ($z = \overline{1,Z}$), в которую входит ПЗ этого типа с соответствующим h_i -м номером, либо значению 0, если пакет входит в множество *Q*. Пакеты заданий *i*-го типа из групп N^z ($z = \overline{1,Z}$) последовательно «распределяются» по генам участка хромосомы, который соответствует заданиям этого типа (значения q_{h_i} h_i –го гена, соответствующее включению h_i–го ПЗ в одну из групп N^z ($z = \overline{1,Z}$) или в множество *Q* для начального решения формируются случайным образом). Пример кодирования решений для *n=3*, $m_i = 8$ ($i = \overline{1,3}$), *Z=3* представлен на рисунке 6.1. Полученная популяция хромосом используется для построения новых решений по составам групп ПЗ в виде $[\{ N^z \mid z = \overline{1,Z} \}, Q]$. После чего они (решения) передаются на третий уровень для построения расписаний выполнения ПЗ, входящих в группы. После построения расписаний выполнения ПЗ, входящих в группы N^z, реализуется проверка условия (6.11). В случае его выполнения оценивается оптимальность решения по составам групп $[\{ N^z \mid z = \overline{1,Z} \}, Q]$ с использованием критерия (6.9).

Рисунок 6.1– Вид хромосомы для решения $[\{ N^z | (z = \overline{1,Z}) \}, Q]$ по составам групп ПЗ

Формирование решений по составам групп ПЗ (новой популяции хромосом) осуществляется путем реализации операторов кроссинговера и мутации с последующей селекцией полученных решений с точки зрения критерия (6.9). Оператор мутации предполагает:

– генерацию для каждого участка хромосомы, соответствующего определенному типу заданий, номера гена h_i, мутация которого будет выполняться (формируется *n* точек мутации либо *kn* точек мутации, если для каждого участка хромосомы формируется *k* точек);

– определение вида операции, связанной с перемещением рассматриваемого ПЗ с идентификатором h_i между группами N^z ($z = \overline{1,Z}$) : увеличение значения q_{h_i} гена (перемещение ПЗ с идентификатором h_i в группу N^z с большим номером – единичное значение генерируемой случайным образом переменной), уменьшение значения q_{h_i} этого гена (перемещение ПЗ с

идентификатором h_i в группу N^z с меньшим номером, либо в множество Q – нулевое значение генерируемой случайным образом переменной).

В том случае, если полученное после мутации значение гена удовлетворяет условию $q_{h_i} > Z$, то это значение инициализируется следующим образом: $q_{h_i} = 0$.

Оператор кроссинговера предполагает генерацию одной либо нескольких точек пересечения участков хромосомы, каждый из которых соответствует определенному *i*-ому типу заданий. В результате путем пересечения участков родительских хромосом формируются хромосомы в новой популяции. Для селекции полученные после реализации операторов мутации и кроссинговера хромосомы преобразуются в стандартную форму решений для групп ПЗ вида $[\{ N^z \mid z = \overline{1,Z} \}, Q]$. Полученные составы групп N^z ($z = \overline{1,Z}$) передаются на третий уровень иерархии для формирования расписаний выполнения ПЗ каждой из групп. Сформированные расписания в виде решения $[P^z, R^z, \{(T^{0l})^z \mid (l = \overline{1,L})\}]$ для каждой группы ПЗ интерпретируются с точки зрения выполнения условия (6.11). При истинности условия (6.11) рассматриваемое решение включается в формируемую популяцию, при его ложности решение отбрасывается. После формирования решений по составам групп ПЗ выполняется их сортировка по значению критерия f_2. Синтезированный ГА для оптимизации групп ПЗ рассмотрен в [142].

Исследование метода оптимизации составов групп ПЗ предусматривало сравнение решений по составам групп, полученных с его использованием, и решений по составам групп, которые не подвергались оптимизации (решения по составам фиксированных групп N^z ($z = \overline{1,Z}$), полученные после построения начального решения). Для каждого из полученных решений определялись суммарные простои приборов в течение всех Z интервалов времени функционирования КС. В качестве параметра, характеризующего эффективность применения метода оптимизации групп ПЗ, определялось отношение разности значений общих простоев приборов КС (в течение интервалов t^z ($z = \overline{1,Z}$)) при формировании фиксированных групп пакетов (полученных при построении начального решения) и групп пакетов, составы которых сформированы в соответствии с рассмотренным методом, к значению общих простоев приборов КС для фиксированных групп N^z: $f_{эмосгп} = (f_2^{фикс} - f_2^{мосгп}) / f_2^{фикс}$, где $f_{эмосгп}$ – степень снижения простоев приборов КС в течение всех интервалов времени ее функционировании при использовании метода оптимизации, $f_2^{фикс}$ –простои приборов КС в течением интервалов времени ее функционирования для решений по составом фиксированных групп ПЗ (начальные решения по составам групп ПЗ), $f_2^{мосгп}$ – простои приборов КС в течением интервалов времени ее функционирования для оптимизированных решений по составом групп ПЗ.

Для исследования метода оптимизации составов групп ПЗ использованы обозначения, аналогичные введенным в главе 4: $max(t_{li})/min(t_{li})$; $max(t_{ij}^{l})/min(t_{ij}^{l})$; n^{i} – количество заданий каждого i-го типа ($i=\overline{1,n}$), t^{z} – длительность интервала времени функционирования системы, Z– количество интервалов. Заданы следующие значения параметров задачи: n=5, L=5, $n^{i}=24$. Значения t^{z} задавались равными 100 и 200, значения Z – соответственно 2 и 4. При исследованиях значения $max(t_{ij}^{l})/min(t_{ij}^{l})$ задавались равными: 1, 2, 4, 8, 16, значения $max(t_{li})/min(t_{li})$ – равными 1, 2, 4, 8. Графики зависимостей степени снижения суммарных простоев приборов КС при выполнении ПЗ из групп N^{z} в течение интервалов t^{z} для решений, полученных с использованием предложенного метода, по сравнению с фиксированными группами от значений входных параметров (n=5, L=5, $t^{z}=100$ и $t^{z}=200$, Z=2 и Z=4) представлены на рисунках 6.2-6.5 (МО СГП – метод оптимизации составов групп пакетов).

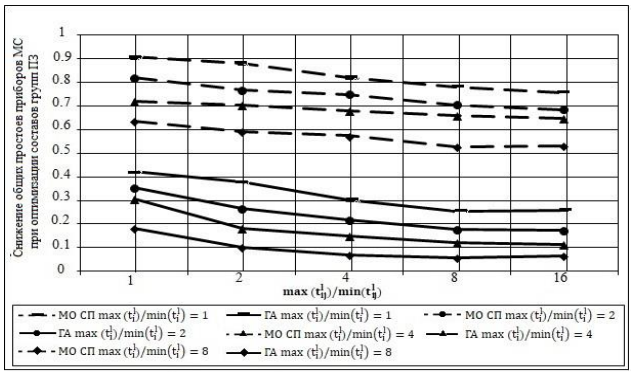


Рисунок 6.2 – Снижение суммарных простоев приборов КС при оптимизации составов групп ПЗ (n=5, L=5, $t^{z}=100$, Z=2)

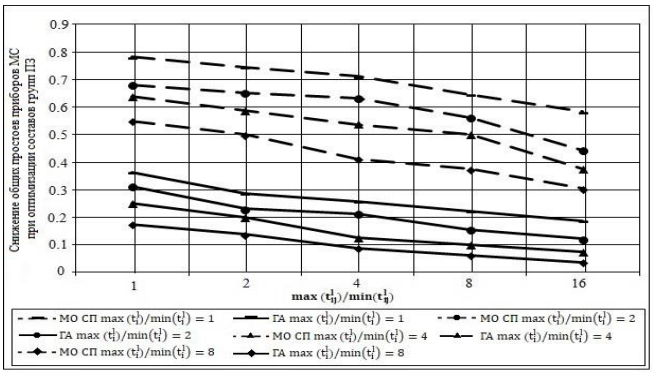


Рисунок 6.3 – Снижение суммарных простоев приборов КС при оптимизации составов групп ПЗ (n=5, L=5, $t^{z}=100$, Z=4)

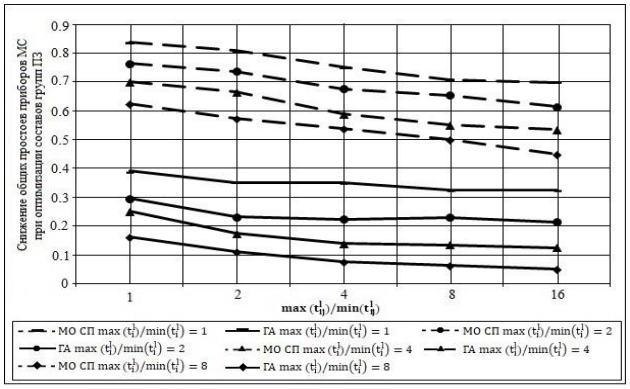


Рисунок 6.4 – Снижение суммарных простоев приборов КС при оптимизации составов групп ПЗ (n=5, L=5, $t^{z}=200$, Z=2)

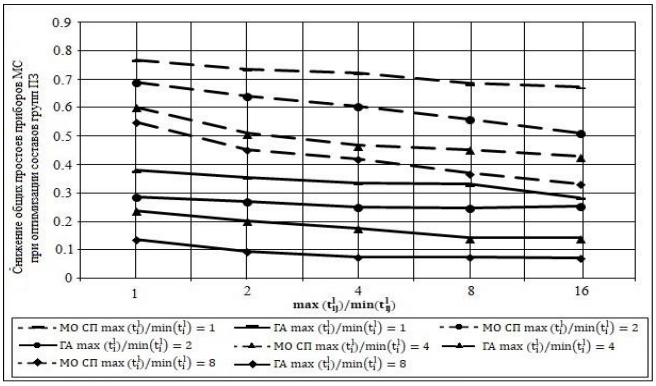


Рисунок 6.5 – Снижение суммарных простоев приборов КС при оптимизации составов групп ПЗ (n=5, L=5, $t^{z}=200$, Z=4)

Анализ результатов исследований метода оптимизации составов групп ПЗ позволил сформулировать следующие особенности формирования решений в соответствии с введенными в рассмотрение значениями параметров:

– при малых значениях отношений $max(t_{li})/min(t_{li})$ и $max(t_{ij}^{l})/min(t_{ij}^{l})$ (равных 1 и 2) метод оптимизации составов групп ПЗ позволяет получить решения, которые обеспечивают наиболее эффективное использование ограниченного ресурса времени функционирования КС;

– при малых значениях отношений $max(t_{li})/min(t_{li})$ и $max(t_{ij}^{l})/min(t_{ij}^{l})$ (равных 1 и 2) метод оптимизации составов групп ПЗ позволяет получить решения, которые обеспечивают наиболее эффективное использование ограниченного ресурса времени функционирования КС;

– при увеличении неоднородностей длительностей переналадок и длительностей выполнения заданий степень снижения суммарных простоев приборов в решениях, полученных с использованием рассмотренного метода, по сравнению с решениями, соответствующим фиксированным группам, уменьшается (уменьшение на 25-30% при увеличении $max(t_{li})/min(t_{li})$ от 1 до 8, уменьшение на 15-25 % при увеличении $max(t_{ij}^{l})/min(t_{ij}^{l})$ от 1 до 16);

– увеличение количества групп ПЗ обуславливает незначительное (10-15%) уменьшение значения $f_{эмосгп}$ (накапливается (суммируется) общая неэффективность использования ограниченного временного ресурса КС);

– увеличение длительностей интервалов функционирования КС обуславливает уменьшение значений $f_{эмосгп}$ на 5-8%; это связано с тем, что при увеличении длительностей интервалов большее количество ПЗ может быть размещено в группах для их выполнения.

Анализ результатов исследований показал, что при минимальных неоднородностях длительностей выполнения заданий на приборах КС и длительностей переналадок приборов степень снижения суммарных простоев приборов в решениях, полученных с использованием рассмотренного метода, по сравнению с решениями, соответствующими фиксированным группам пакетов, является максимальной. Степень снижения суммарных простоев приборов в решениях, полученных с использованием рассмотренного метода, по сравнению с решениями, соответствующими фиксированным группам, уменьшается при увеличении значений отношений $max(t_{li})/min(t_{li})$ и $max(t_{ij}^{l})/min(t_{ij}^{l})$. При этом увеличение неоднородности длительностей выполнения заданий разных типов на приборах КС влияет на уменьшение значения $f_{эмосгп}$ более значительно, чем увеличение неоднородностей длительностей переналадок приборов. Увеличение количества групп ПЗ (с $Z=2$ до $Z=4$) при прочих равных значениях параметров приводит к уменьшению степени снижения суммарных простоев приборов в решениях, полу-

ченных с использованием рассмотренного метода, по сравнению с решениями, соответствующими фиксированным группам пакетов, на 10% и более.

6.5. Математическое моделирование процессов выполнения пакетов заданий в конвейерных системах при ограничении на время функционирования и формировании комплектов. Модель иерархической игры оптимизации составов пакетов заданий, групп пакетов заданий и расписаний выполнения пакетов заданий, входящих в группы, в конвейерных системах

Решение задачи построения расписаний выполнения ПЗ в КС при ограничении на интервалы времени их функционирования и условии формирования комплектов результатов (КР) выполняется в составе трехуровневой системы оптимизации решений (по аналогии с разделом 6.1). Функционирование подсистем предполагает определение решений: по составам ПЗ, выполняемых в КС (первый уровень); по составам групп ПЗ, выполняемых в течение временных интервалов ограниченной длительности (второй уровень); по порядкам выполнения ПЗ на приборах КС – расписаниям выполнения пакетов, включенных в группы (третий уровень). Порядок формирования решений при построении расписаний аналогичен рассмотренному в разделе 6.1. При этом предусмотрен обмен решениями между уровнями: решение с вышестоящего уровня передается на нижестоящий для того, чтобы оно было использовано для формирования решения на этом уровне; решение с нижестоящего уровня передается на вышестоящий для того, чтобы с его использованием оценить оптимальность решения на вышестоящем уровне. Оптимизация расписаний выполнения ПЗ в КС, предусматривающая определение составов пакетов, составов групп пакетов, расписаний выполнения пакетов, включенных в группы, позволяет увеличить количество комплектов результатов, полученных после выполнения в КС ПЗ, включенных в группы, а также снизить количество заданий, выполняемых в составе пакетов, включенных в группы, но результаты которых не будут использованы при формировании комплектов. Это обеспечивает повышение производительности системы при выполнении ПЗ, а также увеличение эффективности использования ресурсов КС за счет уменьшения количества заданий, выполняемых в группах, результаты реализации действий с которыми не будут включены в комплекты. Решаемая задача является актуальной при планировании сменно-суточных заданий на обработку передаточных партий деталей в мелкосерийном производстве при условии, что выпускаемые детали вхолят в составы комплектов (Приложение 3).

С целью моделирования иерархических структур с определенным порядком формирования решений на их уровнях применена теория иерархических игр [89-99]. Игрок первого уровня (ведущий игрок) реализует формирование решений по составам ПЗ, игрок второго уровня –

по составам групп ПЗ, игрок третьего уровня– по расписаниям выполнения ПЗ, входящих в группы, в КС. Порядок взаимодействия игроков на уровнях иерархической игры, стратегии поведения игроков аналогичны рассмотренным в разделе 6.1.

Для построения математической модели процесса выполнения ПЗ в КС при наличии ограничения на длительности интервалов времени ее функционирования использованы обозначения, введенные в разделе 6.1. Решение по составам ПЗ имеет вид: *[M, A]*, решение по составам групп ПЗ имеет вид $[\{ N^z \mid z = \overline{1,Z} \}, Q]$, где состав групп ПЗ представляется множеством $\{ N^z \mid z = \overline{1,Z} \}$ кортежей вида: $N^z = \{[i, m_i^z, (A)_i^z]_k, \mid k = \overline{1,k_z} \}^z$ (где m_i^z – количество ПЗ *i*-го типа в группе N^z, $(A)_i^z$ – вектор, *h*-ый элемент которого соответствует составу одного из m_i^z ПЗ *i*-го типа) и множеством *Q*, введенным для ПЗ, не включенных в группы N^z ($z = \overline{1,Z}$) (*Q* – множество кортежей вида: $Q = \{[i, m_i^q, (A)_i^q]_k, \mid k = \overline{1,k_q} \}$, где m_i^q – количество ПЗ *i*-го типа, не включенных в группы N^z, вектор $(A)_i^q$ – составы этих пакетов). Расписание выполнения ПЗ, входящих в группы N^z ($z = \overline{1,Z}$) имеет вид: $\{[P^z, R^z, \{(T^{0l})^z \mid (l = \overline{1,L})\}] \mid z = \overline{1,Z})\}$, где P^z – матрицы порядка выполнения ПЗ групп N^z ($z = \overline{1,Z}$) на приборах КС, R^z – матрицы количества заданий *i*-х типов в ПЗ, включенных в группы N^z ($z = \overline{1,Z}$) и занимающих в последовательностях π^l их выполнения на приборах КС *j*-е позиции, $(T^{0l})^z$ – матрицы моментов времени начала выполнения *q*-х заданий в пакетах, включенных в группы N^z, занимающих *j*-е позиции в последовательностях π^l реализации действий с ними в КС ($z = \overline{1,Z}$, $l = \overline{1,L}$).

Для того, чтобы охарактеризовать ограниченные длительности временных интервалов функционирования КС в рассмотрение введено обозначение t^z ($z = \overline{1,Z}$). Также использованы обозначения параметров длительностей выполнения заданий $(t_{li})^z$ и длительностей переналадок приборов $(t_{ii'}^l)^z$, введенные в разделе 6.1. В соответствии с введенными в разделе 6.1 обозначениями $[t^{0l}_{n_p^z, n_{n_p^z}}]^z$ соответствует моменту времени начала выполнения последнего $n_{n_p^z}$ – го задания в n_p^z -м пакете (включенном в группу N^z, раздел 6.1) на последнем *L*-м приборе КС.

Тогда с использованием выражения $\left[[t^{0l}_{n_p^z, n_{n_p^z}}]^z + \sum_{h=1}^{k_z} [t_h^l]^z \cdot p^z_{h, n_p^z} \right]$ реализуется вычисление значения момента времени окончания выполнения ПЗ, включенных в группу N^z.

Для формализации модели выполнения ПЗ в КС при формировании комплектов использованы обозначения, аналогичные введенным в разделе 5.1: g – идентификатор типа комплекта, который формируется из результатов выполнения ПЗ в КС, $g^{ком}$ – общее количество типов комплектов, w_{ig} – количество результатов выполнения заданий i–го типа, которые должны входить в один комплект g–го типа, $n_g^{ком}$ – количество комплектов g-го типа ($g = \overline{1, g^{ком}}$), которые требуется сформировать из результатов выполнения ПЗ. Результаты выполнения заданий всех n типов входят в определенном количестве в составы комплектов каждого типа. Также использованы обозначения, введенные в разделе 5.2, для множеств и параметров, используемых при распределении результатов выполнения ПЗ в КС по комплектам: $K_y^{ком}$, $K_y^{ком\prime}$ – множества идентификаторов типов комплектов, упорядоченные в соответствии с рассматриваемым в разделе 5.2 способом (по сложности составов комплектов, $\left|K_y^{ком}\right| = \left|K_y^{ком\prime}\right| = g^{ком}$); p-позиция идентификатора g типа комплекта, на которой он размещается в множествах $K_y^{ком}$ и $K_y^{ком\prime}$; g_p – идентификатор типа комплекта в p-й позиции в $K_y^{ком}$ и $K_y^{ком\prime}$ ($p = \overline{1, g^{ком}}$).

В выполненной постановке задачи введено ограничение на длительность интервалов времени выполнения ПЗ, входящих в группы (в течение заданных временных интервалов t^z ($z = \overline{1, Z}$) функционирования КС). Не вошедшие в группы ПЗ не будут выполнены. Комплекты могут быть сформированы только из результатов выполнения ПЗ, включенных в соответствующие группы. Количество выполненных в течение интервалов t^z ($z = \overline{1, Z}$) заданий зависит от составов сформированных ПЗ. Оптимизация решений по составам ПЗ, составам группам ПЗ, расписаниям выполнения ПЗ из групп в КС с учетом ограничения на длительности интервалов t^z должна обеспечить формирование максимального количества комплектов результатов всех типов (внешняя цель функционирования системы).

Для того, чтобы охарактеризовать комплекты, сформированные из результатов выполнении заданий в пакетах, включенных в группы, использованы обозначения: n_g – количество комплектов g-го типа, которые будут сформированы из результатов выполнения ПЗ всех n ти-

пов ($i=\overline{1,n}$) в группах N^z ($z=\overline{1,Z}$), N_g – вектор количества сформированных из результатов выполнения ПЗ комплектов. Вектор N_g характеризует решение по составам групп N^z ($z=\overline{1,Z}$), он используется для оценки его оптимальности на втором уровне. Также на его основе реализуется оценка оптимальности решений по составам ПЗ на первом уровне. Поэтому он интерпретируется как параметр решения по составу групп N^z ($z=\overline{1,Z}$), используемый для оценки оптимальности решения *[M,A]* по составам ПЗ. По этой причине вектор N_g включен в состав решения по составам групп N^z ($z=\overline{1,Z}$), передаваемого на первый уровень. Решение по составам групп N^z ($z=\overline{1,Z}$) примет следующий вид: $[\{N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q,N_g]$.

Тогда в математической модели многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС в течение временных интервалов ограниченной длительности заданы следующие ее иерархически упорядоченные компоненты: состав ПЗ в виде *[M,A]*, состав групп ПЗ в виде $[\{N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q,N_g]$, расписания выполнения ПЗ из групп на приборах КС в виде $\{[P^z,R^z,\{(T^{0l})^z \mid (l=\overline{1,L})\}] \mid z=\overline{1,Z}\}$.

Внешней целью системы построения расписаний выполнения ПЗ в КС является синтез решений, соответствующих максимальному количеству сформированных комплектов. Общее количество сформированных комплектов результатов выполнения ПЗ в группах N^z ($z=\overline{1,Z}$) определяется следующим образом: $\sum_{g=1}^{g^{ком}} n_g$. Это выражение используется в качестве критерия оптимальности решений на первом уровне. Значение критерия, характеризующего решение *[M,A]*, определяется на основе решения $[\{N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q,N_g]^* \in N_2([M,A])$ по составам групп ПЗ, сформированного на его основе на втором уровне.

Выполнение ПЗ в течение интервалов t^z (в составе групп N^z ($z=\overline{1,Z}$)) должно обеспечивать наиболее полное использование ресурса времени функционирования КС. Для реализации внутренней цели функционирования системы требуется сформировать решение по составам групп N^z и множества Q (решение $[\{N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q,N_g] \in N_2([M,A])$), чтобы оно обеспечивало минимальное количество заданий, результаты выполнения которых не будут включены в комплекты. На втором уровне системы построения расписаний наряду с определением решений по составам групп ПЗ требуется выполнить распределение результатов по комплектам и формирование вектора N_g. Сформированные на первом уровне ПЗ должны быть

распределены по группам N^z ($z=\overline{1,Z}$) так, чтобы количество результатов, не включаемых в комплекты, было минимальным.

Через $[(a_h)_i^z]_k$ обозначен h-й элемент вектора $(A)_i^z$, являющегося компонентой k-го кортежа $[i,m_i^z,(A)_i^z]_k$, соответствующего составам ПЗ i-го типа, включенным в группу N^z, через $[m_i^z]_k$ – количество ПЗ i-го типа, определенное в k-м кортеже $[i,m_i^z,(A)_i^z]_k \in N^z$. Количество заданий i-го типа в пакетах, включенных в группу N^z, определяется выражением вида $\sum_{h=1}^{[m_i^z]_k}[(a_h)_i^z]_k$, а количество заданий разных i-ых типов в пакетах, включенных в группу N^z, будет вычислено выражением $\sum_{k=1}^{k_z}\sum_{h=1}^{m_i^z}[(a_h)_i^z]_k$. Общее количество заданий, которые будут выполнены в пакетах, включенных в группы N^z ($z=\overline{1,Z}$) в соответствии с решением $[\{N^z|(z=\overline{1,Z})\},Q,N_g]$, определяется выражением: $\sum_{z=1}^{Z}\sum_{k=1}^{k_z}\sum_{h=1}^{m_i^z}[(a_h)_i^z]_k$. Количество заданий разных типов, результаты выполнения которых будут использованы при формировании комплектов, определяется выражением $\sum_{g=1}^{g^{ком}}\sum_{i=1}^{n} n_g \cdot w_{ig}$. Тогда количество заданий, которые включены в пакеты и будут выполнены в группах N^z ($z=\overline{1,Z}$), но результаты выполнения которых не будут использованы при формировании комплектов, определяется выражением вида: $\sum_{z=1}^{Z}\sum_{k=1}^{k_z}\sum_{h=1}^{[m_i^z]_k}[(a_h)_i^z]_k - \sum_{g=1}^{g^{ком}}\sum_{i=1}^{n} n_g \cdot w_{ig}$. Это выражение используется в качестве критерия оптимальности решений по составам групп ПЗ на втором уровне игры.

Решение $[\{N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q]$ передается на третий уровень для построения на его основе расписания $\{[P^z,R^z,\{(T^{0l})^z \mid l=1,L\}] \mid z=\overline{1,Z}\}^* \in N_3([\{N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q])$ выполнения ПЗ из группы на приборах КС. Сформированное решение $\{[P^z,R^z,\{(T^{0l})^z \mid l=1,L\}] \mid z=\overline{1,Z}\}^*$ передается на второй уровень с целью интерпретации ограничения (6.11). В том случае, если для решения $\{[P^z,R^z,\{(T^{0l})^z \mid l=1,L\}] \mid z=\overline{1,Z}\}^*$ ограничение (6.11) выполняется, то рассматриваемое решение по составам групп $[\{N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q]$ является допустимым. Тогда построение «плотного» расписания выполнения ПЗ гарантирует размещение в группах N^z ($z=\overline{1,Z}$) большего количества ПЗ, из результатов выполнения которых формируются комплекты (дей-

ствия игрока третьего уровня являются благожелательными по отношению к игроку второго уровня). Оценка оптимальности решения $[\{ N^z \mid z=\overline{1,Z} \},Q,N_g]$ зависит от расписания $\{[P^z,R^z,\{(T^{0l})^z \mid l=1,L\}] \mid z=\overline{1,Z}\}^*$ выполнения ПЗ, входящих в группы N^z.

Построение расписаний выполнения ПЗ, входящих в группы N^z ($z=\overline{1,Z}$), реализуется на третьем уровне иерархии с учетом общих простоев приборов КС. Для решения задачи оптимизации порядка выполнения ПЗ на приборах КС применен критерий (6.10) (раздел 6.1), определяющий простои приборов, а также ограничение (6.11) на длительность реализации действий с заданиями в КС. Тогда математическая модель иерархической игры оптимизации расписаний процессов выполнения ПЗ в КС при ограниченных длительностях интервалов времени их функционирования и формирования комплектов имеет следующий вид:

1) первый уровень: $max\ f_1([M,A],[\{ N^z \mid (z=\overline{1,Z})\},Q,N_g]^*)$,

где $f_1 = \sum\limits_{g=1}^{g^{ком}} n_g$; (6.24)

2) второй уровень: $min\ f_2([\{ N^z \mid (z=\overline{1,Z})\},Q,N_g],\{[P^z,R^z,\{(T^{0l})^z \mid (l=\overline{1,L})\}] \mid z=\overline{1,Z})\}^*)$,

где $f_2 = \sum\limits_{z=1}^{Z}\sum\limits_{k=1}^{k_z}\sum\limits_{h=1}^{m_i^z}[(a_h)_i^z]_k - \sum\limits_{g=1}^{g^{ком}}\sum\limits_{i=1}^{n} n_g \cdot w_{ig}$; (6.25)

3) третий уровень: $min\ f_3^z(N^z,[P^z,R^z,\{(T^{0l})^z \mid l=\overline{1,L}\}])$ (при $z=\overline{1,Z}$),

где

$$f_3^z = \sum_{l=2}^{L}[t_{11}^{0l}]^z + \sum_{l=1}^{L}\sum_{j=2}^{n_p^z}\left[[t_{j1}^{0l}]^z - \left[[t_{j-1,n_{j-1}}^{0l}]^z + \sum_{h=1}^{k_z}[t_{lh}]^z \cdot p_{h,j-1}^z\right]\right] + \tag{6.26}$$

$$+ \sum_{l=2}^{L}\sum_{j=1}^{n_p^z}\sum_{q=2}^{n_j^z}\left[[t_{jq}^{0l}]^z - \left[[t_{j,q-1}^{0l}]^z + \sum_{h=1}^{k_z}[t_{lh}]^z \cdot p_{hj}^z\right]\right]\cdot$$

4) ограничение на длительность выполнения ПЗ в КС:

$$\max_{l=1,L}\left[[t^{0l}_{n_p^z,n_{n_p^z}}]^z + \sum_{h=1}^{k_z}[t_h^l]^z \cdot p^z_{h,n_p^z}\right] \le t^z \text{ при } z=\overline{1,Z}. \tag{6.27}$$

Критерий (6.24) оптимальности решений по составам ПЗ на верхнем уровне соответствует общему количеству комплектов, сформированных из выполняемых заданий, входящих в пакеты, включенные в группы N^z ($z=\overline{1,Z}$) (внешняя цель системы). Он характеризует выигрыш ведущего игрока при реализации иерархической игры. Критерий (6.25)оптимальности решений

по составам групп ПЗ N^z ($z=\overline{1,Z}$) на втором уровне соответствует общему количеству заданий, которые будут выполнены в КС в составе пакетов, включенных в группы N^z ($z=\overline{1,Z}$), но результаты которых не будут включены в комплекты (внутренняя цель системы). Критерий (6.26) на третьем уровне соответствует суммарным простоям приборов КС при выполнении ПЗ, включенных в группы N^z ($z=\overline{1,Z}$). Условия, ограничивающие множества N_1, $N_2([M,A])$, $N_3([\{N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q])$, аналогичны выражениям (6.12)-(6.16), введенным в разделе 6.1. Ограничения дополнены условием для количества комплектов каждого типа в виде: $n_g \le n_g^{ком}$ ($g=\overline{1,g^{ком}}$), интерпретируемом на втором уровне игры.

Задача оптимизации составов ПЗ, составов групп ПЗ и расписаний их выполнения в КС сформулирована следующим образом. Заданными являются: количество типов комплектов $g^{ком}$; количество комплектов каждого типа $n_g^{ком}$ ($g=\overline{1,g^{ком}}$); матрица *W* составов комплектов; количество *n* типов заданий, выполняемых в КС; матрица *T* длительностей выполнения заданий на *l*-х приборах КС ($l=\overline{1,L}$) (на ее основе формируются матрицы T^z ($z=\overline{1,Z}$) при включении пакетов заданий соответствующих типов в группы N^z); матрицы T^l ($l=\overline{1,L}$) длительностей переналадок приборов с выполнения заданий *i*-го типа на выполнение заданий *i'*-го типа (на их основе формируются матрицы переналадок $(T^l)^z$ ($z=\overline{1,Z}$) при включении ПЗ в группы N^z); количество интервалов времени Z функционирования КС, в течение которых выполняются ПЗ, длительности интервалов времени t^z ($z=\overline{1,Z}$). Требуется определить: составы ПЗ (решение *[M,A]*), составы групп N^z ПЗ выполняемых в течение интервалов времени t^z ($z=\overline{1,Z}$), состав множества *Q* ПЗ, не включенных в группы (решение $[\{N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q,N_g]$), расписания выполнения ПЗ, включенных в группы N^z ($z=\overline{1,Z}$), на приборах КС в виде решения $\{[P^z,R^z,\{(T^{0l})^z \mid l=1,L\}] \mid z=\overline{1,Z}\}$.

Взаимодействия игроков первого, второго и третьего уровней, а также ситуация равновесия в иерархической игре аналогичны рассмотренным в разделе 6.1. Результаты исследований по синтезу математической модели процессов выполнения ПЗ в КС при ограничении и формировании комплектов, модели иерархической игры оптимизации решений по составам ПЗ, составам групп ПЗ и расписаниям выполнения ПЗ в КС опубликованы в работах [143-147].

6.6. Метод распределения по комплектам результатов выполнения в конвейерных системах заданий из пакетов, включенных в группы

Распределение по комплектам результатов выполнения заданий, входящих в пакеты, включенные в группы, необходимо для оценки оптимальности решений по составам групп $[\{ N^z \mid z=\overline{1,Z} \},Q]$ (определяется вектор N_g количества комплектов, сформированных из результатов выполнения ПЗ, включенных в группы, который является параметром решения, передаваемого на первый уровень). При вычислении количества комплектов каждого типа, которые будут сформированы из результатов выполнения ПЗ, включенных в группы, используются: значения количества результатов выполнения заданий каждого i-го типа в пакетах, включенных в группы N^z ($z=\overline{1,Z}$), обозначенное как a_i^z ($i=\overline{1,n}$) и определяемое следующим образом: $a_i^z = \sum_{z=1}^{Z} \sum_{h=1}^{[m_i^z]_k} (a_h)_i^z$; множества $K_y^{ком}$ и $K_y^{ком'}$ идентификаторов типов комплектов; параметр st_g – количество полностью сформированных компонент в одном комплекте g-го типа; I_1^z, I_2^z – множество типов заданий, пакеты которых включены в группы N^z ($z=\overline{1,Z}$). Инициализация значений входных параметров алгоритма реализуется следующим образом: $I_2^z = I_1^z$, $K_y^{ком'} = K_y^{ком}$, $n_g = 0$ ($g=\overline{1,g^{ком}}$), $a_i^z = \sum_{z=1}^{Z} \sum_{h=1}^{[m_i^z]_k} (a_h)_i^z$ ($i=\overline{1,n}$). Входными данными для алгоритма является решение по составам групп N^z ($z=\overline{1,Z}$). Результатом является вектор N_g количества комплектов g-х типов ($g=\overline{1,g^{ком}}$), которые будут сформированы из результатов выполнения заданий в пакетах, включенных в группы N^z.

Алгоритм распределения результатов выполнения заданий в пакетах, включенных в группы N^z ($z=\overline{1,Z}$), по комплектам g-х типов имеет следующий порядок шагов:

1. Если $K_y^{ком'} \neq \varnothing$, то извлечь идентификатор типа комплекта: $g' = \min_p \{ g_p \mid g_p \in K_y^{ком'} \}$, $K_y^{ком'} = K_y^{ком'} \setminus \{ g' \}$, положить $st_{g'} = 0$. Если $K_y^{ком'} = \varnothing$, то перейти на пункт 6.

2. Если $I_2^z = \varnothing$, то перейти на пункт 5. Если $I_2^z \neq \varnothing$, то извлечь идентификатор типа результатов: $i' = \min\{ i \mid i \in I_2^z \}$, $I_2^z = I_2^z \setminus \{ i' \}$, перейти на пункт 3.

3. Если $a_{i'}^z \geq w_{i'g'}$, то $st_{g'} = st_{g'} + 1$. Если $I_2^z \neq \varnothing$, то перейти на пункт 2. Если $I_2^z = \varnothing$, то перейти на пункт 4. Если $a_{i'}^z < w_{i'g'}$, то $K_y^{ком} = K_y^{ком} \setminus \{g'\}$, перейти на пункт 5.

4. Модифицировать значение счетчика количества комплектов g'-го типа: $n_{g'} = n_{g'} + 1$. Если $n_{g'} = n_{g'}^{ком}$, то $K_y^{ком} = K_y^{ком} \setminus \{g'\}$. Модифицировать значения параметров a_i^z ($i = \overline{1,n}$) для всех n типов результатов: $a_i^z = a_i^z - w_{ig'}$ ($i = \overline{1,n}$). Положить $I_2^z = I_1^z$. Перейти на пункт 1.

5. Положить $I_2^z = I_1^z$, перейти на пункт 1.

6. Если $K_y^{ком} \neq \varnothing$, то $K_y^{ком\prime} = K_y^{ком}$, $I_2^z = I_1^z$. Перейти на пункт 1. Если $K_y^{ком} = \varnothing$, то перейти на пункт 7.

7. Останов алгоритма.

В результате реализации алгоритма будут получены значения n_g элементов вектора N_g, каждое из которых соответствует количеству комплектов g-го типа, сформированных из результатов выполнения ПЗ в группах, а также значения $a_i^z \geq 0$ ($i = \overline{1,n}$), соответствующие количеству результатов каждого типа, не включенных в комплекты (если результаты выполнения заданий i-го типа использованы не полностью при формировании комплектов, то $a_i^z > 0$). Оптимизация решений по составам групп N^z ($z = \overline{1,Z}$) предусматривает исключение из групп ПЗ, результаты выполнения которых не используются при формировании комплектов (при $a_i^z > 0$) и размещение в группах ПЗ из множества Q. Таким образом, с целью оптимизации составов групп N^z ($z = \overline{1,Z}$) в каждой из них выделяются пакеты разных типов (индекс пакета $h = \overline{1,m_i^z}$), дли которых разности $((a_h)_i^z - a_i^z) > 0$ являются минимальными (где $(a_h)_i^z$ – элемент вектора $(A)_i^z$ ($h = \overline{1,m_i^z}$), входящего в кортеж $[i, m_i^z, (A)_i^z]_k \in N^z$, соответствующего составам ПЗ i-го типа в группе N^z).

6.7. Метод оптимизации составов групп пакетов заданий, выполняемых в конвейерных системах, с учетом формирования комплектов результатов

Решение задачи построения расписаний выполнения ПЗ в КС при ограничении на длительности интервалов времени их функционирования предусматривает оптимизацию составов ПЗ (первый уровень), составов групп ПЗ (второй уровень), расписаний выполнения ПЗ каждой

из групп (третий уровень). Определение составов ПЗ предполагает использование метода оптимизации, рассмотренного в разделе 4.2. Оптимизация расписаний выполнения ПЗ в КС реализуется с привлечением метода, рассмотренного в разделе 6.3. В соответствии с постановкой задачи синтезирован метод локальной оптимизации групп ПЗ, выполняемых в течении интервалов времени t^z ($z = \overline{1,Z}$) при условии формирования комплектов.

Для построения метода определения локально оптимальных решений по составам групп ПЗ, выполняемых в течение интервалов t^z ($z = \overline{1,Z}$), требуется сформулировать: алгоритм формирования начального решений по составам групп; алгоритм оптимизации решений по составам групп. Добавление ПЗ *i*-го типа в группу N^z предусматривает модификацию значений параметров m_i^z (увеличение значения) и $(A)_i^z$ (инициализацию элемента $(a_{m_i^z})_i^z$) вектора $(A)_i^z$ в кортеже $[i, m_i^z, (A)_i^z]_k \in N^z$ для *i*-го типа заданий). Если для *i*-го типа заданий отсутствует кортеж вида $[i, m_i^z, (A)_i^z]_k$, то реализуется его формирование, инициализация значений его параметров и добавление кортежа в множество N^z, соответствующее составу группы. Исключение ПЗ *i*-го типа из группы N^z в случае не выполнения ограничения (6.11) предусматривает уменьшение значения параметра m_i^z в кортеже $[i, m_i^z, (A)_i^z] \in N^z$. Добавление ПЗ *i*-го типа в множество *Q* предусматривает модификацию значений параметров m_i^q (увеличение значения) и $(A)_i^q$ (инициализация элемента $(a_{m_i^q})_i^q$) вектора $(A)_i^q$ в кортеже $[i, m_i^q, (A)_i^q] \in Q$). Синтезированный метод построения начальных решений, являясь модификацией метода, рассмотренного в разделе 6.2, предусматривает добавление по одному пакету каждого типа в группы N^z (при выполнении условия (6.11)). Тем самым обеспечивается возможность формирования большего количества комплектов (обеспечивается оперативность их формирования). Алгоритм построения начального решения по составам групп рассмотрен в [145].

Оптимизация составов групп ПЗ предполагает определение для каждого пакета заданий *i*-го типа, включенного в рассматриваемую группу N^z, отклонения количества заданий $(a_h)_i^z$ ($h = \overline{1, m_i^z}$) в нем от значения a_i^z, полученного после распределения результатов их (заданий) выполнения в КС по комплектам. Среди всех пакетов заданий рассматриваемого *i*-го типа в группе N^z выбирается пакет, отклонение количества заданий $(a_h)_i^z$ в котором от значения $a_i^z > 0$ будет минимальным (при $(a_h)_i^z \geq a_i^z$). Для минимального отклонения количества зада-

ний $(a_h)_i^z$ $(h=\overline{1,m_i^z})$ в пакетах i-го типа от значения a_i^z введено обозначение mh_i^z. Значение mh_i^z определяется следующим образом: $mh_i^z = \min\limits_{1\le h\le m_i^z}((a_h)_i^z - a_i^z)$ $(((a_h)_i^z - a_i^z)\ge 0)$.

Для синтеза алгоритма оптимизации групп ПЗ выполнены следующие рассуждения:

– для каждого сформированного решения по составам групп N^z $(z=\overline{1,Z})$ реализуется распределение результатов выполнения ПЗ по комплектам;

– при распределении результатов по комплектам используются значения a_i^z $(i=\overline{1,n})$, соответствующие количеству заданий i-ых типов в пакетах, включенных в группы N^z;

– после распределения результатов выполнения ПЗ по комплектам получены значения n_g количества сформированных комплектов g-х типов и значения $a_i^z \ge 0$ $(i=\overline{1,n})$; если $a_i^z > 0$, то не все результаты выполнения ПЗ в группах N^z распределены по комплектам;

– для каждого i-го типа заданий, пакеты которых включены в группу N^z, реализуется проверка условия $a_i^z > 0$; в случае его выполнения в этой группе N^z реализуется выбор пакета этого типа с идентификатором h_i^z, для которого отклонение количества заданий в нем от значения $a_i^z > 0$ будет минимальным (соответствует mh_i^z при $((a_h)_i^z - a_i^z)\ge 0$);

– определенный таким образом h_i^z-й ПЗ i-го типа исключается из рассматриваемой группы N^z, вместо него в эту группу добавляются пакеты разных типов, не включенные в группы N^z $(z=\overline{1,Z})$ (из множества Q); среди добавляемых в группу N^z пакетов выбирается тот, включение которого в N^z обеспечивает формирование решения, характеризующегося уменьшением значения критерия $f_2(\cdot)$ в максимальной степени;

– действия, связанные с исключением пакетов из рассматриваемой группы N^z и добавлением пакетов из множества Q, повторяются для всех i-х типов заданий, для которых $a_i^z > 0$; для рассматриваемой группы фиксируются параметры исключаемого из нее и добавляемого в нее пакетов, действия с которыми позволяют получить решение, характеризуемое уменьшением значения критерия $f_2(\cdot)$ в максимальной степени;

– действия, связанные с исключением ПЗ i-х типов $(i=\overline{1,n})$ и добавлением пакетов из множества Q, повторяются для каждой группы N^z $(z=\overline{1,Z})$; среди решений по составам

групп N^z $(z=\overline{1,Z})$ в качестве локально оптимального фиксируется то решение, которое характеризуется уменьшением значения критерия $f_2(\cdot)$ в максимальной степени.

При оптимизации решений $([\{N^z|(z=\overline{1,Z})\},Q,N_g])$ использованы следующие обозначения: z' – номер группы ПЗ, состав которой изменяется на текущем шаге алгоритма оптимизации решений; i' – идентификатор типа заданий, действия с пакетами которых в группе $N^{z'}$ выполняются на текущей итерации алгоритма оптимизации; I_1^z, I_2^z $(z=\overline{1,Z})$ – множества типов заданий, пакеты которых размещены в каждой из групп N^z $(z=\overline{1,Z})$; I_1^q, I_2^q – множества типов заданий, пакеты которых размещены в множестве Q; N_{1T}^z – промежуточное решение по составу группы N^z, формируемое посредством исключения из нее $h_{i'}^z$-го пакета рассматриваемого i'-го типа, который характеризуется минимальным значением $mh_{i'}^z$ отклонения количества заданий в нем от значения $a_i^z>0$; N_{2T}^z – промежуточное решение по составу группы N^z, формируемое путем добавления в решение N_{1T}^z ПЗ различных типов, которые не включены в группы N^z $(z=\overline{1,Z})$ (из множества Q); h_{i^q} – номер ПЗ i-го типа, который не вошел в состав ни одной группы N^z $(z=\overline{1,Z})$ (включен в состав множество Q); H_{i^q}, $H_{i^q}^T$ – множества номеров h_{i^q} пакетов i-х типов, которые включены в множество Q; $(\nabla^- f_2)^z$ $(z=\overline{1,Z})$ – значение левого дискретного градиента критерия $f_2(\cdot)$, характеризующее лучшее решение по составу рассматриваемой группы N^z; $(\nabla^- f_2)_G$ – значение левого дискретного градиента критерия $f_2(\cdot)$, характеризующее лучшее решение среди всех групп N^z $(z=\overline{1,Z})$ (лучшее «глобальное» решение среди всех групп N^z $(z=\overline{1,Z})$); i^z, a^z $(z=\overline{1,Z})$ – переменные, предназначенные для хранения идентификатора типа заданий и количества заданий в пакете, исключение которого из группы N^z и добавление в эту группу пакетов из Q позволяет получить решение, являющееся лучшим среди всех решений для рассматриваемой группы N^z; i^{qz}, a^{qz} – переменные, предназначенные для хранения идентификатора типа заданий и количества заданий в пакете, добавление которого в группу N^z из множества Q позволяет получить решение, являющееся лучшим среди всех решений для рассматриваемой группы N^z; i_G^z,

a_G^z, i_G^q, a_G^q – переменные, предназначенные для хранения идентификаторов типов заданий и количества заданий в пакете, исключаемом из группы N^z, и пакете, добавляемый в группу N^z из множества Q, обмен которыми между этой группой и множеством Q гарантирует лучшее решение среди всех решений по составам групп N^z ($z = \overline{1,Z}$); p^z – переменная, единичное значение которой указывает на наличие в окрестности текущего локально оптимального решения лучшего решения, *z1*– переменная, предназначенная для буферизации номера группы, обмен пакетами между которой и множеством Q гарантирует лучшее решение среди групп N^z ($z = \overline{1,Z}$).

В качестве входных данных для алгоритма оптимизации используется начальное решение по составам групп N^z ($z = \overline{1,Z}$) и составу множества Q. Инициализация значений входных параметров алгоритма оптимизации составов групп ПЗ реализована следующим образом:

– для каждой группы N^z ($z = \overline{1,Z}$) задать значения элементов множеств I_1^z, I_2^z ($z = \overline{1,Z}$) следующим образом: $I_1^z = \{ i_1^z, i_2^z, .., i_{k_z}^z \}$ при $i_k^z = i$, где i такой, что $[i, m_i^z, (A)_i^z]_k \in N^z$ ($k = \overline{1,k_z}$); $I_2^z = I_1^z$;

– для множества Q задать значения элементов множества I_1^q и I_2^q следующим образом: $I_1^q = \{ i_1^q, i_2^q, .., i_{k_q}^q \}$ при $i_k^q = i$, где i такой, что $[i, m_i^q, (A)_i^q]_k \in Q$ ($k = \overline{1,k_q}$); $I_2^q = I_1^q$;

– для каждого k-го набора $[i, m_i^q, (A)_i^q]_k \in Q$ ($k = \overline{1,k_q}$) задать значения элементов h_{i^q} множеств H_{i^q} и $H_{i^q}^T$: $H_{i^q} = \{1,2,..,m_i^q\}$ (задать идентификаторы ПЗ); $H_{i^q}^T = H_{i^q}$;

– задать значения $(\nabla^- f_2)^z = 0$ ($z = \overline{1,Z}$) и $(\nabla^- f_2)_G = 0$; задать значение ε.

Последовательность шагов алгоритма оптимизации групп $N^z (z = \overline{1,Z})$ на основе начального решения по их составу имеет следующий вид:

1. Задать номер z' текущей рассматриваемой группы $N^{z'}$ следующим образом: $z' = 1$. Инициализировать множество $N_{1T}^{z'}$: $N_{1T}^{z'} = N^{z'}$.

2. Если $I_2^{z'} \neq \varnothing$, то извлечь из множества $I_2^{z'}$ типов заданий идентификатор i': $i' = min\{ i \mid i \in I_2^{z'} \}$; $I_2^z = I_2^z \setminus \{ i' \}$. Положить $p^{z'} = 0$. Перейти на пункт 3. Если $I_2^{z'} = \varnothing$, то перейти на пункт 11.

3.Для i'-го типа заданий в множестве $N^{z'}$ определить кортеж $[i', m_{i'}^{z'}, (A)_{i'}^{z'}]_k \in N^{z'}$. Если $a_{i'}^{z'} > 0$, то в векторе $(A)_{i'}^{z'}$ кортежа $[i', m_{i'}^{z'}, (A)_{i'}^{z'}]_k \in N^{z'}$ определить идентификатор h элемента $(a_h)_{i'}^{z'}$, для которого $mh_i^z = \min\limits_{1 \le h \le m_{i'}^{z'}} ((a_h)_{i'}^{z'} - a_{i'}^z)$ (при $((a_h)_{i'}^{z'} - a_{i'}^z) \ge 0$). Задать значение параметра $h_{i'}^{z'} = h$. Перейти на пункт 4. Если все элементы $(a_h)_{i'}^{z'}$ вектора $(A)_{i'}^{z'}$ такие, что $((a_h)_i^z - a_i^z) < 0$, то перейти на пункт 2. Если $a_{i'}^{z'} = 0$, то перейти на пункт 2. Если для i'-го типа заданий не существует кортежа $[i', m_{i'}^{z'}, (A)_{i'}^{z'}]_k \in N^{z'}$, то перейти на пункт 2.

4. Сформировать промежуточное решение $N_{1T}^{z'}$ (множество кортежей) путем исключения $h_{i'}^{z'}$-го элемента $(a_{h_{i'}^{z'}})_{i'}^{z'}$ из вектора $(A)_{i'}^{z'}$ в кортеже $[i', m_{i'}^{z'}, (A)_{i'}^{z'}] \in N_{1T}^{z'}$: $(a_h)_{i'}^{z'} = (a_{h+1})_{i'}^{z'}$ при $h = \overline{h_{i'}^{z'}, m_{i'}^{z'} - 1}$; $m_{i'}^{z'} = m_{i'}^{z'} - 1$; если $m_{i'}^{z'} = 0$, то $N_{1T}^{z'} = N_{1T}^{z'} \setminus \{[i', m_{i'}^{z'}, (A)_{i'}^{z'}]\}$; $k_{z'} = k_{z'} - 1$.

5. Извлечь из I_2^q элемент, соответствующий типу ПЗ в множестве Q (ПЗ, размещаемый в группе $N^{z'}$, вместо исключенного ПЗ i'-го типа): $i^q = min\{i \mid i \in I_2^q\}$, $I_2^q = I_2^q \setminus \{i^q\}$.

6. Извлечь из множества $H_{i^q}^T$ идентификатор ПЗ, который добавляется в группу $N^{z'}$: $h'_{i^q} = min\{h_{i^q} \mid h_{i^q} \in H_{i^q}^T\}$, $H_{i^q}^T = H_{i^q}^T \setminus \{h'_{i^q}\}$.

7. Инициализировать $N_{2T}^{z'} = N_{1T}^{z'}$. Сформировать решение $N_{2T}^{z'}$ по составу группы $N^{z'}$:

– если при $i = i^q$ выполняется $[i, m_i^{z'}, (A)_i^{z'}]_k \in N_{2T}^{z'}$ ($k = \overline{1, k_{z'}}$), то $m_i^{z'} = m_i^{z'} + 1$; $(a_{m_i^{z'}})_i^{z'} = (a_{h'_{i^q}})_{i^q}^q$;

– если не существует i такого, что при $i = i^q$ выполняется $[i, m_i^{z'}, (A)_i^{z'}]_k \in N_{2T}^{z'}$ ($k = \overline{1, k_{z'}}$), то $i = i^q$; $m_i^{z'} = 1$; $(a_{m_i^{z'}})_i^{z'} = (a_{h'_{i^q}})_{i^q}^q$; $k_{z'} = k_{z'} + 1$; $k = k_{z'}$; $N_{2T}^{z'} = N_{2T}^{z'} \cup \{[i, m_i^{z'}, (A)_i^{z'}]_k\}$.

8. Передать сформированное решение $N_{2T}^{z'}$ по составу группы $N^{z'}$ (множество кортежей $N_{2T}^{z'}$) в алгоритм формирования расписаний выполнения ПЗ в КС (на третьем уровне). Получить сформированное решение $[P^z, R^z, \{(T^{0l})^z \mid (l = \overline{1, L})\}]^*$. В случае выполнения ограничения (6.11) реализовать процедуру формирования комплектов из результатов выполнения ПЗ в

группах N^z $(z=\overline{1,Z})$. Определить значение критерия $f_2(\cdot)$, значение левого $(\nabla^- f_2)<0$ либо правого $(\nabla^+ f_2 \geq 0)$ дискретных градиентов критерия. Сравнить значения $(\nabla^- f_2)$ и $(\nabla^- f_2)^{z'}$: если $(\nabla^- f_2)\geq(\nabla^- f_2)^{z'}$, то перейти на пункт 9; если $(\nabla^- f_2)<(\nabla^- f_2)^{z'}$, то сохранить значения параметров, характеризующих добавляемый в группу пакет: $i^{qz}=i^q$, $a^{qz}=(a_{h'_{i^q}})_i^q$, $(\nabla^- f_2)^{z'}=(\nabla^- f_2)$, $p^{z'}=1$.

9. Если $H_{i^q}^T \neq \varnothing$, то перейти на пункт 6. Если $H_{i^q}^T=\varnothing$, то проверить условие $I_2^q=\varnothing$. Если $I_2^q=\varnothing$, то перейти на пункт 10. Если $I_2^q\neq\varnothing$, то перейти на пункт 5.

10. Если $p^{z'}\neq 0$, то сохранить значения параметров исключаемого из группы $N^{z'}$ пакета: $i^{z'}=i'$; $a^{z'}=(a_{h_{i'}^{z'}})_{i'}^{z'}$. Если $I_2^{z'}\neq\varnothing$, то $I_2^q=I_1^q$, для всех $i^q\in I_1^q$ положить $H_{i^q}^T=H_{i^q}$, $p^{z'}=0$, перейти на пункт 2. Если $I_2^{z'}=\varnothing$, то перейти на пункт 11. Если $p^{z'}=0$ и $I_2^{z'}\neq\varnothing$, то положить $I_2^q=I_1^q$, для всех $i^q\in I_1^q$ положить $H_{i^q}^T=H_{i^q}$, перейти на пункт 2. Если $p^{z'}=0$ и $I_2^{z'}=\varnothing$, то перейти на пункт 11;

11. Выполнить сравнение значения $(\nabla^- f_2)^{z'}$ для рассматриваемой группы $N^{z'}$ и значения $(\nabla^- f_2)_G$. Если $(\nabla^- f_2)^{z'}<(\nabla^- f_2)_G$, то сохранить значения параметров исключаемого из группы $N^{z'}$ пакета и добавляемого в группу $N^{z'}$ пакета: $i_G^z=i^{z'}$, $a_G^z=a^{z'}$, $i_G^q=i^{qz}$, $a_G^q=a^{qz}$, *z1=z'*. Модифицировать номер *z'* группы ПЗ: *z'=z'+1*. Если $z'\leq Z$, то положить $(\nabla^- f_2)^{z'}=0$. Перейти на пункт 2. Если $z'>Z$, то перейти на пункт 12. Если $(\nabla^- f_2)^{z'}\geq(\nabla^- f_2)_G$, то $(\nabla^- f_2)^{z'}=0$, модифицировать номер *z'* : *z'=z'+1*. Если $z'\leq Z$, перейти на пункт 2. Если $z'>Z$,то перейти на пункт 12.

12. Если $\left|(\nabla^- f_2)_G\right|<\varepsilon$, то перейти на пункт 13 (где $|\cdot|$ – модуль $(\nabla^- f_2)$). Если $\left|(\nabla^- f_2)_G\right|\geq\varepsilon$, то сформировать новые составы: множества N^z (где *z=z1*) кортежей вида $[i,m_i^z,(A)_i^z]\in N^z$, множества *Q* кортежей вида $[i,m_i^q,(A)_i^q]_k\in Q$ (сформировать локально оптимальное решение по составам групп ПЗ (состав группы N^z, для которой *z=z1*)):

– для $i = i_G^z$ определить кортеж $[i, m_i^z, (A)_i^z] \in N^z$; в векторе $(A)_i^z$ определить индекс h' элемента, для которого $(a_{h'})_i^z = a_G^z$; исключить h'-й элемент из вектора $(A)_i^z$: $(a_h)_i^z = (a_{h+1})_i^z$ при $h = \overline{h', m_i^z - 1}$; $m_i^z = m_i^z - 1$; если $m_i^z = 0$, то $N^z = N^z \setminus \{[i, m_i^z, (A)_i^z]\}$; $k_z = k_z - 1$; $I_1^z = I_1^z \setminus \{i_G^z\}$.

– если при $i = i_G^z$ выполняется $[i, m_i^q, (A)_i^q]_k \in Q$ ($k = \overline{1, k_q}$), то $m_i^q = m_i^q + 1; (a_{m_i^q})_i^q = a_G^z$;

– если не существует i, что при $i = i_G^z$ выполняется $[i, m_i^q, (A)_i^q]_k \in Q$ ($k = \overline{1, k_q}$), то $i = i_G^z; m_i^q = 1; (a_{m_i^q})_i^q = a_G^z; k_q = k_q + 1;\ k = k_q;\ Q = Q \cup \{[i, m_i^q, (A)_i^q]_k\};\ I_1^q = I_1^q \cup \{i_G^z\}$;

– если при $i = i_G^q$ выполняется $[i, m_i^z, (A)_i^z]_k \in N^z$ ($k = \overline{1, k_z}$), то $m_i^z = m_i^z + 1$; $(a_{m_i^z})_i^z = a_G^q$;

– если не существует i, что при $i = i_G^q$ выполняется $[i, m_i^z, (A)_i^z]_k \in N^z$ ($k = \overline{1, k_z}$), то $i = i_G^q; m_i^z = 1; (a_{m_i^z})_i^z = a_G^q; k_z = k_z + 1; k = k_z; N^z = N^z \cup \{[i, m_i^z, (A)_i^z]_k\};\ I_1^z = I_1^z \cup \{i_G^q\}$;

– для $i = i_G^q$ определить кортеж $[i, m_i^q, (A)_i^q] \in Q$; в векторе $(A)_i^q$ определить индекс h' элемента, для которого $(a_{h'})_i^q = a_G^q$; исключить h'-ый элемент из вектора $(A)_i^q$: $(a_h)_i^q = (a_{h+1})_i^q$ при $h = \overline{h', m_i^q - 1}$; $m_i^q = m_i^q - 1$; если $m_i^q = 0$, то $Q = Q \setminus \{[i, m_i^q, (A)_i^q]\}; I_1^q = I_1^q \setminus \{i_G^q\};\ k_q = k_q - 1$.

– для каждого k-го кортежа $[i, m_i^q, (A)_i^q]_k \in Q$ ($k = \overline{1, k_q}$) задать значения элементов h_{i^q} множеств H_{i^q} и $H_{i^q}^T$: $H_{i^q} = \{1, 2, .., m_i^q\}$, $H_{i^q}^T = H_{i^q}$. Выполнить инициализацию $I_2^z = I_1^z$; $I_2^q = I_1^q$. Задать значения $(\nabla^- f_2)^z = 0$ ($z = \overline{1, Z}$); $(\nabla^- f_2)_G = 0$. Перейти на пункт 1.

13. Останов алгоритма.

Результаты исследований по синтезу метода оптимизации составов групп ПЗ, выполняемых в КС в течение временных интервалов ограниченной длительности, учитывающего условие формирования комплектов результатов, опубликованы в работах [145,146]. Определение порядков выполнения ПЗ, входящих в группы N^z ($z = \overline{1, Z}$), на приборах КС осуществляется с использованием метода оптимизации расписаний, рассмотренного в разделе 6.3.

6.8. Анализ результатов исследований метода оптимизации составов групп пакетов заданий, выполняемых в конвейерных системах при ограничении на длительности интервалов времени функционирования и формировании комплектов

Целью исследования эффективности применения метода построения расписаний процессов выполнения ПЗ в КС при формировании комплектов и ограничении на длительность интервалов времени функционирования системы является определение степени увеличения количества формируемых комплектов при использовании метода оптимизации составов групп ПЗ по сравнению с фиксированными группами (составы групп формируются с использованием метода построения начальных решений). В качестве результатов исследования получены зависимости значения отношения $f_{эмосгп} = (f_1^{мосгп} - f_1^{фикс}) / f_1^{фикс}$ от входных параметров задачи ($f_{эмосгп}$– степень увеличения количества комплектов при использовании рассмотренного метода оптимизации групп ПЗ по сравнению с фиксированными группами, $f_1^{фикс}$ – значение критерия $f_1(\cdot)$ при условии, что составы групп ПЗ не оптимизируются, $f_1^{мосгп}$ – значение критерия $f_1(\cdot)$ при условии, что решения по составам групп ПЗ оптимизируются с использованием рассмотренного метода). Исследования проводились при задании параметров, введенных в рассмотрение в главах 4, 5 и разделе 6.4. Значения $max(t_{ii'}^{l}) / min(t_{ii'}^{l})$ задавались равными 1, 2, 4, 8; значения $max(t_{li}) / min(t_{li})$ – равными 1, 2, 4; значения $max(w_{ig}) / min(w_{ig'})$ – равными 1, 2, 4. Исследования выполнялись при значениях параметра $n_g^{ком}$, равных 4 и 8, параметра $g^{ком}$ равного 4. При $n_g^{ком} = 4$ длительности интервалов времени t^z ($z = \overline{1,3}$) задавались равными 100, при $n_g^{ком} = 8$ длительности интервалов t^z ($z = \overline{1,3}$) задавались равными 200. Формировались решения: фиксированные группы ПЗ (начальные решения по составам групп ПЗ); оптимизированные составы групп ПЗ. Зависимости значений $f_{эмосгп}$ от входных параметров задачи ($n=5$, $L=5$, $t^z = 100$ при $n_g^{ком} = 4$, $t^z = 200$ при $n_g^{ком} = 8$, $Z=3$) в сравнении с ГА представлены на рисунках 6.6-6.11 (МО СГП– метод оптимизации составов групп пакетов). Анализ результатов исследований позволил сформулировать следующие особенности применения метода оптимизации составов групп ПЗ:

– увеличение неоднородности длительностей выполнения заданий (значений $max(t_{li}) / min(t_{li})$) обуславливает рост количества формируемых комплектов при оптимизации составов групп по сравнению с фиксированными группами (увеличение на 20- 40%);

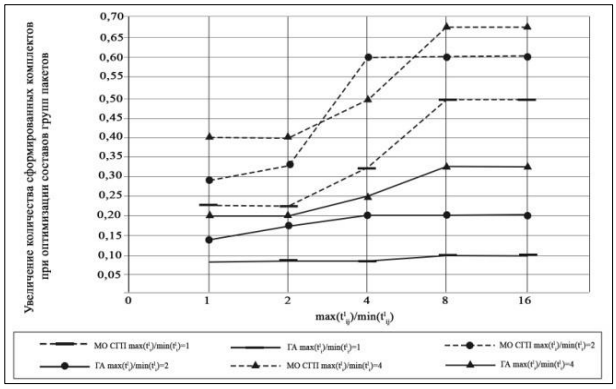


Рисунок 6.6 – Увеличение количества комплектов при оптимизации групп ПЗ ($n_g^{ком}=4$, $t^z=100$, $Z=3$, $max(w_{ig})/min(w_{ig'})=1$)

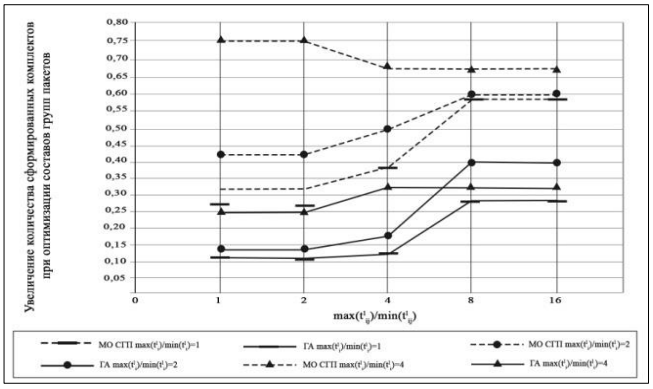


Рисунок 6.7 – Увеличение количества комплектов при оптимизации групп ПЗ ($n_g^{ком}=4$, $t^z=100$, $Z=3$, $max(w_{ig})/min(w_{ig'})=2$)

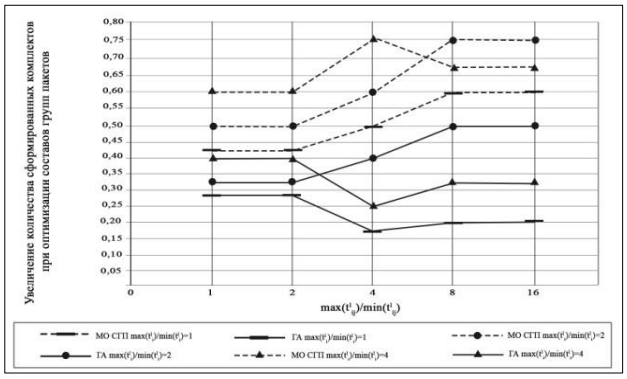


Рисунок 6.8– Увеличение количества комплектов при оптимизации групп ПЗ ($n_g^{ком}=4$, $t^z=100$, $Z=3$, $max(w_{ig})/min(w_{ig'})=4$)

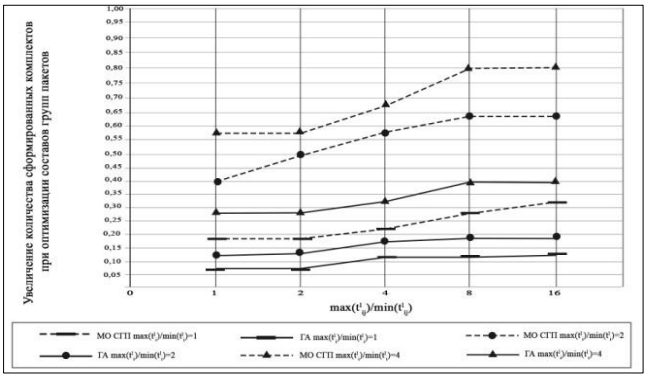


Рисунок 6.9 – Увеличение количества комплектов при оптимизации групп ПЗ ($n_g^{ком}=8$, $t^z=200$, Z=3, $max(w_{ig})/min(w_{ig'})=1$)

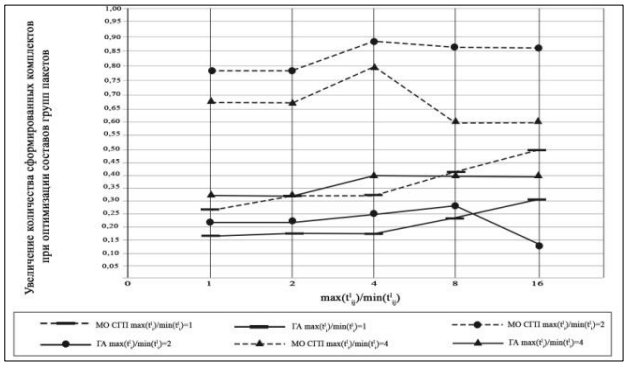


Рисунок 6.10 – Увеличение количества комплектов при оптимизации групп ПЗ ($n_g^{ком}=8$, $t^z=200$, Z=3, $max(w_{ig})/min(w_{ig'})=1$)

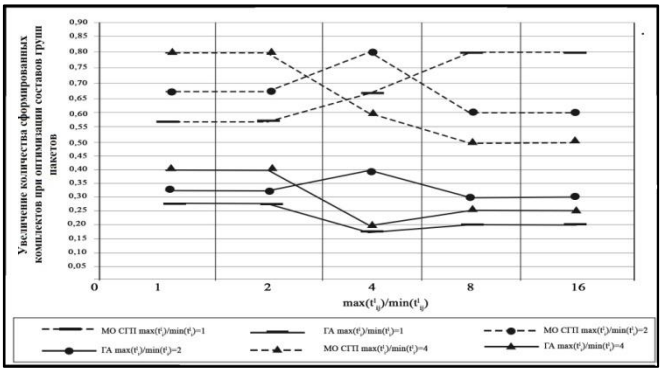


Рисунок 6.11 – Увеличение количества комплектов при оптимизации групп ПЗ ($n_g^{ком}=8$, $t^z=200$, Z=3, $max(w_{ig})/min(w_{ig'})=1$)

– при малой неоднородности составов комплектов ($max(w_{ig})/min(w_{ig'})=1$), при малой неоднородности длительностей выполнения заданий ($max(t_{li})/min(t_{li})$ равны 1,2) увеличение неоднородности длительностей переналадок приборов (значений $max(t^l_{ii'})/min(t^l_{ii'})$) обуслав-

ливает рост количества формируемых комплектов при оптимизации составов групп по сравнению с фиксированными группами (увеличение на 20-30%);

–при увеличении неоднородности составов комплектов ($max(w_{ig})/min(w_{ig'})$ равны 2,4), при значительной неоднородности длительностей выполнения заданий ($max(t_{li})/min(t_{li})=4$) увеличение неоднородностей длительностей переналадок приборов (значений $max(t^{l}_{ii'})/min(t^{l}_{ii'})$) обуславливает меньшее увеличение количества формируемых комплектов, то есть при малых значения $max(t^{l}_{ii'})/min(t^{l}_{ii'})$ увеличение количества формируемых комплектов значительно и увеличение количества комплектов менее значительно при росте $max(t^{l}_{ii'})/min(t^{l}_{ii'})$;

– при увеличении неоднородности составов комплектов (при одинаковых значениях других входных параметров задачи) оптимизация составов групп ПЗ позволяет значительно увеличить количество формируемых комплектов (рост значений $f_{эмосгп}$ составляет до 15 %).

Вычислительная сложность алгоритма оптимизации составов групп ПЗ определена как $O(n \cdot n^{i} \cdot Z)$ (по аналогии с разделом 6.4). Рассматриваемый подход позволяет реализовать совместную оптимизацию решений по составам ПЗ, составам групп ПЗ и расписаниям выполнения ПЗ из групп в КС на уровнях иерархии системы построения расписаний с применением теории иерархических игр. Рассмотренный метод локальной оптимизации решений по составам групп ПЗ обеспечивает повышение производительности функционирования КС (увеличение количества сформированных комплектов при его использовании по сравнению с фиксированными составам групп ПЗ составляет в среднем 40%).

6.9. Особенности методов математического моделирования многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС и построения расписаний выполнения ЕЗ и ПЗ в КС

Метод математического моделирования многостадийных процессов выполнения ПЗ в МС предполагает синтез компонент моделей указанных процессов, которые являются иерархически упорядоченными и взаимосвязанными. В зависимости от количества уровней, на которых в результате декомпозиции обобщенной функции системы определены ее подфункции (решаемые ею подзадачи), идентифицируется количество компонент, входящих в математическую модель соответствующего процесса выполнения ПЗ в КС. То есть некоторая компонента математической модели процесса выполнения ПЗ в КС соответствует определенной подзадаче, закрепленной за уровнем иерархии в системе. В этой подзадаче реализуются действия, связанные с соответствующей ей компонентой модели. Тогда для решения задачи построения расписаний

выполнения ПЗ в КС сформирована двух компонентная модель рассматриваемого многостадийного процесса. Аналогичная двухкомпонентная модель сформирована для решения задачи построения расписаний выполнения ПЗ в КС при формировании комплектов результатов. Для решения задачи построения расписаний процесса выполнения ПЗ в КС (в том числе при формировании комплектов результатов) сформирована модель этого процесса в виде:

– компонента, соответствующая пакетам, выполняемым в КС $[M,A]$;

– компонента, соответствующая расписаниям выполнения пакетов в КС $[P,R,\{T^{0l} \mid l=\overline{1,L}\}]$.

Для решения задачи построения расписаний выполнения ПЗ в КС при ограничении на длительности интервалов времени их функционирования сформирована трехкомпонентная модель многостадийных процессов. Аналогичная трех компонентная модель сформирована при решении задачи построения расписаний выполнения ПЗ в КС при ограничении на длительности интервалов времени их функционирования и формировании комплектов результатов.

Для решения задачи построения расписаний процесса выполнения ПЗ в КС при ограничении на длительности интервалов времени функционирования системы сформирована модель этого процесса в виде:

– компонента, соответствующая пакетам, выполняемым в КС $[M,A]$;

– компонента, соответствующая группам пакетов заданий, выполняемых в течение интервалов времени ограниченной длительности $[\{N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q]$, где группы N^z представляют собой множества кортежей вида $N^z=\{[i,m_i^z,(A)_i^z]_k,\mid k=\overline{1,k_z}\}^z$, m_i^z – количество ПЗ i-го типа в группе N^z; $(A)_i^z$ – вектор количества заданий i-го типа в m_i^z пакетах в группе N^z, Q – множество кортежей вида $Q=\{[i,m_i^q,(A)_i^q]_k,\mid k=\overline{1,k_q}\}$, m_i^q – количество ПЗ i-го типа, не включенных в группы N^z, вектор $(A)_i^q$ – составы пакетов;

– компонента, соответствующая расписаниям выполнения ПЗ, включенных в группы, в КС $\{[P^z,R^z,\{(T^{0l})^z \mid l=\overline{1,L}\}] \mid z=\overline{1,Z}\}$.

Для решения задачи построения расписаний выполнения ПЗ в КС при ограничении на длительность интервалов времени их функционирования и формировании комплектов результатов сформирована математическая модель многостадийных процессов следующего вида.

– компонента, соответствующая пакетам, выполняемым в КС $[M,A]$;

– компонента, соответствующая группам пакетов заданий, выполняемых в течение интервалов времени ограниченной длительности $[\{N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q,N_g]$, где параметры N^z и Q

интерпретируются аналогично рассмотренным выше, N_g – вектор количества комплектов каждого g-го типа ($g = \overline{1,g^{ком}}$), сформированных из результатов выполнения ПЗ, включенных в группы, в КС;

– компонента, соответствующая расписаниям выполнения пакетов, включенных в группы N^z, в КС $\{[P^z, R^z, \{(T^{0l})^z \mid l = \overline{1,L}\}] \mid z = \overline{1,Z}\}$.

Метод построения расписаний выполнения ПЗ в КС предусматривает представление задач в виде иерархии подзадач оптимизации решений на соответствующих им уровнях (решение задач построения расписаний выполнения ПЗ в КС обеспечивается решением подзадач на уровнях иерархии системы). Построение расписаний многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС (задача 1) предполагает решение следующих подзадач:

–определения составов ПЗ (минимизация длительности выполнения в КС заданий, из которых сформированы пакеты):

$$[M, A]^* = arg \min_{[M,A] \in N_1} f_1([M, A], [P, R, \{T^{0l} \mid l = 1,L\}]^*);$$

– определения расписаний выполнения ПЗ в КС (минимизация простоев приборов при выполнении ПЗ):

$$[P, R, \{T^{0l} \mid l = 1,L\}]^* = arg \min_{[P,R,\{T^{0l} \mid l = \overline{1,L}\}] \in N_2([M,A])} f_2([M, A], [P, R, \{T^{0l} \mid l = 1,L\}]).$$

Построение расписаний многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС при формировании комплектов (задача 2) предполагает решение следующих подзадач:

– определения составов ПЗ:

$$[M, A]^* = arg \min_{[M,A] \in N_1} f_1([M, A], [P, R, \{T^{0l} \mid l = 1,L\}]^*, \{T^g \mid g = \overline{1,g^{ком}}\});$$

– определения расписаний выполнения ПЗ в КС:

$$[P, R, \{T^{0l} \mid l = 1,L\}]^* = arg \min_{[P,R,\{T^{0l} \mid l = \overline{1,L}\}] \in N_2([M,A])} f_2([M, A], [P, R, \{T^{0l} \mid l = 1,L\}]),$$

где T^g – матрицы моментов времени окончания формирования h_g-х комплектов ($h_g = \overline{1,n_g^{ком}}$) g-ых типов ($g = \overline{1,g^{ком}}$), синтезируемые на основе расписаний выполнения ПЗ.

Построение расписаний многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС при ограничении на длительности интервалов времени функционирования систем (задача 3) предполагает решение следующих подзадач:

–определения составов ПЗ (максимизация количества выполненных в течение интервалов t^z ($z = \overline{1,Z}$) заданий):

$$[M,A]^* = arg \max_{[M,A]\in N_1} f_1([M,A],[\{N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q]^*);$$

–определения составов групп ПЗ, выполняемых в течение интервалов времени ограниченной длительности:

$$[\{N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q]^* =$$
$$= arg \min_{[\{N^z|z=\overline{1,Z}\},Q]\in N_2([M,A])} f_2([\{N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q],\{[P^z,R^z,\{(T^{0l})^z \mid l=\overline{1,L}\}] \mid z=\overline{1,Z}\}^*);$$

–определения расписаний выполнения ПЗ, включенных в группы N^z ($z=\overline{1,Z}$), в КС:

$$[P^z,R^z,\{(T^{0l})^z \mid l=\overline{1,L}\}]^* =$$
$$= arg \min_{[P^z,R^z,\{(T^{0l})^z|l=\overline{1,L}\}]\in N_3^z(N^z)} f_3([P^z,R^z,\{(T^{0l})^z \mid l=\overline{1,L}\}]),$$

где $N_3^z(N^z)$ – множество расписаний выполнения ПЗ, включенных в группу N^z ($z=\overline{1,Z}$;

$N_3^z(N^z) \subset N_3([\{N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q])$.

Построение расписаний многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС при ограничении на длительности интервалов времени функционирования систем и формировании комплектов (задача 4) предполагает решение следующих подзадач:

–определения составов ПЗ:

$$[M,A]^* = arg \min_{[M,A]\in N_1} f_1([M,A],[\{N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q,N_g]^*);$$

–определения составов групп ПЗ, выполняемых в течение интервалов времени ограниченной длительности:

$$[\{N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q,N_g]^* =$$
$$= arg \min_{[\{N^z|z=\overline{1,Z}\},Q]\in N_2([M,A])} f_1([\{N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q,N_g],\{[P^z,R^z,\{(T^{0l})^z \mid l=\overline{1,L}\}] \mid z=\overline{1,Z}\}^*);$$

–определения расписаний выполнения ПЗ, включенных в группы N^z ($z=\overline{1,Z}$), в КС:

$$[P^z,R^z,\{(T^{0l})^z \mid l=\overline{1,L}\}]^* =$$
$$= arg \min_{[P^z,R^z,\{(T^{0l})^z|l=\overline{1,L}\}]\in N_3^z(N^z)} f_3^z([P^z,R^z,\{(T^{0l})^z \mid l=\overline{1,L}\}]),$$

где $N_3^z(N^z)$ – множество расписаний выполнения ПЗ, включенных в группу N^z ($z=\overline{1,Z}$;

$N_3^z(N^z) \subset N_3([\{N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q])$.

Анализ задач построения расписаний выполнения ПЗ в КС (задачи 1-4) показал, что решение каждой из них предусматривает оптимизацию на верхнем (первом) уровне составов ПЗ. Тогда синтезированный в разделе 6.2 метод оптимизации составов ПЗ является основой для

решения комплекса задач (задачи 1-4) построения расписаний выполнения ПЗ в КС. Построение расписаний выполнения ПЗ в КС (задача 1) предусматривает оптимизацию на уровнях иерархической системы составов ПЗ и расписаний их выполнения. Этот подход развит при решении задачи построения расписаний выполнения ПЗ в КС при формирования комплектов результатов (задача 2), однако оптимизация составов ПЗ реализуется с учетом моментов времени окончания формирования комплектов. Таким образом, синтезированные для решения задачи 1 методы оптимизации составов ПЗ и расписаний их выполнения в КС используются при решении задачи 2 (также используются алгоритмы, обеспечивающие распределение результатов по комплектам с целью определения значений элементов матриц T^g ($g = \overline{1, g^{ком}}$)).

Решение задачи построения расписаний выполнения ПЗ в КС в течение интервалов времени ограниченной длительности (задача 3) обеспечивается решением подзадач: оптимизации составов ПЗ на верхнем уровне (по аналогии с задачей 1), оптимизации составов групп ПЗ, выполняемых в течение временных интервалов ограниченной длительности, оптимизации расписаний выполнения ПЗ, включенных в группы, в КС. Разработанный для решения задачи 1 метод оптимизации составов ПЗ применен также в рассматриваемой задаче (для подзадачи на верхнем уровне). Развитие предложенного для задачи 1 подхода предусматривает использование разработанного метода оптимизации групп ПЗ, выполняемых в течение интервалов времени ограниченной длительности. Метод оптимизации решений по составам групп ПЗ предусматривает, что для построения лучших решений требуется исключить из каждой группы такие пакеты, выполнение которых в их составе вызывает неэффективное использование выделенного ограниченного ресурса, и включить в группы такие ПЗ, реализация действий с которыми в КС позволит использовать ресурс в максимальной степени. Таким образом, метод построения решений в задаче 3 основывается на предложенном для задачи 1 подходе и использует как синтезированные для ее решения методы, так и методы решения подзадач, разработанные для указанной задачи. Аналогичным образом решение задачи построения расписаний выполнения ПЗ в КС в течение интервалов времени ограниченной длительности и формировании комплектов результатов (задача 4) обеспечивается оптимизацией решений на трех уровнях иерархии подзадач. Для оптимизации составов ПЗ на первом уровне применен метод, предложенный для решения задачи 1, для оптимизации составов групп ПЗ, выполняемых в течение интервалов времени ограниченной длительности применен метод, предложенный для задачи 2 (предусматривающий исключение из групп ПЗ, действия с которыми вызывают не эффективное использование ограниченного ресурса), для распределения результатов выполнения ПЗ по комплектам применен алгоритм, предложенный для задачи 3 (с учетом его модификации). Таким образом, каждая последующая решаемая задача построения расписаний выполнения ПЗ в КС является

развитием предшествующей ей задачи и использует синтезированные для нее методы и алгоритмы (с учетом требуемой модификации под особенности рассматриваемой задачи).

Аналогичные рассуждения могут быть применены при рассмотрении задач построения статических и динамических расписаний выполнения ПЗ в КС (с учетом возмущающих воздействий разных видов). Тогда на основе анализа видов задач построения расписаний выполнения ЕЗ и ПЗ в КС сформирована схема развития методов их решения, представленная на рисунке 6.12.

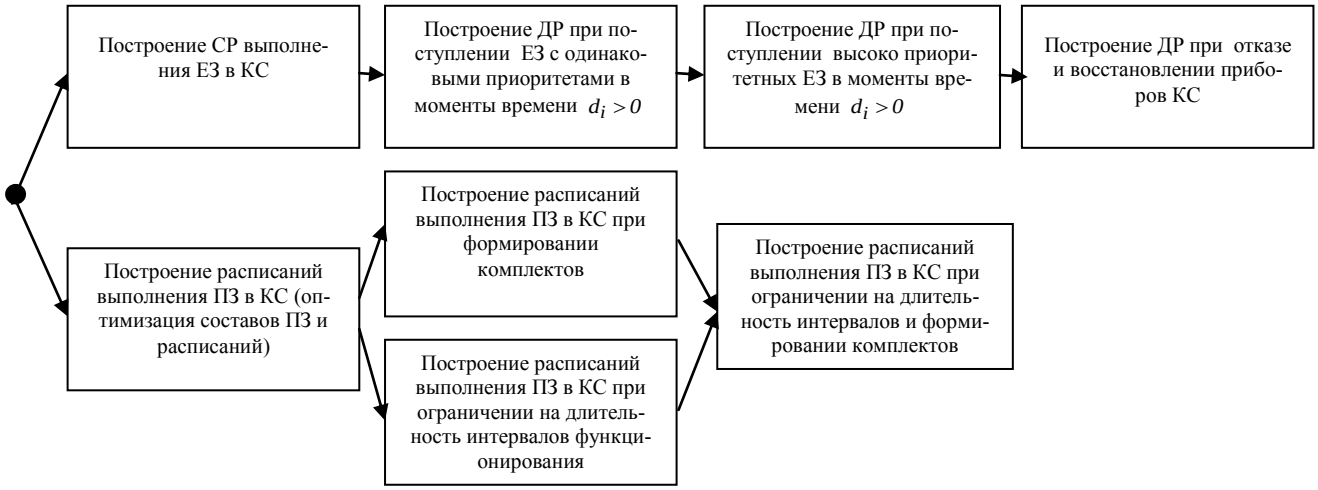


Рисунок 6.12 – Развитие методов решения задач построения расписаний выполнения ЕЗ и ПЗ в КС

6.10. Архитектура комплекса программ построения расписаний выполнения заданий (включая пакеты заданий) в конвейерных системах

Современными средствами проектирования комплексов программ (КП) являются [147,149]:1) объектно-ориентированное проектирование (ООП); 2) предметно-ориентированное проектирование (ПОП); 3) компонентное проектирование (разработка КП с использованием компонент). Подход на основе ООП [149-152] предполагает обобщенный анализ потоков данных в разрабатываемой предметной области, определение событий в предметной области. На основе этого анализа формируется объектная модель данных (объектная структура, отображающая взаимодействие между объектами – иерархия классов) и операции с этими объектами в предметной области (в системе). Таким образом, ООП – это способ структурирования КП в виде иерархии взаимодействующих объектов и определения действий с этими объектами из иерархии. Модель, ориентированная на данные (полученная в результате ООП), не в полной мере отражает процессы с объектами предметной области (не позволяет в полной мере описывать поведение объектов предметной области) [153-155], так как ООП – это подход более адап-

тированный к анализу потоков данных в системе, чем к анализу объектов в предметной области (ООП обеспечивает формирование модели данных, а не модели предметной области).

Развитием идей ООП является предметно-ориентированное проектирование (ПОП). ПОП предполагает в первую очередь формирование модели предметной области (ПО) с использованием шаблонов проектирования («объект-сущность», «объект-значение», «служба», «агрегаты» и т.д.), а также определение правил, характеризующих взаимодействие между объектами ПО, на основе которых идентифицируются действия с ними. Сформированная модель ПО только в последствии преобразуется в модель данных (иерархию классов с точки зрения ООП). При этом модель ПО является ее информационной моделью. Использованием при формировании модели ПО шаблонов определенных типов позволяет уточнить структуру данных в задаче.

Базовыми понятиями ПОП являются шаблоны «естественный язык» и «ограниченный контекст». Шаблон «естественный язык» включает термины и понятия, с которыми оперируют в рассматриваемой предметной области и с использованием которых ведется проектирование, виды взаимодействий понятий предметной области. Модель ПО формируется на основе предложений естественного языка, которые затем трансформируются в объекты ПО и операции с ними. Шаблон «ограниченный контекст» определяет границы применения понятий и терминов предметной области, сформулированных в шаблоне «естественный язык» (ограничивает совокупность понятий (объектов) ППО и способы реализации действий с ними).

Основным свойством ПОП является декомпозиция исходной предметной области на несколько предметных подобластей, для каждой из которых формируются свои шаблоны «естественный язык» и «ограниченный контекст» (т.е. своя информационная модель). Разделение на предметные подобласти (ППО) реализуется по фактической функциональности. При этом выделяют главную подобласть – смысловое ядро, то есть «главные» объекты предметной области и действия (операции) с ними. Если ограниченный контекст моделирует аспект работы предметной области, но не является смысловым ядром, то это – служебная подобласть. При разделении ПО на предметные подобласти ограниченные контексты могут пересекаться, в разных подобластях реализуется использованием одинаковых понятий. Таким образом, если ПО (ППО)– это пространство задач и пространство решений (какая задача решается и как решается), то при пересечении смысловых контекстов разных ППО требуется их интеграция с точки зрения совместного использования понятий (объектов ППО) и операций с объектами ППО.

Моделирование ППО выполняется внутри их ограниченных контекстов с использованием предметно-ориентированных шаблонов («сущность», «значение», служба, агрегат, хранилище и т.д.). При этом моделирование ППО предполагает как определение ее объектов, так и определение их атрибутов и операций с ними без относительно к программной реализации системы. В результате идентифицированные (в рамках их ограниченных контекстов) посредством стан-

дартных шаблонов ПОП объекты ПО представляют собой ее информационную модель, используемую для формирования объектной модели ПО (иерархии классов). Использование ПОП позволяет идентифицировать дополнительные объекты ПО и действия с ними.

Базовой парадигмой ПОП являются события с объектами ПО (событийная модель ПО, позволяющая координировать взаимодействии ее объектов, шаблон «событие») [153-155]. Шаблон «событие» является частью информационной модели ППО. Информация о событии может пересекать границы «ограниченных контекстов», поэтому события, происходящие с объектами должны быть опубликованы (хранилище событий на инфраструктурном уровне). Процесс, ожидающий события, реализует подписку на него средствами инфраструктуры обработки событий (программная система интерпретации событий). Тогда после формирования события объектом оно будет опубликовано в хранилище системой обработки событий. После чего информация о событии рассылается инфраструктурой их обработки по очередям подписчиков, их ожидающих. Таким образом реализуется шаблон «издатель-подписчик».

Анализ ПО, обеспечивающий формирование информационной модели, выполнен с учетом использования многоуровневой модели организации программных систем, включающей уровни (шаблон «Многоуровневая архитектура программных систем» [153-155]):

– интерфейсный, реализующий функции взаимодействия с системой управления выполнения заданий в КС;

– прикладных служб, которые реализуют координацию выполнения (управление выполнением) задач на уровне ПО, на который вынесены средства выполнения операций с ее объектами (модули оптимизации решений при построении расписаний выполнения ЕЗ и ПЗ в КС);

– предметной области, включающий средства реализации действий с объектами ПО (модули оптимизации решений по расписаниям выполнения ЕЗ и ПЗ в КС);

– инфраструктурный, обеспечивающий взаимодействие между объектами ПО и между уровнями иерархической организации программного обеспечения.

То есть построение информационной модели ПО реализовано совместно с распределением ее объектов по уровням иерархической модели организации КП (анализ ПО с точки зрения использования шаблона «Многоуровневая архитектура программных систем» [153- 155]). Программные модули, вынесенные на уровень прикладных служб, координируют выполнение операций с объектами уровня предметной области, тем самым определяя порядок их (операций) активизации. При этом координация выполнения операций с объектами ПО реализуется на основе контроля событий с этими объектами (реализация событийной модели взаимодействия объектов ПО). На уровень предметной области вынесены программные модули, выполняющие операции с объектами ППО, которые определены (входят) в их ограниченные контексты. Вся логика операций с объектами ППО сосредоточена строго на уровне предметной области. Хра-

нилища результатов выполнения операций с объектами ППО, хранилища событий организуются на инфраструктурном уровне, что позволяет (посредством взаимодействия с ним уровней прикладных служб и предметной области) контролировать получение результатов на уровне ПО – событий готовности результатов, на уровне прикладных служб фиксировать события с объектами ПО, выполнять координацию операций с объектами уровня ПО.

В результате все объекты предметной области и действия с ними вынесены строго на уровень ПО в многоуровневой модели, а совместное использование многоуровневой модели организации программных систем и модели ПО реализует иерархию решения задач в системе (при условии, что объекты предметной области и операции с ним вынесены строго на соответствующий уровень многоуровневой модели организации программных систем). Также совместное использование иерархической модели организации КП и принципов ППО (типизация объектов ПО с использованием встроенных шаблонов) позволило более корректно структурировать объекты, распределять их по уровням модели программных систем.

Особенностью ПОП является также выделение транзакционно зависимых объектов (сущностей, объектов-значений), которые объединяются в агрегаты. Это позволяет дополнительно структурировать объекты ПО (в результате, данные) и упростить обращение к ним (обращение выполняется не к отдельному объекту ПО, а к агрегату, с объектами которого выполняются операции).

В соответствии с ПОП сформированы ППО, соответствующие задачам построения статических и динамических расписаний выполнения ЕЗ в КС, задачам построения расписаний выполнения ПЗ в КС (расписаний выполнения ПЗ в КС; расписаний выполнения ПЗ в КС при формировании комплектов результатов; расписаний выполнения ПЗ в КС при ограничении на интервалы времени их функционирования; расписаний выполнения ПЗ в КС при задании ограничения на интервалы времени их функционирования и формировании комплектов результатов), определены шаблоны «естественного языка» и «ограниченных контекстов» для каждой ППО, пересечения «ограниченных контекстов». Пересечения «ограниченных контекстов» позволили определить объекты, соответствующие разным ППО, которые будут использоваться совместно при решении различных задач построения расписаний, действия с объектами разных ППО (входящих в пересечение «ограниченных контекстов»), реализуемые при решении различных задач. Это позволило (при сервис-ориентированной организации программной системы) использовать одни и те же сервисы при решении различных задач построения расписаний многостадийных процессов выполнения заданий (либо ПЗ) в КС.

Так как «ограниченные контексты» разных ППО пересекаются, то одни и те же объекты и операции с ними используются при оптимизации решений по выполнению ЕЗ и ПЗ в разных задачах построения расписаний следующим образом:

– совместное использование программных модулей, реализующих построение статических и динамических расписаний (при решении задач построения расписаний выполнения единичных заданий, поступивших в систему в моменты времени $d_i = 0$ и в моменты времени $d_i > 0$ (с одинаковыми и разными приоритетами), а также при учете отказов приборов КС);

– совместное использование программных модулей, реализующих оптимизацию решений по составам ПЗ, при решении задач построения расписаний выполнения ПЗ в КС, выполнения ПЗ в КС при условии формирования комплектов из результатов, выполнения ПЗ в КС при задании ограничения на длительность интервалов времени функционирования системы, выполнения ПЗ в КС при задании ограничения на длительность интервалов времени функционирования системы и формировании комплектов.

Таким образом, в результате с выполненного анализа ПО с точки зрения интегрирования «ограниченных контекстов» разных ППО определена необходимость использования разработанных программных модулей, реализующих операции с объектами из пересечения «контекстов», для формирования КП заданной структуры в соответствии с видом решаемой задачи. То есть определена необходимость изменения структуры КП (структурной адаптации КП) и алгоритма его функционирования (последовательности активизации программных модулей) в соответствии с видом решаемой задачи. В результате при разработке КП реализована его структурная гибкость (адаптация состава модулей и связей между ними), изменение процесса его функционирования с учетом вида решаемой задачи [156, 157]. Реализуется адаптивное (с точки зрения вида решаемой задачи) формирование последовательности активизации программных модулей, то есть реализуется адаптивный подход к построению расписаний выполнения единичных заданий (либо ПЗ) в КС, обеспечивающий структурную гибкость КП.

Современными архитектурами организации КП являются [158-160]: иерархическая организация КП; клиент-серверная организация КП; архитектуры независимых компонентов; архитектуры, основанные на портах; сервис-оринтированные архитектуры и т.д. В силу того, что при реализации ПОП анализ ПО выполнен, в том числе, и с учетом шаблона «Многоуровневая архитектура программных систем», поэтому при разработке КП применена иерархическая организация его компонент. В результате анализа ПО определены пересечения «ограниченных контекстов» разных ППО. Это указывает на то, что одинаковые операции с одними и теми же объектами выполняются при решении разных задач построения расписаний. Тогда КП организован таким образом, чтобы составляющие его компоненты (программные модули) обеспечивали структурную гибкость при решении разных задач построения расписаний. Для реализации структурной гибкости КП его организация выполнена на основе сервис-ориентированной архитектуры (Service Oriented Architecture – SOA) [161-176].

Сервис (в соответствии с архитектурой SOA) представляет собой программный компонент, который реализует строго определенные функции (решает назначенные ему задачи) в рамках единой программной системы построения расписаний выполнения заданий в КС. Для каждого сервиса задан определенный интерфейс, который устанавливает шаблоны для обмена сообщениями с другими сервисами. Сообщения, которыми обмениваются между собой сервисы, основываются на протокольно-независимой технологии (Simple Object Access Protocol).

Так как сервис-ориентированная архитектура обеспечивает структурную гибкость разрабатываемого КП, поэтому она положена в основу программной реализации системы построения расписаний выполнения заданий (включая ПЗ) в КС. На основе рассмотренных в главах 3-6 методов оптимизации расписаний выполнения заданий (построения расписаний выполнения ЕЗ и ПЗ в КС) предложена архитектура КП оптимизации решений при построении расписаний реализации действий с единичными заданиями и ПЗ на обрабатывающих приборах КС, представленная на рисунке 6.13.

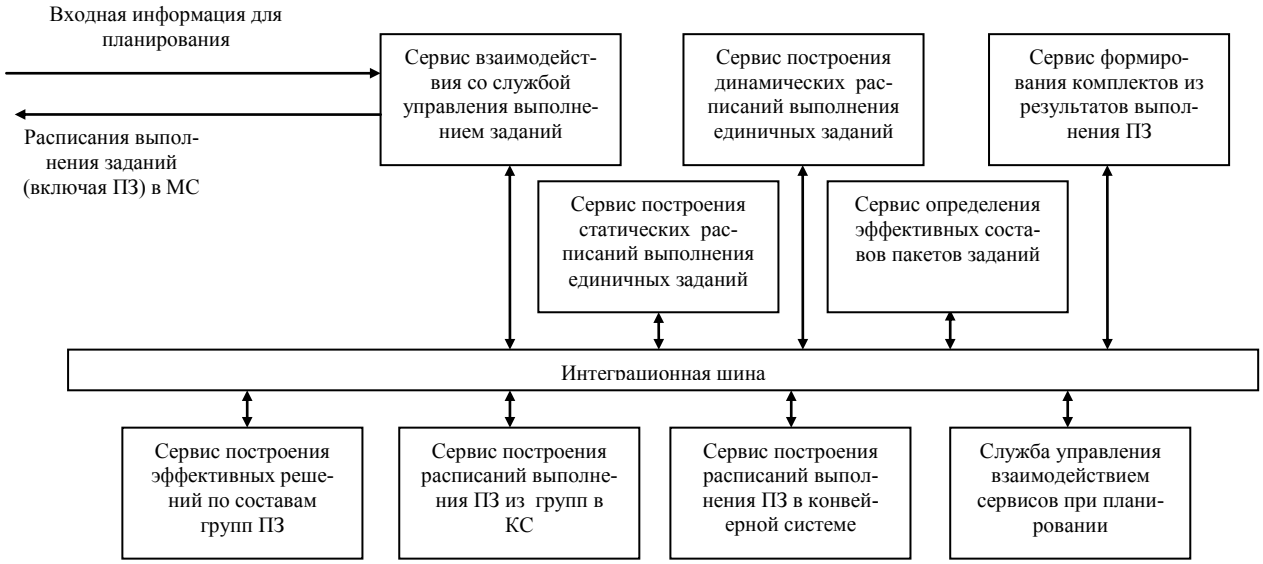


Рисунок 6.13 – Сервис-ориентированная архитектура КП построения расписаний выполнения заданий в КС

Информация о типах выполняемых заданий, их количестве, длительностях выполнения заданий на приборах КС и длительностях переналадки приборов на выполнение заданий соответствующих типов поступает в систему построения расписаний от сервиса управления процессом реализации действий с заданиями.

Результаты построения расписаний выполнения заданий поступают в сервис управления процессом реализации действий с заданиями на приборах КС. Для реализации указанных видов взаимодействий в систему построения расписаний введен соответствующий сервис (сервис взаимодействия со службой управления выполнением заданий в КС, реализующий интер-

фейсный уровень многоуровневой модели организации программных систем). Наряду с сервисами, реализующими построение расписаний выполнения заданий в КС, в систему введены сервисы, обеспечивающие хранение результатов и событий с объектами ПО (сервисы, обеспечивающие реализацию инфраструктурного уровня многоуровневой модели). Использование этих сервисов позволяет «освободить» сервисы, реализующие определенные методы построения комплексных расписаний (на уровне ПО), после формирования ими результатов, а также обеспечивает реализацию событийной модели взаимодействия в КП.

Организация взаимодействия сервисов в SOA и в рассматриваемом КП построения расписаний выполнения ЕЗ и ПЗ в КС реализуется с использованием подхода, базирующегося на событийном управлении, с использованием технологии EDA (EDA (Event-DrivenArchitecture)– архитектура, управляемая событиями) [177-182]. Для обеспечения реализации этой технологии в состав системы введена служба управления взаимодействием сервисов при построении решений (процессор событий, интерпретирующий событийную модель взаимодействия). Указанная служба оперирует с реестром сервисов, который ею используется для фиксации событий на инфраструктурном уровне. Таким образом, наряду с сервис-ориентированной архитектурой в системе реализуется модель событийного управления процессом построения комплексных расписаний выполнения ЕЗ и ПЗ в КС (модель событийного программирования) [152-156].

Рассмотренные математические модели процесса выполнения единичных заданий, учета влияния возмущающих воздействий на ход процесса выполнения заданий, методы построения статических и динамических расписаний реализации действий с ними на приборах КС использованы при разработке следующих сервисов: 1) сервиса построения статических расписаний выполнения единичных заданий; 2) сервиса построения динамических расписаний выполнения единичных заданий.

Разработанные математические модели процессов выполнения ПЗ (в том числе с учетом требования формирования комплектов результатов, при ограничении на длительности интервалов времени функционирования КС), математические модели иерархических игр, используемые при построении расписаний процессов выполнения ПЗ, методы оптимизации решений по составам ПЗ, решений по составам групп ПЗ, расписаниям выполнения ПЗ в КС, методы распределения результатов выполнения заданий по комплектам положены в основу разработки следующих сервисов, реализующих формирование решений: 1) сервиса определения локально оптимальных составов пакетов заданий; 2) сервиса построения локально оптимальных решений по составам групп пакетов заданий; 3) сервиса построения расписаний выполнения ПЗ в КС; 4) сервиса построения расписаний выполнения ПЗ из групп в КС; 5) сервиса формирования комплектов из результатов выполнения ПЗ в КС.

Синтезированная архитектура КП построения расписаний выполнения заданий в КС, сформированная по сервис-ориентированному принципу, снижает сложность организации и реализации системы построения расписаний. Применение разработанных методов построения расписаний выполнения ЕЗ и ПЗ в КС, а также разработанной системы построения расписаний выполнения заданий при решений задач обработки данных дистанционного зондирования Земли с целью мониторинга окружающей среды рассмотрены в Приложениях 2, 3. Применение разработанных методов построения расписаний выполнения ПЗ в КС, а также разработанной системы построения расписаний выполнения ПЗ в КС при решений задач планирования обработки передаточных партий цилиндрических деталей узлов и агрегатов технологического и транспортного оборудования при их восстановлении рассмотрены в Приложении 3. По результатам разработки комплекса программ получены свидетельства на государственную регистрацию программ для ЭВМ [183-185]. Акты внедрения результатов исследований представлены в Приложении 4.

Выводы по Главе 6

В соответствии с содержанием главы 6 сформулированы следующие выводы:

– в настоящее время отсутствуют математические модели многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС при ограничении на длительности интервалов времени их функционирования, а также отсутствуют методы построения расписаний выполнения ПЗ в таких системах при наличии ограничения указанного вида; также отсутствуют математические модели многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС при ограничении на длительность интервалов времени их функционирования и формировании комплектов, методы построения расписаний многостадийных процессов выполнения ПЗ при учете введенных условий;

– с целью разработки математической модели процессов выполнения ПЗ в КС при наличии ограничения на длительности интервалов времени их функционирования и методов построения расписаний реализации действий с ПЗ на обрабатывающих приборах КС выполнена декомпозиция обобщенной функции системы, в результате которой определены отдельные ее подфункции, каждая из которых реализуется на одном из уровней иерархии в этой системы;

– предложен метод математического моделирования процессов выполнения ПЗ в КС, который предусматривает организацию их (процессов) моделей в виде иерархически упорядоченных взаимосвязанных компонент; предложена математическая модель процесса выполнения ПЗ в КС при ограничении на длительности интервалов времени их функционирования, а также математическая модель иерархической игры оптимизации расписаний многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС; использование модели иерархической игры позволяет формировать локально оптимальные решения по составам ПЗ, составам групп ПЗ, выполняемым в

течение временных интервалов ограниченной длительности, и расписаниям выполнения ПЗ каждой из групп в КС; предложен метод построения расписаний выполнения ПЗ в КС, предусматривающий, что решение соответствующих задач формируется из решений подзадач, полученных в результате декомпозиции;

– предложен метод формирования начальных решений по составам групп ПЗ, выполняемых в КС в течение заданных временных интервалов, который предполагает последовательное распределение пакетов разных типов по группам; использование этого метода позволяет на основе решения по составам ПЗ сформировать решение по составам групп ПЗ, которое в дальнейшем оптимизируется;

– предложены условия для определения ПЗ, входящих в каждую из групп, выполнение которых в КС вызывает максимальные по сравнению с другими пакетами простои приборов; использование указанных условий позволяет определить ПЗ, которые могут быть исключены из групп с целью оптимизации их составов;

– предложен метод оптимизации решений по составам групп ПЗ, реализация которого позволяет сформировать составы этих групп, которые обеспечивают минимизацию простоев приборов КС при выполнении операций с пакетами в течение задаваемых временных интервалов;

– использование предложенного метода оптимизации составов групп ПЗ позволяет в среднем на 50% снизить общие простои приборов КС в течение заданных временных интервалов при выполнении ПЗ из групп по сравнению с начальным распределением ПЗ по группам (без оптимизации); использование предложенного метода оптимизации составов групп ПЗ позволяет в среднем на 40% получать лучшие решения, чем решения на основе ГА;

– предложена математическая модель процесса выполнения ПЗ в КС при ограничении на интервалы времени ее функционирования и формировании комплектов результатов, представляющая собой взаимосвязанные компоненты, распределенные по уровням иерархии;

– предложена математическая модель иерархической игры для оптимизации расписаний выполнения ПЗ в КС при наличии ограничения на длительности интервалов времени их функционирования и формировании комплектов; модель иерархической игры позволяет оптимизировать решения по составам ПЗ, составам групп ПЗ, и расписаниям выполнения ПЗ каждой из групп с учетом распределения результатов по комплектам;

– предложены условия для определения ПЗ, входящих в каждую из групп, результаты выполнение которых не используются при формировании комплектов; определенные таким образом пакеты исключаются из групп, вместо них в группы добавляются пакеты, до этого в них не входящие; использование указанных условий позволяет определить ПЗ, которые исключаются из групп с целью оптимизации их составов;

– предложен метод оптимизации решений по составам групп ПЗ, реализация которого позволяет сформировать такие составы этих групп, которые обеспечивают минимизацию количества не использованных при формировании комплектов результатов выполнения ПЗ в течение временных интервалов ограниченной длительности.

– с целью разработки комплекса программ построения расписаний выполнения ЕЗ и ПЗ в КС развит предметно-ориентированный подход к проектированию, что позволило сформировать информационную модель предметной области, с использованием которой выполнено построение объектной модели предметной области; сформулирована необходимость реализации структурной гибкости разрабатываемого комплекса программ, т.е. адаптации структуры комплекса программ под вид решаемой задачи;

– реализовано обоснование организации комплекса программ построения расписаний многостадийных процессов выполнения заданий в КС (единичных заданий и ПЗ), основывающейся на архитектуре сервис-ориентированных систем; выполнено обоснование функционирования блоков системы и системы в целом на основе технологии событийного управления выполнения заданий (событийного программирования);

– рассмотрено применение разработанного комплекса программ при решении задач построения расписаний обработки данных ДЗЗ в Web-ориентированном сервисе мониторинга ОС: статических расписаний выполнения ЕЗ на обработку данных ДЗЗ в конвейерных системах, динамических расписаний выполнения ЕЗ на обработку данных ДЗЗ в конвейерных системах при поступлении в систему новых данных с приоритетами, равными или превышающими приоритеты данных, обрабатываемых в КС в соответствии со статическим расписанием, расписаний выполнения ПЗ в КС (при минимизации общей длительности выполнения в КС заданий, включенных в составы пакетов); расписаний выполнения ПЗ в КС при ограничении на длительность их функционирования и формировании комплектов.

– рассмотрено применение разработанного комплекса программ при решении задач построения расписаний обработки передаточных партий деталей цилиндрической формы узлов и агрегатов транспортного и технологического оборудования при восстановлении их поверхностей: расписаний обработки партий деталей в КС (при минимизации общей длительности выполнения в КС деталей, включенных в составы партий); расписаний обработки партий деталей в КС при ограничении на длительность их функционирования и формировании комплектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнено решение важных научно-практических задач построения расписаний многостадийных процессов выполнения единичных заданий и пакетов заданий в конвейерных системах. Для этого разработаны математические модели процессов выполнения единичных заданий в конвейерных системах, метод математического моделирования влияния возмущающих воздействий на ход многостадийных процессов выполнения заданий, предусмотренный статическим расписанием, метод математического моделирования многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС, математические модели иерархических игр, позволяющие оптимизировать решения по составам ПЗ, составам групп ПЗ, расписаниям выполнения ПЗ в КС, метод построения динамических расписаний выполнения ЕЗ в КС, позволяющий выполнять адаптацию процессов реализации действий с ними к возмущающим воздействиям разных видов с целью снижения их влияния, метод построения расписаний выполнения ПЗ в КС (в том числе с учетом особенностей решаемых задач). В качестве итогов работы могут быть отмечены следующие результаты научных исследований:

1) существующие способы классификации задач построения расписаний не позволяют рассматривать их в виде взаимодействующих подзадач, поэтому выполнена разработка информационной модели процессов реализации действий с заданиями в конвейерных системах, а также предложена классификация задач построения расписаний многостадийных процессов выполнения заданий, позволяющая рассматривать их в виде совокупности взаимодействующих подзадач оптимизации решений на уровнях иерархии системы; введенная классификация позволяет идентифицировать новые виды задач построения расписаний многостадийных процессов выполнения заданий (ЕЗ и ПЗ) в КС и способы их решения с использованием аппарата теории иерархических игр;

2) существующие методы построения статических расписаний процессов выполнения ЕЗ в КС не позволяют формировать решения при произвольном количестве приборов КС, отсутствии упорядочивания длительностей выполнения заданий на приборах, при отсутствии условия об одинаковом порядке выполнения заданий на приборах, получать гарантированные результаты при различных значениях входных параметров; в связи с этим разработан метод построения статических расписаний выполнения ЕЗ в КС, основывающийся на «жадном» подходе при оптимизации, позволяющий исключить указанные ограничения существующих методов и гарантированно получать результаты при различных значениях входных параметров (в общем виде); разработанный метод позволяет получать решения, лучшие на 15-20%, чем известные метаэвристические алгоритмы;

3) современное состояние теории расписаний характеризуется отсутствием синтезированных моделей, методов и алгоритмов, позволяющих формировать динамические расписания, учитывающие влияние возмущающих воздействий различных видов на ход процессов выполнения заданий в КС с целью их адаптации к этим воздействиям; адаптация многостадийных процессов выполнения ЕЗ в КС к возмущающим воздействиям связана с построением динамических расписаний, учитывающих их влияние; предложен метод математического моделирования влияния возмущающих воздействий на ход процесса выполнения ЕЗ в КС, предусмотренный статическим расписанием (метод предусматривает при построении моделей указанного вида идентификацию заданий, порядок которых не может быть изменен с учетом возмущающего воздействия, и заданий, порядок которых требуется изменить с учетом вида воздействия); на основе указанного метода выполнена разработка математических моделей влияния возмущающих воздействий разных видов на ход процесса выполнения ЕЗ (поступление в КС новых заданий после начала реализации статического расписания (приоритеты поступивших заданий одинаковы или превышают приоритеты заданий, для которых сформировано статическое расписание), отказы приборов КС и их последующее восстановление); также разработан метод построения динамических расписаний, учитывающий указанные виды возмущений; использование предложенных: метода математического моделирования влияния возмущающих воздействий на ход процесса выполнения ЕЗ в КС, математических моделей влияния возмущающих воздействий на ход процесса выполнения заданий в КС, метода построения динамических расписаний позволяет на 20-45% уменьшить простои приборов по сравнению с не модифицируемым расписанием;

4) существующие методы построения расписаний многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС не учитывают при формировании решений их (процессов) технологические параметры, а также характеризуются наличием ограничений на размерность задачи, не возможностью гарантированного улучшения решений при различных наборах значений входных параметров; в силу этого выполнена разработка: нового иерархического подхода к построению расписаний многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС; метода математического моделирования многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС, предусматривающего представление моделей этих процессов в виде совокупности иерархически упорядоченных (взаимосвязанных) компонент; математической модели процесса выполнения ПЗ в КС; математической модели иерархической игры для оптимизации решений по составам ПЗ и расписаниям их выполнения в КС; метода построения расписаний выполнения ПЗ в КС, предусматривающего представление обобщенной задачи в виде совокупности взаимосвязанных иерархически упорядоченных подзадач, для каждой из которых формируется локально оптимальное решение на соответствующем ей уровне иерархии; методов локальной оптимизации составов ПЗ и расписаний их

выполнения в КС; использование предложенных методов и моделей позволяет в среднем на 20-40% сократить время выполнения ПЗ в КС по сравнению с фиксированными пакетами, включающими все задания из их наборов (не предполагающими оптимизацию);

5) существующие математические модели и методы построения расписаний многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС не учитывают условие формирования комплектов результатов; поэтому разработан новый подход к построению расписаний многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС при условии формирования комплектов результатов, предусматривающий формирование иерархии подзадач определения локально оптимальных решений на каждом из уровней; на основе предложенного метода математического моделирования процессов выполнения ПЗ в КС синтезирована модель этого процесса при формировании комплектов результатов; получены: математические модели иерархических игр оптимизации решений по составам пакетов и расписаниям их выполнения в КС, метод построения расписаний выполнения ПЗ в КС, позволяющие выполнить учет этого условия; использование предложенных методов позволяет на 30-40% снизить время формирования комплектов по сравнению с фиксированными ПЗ (не предполагающими оптимизации составов ПЗ) и суммарное время запаздывания с формированием комплектов относительно их заданных директивных сроков по сравнению с фиксированными ПЗ;

6) существующие методы построения расписаний многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС не предусматривают задания ограничения на время функционирования системы; поэтому разработан новый подход к решению указанной задачи, предусматривающий декомпозицию обобщенной функции системы на совокупность иерархически упорядоченных функций подсистем; на основе предложенного метода математического моделирования процессов выполнения ПЗ в КС синтезирована математическая модель этого процесса при ограничении на длительности интервалов времени ее (системы) функционирования, математическая модель иерархической игры оптимизации составов ПЗ, составов групп ПЗ и расписаний выполнения ПЗ из групп в КС, метод построения расписаний выполнения ПЗ в КС, позволяющий осуществлять оптимизацию их составов с точки зрения максимально «плотного» размещения их в группах, выполняемых в течение заданных интервалов времени; использование метода оптимизации составов групп ПЗ позволяет в среднем на 50% повысить эффективность использования временного ресурса приборов КС по сравнению с начальными составами групп;

7) существующие методы построения расписаний выполнения ПЗ в КС не предусматривают возможности задания ограничения на время функционирования системы и условия формирования комплектов результатов; поэтому реализована разработка: математической модели многостадийного процесса выполнения ПЗ в КС при ограничении на длительность интервалов времени ее (системы) функционирования и условии формирования комплектов результатов,

математической модели иерархической игры по оптимизации составов ПЗ, составов групп ПЗ и расписаний выполнения ПЗ из групп в КС, метода построения расписаний выполнения ПЗ в КС, позволяющего осуществлять оптимизацию составов групп с точки зрения эффективного использования ограниченного временного ресурса системы (минимизирующего в группах количество заданий, результаты выполнения которых не будут использованы при формировании комплектов); использование метода оптимизации групп ПЗ позволяет в среднем на 40% увеличить количество комплектов, формируемых из результатов выполнения заданий, включенных в пакеты, входящие в группы;

8) на основе результатов экспериментальных исследований с использованием разработанных методов математического моделирования и методов построения расписаний выполнения заданий в КС (расписаний выполнения ЕЗ и ПЗ в КС) сформулированы особенности зависимостей эффективности решений, полученных на их основе, от различных значений входных параметров;

9) с целью разработки комплекса программ построения расписаний выполнения ЕЗ и ПЗ в КС развито применение предметно-ориентированного подхода к проектированию, позволившее сформировать информационную и объектную модели предметной области (подобластей); это позволило идентифицировать объекты и программные модули, используемые при решении различных задач построения расписаний процессов выполнения ЕЗ и ПЗ в КС, что сделало возможным реализацию структурной гибкости разработанного комплекса программ, предусматривающей в соответствии с типом решаемой задачи определение состава используемых программных модулей и связей между ними (то есть реализацию адаптации структуры программного комплекса в соответствии с видом решаемых задач); таким образом, развитие предметно-ориентированного подхода к проектированию и иерархической модели организации программных систем позволило обеспечить структурную адаптацию комплекса программ построения расписаний выполнения ЕЗ и ПЗ в КС с учетом вида решаемой задачи.

Все синтезированные методы математического моделирования процессов выполнения заданий в КС, математические модели многостадийных процессов выполнения ЕЗ и ПЗ в КС, математические модели иерархических игр оптимизации решений по составам ПЗ, групп ПЗ, расписаниям выполнения ПЗ в КС, методы построения расписаний выполнения ЕЗ и ПЗ в КС, обеспечивающие формирование локально оптимальных решений для иерархически упорядоченных подзадач, реализованы в виде комплекса программ построения расписаний. Реализованные в составе разработанного комплекса программ методы математического моделирования процессов выполнения ЕЗ и ПЗ в КС, методы построения расписаний выполнения ЕЗ и ПЗ в КС использованы при:

– построении расписаний многостадийных процессов обработки единичных данных ДЗЗ, по результатам которой выполняется идентификация наличия на земной поверхности НПЯ и ТВ на ОС (первый режим обработки данных ДЗЗ в Web-ориентированном сервисе мониторинга ОС, связанный с идентификацией наличия НПЯ и ТВ на ОС, Приложения 2,3);

– построении расписаний многостадийных процессов обработки наборов данных ДЗЗ разных типов, что предусматривает формирование ПЗ, расписаний выполнения этих пакетов в КС; по результатам выполнения ПЗ на обработку данных ДЗЗ реализуется определение характеристик обнаруженных НПЯ и ТВ на ОС (второй режим обработки данных ДЗЗ, связанный с определением характеристик НПЯ и ТВ в Web-ориентированных сервисах мониторинга ОС, Приложения 2,3);

– построении расписаний выполнения ПЗ на обработку данных ДЗЗ разных типов при формировании комплектов результатов (третий режим обработки данных ДЗЗ, связанный с определением условий развития и распространения НПЯ и ТВ в Web-ориентированных сервисах мониторинга ОС, Приложения 2,3) и при задании ограничений на интервалы времени функционирования системы при обработке данных.

Также разработанные методы математического моделирования многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС, методы построения расписаний выполнения ПЗ в КС, реализованные в составе комплекса программ, использованы при построении расписаний обработки передаточных партий деталей цилиндрической формы узлов и агрегатов транспортного и технологического оборудования при восстановлении их поверхностей, расписаний обработки партий деталей в КС (при минимизации общей длительности выполнения в КС деталей, включенных в составы партий), расписаний обработки партий деталей в КС при ограничении на длительность их функционирования и формировании комплектов (Приложение 3). Акты внедрения результатов исследований приведены в Приложении 4.

Применение разработанных методов математического моделирования многостадийных процессов выполнения ЕЗ и ПЗ в КС в различных сферах практической деятельности (обработка данных ДЗЗ в конвейерных системах, восстановление поверхностей цилиндрических деталей узлов и агрегатов технологического и транспортного оборудования в конвейерных системах) показало их универсальность.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

БД база данных

БИК ближний инфракрасный диапазон длин волн

ВУ вычислительное устройство

ГА генетический алгоритм

ГВЦ МСХ главный вычислительный центр Министерства сельского хозяйства

ДЗЗ дистанционное зондирование Земли

ДП динамическое программирование

ДР динамическое расписание

ЕД единичные данные

ЕЗ единичные задания

ИАПУ ДВО РАН Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного от деления **РАН**

ИВТ СО РАН Институт вычислительных технологий Сибирского отделений РАН,

ИЗС искусственный спутник Земли

ИК инфракрасный диапазон длин волн

ИКИ РАН институт космических исследований Российской Академии наук

КС конвейерная система

КСЯ коэффициент солнечной яркости

МВГ метод ветвей и границ

МС многостадийная система

НПЯ негативные природные явления

ОП оперативная память

ОС окружающая среда

ПЗС приборы с зарядной связью

ПД пакет данных

ПЗ пакет заданий

РСА радиолокатор с синтезированной апертурой

СИК средний инфракрасный диапазон длин волн

СР статическое расписание

ТВ техногенные воздействия

ЧЦЛП частично целочисленное линейное программирование

ЦМР цифровая модель рельефа

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Топорков В.В. Модели распределенных вычислений / В.В.Топорков. – М.: Из-во ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 320 с.

2. Воеводин В.В. Параллельные вычисления / В.В. Воеводин, Вл.В.Воеводин. – СПб.: Из-во «BHV– Петербург», 2002.– 599 с.

3. Сиротина Н.Ю. Параллельные вычислительные системы / Н.Ю.Сиротина. – Красноярск: Из-во ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», 2008. – 133 с.

4. Талалаев А. А. Модели, алгоритмы и программно-инструментальные средства для организации конвейерно-параллельных вычислений на мультипроцессорных системах: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.13.11 / Талалаев Александр Анатольевич. – Переславль-Залесский, 2012. – 21 с.

5. Мельман С.В. Технология распределенно-параллельной обработки и визуализации больших объемов синоптических данных / С.В.Мельман, В.А.Бобков, А.С.Черкашин // Информатика и системы управления. 2015, №3(45). – С. 63-71.

6. Танаев В.С. Теория расписаний. Многостадийные системы / В.С. Танаев, Ю.Н. Сотсков, В.А. Струсевич. – М.: Наука, 1989. – 328 с.

7. Ковалев М. Я. Модели и методы календарного планирования. Курс лекций / М. Я. Ковалев. – Минск: БГУ, 2004. – 63 с.

8. Лазарев А. А. Теория расписаний. Задачи и алгоритмы / А. А.Лазарев, Е.Р.Гафаров. – М.: МГУ, 2011. – 222 с.

9. Agha M. Integrated management of energy and production: scheduling of batch process and Combined Heat& Power (CHP) plant // University of Toulouse. National Polytechnic Institute of Toulouse. (FRANCE), 2009. – 255 p.

10. Лазарев А. А. Теория расписаний. Задачи управления транспортными системами / А. А.Лазарев, Е. Г.Мусатова, А. Г. Кварцхелия, Е. Р.Гафаров. – М.: МГУ им. М. В. Ломоносова, 2012. – 159 с.

11. Лазарев А.А. Методы и алгоритмы решения задач теории расписаний для одного и нескольких приборов и их применение для задач комбинаторной оптимизации: дис. … док. физ.-мат. наук: 01.01.09 / Лазарев Александр Алексеевич – М., 2007. – 426 с.

12. Садыков Р.Р. Алгоритмы решения задач теории расписаний для одного прибора с критериями L_{max} и $\sum w_j U_j$: дис. … канд. физ.-мат. наук: 01.01.09 / Садыков Руслан Равильевич – М.: 2006. – 131 с.

13. Кобак В.Г. Методология сопоставительно-критериальной аналитической оценки распределительных задач и средства ее программно-алгоритмической поддержки: дис. … док. техн. наук: 05.13.01 / Кобак Валерий Григорьевич. – Ростов-на-Дону, 2008. – 317 с.

14. Гончар Д.Р. Методы планирования вычислений в САПР систем реального времени: дис. … канд. техн. наук: 05.13.01 / Гончар Дмитрий Русланович. – М., 2008. – 139 с.

15. Brucker P. Scheduling. Algorithms.–Berlin: Springer-Verlag Heidelberg, 2007. – 317p.

16. Pinedo M. L. Sheduling. Theory, Algoritms and Systems.– Springer, 2008. – 664 p.

17. Morton T.E., Pentico D.W. Heuristic Scheduling Systems (with Applications to Production Systems and Project Management). – Wiesley-Interscience, 1993. – 720 p.

18. Прилуцкий М. Х.Метод ветвей и границ с эвристическими оценками для конвейерной задачи теории расписаний / М. Х.Прилуцкий, В.С.Власов // Математическое моделирование. Оптимальное управление. Вестн. Нижегород. ун-та им. Лобачевского Н. И., 2008, №3. – С. 147–153.

19. Афраймович Л.Г.Планирование и оперативное управление процессом изготовления сложных изделий / Л.Г.Афраймович, В.С.Власов, М.С.Куликов, М.Х.Прилуцкий, Н.В.Старостин, А.В.Филимонов // XII Всероссийское совещание по проблемам управления «ВСПУ-2014», Москва 16-19 июня 2014 г. – М.: 2014.– С.5138-5150.

20. Кобак В. Г. Алгоритмическое улучшение генетического алгоритма для нечетного количества однородных устройств / В.Г.Кобак, Д.В.Титов, В.И.Калюка, В.В.Слесарев // Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск: Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении.№5. – Ростов-н/Д: Изд. центр Донского Государственного техн. ун-та. – С. 159-163.

21. Шаповалов Т.С. Генетический алгоритм составления расписания запуска параллельных заданий в GRID / Т.С.Шаповалов // Многопроцессорные вычислительные системы, №4 (26), 2010. – С.115-126.

22. Шаповалов Т.С. Планирование выполнения заданий в распределенных вычислительных системах с применением генетических алгоритмов: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.13.11 / Шаповалов Тарас Сергеевич. – Иркутск, 2011. – 19 с.

23. Нейдорф Р. А. Исследование селективно-перестановочного метода решения однородной распределительной задачи с использованием мультиперестановок / Р.А.Нейдорф, А.А. Жикулин // Системный анализ, управление и обработка информации. Труды 3-го Международного семинара / Под общ. ред. Р.А. Нейдорфа. – Ростов-н/Д: Изд. центр Донского Государственного техн. ун-та, 2012. – С. 58-68.

24. Кобак В.Г. Сравнительный анализ критериев эффективности при решении неоднородной минимаксной задачи алгоритмом Крона / В.Г.Кобак, М.А.Муратов // Системный анализ,

управление и обработка информации. Труды 3-го Международного семинара / Под общ. ред. Р.А. Нейдорфа. – Ростов-н/Д: Изд. центр Донского Государственного техн. ун-та, 2012. – С. 75-82.

25. Муратов М.А. Разработка и исследование алгоритмов решения минимаксной неоднородной задачи для балансировки вычислительной нагрузки.: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.13.01 / Муратов Михаил Александрович. – Таганрог, 2016.–19 с.

26. Долгова О. Э. Составление расписаний с минимизацией суммарного запаздывания на одном приборе методом параллельных муравьиных колоний / О.Э.Долгова, В.В. Пересветов // Вестн. ТОГУ Информатика, вычислительная техника и управление, 2012, №2 (25). – С. 45-52.

27. Псигин Ю.В.Основы математического моделирования / Ю.В.Псигин, С.И. Рязанов. – Ульяновск: Из-во Ульяновского ГТУ, 2007. – 71 с.

28. Lawler E.L., Lenstra J.K., Rinnooy Kan A.H.G., Shmoys D.B.. Sequencing and Scheduling: Algorithmus and Complexity // Volume 4 of Handbook in Operations Research and Managment Science. North-Holland, Amsterdam, 1993.– P. 445-522.

29. Lee S., Kim H., Lee J. A Soft Aperiodic Task Scheduling Algorithm in Dynamic Priority System // 2nd International Workshop on Real-Time Computing Systems and Applications. October 25 – 27, 1995. Tokyo, Japan. – P.68-72.

30. Wang J., Zhu X., Qiu D. Emergency Scheduling of Multiple Imaging Satellites with Dynamic Merging // «SpaceOps 2012 Conference». Stockholm, Sweden, 11-15 June 2012. V.1. – P. 294-305.

31. Chetto M., Marchand A. Dynamic Scheduling of Skippable Periodic Tasks: Issues and Proposals. Journal of Software. Science in China Press, 2007, 2 (5). – P.44-51.

32. Marchand A., Chetto M. Dynamic Real-Time Scheduling of Firm Periodic Tasks with Hard and Soft Aperiodic Tasks // Journal of Real-Time Systems, Vol. 32, No. 1-2. – P. 21-47.

33. Madureira A., Ramos C., Carmo Silva S. A Genetic Algorithm for the Dynamic Single Machine Scheduling Problem. In: Camarinha-Matos L.M., Afsarmanesh H., Erbe HH. (eds) Advances in Networked Enterprises. BASYS 2000. IFIP – The International Federation for Information Processing, Boston, Springer, 2000,.vol 53. – P. 315-324.

34. He L., Jarvis S.A., Spooner D.P., Chen X., Nudd G.R. Hybrid Performance-oriented Scheduling of Moldable Jobs with QoS Demands in Multiclusters and Grids // International Conference on Grid and Cooperative Computing «Grid and Cooperative Computing (GCC)», 2004.– P. 217-224.

35. Dahal K., Hossain A., Varghese B., Abraham A., Xhafa F. Scheduling in Multiprocessor System using Genetic Algoritm // 7th International Conference on Computer Information System and Industrial Management Application. Ostrava, Czech Republic. June 26-28, 2008. – P. 281-286.

36. Lin S.-G., Goodman E.D., Punch W.F. A Genetic Algorithm Approach to Dynamic Job Shop Scheduling Problems // 7th International Conference on Genetic Algoritm. East Lansing.USA. July 19-23. 1997. – P. 481-488.

37. Bierwirth C., Kopfer H., Mattfeld D.C., Rixen I. Genetic algorithm based scheduling in a dynamic manufacturing environment // Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Evolutionary Computation. 29 Nov.– 1 Dec. 1995. Perth, WA, Australia. – P. 439-445.

38. Visalakshi P., Sivanandam S.N. Dynamic Task Scheduling with Load Balancing using Hybrid Particle Swarm Optimization // International Journal Open Problems Computing Mathematic, Vol. 2, No. 3, 2009. – P. 475-488.

39. Jakobovic D., Budin L. Dynamic Scheduling with Genetic Programming // 9th European conference on Genetic Programming (EuroGP), Budapest, April 10-12, 2006. – P.73-84.

40. Hwang J., Wood T. Adaptive Dynamic Priority Scheduling for Virtual Desktop Infrastructures // Proceedings of the 2012 IEEE 20th International Workshop on Quality of Service. Coimbra, Portugal. 04–05 June, 2012. – P. 238-251.

41. Hunt R., Johnston M., Zhang M. Evolving Dispatching Rules with Greater Understandability for Dynamic Job Shop Scheduling // Evolutionary Computation, #6, 2015. – P. 29-58.

42. Cosnard M., Jeannot E., Rougent L. Low Memory Cost Dynamic Scheduling of Large Coarse Grain Task Graphs // International Parallel Processing Symposium (IPPS'98), 1998,Orlando, Florida.– P. 234-248.

43. Terekhova D., Tran T., Down D. G., Beck J. C. Long-Run Stability in Dynamic Scheduling // Proceedings of the Twenty-Second International Conference on Automated Planning and Scheduling, ICAPS 2012. Atibaia, Brazil. June 25–29, 2012. – P.261-269.

44. Cowling P., Johansson M. Using real time information for effective dynamic scheduling // European Journal of Operational Research, 139 (2002).– P.230–244.

45. Martens H., Rahm E., Stohr T. Dynamic Query Scheduling in Parallel Data Warehouses // European Conference on Parallel Processing, Euro-Par 2002, Lecture Notes in Computer Science. Berlin: Springer, 2002. – P. 321–331.

46. Sauer J. Meta-Scheduling using Dynamic Scheduling Knowledge // In: Dorn, J., Froeschl, K.A. (eds.) Scheduling of Production Processes. Ellis Horwood. Ellis Horwood Series in Artificial Intelligence. – P. 151–162.

47. Loer K., Hildebrandt M., Harrison M. Analyzing dynamic function scheduling decisions // 7th Working Conference “Human Error, Safety and Systems Development”. 22-27 August 2004. Toulouse, France. 2004. – P 45-60.

48. Flachtenberg E. Flitelson D.G. Parrallel job scheduling under dynamic workloads // 9th Workshop on Job Scheduling Strategies for Parallel Processing. Seattle. Washington. 24 June. 2003.– P.448-459.

49. Barbosa de Silva E., Goncales Costa M., Pereira F.H. Simulition study of dispatching rules in stochastic job shop dynamic scheduling // Word Jornal of Modelling and Simulation, vol. 10 (2014), № 3. – P. 231-240.

50. Vinod V., Sridharanb R. Scheduling a dynamic job shop production system with sequence-dependent setups: An experimental study // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. Volume 24, Issue 3, 2008.– P. 435-449.

51. Mendez C.A. et al. State-of-the-art review of optimization methods for short-term scheduling of batch processes // Computers and Chemical Engineering, 2006, vol. 30. – P. 913–946.

52. Adonyi R., Romero J., Puigjaner L., Friedler F. Incorporating heat integration in batch process scheduling // Applied Thermal Engineering, 2003, vol. 23. – P. 1743–1762.

53. Zeballos L.J., Henning G.P. A CP approach to the scheduling of resource-constrained multiproduct continuous facilities // Latin American Applied Research, #36, 2006 . – P. 205-212.

54. Díaz-Ramírez J., Huertas J.I.A continuous time model for a short-term multiproduct batch process scheduling // Ingeniería e Investigación, vol. 38, # 1, 2018. – P. 96-104.

55. Ning Ch., You F. Batch Process Scheduling under Uncertainty using Data-Driven Multistage Adaptive Robust Optimization // Chemical engineering transactions, 2017, Vol. 61. – P. 1567-1572.

56. Chandra P. Managing Batch Processors to reduce lead time in a semiconductor packaging line // International Jornal of Production Research, 1997, vol. 35(3). – P. 611–633.

57. Bein W., Noga J., Wiegley J. Priority Approximation for Batching [Электронный ресурс] // 41st Hawaii International International Conference on Systems Science (HICSS-41 2008), Proceedings, 7-10 January 2008, Waikoloa, Big Island, USA. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/221179836_Priority_Approximation_for_Batching.

58. Bein W., Noga J., Wiegley J. Approximation for Batching via Priorities // Scientific Annals of Computer Science, Volume 17, 2007.– P. 129-138.

59. Steiner G. Minimizing the weighted number of late jobs with Batch setup times and delivery costs on a single machine./ G.Steiner, R. Zhang // Multiprocessor Scheduling, Theory and Applications. Edited by Levner E. Itech Education and Published, 2007. – P. 85-98.

60. Surjandari I., Rachman A., Purdianta A., Dhini A. The batch scheduling model for dynamic multi-item, multi-level production in an assembly job shop with parallel machines // International Journal of Technology, 2015,# 1.– P. 84-96.

61. Koehler F. Khuller S. Optimal Batch Schedules for Parrallel Machines // Algorithms and Data Structures: 13th International Symposium. Berlin: Springer, 2013. – P. 475–486.

62. Monch L., Balasubramanian H., Fowler J. W., Pfund M. E. Heuristic scheduling of jobs on parallel batch machines with incompatible job families andunequal ready times // Computers & Operations Research, # 32, 2005. – P. 2731–2750.

63. Dang Th.-T., Frankovic B., Budinska I. Using heuristic search for solving single machine batch processing problems // Computing and Informatics, Vol. 25, 2006. – P. 405-420.

64. Kohn R., Rose O., Laroque Ch. Study on multi-objective optimization for parallel batch machine scheduling using variable neighbourhood search // Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference, 8th-11th December, 2013. – P.3654-3670.

65. Cheng T., Yuan J., Yang A. Scheduling a batch processing machine subject to precedence constraints, release dates and identical processing times // Scientific Annals of Computer Science, Volume 16, 2007.– P. 29-58.

66. Van der Zee D.-J. Dynamic scheduling of batch processing machines with non-identical product sizes // International Journal of Production Research, Taylor & Francis, 2007, 45 (10). – P.2327-2349.

67. Li Sh.,.Cheng T.C.E.,.Ng C.T, Yuan J. Single-machine batch scheduling with job processing time compatibility // Theoretical Computer Science, 2015, Vol. 583, – P. 57-66.

68. Jin M., Liu X., Luo W. Single-Machine Parallel-Batch Scheduling with Nonidentical Job Sizes and Rejection // Mathematics, 2020, Vol. 8, Article ID:258.

69. Tan Y., Huangi W., Sun Y., Yue Y. Comparative Study of Different Approaches to Solve Batch Process Sheduling and Optimisation Problems // Proceedings of the 18th International Conference on Automation & Computing. Loughborough University, Leicestershire, 2012. – P. 424–444.

70. Li X.,Wang Y.Scheduling Batch Processing Machine Using Max–Min Ant. System Algorithm Improved by a Local Search Method // Mathematical Problems in Engineering, Volume 2018.– P.330-338.

71. Ramasubramanian M., Mathirajan M. A Mathematical Model for Scheduling a Batch Processing Machine with Multiple Incompatible Job Families, Non-identical Job dimensions, Nonidentical Job sizes, Non-agreeable release times and due dates // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 46 (2013). – P. 455-467.

72. Ogun B., Cigdem A.-U. Mathematical Models for a Batch Scheduling Problem to Minimize Earliness and Tardiness // Journal of Industrial Engineering and Management. JIEM, 2018, # 11(3). – P.390-405.

73. Kreipl S., Pinedo M. Planning and Scheduling in supply chains: An Overview of Issues in Practice // Production and Operations Management. 2004, vol. 17, # 1. – P. 77–92.

74. Yugma C., et al. Batching and Scheduling Algoritm for the diffusion Area in Semiconductor Manufacturing // International Journal of Production Research. 2012, vol. 50, # 8. – P. 2118–2132.

75. Joglekar G. Using Simulation for Scheduling and Rescheduling of Batch Processes // Processes, 2017, # 5, Article ID 66.

76. Омельченко А. В. Теория графов / А. В. Омельченко. – М.: МЦНМО, 2018. – 416 с.

77. Зыков А.А. Основы теории графов / А.А. Зыков. – М: Вузовская книга, 2004. – 664 с.

78. Месарович М. Общая теория систем: математические основы / М. Месарович, И. Такахара.– М.: Из-во «Мир», 1978. – 316 с.

79. Волкова В.Н.Теория систем и системный анализ: учебник для академического бакалавриата. 2-е изд., перераб. и доп. / В.Н.Волкова, А.А.Денисов. – М.: Из-во Юрайт, 2014.– 616 с.

80. Чернышов В.Н. Теория систем и системный анализ./ В.Н.Чернышов, А.В.Чернышов. – Тамбов: Из-во Тамбовского ГТУ, 2008. – 96 с.

81. Данелян Т.Я. Теория систем и системный анализ (ТСиСА): учебно-методический комплекс / Т.Я. Данелян. – М.: Изд.центр ЕАОИ, 2010. – 303 с.

82. Хьюз К.Параллельное и распределенное программирование на С++ / К.Хьюз, Т.Хьюз. – М.: Из-во «Вильямс», 2004.– 672 с.

83. Бэкон Д. Операционные системы. Параллельные и распределенные системы / Д. Бэкон, Т. Харрис. – СПБ.: Из-во Питер, БХВ-Петербург, 2004.– 800 с.

84. Кротов К.В. Информационная модель многоуровневой системы выполнения конвейеризированных программ / К.В.Кротов // Международный научно-технический журнал «Проблемы управления и информатики», 2014, № 3.– С. 89-101.

85. Месарович М. Теория иерархических многоуровневых систем / М.Месарович, Д.Мако, И.Такахара. – М.: Из-во «Мир», 1973.– 344 с.

86. Воронин А.А. Оптимальные иерархические структуры / А.А.Воронин, С.П.Мишин. – М.: ИПУ РАН, 2003. – 214 с.

87. Мамченко О.П. Моделирование иерархических систем: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности "Математические методы в экономике" и другим экономическим специальностям / О.П.Мамченко, Н. М.Оскорбин. – Барнаул: Из-во Алтайского гос. ун-та, 2007.– 315 с.

88. Мещеряков Р.В. Информационные иерархические системы / Р.В.Мещеряков // Известия Томского политехнического университета. Серия «Управление, вычислительная техника и информатика». 2009, т. 314, № 5.– с. 151-154.

89. Гермейер Ю.Б. Игры с непротивоположными интересами / Ю.Б. Гермейер. – М.: Наука, 1976. – 327 с.

90. Петросян Л.А. Теория игр / Л.А.Петросян, Н.А.Зенкевич, Е.А.Семина. – М.: Высшая школа, 1999. – 300 с.

91. Губко М.В. Теория игр в управлении организационными системами. Издание 2 / М.В. Губко, Д.А. Новиков. – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова, 2005.– 138 с.

92. Бурков В.Н. Введение в теорию управления организационными системами / Под ред. чл.-корр. РАН Д.А. Новикова / В.Н.Бурков, Н.А.Коргин, Д.А. Новиков.– М.:Либроком,2009.– 264 с.

93. Бусыгин В. П. Микроэкономический анализ несовершенных рынков / В.П.Бусыгин, Е.В.Желободько, С. Г.Коковин, А. А.Цыплаков. – Новосибирск: Из-во НГУ, 1999.– 132 с.

94. Угольницкий Г. А. Динамические иерархические игры двух лиц в программных стратегиях и их приложения / Г. А.Угольницкий, А.Б.Усов // Математическая теория игр и ее приложения, т.5, №.2.– С. 82–104.

95. Горелик В.А. Теоретико-игровые модели принятия решений в эколого-экономическнх системах / В.А. Горелик , А.Ф. Кононенко. – М.: Из-во «Наука», 1982.– 147 с.

96. Горелик В.А. Анализ конфликтных ситуаций в системах управления / В.А. Горелик, М.А. Горелов, А.Ф. Кононенко. – М.: Радио и связь, 1991. – 286 с.

97. Dempe S. Foundations of bilevel programming. Kluwer Academie Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 2002. – 309 p.

98. Bard J.F. Practical Bilevel Optimization. Algorithms and Applications. Kluwer Academie Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 2002. – 453 p.

99. Multilevel optimizatioin: Algorithms and Applications. By edited Migdalas M., Pardalos P.M., Varbrand P. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1998. – 381 p.

100. Кротов К.В. Обоснование классификации задач построения расписаний, решаемых в многоуровневой системе выполнения конвейеризированных программ / К.В.Кротов // Международный научно-технический журнал «Проблемы управления и информатики», 2014, № 4.– С. 135-150.

101. Кормен Т. Алгоритмы. Построение и анализ. Изд. 3-е / Т.Кормен, Ч.Лейзерсон, Р.Ривест, К.Штайн. – М.: Из-во «Вильямс», 2013. – 1324 с.

102. Дасгупта С. Алгоритмы / С.Дасгупта, Х.Пападимитриу, У.Вазирани. – М.:Издательство МЦНМО, 2014. – 320 с.

103. Ковалев М.М. Матроиды в дискретной оптимизации. Изд. 3 / М.М.Ковалев – М.: Из-во «Едиториал УРСС», 2011.– 224 с.

104. Корте Б. Комбинаторная оптимизация. Теория и алгоритмы / Б.Корте, Й.Фиген. – М.: Из-во МЦНМО, 2015. – 723 с.

105. Тюхтина А.А. Методы дискретной оптимизации. Часть 2: Учебно-методическое пособие / А.А. Тюхтина. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2015. – 72 с.

106. Ковалев М.М. Дискретная оптимизация. Целочисленное программирование / М.М. Ковалев. – Минск: Из-во БГУ, 1977. – 192 с.

107. Сергиенко И.В. Математические модели и методы решения задач дискретной оптимизации / И.В. Сергиенко. – Киев: Наукова думка, 1988.– 472 с.

108. Сигал И.Х. Введение в прикладное дискретное программирование: модели и вычислительные алгоритмы:Учебное пособие / И.Х. Сигал, А.П. Иванова. – М.:ФИЗМАТЛИТ, 2002.– 240 с.

109. Кочетов Ю.А. Локальный поиск с чередующимися окрестностями / Ю.А. Кочетов, Н. Младенович, П. Хансен // Дискретный анализ и исследование операций, Том 10, №1. 2003.– С. 11-43.

110. Кононова П.А. Нижние и верхние оценки длины оптимального расписания презентаций медиа-объектов / П.А. Кононова // Дискретный анализ и исследование операций, Том 19, №1, 2012.– С. 54-73.

111. Кононова П.А. Локальный поиск с чередующимися окрестностями для задачи Джонсона с пассивным буфером / П.А. Кононова// Дискретный анализ и исследование операций, Том 19, №5, 2012.– С.63-82.

112. Кононова П.А. Алгоритмы построения расписаний для цеховых задач потокового типа с цифровым буфером.: дис. … канд. физ.-мат. наук: 05.13.18 / Кононова Полина Александровна – Новосибирск: Институт математики им. Соболева С.Л., 2012.– 106 с.

113. Свами М. Графы, сети и алгоритмы / М. Свами, К. Тхуласираман. – М.: Из-во «Мир», 1984.– 454 с.

114. Асанов М.О. Дискретная математика: графы, матроиды, алгоритмы / М.О. Асанов, В.А. Баранский, В.В. Расин. – Ижевск: НИЦ "РХД", 2001.– 288 с.

115. Кротов К.В. Градиентный метод составления статических расписаний для конвейерных систем, основывающийся на жадных стратегиях / К.В. Кротов // Вестник Новосибирского ГУ. Серия: Информационные технологии, 2015, т.13, № 1.– С.55-73.

116. Кротов К.В.Градиентный метод формирования динамических расписаний обработки данных в конвейерной системе при различных моментах времени их поступления / К.В. Кротов // Вестник Новосибирского ГУ. Серия: Информационные технологии, 2016, т.14, №1.– С.39-60.

117. Кротов К.В. Градиентный метод формирования динамических расписаний обработки данных в конвейерной системе при различных моментах времени их поступления и разных приоритетах / К.В. Кротов, Т.Ю. Кротова // Журнал «Вычислительные технологии», Новосибирск, Изд-во Института вычислительных технологий СО РАН, Том 21, №5, 2016. – С.77-94.

118. Кротов К.В. Метод построения динамических расписаний обработки данных в конвейерных системах при учете отказов сегментов / К.В.Кротов, Т.Ю.Кротова // Материалы 23-й Международной научно-технической конференции «Прикладные задачи математики». – Севастополь: Из-во СевГУ, 2014. – С. 128-135.

119. Кротов К.В. Градиентный метод составления динамических расписаний для конвейерных систем, учитывающий отказы сегментов / К.В. Кротов, Т.Ю. Кротова // Вестник Воронежского Государственного Университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии, №3, 2015.– С.84-99.

120. Кротов К.В. Комплексный метод определения эффективных решений по составам партий данных и расписаниям их обработки в конвейерных системах / К.В. Кротов // Вычислительные технологии, № 3, 2018.– С.58-76.

121. Кротов К.В., Кротова Т.Ю. Двухуровневая модель и методы определения эффективных составов партий данных и порядка их обработки в конвейерной системе / К.В. Кротов, Т.Ю. Кротова // Материалы международной научно-практической конференции «Информационные технологии и информационная безопасность в науке, технике и образовании "Инфотех-2015». – Севастополь: Из-во СевГУ, 2015. – С.9-10.

122. Кротов К.В. Построение расписаний выполнения заданий в многостадийных обрабатывающих системах при объединении их в партии / К.В.Кротов // Материалы I Междисциплинарной Всероссийской научно-практической конференции «Развитие методологии современной экономической науки и менеджмента», г. Севастополь, 4-5 мая 2017 г. – Севастополь: Из-во СевГУ, 2017 г. – С.629-632.

123. Кротов К.В. Обоснование двухуровневой модели определения эффективных расписаний обработки партий данных в конвейерной системах / К.В.Кротов // Материалы научной сессии НИЯУ МИФИ-2015, т.3. «Защищенные инфокоммуникационные технологии и системы кибербезопасности, экономические и правовые проблемы инновационного развития атомной отрасли, методология профессионального и общего образования, технические секции обособленных подразделений НИЯУ МИФИ». – М.: Из-во НИЯУ МИФИ, 2015. – С. 83.

124. Кротов К.В. Обоснование методов для определения эффективных расписаний обработки партий данных в конвейерных системах / К.В.Кротов // Материалы научной сессии НИЯУ МИФИ-2015, т.3. «Защищенные инфокоммуникационные технологии и системы кибербезопасности, экономические и правовые проблемы инновационного развития атомной отрасли, методология профессионального и общего образования, технические секции обособленных подразделений НИЯУ МИФИ». – М.: Из-во НИЯУ МИФИ, 2015. – С. 83.

125. Гладков Л.А. Генетические алгоритмы / Л.А.Гладков, В.В.Курейчик, В.М.Курейчик. – М.: Из-во Физматлит, 2006. – 320 с.

126. Курейчик В.М. Генетические алгоритмы и их применение / В.М.Курейчик.– Таганрог: Из-во Таганрогского РТУ, 2002. – 244 с.

127. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М.Пилиньский, Л.Рутковский. – М.: Из-во «Горячая линия–Телеком», 2006. – 452 с.

128. Кротов К.В. Использование аппарата генетических алгоритмов при формирования решений по составам партий данных в двухуровневой задаче построения комплексных расписаний их обработки / К.В. Кротов //Автоматизированные технологии и производства. Международный научно-технический журнал, 2017, №2 (16). – С.23-34.

129. Кротов К. В. Математическая модель и алгоритм метода ветвей и границ для оптимизации решений по составам пакетов в многостадийных системах / К.В.Кротов // Информатика и автоматизация (Труды СПИИРАН), 2022. Т.21, Вып.1.– С.5-37.

130. Самойленко А.П. Прикладные элементы теории эффективности архитектур объектно-ориентированных ЭВМ. Учебное пособие / А.П.Самойленко, С.А.Черный. – Таганрог: Из-во ТРТУ, 2002. – 79 с.

131. Подиновский В.В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В.В. Подиновский, В.Д. Ногин. – М.: Наука, 1982. – 254 с.

132. Ногин В.Д. Принятие решений при многих критериях. Учебно-методическое пособие / В.Д.Ногин. – СПб.: Издательство «ЮТАС», 2007. – 104 с.

133. Ногин В.Д. Границы применимости распространенных методов скаляризации при решении задач многокритериального выбора / В.Д.Ногин // Методы возмущений в гомологической алгебре и динамика систем: Межвуз. сб. науч. тр.– Саранск: Из-во Мордов. ун-та, 2004.– С. 59-68.

134. Кротов К.В. Двухуровневая модель построения комплексных расписаний обработки партий данных в конвейерных системах при задании директивных сроков формирования комплектов / К.В.Кротов // Автоматизированные технологии и производства. Международный научно-технический журнал, 2016, №4 (14). – С.33-44.

135. Кротов К.В. Управление обработкой партий данных в конвейерных системах при формировании комплектов и заданных для них директивных сроках / К.В.Кротов // Материалы международной научно-практической конференции «Информационные технологии и информационная безопасность в науке, технике и образовании "Инфотех – 2017». – Севастополь: Из-во СевГУ, 2017.– С.16-19.

136. Кротов К.В. Обоснование методов построения комплексных расписаний обработки партий данных при условии оперативного формировании комплектов из результатов / К.В.Кротов // Вестник Воронежского Государственного Университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии, 2018, №4. – С.58-72.

137. Кротов К.В. Построение комплексных расписаний выполнения пакетов заданий при формировании комплектов в заданные директивные сроки / К.В.Кротов, А.В.Скатков // Информатика и автоматизация (Труды СПИИРАН). 2021, Т.20, Вып.3. – С. 654-689.

138. Кротов К.В. Обоснование модели многоуровневого программирования для построения расписаний групповой обработки партий данных в конвейерной системе при наличии ограничений / К.В. Кротов // Вестник Иркутского национального исследовательского технического университета, 2016, №1 (108). – С.35-47.

139. Кротов К.В. Обоснование модели комплексного планирования обработки пакетов данных в конвейерной системе при наличии ограничений на длительности интервалов ее функционирования / К.В. Кротов // Материалы V межрегиональной научно-практической конференции «Перспективные направления развития отечественных информационных технологий». – Севастополь: Из-во СевГУ, 2019. – С. 127-132.

140. Кротов К.В. Обоснование метода построения комплексных расписаний обработки пакетов данных в конвейерной системе при наличии ограничений на длительности интервалов ее функционирования / К.В. Кротов // Материалы V межрегиональной научно-практической конференции «Перспективные направления развития отечественных информационных технологий». – Севастополь: Из-во СевГУ, 2019. – С. 132-136.

141. Кротов К.В. Построение комплексных расписаний обработки пакетов данных в конвейерной системе при задании ограничений на длительность интервалов времени ее функционирования / К.В. Кротов // Труды учебных заведений связи, т.6, №3, 2020. – С.75-90.

142. Кротов К.В. Использования генетических алгоритмов для построения эффективных комплексных расписаний обработки пакетов данных в конвейерной системе при задании ограничений на длительность интервалов времени ее функционирования / К.В. Кротов // Вестник Воронежского Государственного Университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии, 2020, №1. – С.71-87.

143. Кротов К.В., Дрозин А.Ю. Иерархические модели построения расписаний обработки данных в конвейерных системах при наличии ограничений и формировании комплектов / К.В. Кротов, А.Ю. Дрозин // Материалы научной сессии НИЯУ МИФИ-2015. т.3. «Защищенные инфокоммуникационные технологии и системы кибербезопасности, экономические и правовые проблемы инновационного развития атомной отрасли, методология профессионального и общего образования, технические секции обособленных подразделений НИЯУ МИФИ».– М.: Изво НИЯУ МИФИ, 2015. – С. 82.

144. Кротов К.В. Многоуровневая модель построения расписаний обработки партий данных в конвейерных системах при формировании комплектов и наличии ограничений / К.В. Кротов // Труды СПИИРАН, 2016, Вып. 4(47). – С. 65-91.

145. Кротов К.В. Оптимизация планирования выполнения пакетов заданий в многостадийных системах при ограничениях и формировании комплектов / К.В. Кротов, А.В. Скатков // Компьютерные исследования и моделирование, 2021, №5. – С. 917-946.

146. Krotov K.V. Schedule planning proceeding of transfer batches in Flexible Automated Lines while sets are forming and limits are recognized / K.V. Krotov, A.Y. Drozin, E.N. Zaikina // Internation Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: Mechanical Engineering and Materials Science (ICMTMTE 2021), 6-10 September 2021.– Sevastopol, 2021. #№03094.– 8 p.

147. Милованов И.В. Основы разработки программного обеспечения вычислительных систем: учебное пособие / И.В.Милованов, В.И.Лоскутов. – Тамбов: Из-во ТГТУ, 2011.– 88 с.

148. Черушева Т. В. Проектирование программного обеспечения. Учебное пособие / Т. В. Черушева. – Пенза : Из-во ПГУ, 2014. – 172 с.

149. Мейер Б. Объектно-ориентированное конструирование программных систем / Б. М. Мейер. – М.: Из-во «Русская редакция», 2005.– 768 с.

150. Буч Г., Максимчук Р.А., Энгл М.У., .Янг Б.Д., Коналлен Д. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений / Г.Буч, Р.А. Максимчук, М.У. Энгл, Б.Д. Янг, Д.М. Коналлен. – М.: Изд-во «Вильямс», 2008.– 721 с.

151. Фридман А.Л. Основы объектно-ориентированной разработки программных систем / А.Л. Фридман. – М.: Из-во «Финансы и статистика», 2000. – 192 с.

152. Гамма Э. Приемы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования / Э.Гамма, Р.Хелм, Р.Джонсон, Дж.Влиссидес. – СПб: Из-во «Питер», 2001.– 368 с.

153. Вернон В. Реализация методов предметно-ориентированного проектирования / В. Вернон. – М.: Из-во «Вильямс», 2016.– 688 с.

154. Эванс Э. Предметно-ориентированное проектирование. Структуризация сложных программных систем / Э.Эванс. – М.: Из-во «Вильямс», 2011. – 448 с.

155. Тагайцева С. Г. Предметно-ориентированное программирование. Учебное пособие / С. Г. Тагайцева, Т.В. Юрченко. – Н. Новгород: Из-во ННГАСУ, 2018. – 84 с.

156. Растригин Л.А. Адаптация сложных систем. Методы и приложения / Л.А.Растригин. – Рига: Изд-во «Зинатне», 1981.– 375 с.

157. Ткачук Н.В. Структурная адаптация программных систем: анализ состояния проблемы и некоторые подходы к ее решению / Н.В.Ткачук, К.А.Нагорный // Восточно-европейский журнал передовых технологий, 2009, том 6, №4 (42). – С.33-36.

158. Соммервилл И. Инженерия программного обеспечения / И.Соммервилл. – М.: Из-во «Вильямс», 2002.– 618 с.

159. Назаров С.В. Архитектура и проектирование программных систем / С.В.Назаров. – М.: Из-во «Инфра-М», 2013.– 413 с.

160. Белик А. Г. Проектирование и архитектура программных систем. Учебное пособие / А. Г. Белик, В. Н. Цыганенко. – Омск: Из-во ОмГТУ, 2016. – 96 с.

161. Деревянко А.С. Технологии и средства консолидации информации: Учебное пособие / А.С.Деревянко, М.Н. Солощук. – Харьков: Изд-во НТУ "ХПИ", 2008. – 432 с.

162. Гик Ю.Л. Анализ методологий сервис-ориентированной архитектуры (СОА) / Ю.Л.Гик // Программная инженерия. 2013. №7. – С.16-24.

163. Ньюман С. Создание микросервисов / С. Ньюман. – СПб: Из-во «Питер», 2016. – 304 с.

164. Erl T. Service-Oriented Architecture:Concepts,Technology and Design.The Prentice Hall, 2005. – 760 p.

165. Erl T., Karmarkar A., Haas H. Web Service Contract Design and Versioning for SOA. The Prentice Hall, 2008. – 800 p.

166. Erl T. Service-Oriented Architecture: Analysis and Design for Services and Microservices. The Prentice Hall, 2016. – 416 p.

167. Salter D., Jennings F. Building SOA-Based Composite Applications Using NetBeans IDE 6. Birmingham-Mumbai: Packet Publishing, 2008. – 300 p.

168. Raj G.S. PG B., Babo K., Palkovic R.. Implementing Service-Oriented Architectures (SOA) with the Java EE 5 SDK. Sun Microsystems, 2006. – 65 p.

169. Balani A., Chandramohan N., Chaubal A., Keen M., Nadgir D. K., Sharma M., Steele M., Tost A. Getting Started with IBM WebSphere Business Services Fabric V6.1. IBM, 2008. – 540 p.

170. Keen M., Adinolfi O., Hemmings S., Humphreys A., Kanthi H., Nottingham A. Patterns: SOA with an Enterprise Service Bus in WebSphere Application Server V6. IBM, 2005. – 410 p.

171. Juric M.B., Mathew B., Sarang P. Business Process Execution Language for Web Services, Second Edition. - Birmingham-Mumbai: Packet Publishing, 2006. – 985 p.

172. Hansen M.D. SOA Using Java Web Services. Prentice Hall, 2007. – 605 p.

173. Alur N., Cong Z., Mlynski M., Balakrishnan S., Suhre O. SOA Solutions Using IBM Information Server. IBM, 2007. –506 p.

174. Josuttis N.M. SOA in Practice. Califoia: O'Reilly, 2007. –344 p.

175. Swithinbank P., Bandaru S., Crooks G., Ferrier A., He J., Krishnaswamy R., Mann V., Viale M. Connecting Enterprise Applications to WebSphere Enterprise Service Bus. IBM, 2007. – 550 p.

176. Wahli U., Cui H., Fleming C., Mehta M., Rohr M., Ugurlu P., Gan P., Gonzalez C., Farrell D. M., Heerdegen A. Rational Application Developer V7 Programming Guide. IBM, 2007. – 1384 p.

177. Hailstone R., Illsley R., Jones T., Kellet A. SOA Platforms. Butler Group, 2007. – 525 p.

178. Yeager D.P. Object-Oriented Programming Languages and Event-Driven Programming. Mercury Learning & Information, 2014. – 600 p.

179. Blokdyk G.Event-driven programming. The Ultimate Step-By-Step Guide.5STARCooks, 2018.– 284 p.

180. Ferg S. Event-Driven Programming: Introduction, Tutorial, History. Autoedición, 2006. – 59 p.

181. Levina O., Stantchev V. Realizing Event-Driven SOA.// Fourth International Conference on Internet and Web Applications and Services, ICIW 2009, 24-28 May 2009, Venice, Italy. – P. 37-42.

182. Stopford B. Designing Event-Driven Systems. O'Reilly, 2018.– 166 p.

183. Кротов К.В. Информационная система построения комплексных расписаний выполнения пакетов заданий в многостадийных (конвейерных) системах / К.В. Кротов, А.Ю. Дрозин, В.К. Ростовская // Свидетельство на государственную регистрацию программы для ЭВМ, №2021619004, дата государственной регистрации 03 июня 2021.

184. Кротов К.В. Информационная система построения статических и динамических расписаний выполнения заданий в многостадийных (конвейерных) системах / К.В. Кротов, А.Ю. Дрозин, В.К. Ростовская // Свидетельство на государственную регистрацию программы для ЭВМ, №2021619098, дата государственной регистрации 04 июня 2021.

185. Кротов К.В. Информационная система определения эффективных решений по составам партий данных и расписаниям их обработки в конвейерных системах / К.В. Кротов, А.Ю. Дрозин, В.К. Ростовская // Свидетельство на государственную регистрацию программы для ЭВМ, №2021667167, дата государственной регистрации 26 октября 2021.

186. Втюрин С.А. Использование данных дистанционного зондирования Земли из космоса для прогнозного моделирования экологической обстановки / С.А. Втюрин, Н.А .Князев, Ю.А. Палатов, С.Н. Романенко // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007, т.1, № 4. – С. 111-118.

187. Жарко В. О. Методы обработки данных спутниковых измерений спектрально-временных характеристик отраженного излучения для дистанционной оценки параметров лесного покрова: дис. … канд. физ.-мат. наук: 01.04.01 / Жарко Василий Олегович. – М.: Институт космических исследований РАН, 2015.– 131 с.

188. Ракунов С.В., Поздняков А.П., Дмитриев М.Д. Внедрение современных информационных технологий мониторинга экологической обстановки / С.В.Ракунов, А.П.Поздняков, М.Д. Дмитриев // Геоинформационные технологии в решении задач рационального природопользования Материалы II Всероссийской научно-практической конференции.– Ханты-Мансийск: Из-во «Югорский формат», 2015.– С. 68-74.

189. Саватеева О. А. Несанкционированные свалки в городах как одна из проблем перехода к устойчивому развитию территорий / О. А.Саватеева, Е.Ю. Бурова // Науки о Земле. Евразийский Союз Ученых (ЕСУ), 2014, № 4.– С. 15-18.

190. Барталев С.А. Дистанционная оценка параметров сельскохозяйственных земель по спутниковым данным спектрорадиометра MODIS / С.А. Барталев, Е.А. Лупян, И.А. Нейштадт, И.Ю. Савин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2005, т.2, №2. – С. 228-236.

191. Толпин В. А. Система обработки и визуализации данных дистанционного зондирования Земли для мониторинга состояния сельскохозяйственной растительности.: дис. … канд. техн. наук: 05.13.01 / Толпин Владимир Аркадьевич. – Рязань, Рязанская государственная радиотехническая академия, 2013. – 160 с.

192. Сутырина Е.Н. Дистанционное зондирование Земли. Учебное пособие / Е.Н. Сутырина. – Иркутск: Из-во Иркутского государственного университета, 2013. – 165 с.

193. Герман М.А. Космические методы исследования в гидрометеорологии / М.А. Герман. – Л.: Из-во «Гидрометеоиздат», 1985. – 352 с.

194. Воробьева А.А. Дистанционное зондирование Земли / А.А.Воробьева.– СПб.:Из-во Санкт-Петербургского национального исследовательского университета «ИТМО», 2012.– 168 с.

195. Барталев С.А. Распознавание пахотных земель на основе многолетних спутниковых данных спектрорадиометра MODIS и локально-адаптивной классификации / С.А. Барталев, В.А. Егоров, Е.А. Лупян, Д.А. Плотников, И.А. Уваров // Компьютерная оптика, 2011, т. 35, № 1.– С. 103-116.

196. Бекренев О.В. Особенности автоматической потоковой обработки данных КМСС космического комплекса «Метеор-3М» / О.В. Бекренев, Б.С. Жуков, Л.А. Гришанцева, И.В. Полянский // Геоматика, 2015, №2.– С. 32-36.

197. Макриденко Л.А. Космический аппарат гидрометеорологического и океанографического наблюдения «Метеор-М» №1 / Л.А. Макриденко, С.Н. Волков, А.В. Горбунов, Ю.В. Трифонов, В.П. Ходненко // Вопросы электромеханики, т. 108, 2009. – С.44-55.

198. Комарова А. Ф. Открытые мультиспектральные данные и основные методы дистанционного зондирования в изучении растительного покрова / А. Ф. Комарова, И. В. Журавлева, В. М. Яблоков // Принципы экологии, 2016, № 1. – С. 40–74.

199. Малышева Н.В. Автоматизированное дешифрирование аэрокосмических изображений лесных насаждений. Учебное пособие / Н.В. Малышева. – М.: Из-во Московского государственного университета леса, 2012.– 154 с.

200. Барталев С.А. Спутниковый мониторинг бореальных систем / С.А. Барталев, Е.А. Лупян // Природа, 2005, №9. – С.44-53.

201. Токарева О.С. Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли / О.С. Токарева. – Томск: Из-во Томского политехнического университета, 2010. – 148 с.

202. Кирвякова А. В. Эрозия почв юго-западной части Ставропольской возвышенности и прилегающих территорий Прикубанской равнины : автореф. дис. … канд. географ. наук: 25.00.21 / Кирвякова Анна Валерьевна. – Ставрополь: Ставропольский государственный университет, 2008.– 28 с.

203. Аввакумова А.О. Анализ динамики структуры землепользования на основании данных дистанционного зондирования Земли / А.О. Аввакумова // Научные ведомости Белгородского ГУ. Серия Естественные науки, 2018, т. 42, № 2. – С. 214–222.

204. Токарева О.С. Оценка последствий нефтяных разливов на основе данных дистанционного зондирования Земли / О.С. Токарева, Д.С. Климентьев // ИнтерГео-Сибирь, Из-во ГОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия», 2010, т.4, №1. – С.130-133.

205. Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса. Под редакцией В. Г. Бондура. – М.: Научный мир, 2012. – 558 с.

206. Федотова Е.В. Анализ сезонной динамики растительного покрова на основе данных дистанционного зондирования Земли / Е.В. Федотова, А.А. Жолдуев, В.Г. Изосимов, Ю.Д. Шпирук, Ю.А. Маглинец, Г.М. Цибульский // Журнал Сибирского Федерального университета, 2014, №7. – С. 976-983.

207. Бурым Ю.В. Мониторинг эрозионных процессов средствами космической съемки / Ю.В. Бурым, А.В. Скрипчинский // Наука. Инновации. Технологии – Ставрополь: Из-во СКФУ, 2016, № 2. – С. 89-98.

208. Тимофеева С.С. Мониторинг свалок твердых бытовых и промышленных отходов в Иркутском районе по данным космических снимков./ С.С. Тимофеева, Л.В.Шешукова, А.Л.Охотин // Вестник ИрГТУ, 2012, №9 (68).– Иркутск: Из-во Иркутского государственного технического университета. – С. 76-81.

209. Липилин Д. А. Распределение и динамика объектов размещения твердых бытовых отходов на территории Краснодарского края: дис. … канд. геогр. наук: 25.00.23 / Липилин Дмитрий Александрович.– Краснодар: ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет», 2014. – 184 с.

210. Ту Дж. Принципы распознавания образов / Дж.Ту, Р.Гонсалес. – М.: Из-во «Мир», 1978.– 414 с.

211. Лабутина И.А. Использование данных дистанционного зондирования для мониторинга экосистем ООПТ. Методическое пособие / И.А. Лабутина, Е.А. Балдина // Всемирный фонд дикой природы (WWF России). Проект ПРООН/ГЭФ/МКИ «Сохранение биоразнообразия в российской части Алтае-Саянского экорегиона». – М., 2011.– 88 с.

212. Савицкая О. В. Методы спутникового мониторинга оценки состояния и продуктивности посевов зерновых культур.: дис. … канд. геогр. наук: 25.00.30 / Савицкая Ольга Владимировна.– Обнинск: ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии», 2016. – 184 с.

213. Адамович Т. А. Использование различных комбинаций спектральных каналов космических снимков спутника Landsat 8 для оценки природных сред и объектов (обзор) / Т. А. Адамович, Т. Я. Ашихмина, Г. Я. Кантор // Теоретическая и прикладная экология, 2017, №2. – С.9–18.

214. Клименко К.В. Мониторинг распространения стихийных свалок твердых коммунальных отходов в республике Крым / К.В. Клименко, Т.А. Орлова, Р.Р. Исмаилов // Вестник факультета землеустройства Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – СПб: Из-во Санкт-петербургского государственного аграрного университета, 2017, №3. – С.26-29.

215. Елсаков В. В. Автоматизированное дешифрирование аэрокосмических изображений. Учебное пособие / В. В. Елсаков, Д. В. Кириллов. – Сыктывкар: Из-во Сыктывкарского лесного института, 2013. – 44 с.

216. Чыонг Н. К. Оценка состояния лесного фонда Ленинградской области и ГИС-прогноз его развития: дис. … канд. с.-х. наук: 06.03.02 / Чыонг Нгуен Конг. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, 2014. – 174 с.

217. Черепанов А.С. Вегетационные индексы / А.С. Черепанов// Геоматика, 2011,№2.–С.98-102.

218. Братков В. В. Вегетационные индексы и их использование для картографирования горных ландшафтов российского Кавказа / В.В. Братков, З.В. Атаев // Электронный научный журнал «Apriori. Серия: естественные и технические науки», 2017, №1. – С.1-21.

219. McFeeters S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features // International Journal of Remote Sensing. 1996, vol. 17, #7. – p.1425-1432.

220. Катаев М.Ю. Методика обнаружения водных объектов по многоспектральным спутниковым измерениям / М.Ю. Катаев, А.А. Бекеров // Доклады ТУСУР, 2017, т.20, № 4.– С. 105-108.

221. Волкова Е.В. Дистанционное определение температуры подстилающей поверхности, приземной температуры воздуха и эффективной температуры по спутниковым данным для юга Европейской территории России / Е.В. Волкова, С.А. Успенский // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2016, т. 13, № 5. – С. 291–303.

222. Соломатов Д. В. Алгоритмы и программные средства атмосферной коррекции спутниковых ИК-измерений на основе RTM-метода: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.13.18 / Соломатов Дмитрий Владимирович. – Томск: Томской государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2010. – 23 с.

223. Соломатов Д. В. Программные средства температурного зондирования Земной поверхности с помощью RTM-метода / Д. В. Соломатов // Известия Томского политехнического университета. Серия «Управление, вычислительная техника и информатика», 2009, т. 315, № 5. – С.33-38.

224. Landsat 7 Science Data Users Handbook. Department of the Interior U.S. Geological Survey [Электронный ресурс] // NASA.GOV: сервер Национального управления США по воздухопла-

ванию и исследованию космического пространства. Режим доступа: http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/pdfs/ Landsat7Handbook.pdf .

225. Landsat 8 Science Data Users Handbook. Department of the Interior U.S. Geological Survey [Электронный ресурс] // NASA.GOV: сервер Национального управления США по воздухоплаванию и исследованию космического пространства. Режим доступа: http://landsat.usgs.gov/documents/ Landsat8DataUsersHandbook.pdf.

226. Алескерова А. А. Двухканальный метод восстановления температуры поверхности Черного моря по измерениям Landsat-8 / А.А. Алескерова, А. А. Кубряков, С. В. Станичный // Исследование Земли из космоса, 2016, № 4. – С. 57-64.

227. Дамбаева З. Б. Краткий курс основ почвоведения. Методическое пособие / З.Б. Дамбаева, Ц.Ц. Цыбикдоржиев. – Улан-Удэ: Из-во БГСХА им. В. Р. Филиппова, 2009. – 51 с.

228. Григорьян Б.Р. Почвоведение. Учебное пособие / Б.Р. Григорьян, В.И. Кулагин. – Казань: Из-во Казанского Государственного университета, 2008. – 96 с.

229. Савин И.Ю. Использование спутниковых данных для составления почвенных карт: современные тенденции и проблемы / И.Ю. Савин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2016, т. 13, № 6. – С. 29-39.

230. Симакова М. С. От визуального дешифрирования аэрофотоснимков и полевого картографирования почв до автоматизированного дешифрирования и картографирования по космическим снимкам / М. С. Симакова // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева, 2014. Вып. 74. – С. 3-19.

231. Певцов Е.Ф. Электронные модули и алгоритмы обработки радиолокационных изображений / Е.Ф.Певцов, П.А. Горбокоченко // Материалы Международной научно-технической конференции INTERMATIC – 2016, 21 – 25 ноября 2016 г. – М.: МИРЭА, 2016. – С. 270-272.

232. Неронский Л.Б. Микроволновая аппаратура дистанционного зондирования поверхности земли и атмосферы. Радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны. Ч. 2. Учебное пособие / Л.Б. Неронский, В.Ф. Михайлов, И.В. Брагин. – СПб.: Из-во СПбГУАП, 1999. – 220 с.

233. Балдина Е.А. Радиолокационное зондирование для решения задач сельского хозяйства / Е.А. Балдина, П.В. Денисов, А.С. Мартьянов, К.А. Трошко // Материалы VI Всероссийских Армандовских чтений: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред, Материалы VII Всероссийской научной конференции, 2016 г. – Муром: Полиграфический центр МИ ВлГУ, 2016 г.– С.162-172.

234. Финкельштейн М.И. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии / М.И. Финкельштейн, В.А. Кутев, В.П.Золотарев. – М.: Недра, 1986.– 128 с.

235. Иванов В.К. Радиолокационное зондирование лесов многочастотными РБО/ В.К. Иванов, С.Е.Яцевич // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2007, т.2, №.4. – С. 226-235.

236. Коулсон С. Спутниковое дистанционное зондирование: картирование рисков при сейсморазведке / С. Коулсон, О. Гробак, Э. Каттс, Д. Суини, Р. Хинш, М. Шахингер, А. Лааке, Д. Монк, Д. Товарт // Нефтегазовое обозрение, 2009, т. 20, №4. – С.50-65.

237. Курлович Д.М. Морфометрический ГИС-анализ рельефа Беларуси / Д.М. Курлович // Земля Беларуси, 2013, № 4.– С.42-48.

238. Позаченюк Е. А. ГИС-анализ морфометрических показателей рельефа центрального предгорья главной гряды крымских гор для целей ландшафтного планирования / Е. А. Позаченюк, Е. А.Петлюкова // Учёные записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология, 2016, т. 2 (68), №2. – С. 95–111.

239. Никитенков А.Н. Картографические построения и оценка морфометрических параметров водосборов горно-складчатых территорий по данным спутниковой съемки (SRTM) (на примере северной части Кузнецкого Алатау) / А.Н. Никитенков, Е.М. Дутова, Д. С. Покровский // Вестник ТГАСУ, 2013, № 1. – С. 223- 231.

240. Барталев С.А. Система автоматизированного сбора, обработки и распространения спутниковых данных для мониторинга сельскохозяйственных земель / С.А. Барталев, М. А. Бурцев, Д.В. Ершов, В.Ю. Ефремов, В.В. Ильин, Е.А. Лупян, А.А. Мазуров, Н.Н. Мельник, И.А. Нейштадт, А.А. Полищук, А.В. Столпаков, А.А. Прошин, В.А. Темников, Е.В. Флитман // Материалы второй открытой Всероссийской конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса". Москва, 16-18 ноября 2004 г. – М.: ИКИ РАН, 2004.– С.57.

241. Абушенко Н.А. Применение данных дистанционного спутникового зондирования для слежения за состоянием сельскохозяйственных земель и посевов Иркутской области / Н.А. Абушенко, С.А. Тащилин, А.И. Лобыцин, Л.В. Нефедьев // Материалы второй открытой Всероссийской конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса". Москва, 16-18 ноября 2004 г. – М.: ИКИ РАН, 2004. – С.178.

242. Барталев С.А. Определение параметров сельскохозяйственного производства по данным дистанционного зондирования / С.А. Барталев, Е.А. Лупян, И.А. Нейштадт, И.Ю. Савин // Материалы второй открытой Всероссийской конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса". Москва, 16-18 ноября 2004 г. – М.: ИКИ РАН, 2004.– С.179.

243. Султангазин У.М. Космический контроль системы севооборота пахотных земель Северного Казахстана / У.М. Султангазин, Н.Р. Муратова, А.Г. Терехов // Материалы второй открытой

Всероссийской конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса". Москва, 16-18 ноября 2004 г. – М.: ИКИ РАН, 2004.– С.198.

244. Терехов А.Г. Оценка дат ярового сева в Северном Казахстане по данным Terra / MODIS / А.Г. Терехов, Н.Р. Муратова // Материалы второй открытой Всероссийской конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса". Москва, 16-18 ноября 2004 г. – М.: ИКИ РАН, 2004.– С. 202.

245. Барталёв С.А. Возможности использования системы спутникового мониторинга сельскохозяйственных земель / С.А. Барталев, Е.А. Лупян, А.А. Нестеренко, И.Ю. Савин // Материалы восьмой открытой Всероссийской конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса". Москва, 15-19 ноября 2010 г. – М.: ИКИ РАН, 2010. – С. 60-61.

246. Повх В.И. Оценка динамики структуры сельхозугодий и состояния основных сельскохозяйственных культур / В.И. Повх, Е.А. Воробейчик, Л.А. Шляхова // Материалы восьмой открытой Всероссийской конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса". Москва, 15-19 ноября 2010 г. – М.: ИКИ РАН, 2010. – С.80-81.

247. Мышляков С. Г. Технологии космического мониторинга на службе агропромышленного комплекса России: реалии и перспективы / С. Г.Мышляков // «Структура и морфогенез почвенного покрова в условиях антропогенного воздействия». Материалы Международной научно.-практической конференции, 17 – 20 сент. 2013 г. – Минск: Изд. центр БГУ, 2013.– С. 382–386.

248. Барталев С.А. Современные возможности создания региональной системы космического мониторинга экологической обстановки и контроля хозяйственной деятельности / С.А. Барталев, Н.А. Князев, Ю.С. Крашенинникова, Е.А. Лупян, Ю.А. Палатов, А.А. Мазуров, Е.В. Флитман // Материалы второй открытой Всероссийской конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Москва, 16-18 ноября 2004 г.– М.: ИКИ РАН, 2004.– С.59.

249. Ершов Д.В. Съемка MODIS/TERRA в мониторинге вспышек насекомых-вредителей / Д.В. Ершов, Н.В. Девятова // Материалы второй открытой Всероссийской конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Москва, 16-18 ноября 2004 г. – М.: ИКИ РАН, 2004. – С.189.

250. Исаев А.С. Состояние и перспективы организации спутникового мониторинга массового размножения вредных насекомых в лесах Сибири / А.С. Исаев, Д.В. Ершов, Н.И. Лямцев, Е.А. Лупян, М.Е. Кобельков, Б.С. Денисов // Материалы второй открытой Всероссийской конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Москва, 16-18 ноября 2004 г. – М.: ИКИ РАН, 2004. – С.190.

251. Федотова Е.В. Применение снимков Landsat и Spot для обнаружения поврежденных сибирским шелкопрядом лиственничных лесов Якутии / Е.В.Федотова // Материалы восьмой открытой Всероссийской конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Москва, 15-19 ноября 2010 г. – М.: ИКИ РАН, 2010.– С.94-95.

252. Крылов А.М., Бобринский А.Н. Дистанционный мониторинг вспышки массового размножения непарного шелкопряда в Красноярском крае / А.М. Крылов, А.Н. Бобринский // Материалы восьмой открытой Всероссийской конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Москва, 15-19 ноября 2010 г. – М.: ИКИ РАН, 2010. – С.288.

253. Савин И.Ю. Спутниковый мониторинг реакции растительности на засуху 2010 г. в России / И.Ю. Савин, С.А. Барталев, Е.А. Лупян, В.А. Толпин // Материалы восьмой открытой Всероссийской конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Москва, 15-19 ноября 2010 г. – М.: ИКИ РАН, 2010. – С.10-11.

254. Толпин В.А. Возможности оперативного выявления аномалий в динамике развития растительности на основе данных прибора MODIS / В.А. Толпин, Е.А. Лупян, И.Ю. Савин, С.А. Хвостиков // Материалы восьмой открытой Всероссийской конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Москва, 15-19 ноября 2010 г. – М.: ИКИ РАН, 2010. – С. 61.

255. Лупян Е.А. Использования спутникового сервиса ВЕГА в региональных системах дистанционного мониторинга / Е.А. Лупян, С.А. Барталев, В.А. Толпин, В.О. Жарко, Ю.С. Крашенинникова, А.Ю. Оксюкевич // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014, т. 11, № 3. – С. 215–232.

256. Лупян Е.А. Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности («ВЕГА») / Е.А. Лупян, И.Ю. Савин, С.А. Барталев, В.А. Толпин, И.В. Балашов, Д.Е. Плотников // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2011, т. 8, №1. – С. 190-198.

257. Лупян Е.А. Применение информационной системы дистанционного мониторинга "ИСДМ-Рослесхоз" для определения пожарной опасности в лесах Российской федерации. Учебное пособие / Е.А. Лупян, Е.В. Флитман, Е.В. Щербенко, А.А. Галеев, В.Ю. Ефремов, В.А. Толпин, Д.В. Ершов. – Пушкино, ФГУ "Авиалесоохрана", 2007.– 82 с.

258. Ялдыгина Н. Б. Создание прототипа подсистемы «Геоинформационный портал «Леса России» и ГИС ИСДМ-Рослесхоз» / Н.Б.Ялдыгина // Геоинформационные технологии, №3, 2013. – С.65-67.

259. Ковалев Н.А. Методические рекомендации по обучению специалистов по использованию Информационной системе дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз) / Н.А. Ковалев, В.Е. Щетинский, Р.В. Котельников, Н.А. Коршунов,

И.В. Балашев, В.Ю. Ефремов, Е.А. Лупян, Е.В. Флитман, Д.В. Ершов. – Пушкино, ФГУ "Авиалесоохрана", 2010. – 89 с.

260. Барталев С.А. Информационная система дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства РФ (состояние и перспективы развития) / С.А. Барталев, Д.В. Ершов, Г.Н. Коровин, Р.В. Котельников, Е.А. Лупян, В.Е. Щетинский // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2008, т.2, № 5.– С. 419-429.

261. Лупян Е.А. Организация работы со спутниковыми данными в информационной системе дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз) / Е.А. Лупян, С.А. Барталев, Д.В. Ершов, Р.В. Котельников, И.В. Балашов, М.А. Бурцев, В.А. Егоров, В.Ю. Ефремов, В.О. Жарко, К.А. Ковганко, П.А. Колбудаев, Ю.С. Крашенинникова, А.А. Прошин, А.А. Мазуров, И.А. Уваров, Ф.В. Стыценко, И.Г. Сычугов, Е.В. Флитман, С.А. Хвостиков, П.П. Шуляк // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2015, т. 12, № 5.– С. 222–250.

262. Лупян Е.А. Технология построения автоматизированных информационных систем сбора, обработки, хранения и распространения спутниковых данных для решения научных и прикладных задач / Е.А. Лупян, А.А. Мазуров, Р.Р. Назиров, А.А. Прошин, Е.В. Флитман // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2004, т.1, № 5. – С. 81–88.

263. Уваров И.А. Организация работы с метеорологической информацией в информационных системах дистанционного мониторинга / И.А. Уваров, О.А.Халикова, И.В.Балашов, М.А.Бурцев, Е.А.Лупян, А.М.Матвеев, А.Е.Платонов, А.А.Прошин, В.А.Толпин, Ю.С. Крашенинникова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2013, т.10, № 2.– С.30-45.

264. Лупян Е.А. Создание технологий построения информационных систем дистанционного мониторинга / Е.А. Лупян, И.В. Балашов, М.А. Бурцев, В.Ю. Ефремов, А.В. Кашницкий, Д.А. Кобец, Ю.С. Крашенинникова, А.А. Мазуров, Р.Р. Назиров, А.А. Прошин, И.Г.Сычугов, В.А. Толпин, И.А. Уваров, Е.В. Флитман // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2015, т. 12, № 5. – С. 53-75.

265. Миклашевич С.Э. Программно-аппаратный комплекс для сбора, обработки, архивации и распространения спутниковых данных / С.Э. Миклашевич, И.В. Балашов, М.А. Бурцев, В.Ю. Ефремов, А.А. Мазуров, А.М. Матвеев, А.А. Прошин, К.С. Сенько, М.В. Раденков, Е.В. Флитман // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2012, т. 9, №4. – С. 47-56.

266. Лупян Е.А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей

среды / Е.А. Лупян, А.А. Прошин, М.А. Бурцев, И.В. Балашов, С.А. Барталев, В.Ю. Ефремов, А.В. Кашницкий, А.А. Мазуров, А.М. Матвеев, О.А. Суднева, И.Г. Сычугов, В.А. Толпин, И.А. Уваров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2015, т. 12, № 5.– С. 263–284.

267. Барталев С.А. Спутниковое картографирование растительного покрова России / С.А. Барталев, В.А. Егоров, В.О. Жарко, Е.А. Лупян, Д.Е. Плотников, С.А. Хвостиков. – М.:ИКИ РАН, 2016.– 208 с.

268. Кашницкий А.В. Создание инструментов для удаленной обработки спутниковых данных в современных информационных системах / А.В. Кашницкий, И.В. Балашов, Е.А. Лупян, В.А. Толпин, И.А. Уваров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2015,т.12,№ 1. – С. 156-170.

269. Кобец Д.А. Организация автоматизированной многопотоковой обработки спутниковой информации в системах дистанционного мониторинга / Д.А. Кобец, А.М. Матвеев, А.А. Мазуров, А.А. Прошин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2015, т.12, № 1. – С.145–155.

270. Шокин Ю.И. Распределенная информационная система сбора, хранения и обработки спутниковых данных для мониторинга территорий Сибири и Дальнего Востока / Ю.И. Шокин, И.А. Пестунов, В.В. Смирнов, Ю.Н. Синявский, А.П. Скачкова, И.С. Дубров, В.А. Левин, А.И. Алексанин, М.Г. Алексанина, П.В. Бабяк, А.В. Громов, И.В. Недолужко // Журнал Сибирского федерального университета. Серия “Техника и технологии”, 2008, №4. – С. 291-314.

271. Шокин Ю.И. О распределённой инфраструктуре системы оперативного спутникового мониторинга ЦКП ДДЗ СО РАН / Ю.И. Шокин, Н.Н. Добрецов, В.А. Кихтенко, В.В. Смирнов, Д.Л.Чубаров, Л.Б Чубаров // Вычислительные технологии. 2013, т. 18, Специальный выпуск, Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск. – С. 86-94.

272. Hull D., Wolsfencroft K., Stevens R. et al. Taverna: a tool for building and running workflows of services // Nucleic Acids Research, 2006, Vol. 34. – P. W729–W732.

273. Oinn T., Addis M., Ferris J., Marvin D., Senger M., Greenwood M., Carver T., Glover K., Pocock M.R., Wipat A., Li P. Taverna: a tool for the composition and enactment of bioinformatics workflows // Bioinformatics, 2004, Vol. 20, # 17. – P. 3045-3054.

274. Недолужко И. В. Интеграция ресурсов спутникового центра в информационные системы наблюдения за Землёй: дисс. … канд. техн. наук: 05.13.11 / Недолужко Илья Валерьевич.– Владивосток. Институт автоматики и процессов управления (ИАПУ) ДВО РАН, 2014. – 138 с.

275. Бабяк П.В. Подход к предоставлению услуг по обработке спутниковых данных в Центре коллективного пользования регионального спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН / П.В. Бабяк, И.В. Недолужко, Е.В. Фомин // Труды XIV Всероссийской объединен-

ной конференции «Интернет и современное общество» (IMS-2011), 10-12 октября 2011 г. Санкт-Петербург, Россия, 2011. – С.27-32.

276. Teo Y.M., Tay S.C., Gozali J.P. Distributed Geo-rectification of Satellite Images using Grid Computing // Procs. Int. Parallel and Distributed Processing Symposium, IEEE Computer Society Press (2003). – P. 152–157.

277. Suarez R.A., Nesmachnow S. Parallel Computing Applied to Satellite Images processing for Solar Resource Estimates [Электронный ресурс] // CLEI Electronic Journal, volume 15, number 3, paper 4, december 2012. Режим доступа: http://dblp.uni-trier.de/db/journals/cleiej/cleiej15.

278. Казаков Э.Э. Геосервисы как функциональная основа геопортала: опыт и перспективы / Э.Э. Казаков, Е.Г. Капралов, Е.А. Паниди, А.В. Терехов // «Обработка пространственных данных и дистанционный мониторинг природной среды и масштабных антропогенных процессов (DPRS'2013)». Избранные труды конференции (30 сентября – 04 октября 2013 г. Барнаул). Рос. акад. наук, Сиб. отделение, Ин-т водных и экологических. проблем. – Барнаул: Из-во «Пять плюс», 2013. – С. 14-24.

279. Гаврилова В.В. Пространственная основа геопорталов / В.В. Гаврилова, А.В. Гречищев, Д.С. Лубнин // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка, 2011, № 2. – С. 53-56.

280. Кротов К.В. Web-ориентированный сервис мониторинга с использованием данных ДЗЗ природных явлений и техногенных воздействий, их характеристик и условий распространения / К.В. Кротов, И.А. Мжачев // Материалы IV межрегиональной научно-практической конференции «Перспективные направления развития отечественных информационных технологий». – Севастополь: Из-во СевГУ, 2018. – С. 292-295.

281. Кротов К.В. Алгоритм функционирования Web-ориентированной системы мониторинга ОС с использованием данных ДЗЗ с целью идентификации природных явлений и техногенных воздействий, их характеристик и условий распространения / К.В. Кротов, Е.А. Шарипов // Материалы IV межрегиональной научно-практической конференции «Перспективные направления развития отечественных информационных технологий». – Севастополь: Из-во СевГУ, 2018.– С. 289-292.

282. Кротов К.В. Обоснование возможности конвейеризации обработки спутниковых снимков в Web-ориентированной системе мониторинга ОС с использование данных ДЗЗ / К.В. Кротов, К.В. Сухоруких // Материалы международной научно-практической конференции «Интеллектуальные информационные системы – 2018». – Воронеж: Из-во Воронежского ГТУ, 2018.– С. 176-180.

283. Кротов К.В. Организация web-ориентированного сервиса мониторинга окружающей среды с использованием данных дистанционного зондирования Земли и конвейеризации обработки данных / К.В.Кротов, А.В.Скатков // Труды учебных заведений связи, т.7, №1. – С.105-121.

284. Селиванова И. А. Построение и анализ алгоритмов обработки данных / И.А.Селиванова, В.А.Блинов. – Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2015. – 108 с.

285. Ульянов М. В. Ресурсно-эффективные компьютерные алгоритмы. Разработка и анализ. Учебное пособие / М. В.Ульянов. – М.: Из-во «Наука. Физматлит», 2007. – 376 с.

286. Нижник Е. И. Математическое моделирование производительности файловой системы NTFS при нагрузке типа «запись дисковых данных» / Е.И.Нижник, А. Г. Тормасов // Вестник НГУ. Серия «Информационные технологии», т.5, №2. – С.68-77.

287. Нижник Е. И. Математическое моделирование производительности файловых систем: автореф. дисс. … канд. техн. наук: 05.13.18 / Нижник Екатерина Игоревна. – М.: Московский физико-технический институт (государственный университет), 2007. – 24 с.

288. Зубков И.А. Применение алгоритмов неконтролируемой классификациипри обработке данных ДЗЗ / И.А.Зубков, В.О.Скрипачев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, т.4, № 1, 2007. – С. 57-62.

289. Нейштадт И.А Методы обработки данных спутниковых наблюдений для мониторинга пахотных земель: дисс. … канд. техн. наук: 25.00.34 / Нейштадт Игорь Анатольевич. – М.: ИКИ РАН, 2007. – 162 с.

290. Воловик Е.Л. Справочник по восстановлению деталей / Е.Л. Воловик. – М.: Из-во «Колос», 1981.– 351 с.

291. Ремонт машин. Под ред. Тельнова Н.Ф. – М.: Из-во «Агропромиздат», 1992. – 560 с.

292. Схиртладзе А.Г. Ремонт технологических машин и оборудования: учебное пособие / А.Г. Схиртладзе, В.А. Скрябин, О.В. Пименова, А.С. Репин, Н.Я. Карасев. – Пенза: Информационно-издательский центр Пензенского государственного университета, 2009.– 328 с.

293. Схиртладзе А.Г. Ремонт технологических машин и оборудования: учебное пособие / А.Г.Схиртладзе, В.А.Скрябин, В.П.Борискин.– Старый Оскол: Из-во «Тонкие наукоемкие технологии», 2020. – 434 с.

294. Матвеев В.А. Техническое нормирование ремонтных работ в сельском хозяйстве / В.А. Матвеев, И.И. Пустовалов. – М.: Из-во «Колос», 1979. – 288 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

П1. ДОКАЗАТЕЛЬСТВО ТЕОРЕМЫ О ФОРМИРОВАНИИ ЛОКАЛЬНО ОПТИМАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ МЕТОДОМ GREEDY SCHEDULER

Принцип жадного выбора предполагает, что поиск локально оптимальных решений (последовательное решение задач по поиску локально оптимальных решений) может привести к определению глобального оптимального решения. При этом формирование решения обобщенной задачи оптимизации представляет собой последовательное решение подзадач, решение каждой последующей подзадачи определяется на основе решения предыдущей.

Начальное решение (начальное состояние последовательностей π^l ($l=\overline{1,L}$), предполагающее размещение в них задания типа $i=1$) обозначим как z_0. Исходную рассматриваемую задачу, связанную с размещением в последовательностях π^l ($l=\overline{1,L}$) заданий, типы которых принадлежат множеству N_1 вида $N_1=\{2,3,4,..,n\}$, обозначим как z_{n-1}. Таким образом, задача z_{n-1} состоит в размещении в π^l ($l=\overline{1,L}$) заданий, типы которых принадлежат N_1.

В исходной задаче z_{n-1} может быть выделена подзадача z'_1, которая предполагает размещение в последовательностях задания ($i=2$)-го типа. То есть в задаче z'_1 реализуется жадный выбор с точки зрения определения эффективного местоположения задания ($i=2$)-го типа в последовательностях π^l ($l=\overline{1,L}$). Обозначим решение задачи z'_1 как rz'_1. В результате выделения подзадачи z'_1 может быть сформирована подзадача z_{n-2}, связанная с размещением в π^l ($l=\overline{1,L}$) заданий типов, принадлежащих $N_2=\{3,4,..,n\}$. Новые подзадача z_{n-2} формулируются для множества заданий N_2, полученного на основе множества N_1 путем исключения из N_1 (из исходной задачи z_{n-1}) задания ($i=2$)-го типа. При этом подзадача z_{n-2}, возникающая после жадного выбора (в задаче z'_1), аналогична исходной задаче z_{n-1} (при $|N_1|>|N_2|$). Аналогично в подзадаче z_{n-2} может быть выделена подзадача z'_2 размещения в π^l ($l=\overline{1,L}$) задания ($i=3$)-го типа.

Обозначим решение подзадачи z'_2 как rz'_2, тогда решение rz'_2 формируется с использованием (на основе) решения rz'_1 задачи z'_1. При этом решение rz'_2 задачи z'_2 не вызывает изменения порядка выполнения заданий типов $i=1$ и $i=2$, полученного при решении задачи z'_1. Таким образом, решение задачи z_{n-2} формируется на основе решения rz'_1 задачи z'_1,

сформированным на основе «жадного» выбора. Тогда на основе задачи z_{n-2} (с учетом выделения подзадачи z'_2) может быть сформирована задача z_{n-3}.

Рассуждая по аналогии, приходим к выводу, что размещение в последовательностях $\pi^l\ (l=\overline{1,L})$ задания $(n-1)$-го типа («жадный» выбор при получении локально оптимального решения rz'_{n-2} задачи z'_{n-2}) позволяет сформировать (сформулировать) подзадачу $z_{n-(n-1)}=z_1$, решение которой обеспечит определение эффективного местоположения задания *n*-го типа в последовательностях $\pi^l\ (l=\overline{1,L})$. Подзадаче z_1 может быть поставлено в соответствие подзадача z'_{n-1}, решение которой формируется на основе решения rz'_{n-2} задачи z'_{n-2}. Тогда решение задачи определения расписания π выполнения заданий n типов предполагает, что:

1) задача оптимизации приведена к виду, когда после сделанного «жадного» выбора по определению местоположения в последовательностях $\pi^l\ (l=\overline{1,L})$ задания *i*-го типа необходимо решить только одну подзадачу z_{n-i} по размещению в последовательностях π^l заданий, типы которых принадлежат множеству $N_i=\{i+1,i+2,..,n\}$;

2) решение исходной задачи z_{n-1} (в итоге) трансформируется в решение подзадачи z_1 (связанной с размещением в $\pi^l\ (l=\overline{1,L})$ задания *n*-го типа), которое должно быть получено на основе решения подзадачи z_2 (размещение в $\pi^l\ (l=\overline{1,L})$ задания *(n-1)*-го типа) и т.д.; в свою очередь решение подзадачи z_1 формируется путем реализации «жадного» выбора, связанного с размещением задания *n*-го типа в последовательностях $\pi^l\ (l=\overline{1,L})$;

3) решение подзадачи $z_{n-(i+1)}$, сформированной после выполненного «жадного» выбора в задаче в задаче z'_i $(i=\overline{1,n-2})$, реализуется на основе решения rz'_i и не предполагает при этом изменения порядка обработки данных, размещенных в последовательностях π^l на предыдущих шагах алгоритма.

В итоге, эффективное решение задачи z_{n-1} по размещению в последовательностях $\pi^l\ (l=\overline{1,L})$ задания (*n-1*)-го типа (задание (*i=1*)-го типа размещены в последовательностях $\pi^l\ (l=\overline{1,L})$ по умолчанию) может быть получено из локальных эффективных решений подзадач z'_1, z'_2,.., z'_{n-1}. Любое решение rz'_k подзадачи z'_k содержит решения предыдущих подзадач z'_1, z'_2,.., z'_{k-1}, определяющих порядки выполнения заданий соответствующих типов в последовательностях $\pi^l\ (l=\overline{1,L})$. Т.е. для решения подзадачи z'_{n-1} необходимо решить подзадачу z'_{n-2} и т.д., для решения подзадачи z'_2 необходимо решить подзадачу z'_1. Или эффективное

решение z_{n-1} может быть получено путем определения локально эффективных решений подзадач z'_1, z'_2,.., z'_{n-1}. При решении подзадачи z'_k учитываются результаты подзадач z'_1, z'_2,.., z'_{k-1}, результаты последующих подзадач z'_{k+1}, ,.., z'_{n-1} при этом не рассматриваются (не учитываются). Сформулированные утверждения доказывают свойство (принцип) «жадного» выбора в сформированном алгоритме. Рассуждение о том, что глобальное оптимальное решение формируется таким образом, что оно будет содержать решения всех подзадач, позволяет сделать вывод о наличии структуры подзадач при определении глобального решения. Выполнение свойств «жадного» выбора для сформированного алгоритма является доказанным. Необходимо доказать возможность получения оптимальных решений с его использованием.

Для этого выполним доказательство возможности представления рассматриваемой задачи (рассматриваемого объекта либо рассматриваемой структуры подзадач) в виде матроида [103, 114]. Матроидом называется пара множеств E,I, состоящая из конечного множества E, называемого базовым множеством матроида, и множества его подмножеств I, называемого множеством независимых подмножеств матриода. Матроид $M=(E,I)$ обладает свойствами [107]:

1) множество I не пусто; если исходное множество E является пустым ($E=\varnothing$), и будет состоять из одного элемента – $\varnothing$, то есть $I=\varnothing$;

2) если $B\in I$, а $A\subseteq B$, то $A\in I$; то есть если независимое множество B входит в множество независимых подмножеств I, а A является подмножеством B, то A также входит в I;

3) если $A,B\in I$ и при этом $|A|<|B|$, то существует такой элемент x множества B, что $x\in(B\setminus A)$ и $A\cup\{x\}\in I$.

Таким образом, если для рассматриваемой задачи будут доказаны сформулированные свойства 1-3 матроида (то есть задача (объект, система) обладает указанными свойствами 1-3 матроида), то ее решение может быть найдено с использованием «жадного» алгоритма.

Множества *A* и *B* являются независимыми, если одно из них не является частью другого. Максимальное независимое множество $B\in I$, называется базой матроида.

С целью избежать громоздкости доказательства выполнимости рассмотренных условий для решаемой задачи рассмотрим простейший случай при *L=2* (рассматриваются два сегмента конвейера) и *n=3* (рассматриваются данные трех типов). Для построения рассуждений расписание представим как совокупность наборов вида: (i, j_{i1}, j_{i2}), где i – это тип задания, которое обрабатывается в системе, j_{i1} – это позиция задания *i*-го типа в последовательности π^1 на первом приборе КС, j_{i2} – это позиция задания *i*-го типа в последовательности π^2 на втором боре

КС. Тогда вид расписания выполнения заданий i-ых типов ($i=\overline{1,3}$) на L приборах КС ($L=2$) следующий: $\pi=\{(1,j_{11},j_{12}),(2,j_{21},j_{22}),(3,j_{31},j_{32})\}$.

В этом случае два различных расписания π и π', определяющие порядок выполнения заданий в КС, будут иметь вид: $\pi=\{(1,j_{11},j_{12}),(2,j_{21},j_{22}),(3,j_{31},j_{32})\}$, $\pi'=\{(1,j'_{11},j'_{12}),(2,j'_{21},j'_{22}),(3,j'_{31},j'_{32})\}$. Может быть задан некоторый тип данных i', в соответствии с которым в каждом из множеств π и π' будет реализовываться выделение подмножеств $\pi_1=\{(i',j_{i'1},j_{i'2}),(i,j_{i1},j_{i2})\,|\,i\neq i'\}$ и $\pi_2=\{(i,j_{i1},j_{i2})\,|\,i\neq i'\}$, $\pi'_1=\{(i',j'_{i'1},j'_{i'2}),(i,j'_{i1},j'_{i2})\,|\,i\neq i'\}$ и $\pi'_2=\{(i,j'_{i1},j'_{i2})\,|\,i\neq i'\}$.

Так как метод предполагает формирование различных вариантов решений, тогда $\pi\neq\pi'$. С учетом того, что независимость множеств определяется как невозможность для одного являться частью другого, тогда расписания π и π' являются независимыми. Таким образом, так как $\pi\neq\pi'$ и $\pi\not\subseteq\pi'$,то множество π (расписание π) является независимым, так как $\pi'\not\subseteq\pi$, то множество π' также является независимым, то есть не входят (как часть) в состав других множеств. Соответственно, для рассматриваемых исходных данных множества π и π' являются максимальными, то есть базами матроида M.

Допустим, что в множествах π и π' существуют такие наборы, что $(i',j_{i'1},j_{i'2})=(i',j'_{i'1},j'_{i'2})$, где i' – тип задания, для которого заданы одинаковые позиции в последовательностях их выполнения на первом и втором приборах КС в расписаниях π и π'. Для реализации условия $\pi\neq\pi'$ необходимо, чтобы для остальных i-ых типов заданий выполнялось условие: $(i,j_{i1},j_{i2})\neq(i,j'_{i1},j'_{i2})$ (при условии, что рассматриваемые типы i заданий такие, что $i\neq i'$). То есть позиции заданий разных типов ($i\neq i'$) в последовательностях на различных приборах КС не совпадают. Для подмножеств $\pi_1=\{(i',j_{i'1},j_{i'2}),(i,j_{i1},j_{i2})\,|\,i\neq i'\}$ и $\pi'_1=\{(i',j'_{i'1},j'_{i'2}),(i,j'_{i1},j'_{i2})\,|\,i\neq i'\}$ выполняется условие $\pi_1\neq\pi'_1$ (для $i,i'\in\{1,2,3\}$ и $i\neq i'$). Очевидно, что для подмножеств π_2 и π'_2 вида $\pi_2=\{(i,j_{i1},j_{i2})\,|\,i\neq i'\}$ и $\pi'_2=\{(i,j'_{i1},j'_{i2})\,|\,i\neq i'\}$ условие $\pi_2\neq\pi'_2$ выполняется автоматически.

Тогда $\pi_1\subset\pi$, и в силу того, что $\pi_1\neq\pi'_1$ имеем, что $\pi_1\not\subseteq\pi'$. По аналогии $\pi'_1\subset\pi'$, в силу того, что $\pi\neq\pi'$ и $\pi_1\neq\pi'_1$ имеем, что $\pi'_1\not\subseteq\pi$. Таким образом, подмножество π_1 является независимым по отношению к множеству π', а подмножество π'_1 независимо по отношению к множеству π. Тогда при $\pi_1\subset\pi$ и $\pi'_1\subset\pi'$ имеем, что $\pi_1\in I$ и $\pi'_1\in I$, т.к. π_1 и π'_1 являются независимыми от других множеств (подмножеств), входящих в I. Аналогичные рассуждения

могут быть выполнены для подмножеств $\pi_2 \subset \pi$ и $\pi'_2 \subset \pi'$, тогда $\pi_2 \in I$ и $\pi'_2 \in I$, Второе свойство матроида применительно к рассматриваемой задаче может считаться доказанным.

Для доказательства третьего свойства определим независимые множества $\pi_1 \in I$ и $\pi_2 \in I$ в виде: $\pi_1 = \{(i, j_{i1}, j_{i2}), (i', j_{i'1}, j_{i'2})\}$, $\pi_2 = \{(1, j_{11}, j_{12}), (2, j_{21}, j_{22}), (3, j_{31}, j_{32})\}$. В соответствии с условием 3 $|\pi_1| < |\pi_2|$ (где в π_1 индексы типов заданий *i, i'* могут принимать значения из множества $\{1,2,3\}$). Тогда в множестве π_2 могут быть выделены подмножества $\pi_{21}, \pi_{22}, \pi_{23}$ следующего вида (мощностью 2):

$$\pi_{21} = \{(1, j_{11}, j_{12}), (2, j_{21}, j_{22})\},$$
$$\pi_{22} = \{(1, j_{11}, j_{12}), (3, j_{31}, j_{32})\},$$
$$\pi_{23} = \{(2, j_{21}, j_{22}), (3, j_{31}, j_{32})\}.$$

В силу того, что множества π_1 и π_2 независимы, имеем: $\pi_1 \neq \pi_{21}; \pi_1 \neq \pi_{22}; \pi_1 \neq \pi_{23}$ (ситуация, когда либо $\pi_1 = \pi_{21}$, либо $\pi_1 = \pi_{22}$, либо $\pi_1 = \pi_{23}$ невозможна, т.к. π_1 и π_2 независимы). При условии $\pi_1 \neq \pi_{21}$ и $\pi_1 \neq \pi_{22}$ рассмотрим $i = 1$, тогда возможно либо $j_{i1} = j_{11}$ и $j_{i2} \neq j_{12}$, либо $j_{i1} \neq j_{11}$ и $j_{i2} = j_{12}$. В этом случае при $i' = 2$ возможными являются следующие ситуации: $j_{i'1} = j_{21}$ и $j_{i'2} \neq j_{22}$ (при $j_{i1} = j_{11}$ и $j_{i2} \neq j_{12}$), либо $j_{i'1} \neq j_{21}$ и $j_{i'2} = j_{12}$ (при $j_{i1} \neq j_{11}$ и $j_{i2} = j_{12}$). По аналогии при $i' = 3$ имеем: $j_{i'1} = j_{31}$ и $j_{i'2} \neq j_{32}$ (при $j_{i1} = j_{11}$ и $j_{i2} \neq j_{12}$), либо $j_{i'1} \neq j_{31}$ и $j_{i'2} = j_{32}$ (при $j_{i1} \neq j_{11}$ и $j_{i2} = j_{12}$).

В общем виде приведенные условия могут быть представлены следующим образом: $j_{i'1} = j_{k1}$ и $j_{i'2} \neq j_{k2}$ (при $j_{i1} = j_{11}$ и $j_{i2} \neq j_{12}$), либо $j_{i'1} \neq j_{k1}$ и $j_{i'2} = j_{k2}$ (при $j_{i1} \neq j_{11}$ и $j_{i2} = j_{12}$), где $i' = k = 2$ либо $i' = k = 3$. Аналогичные рассуждения могут быть выполнены для случая, когда $i = 2$, а $i' = 1$ либо $i' = 3$, а также для случая, когда $i = 3$, а $i' = 1$ либо $i' = 2$.

Формирование нового набора π'_1 реализуется путем добавления в множество наборов параметров вида $\pi_1 = \{(i, j_{i1}, j_{i2}), (i', j_{i'1}, j_{i'2})\}$ нового набора вида $(i'', j_{i''1}, j_{i''2})$ (понятно, что $(i'', j_{i''1}, j_{i''2}) \in \pi_2$ и $(i'', j_{i''1}, j_{i''2}) \notin \pi_1$). Тогда добавление в π_1 задания *i''*-го типа (набора вида $(i'', j_{i''1}, j_{i''2})$) позволяет получить множество наборов параметров вида: $\pi'_1 = \{(i, j_{i1}, j_{i2}), (i', j_{i'1}, j_{i'2}), (i'', j_{i''1}, j_{i''2})\}$, при этом исходная совокупность (множество) наборов параметров $\pi_1 \subset \pi'_1$ изменена не будет.

Так как $\pi_1 \neq \pi_{2k}$ (при $k = \overline{1,3}$), но $\pi_1 \subset \pi'_1$, при этом $\pi_{2k} \subset \pi_2$, тогда $\pi'_1 \neq \pi_2$ (и, следовательно, $\pi'_1 \not\subseteq \pi_2$), поэтому сформированное множество π'_1 и множество π_2 являются независимыми и, следовательно, $\pi'_1 \in I$ (т.е. $[\pi_1 \cup \{i'', j_{i''1}, j_{i''2}\}] \in I$), что и требовалось доказать.

Это означает, что третье свойство матроидных структур для рассматриваемой задачи доказано и решаемая задача (система объектов) является матроидом. В силу того, что применимость свойств матроида для рассматриваемой задачи является доказанной, тогда необходимо определить возможность идентификации локально оптимального решения этой задачи с использованием жадного алгоритма. Для этого воспользуемся теоремой о применимости жадного алгоритма для матроида, приведенной в [114]. В соответствии с этой теоремой в результате работы жадного алгоритма, примененного к взвешенному матроиду, получается подмножество локально оптимальных решений. Матроид называется взвешенным, если на множестве E задана весовая функция f с значениями на множестве положительных чисел. При этом функция f является аддитивной и свойство аддитивности распространяется на все подмножества множества E. Вес подмножества определяется как сумма весов его элементов, т.е. $f(\pi)=\sum_{i=1}^{n} f_i$, где f_i- простои приборов КС, связанные с размещением в последовательностях π^l ($l=\overline{1,L}$) задания i-го типа. В этом случае, если первоначально решение π имеет вид $\pi(1)=\{(1,j_1,j_2)\}$, то оно характеризуется значением суммарных простоев L приборов КС при выполнении задания ($i=1$)-го типа. Значение функции $f(1)$ соответствует весу элемента $(1,j_1,j_2)$, который обозначен как f_1, это значение определяется на подмножестве $\{(1,j_1,j_2)\}$. Тогда при добавлении в расписание π набора вида $(2,j_1,j_2)-$ формировании нового подмножества, входящего в E,получим следующий вид множества π: $\pi(2)=\{(1,j_1,j_2),(2,j_1,j_2)\}$. При этом добавление в π набора параметров $(2,j_1,j_2)$ приводит к появлению простоев приборов КС, вызванных выполнением задания ($i=2$)-го типа (вес, соответствующий этому набору параметров, обозначен как f_2). В этом случае значение $f(2)-$ это сумма весов f_1 и f_2, а само значение определяется на подмножестве элементов $\{(1,j_1,j_2),(2,j_1,j_2)\}$. Аналогичные рассуждения могут быть выполнены для набора параметров вида $(3,j_1,j_2)$. Значение $f(3)$, как сумма весов f_1, f_2, f_3, определяется на подмножестве $\{(1,j_1,j_2),(2,j_1,j_2),(3,j_1,j_2)\}$. Введенный в рассмотрение критерий оптимальности расписаний, учитывающий простои приборов КС, является аддитивной весовой функцией, определенной на матроиде. Тогда жадный алгоритм обеспечивает определение подмножества локально оптимальных решений, в котором может быть выбрано одно решение. Рассматриваемый алгоритм Greedy Scheduler, обладающий свойствами жадного алгоритма, будет обеспечивать определение локально оптимальных решения рассматриваемой задачи построения расписаний выполнения единичных заданий.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

П2. ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЙ В КОНВЕЙЕРНЫХ СИСТЕМАХ, МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ РАСПИСАНИЙ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

П2.1. Анализ видов задач, решение которых обеспечивает реализацию мониторинга окружающей среды с использованием данных дистанционного зондирования от искусственных спутников Земли

Современными методами мониторинга окружающей среды (ОС) являются: наземные наблюдения, авиационные наблюдения и наблюдения с использованием искусственных спутников Земли (ИЗС). Регионы, для которых выполняется мониторинг, являются обширными, их местоположение является труднодоступным, не все они охвачены авиационными наблюдениями, поэтому наиболее предпочтительным является способ мониторинга с использованием ИЗС, выполняющих дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ).

В соответствии с [186] комплексный мониторинг экологической обстановки (мониторинг ОС) предполагает обнаружение и контроль негативных природных явлений (НПЯ), оказывающих влияние на ОС, обнаружение и контроль техногенных воздействий (ТВ), негативно воздействующих на ОС. Мониторинг ОС с использованием данных ДЗЗ выполняется с целью:

– идентификации очагов загрязнений ОС природного и техногенного характера, определения их местоположения, контроля динамики, определения условий их распространения с целью детектирования угроз для окружающей среды и объектов инфраструктуры;

– идентификации НПЯ, возникающих на объектах ОС (объектах лесного и сельского хозяйства) и оказывающих негативное на них воздействие, определения условий развития с целью детектирования дальнейшего распространения.

Поэтому решение задачи обнаружения, контроля динамики, идентификации условий распространения очагов загрязнения и НПЯ, оказывающих негативное воздействие на ОС, для последующего анализа их влияния на природные объекты и объекты инфраструктуры является актуальным и должно обеспечиваться мониторингом ОС с использованием данных ДЗЗ.

К НПЯ, для обнаружения, контроля динамики, определения условий распространения которых используются данные ДЗЗ, могут быть отнесены [186-191]:

– болезни лесных насаждений, вспышки размножения насекомых-фитофагов (повреждение лесных насаждений насекомыми-вредителями), влияние выбросов вредных веществ пред-

приятий на растительность и, как следствие, деградация и гибель растительности под воздействием указанных факторов;

– почвенно-эрозийные процессы, изменяющие распределение растительного покрова.

К загрязнениям техногенного характера, для обнаружения которых, контроля их динамики, определения условий распространения и влияния на окружающую среду используются данные ДЗЗ, могут быть отнесены [186-189]:

– подземные и наземные разливы нефти и нефтепродуктов, возникающие вследствие аварий на нефтедобывающих установках либо разрывов нефтепроводов;

– несанкционированные свалки бытовых, промышленных и строительных отходов.

Рассмотрение способов мониторинга окружающей среды с использованием данных ДЗЗ ограничим задачами: детектирования НПЯ указанных типов (болезни лесных насаждений, вспышки размножения насекомых-фитофагов, эрозия почвы); детектирования очагов загрязнений ОС указанных типов (поверхностные и подземные разливы нефтепродуктов, повреждение лесных насаждений под влиянием загрязнения атмосферы, несанкционированные свалки промышленных, строительных и бытовых отходов), определения их динамики, условий их распространения и влияния на ОС и объекты инфраструктуры.

Объектами, для которых необходимо осуществлять мониторинг загрязнений ОС, связанных с разливом нефтепродуктов на поверхности и под поверхностью Земли, являются: места добычи углеводородов (буровые платформы, вышки и скважины); нефтепроводы (наземные и подземные); хранилища углеводородного сырья и нефтепродуктов. Объектами, для которых необходим мониторинг загрязнений ОС, связанных с несанкционированными свалками бытовых, промышленных и строительных отходов, являются инфраструктурные объекты, открытые участки земной поверхности различного назначения в границах административных образований. Объектами, для которых необходимо осуществлять мониторинг НПЯ, вызывающих деградацию и гибель лесных насаждений в результате влияния загрязнения атмосферы вредными выбросами, вспышек болезней и размножения насекомых-фитофагов, являются непосредственно объекты лесного хозяйства. Объектами, для которых необходимо осуществлять мониторинг природных явлений, связанных с эрозией почвы, являются сельскохозяйственные угодья различного назначения. Задачами, решаемыми посредством использования данных ДЗЗ (применительно к рассматриваемым видам загрязнений ОС и НПЯ), являются:

– оперативный мониторинг мест добычи, транспортировки углеводородов для выявления загрязнений нефтепродуктами, определение динамики распространения разливов;

– оперативный мониторинг открытых участков земной поверхности в пределах административных образований для обнаружения несанкционированных свалок промышленных и строительных отходов с последующим контролем изменения их границ;

– оперативный мониторинг открытых участков земной поверхности сельскохозяйственного назначения с целью обнаружения почвенно-эрозийных процессов и контроля динамики;

– оперативный мониторинг лесных насаждений (объектов лесного хозяйства) с целью обнаружения влияния на них атмосферных загрязнений, вспышек болезней, очагов размножения насекомых-фитофагов и определения динамики их развития;

– идентификация условий распространения загрязнений (техногенных воздействий на ОС) и рассматриваемых НПЯ с целью определения их влияния на объекты окружающей среды, инфраструктуры и прогнозируемого влияния на элементы экосистем.

Таким образом, основными задачами, возникающими при использовании данных ДЗЗ для контроля загрязнения ОС и НПЯ, являются: оперативное их обнаружение, наблюдение за их динамикой, определение их характеристик, идентификация условий их распространения, условий их влияния на ОС и объекты инфраструктуры.

П2.2. Анализ существующих подходов к реализации мониторинга окружающей среды с использованием данных дистанционного зондирования Земли

Анализ указанных видов загрязнений ОС и НПЯ показал, что их обнаружение и контроль динамики возможен с использованием данных ДЗЗ, характеризующих состояние подстилающей земной поверхности (почвенно-эрозийные процессы, загрязнения вследствие разливов нефтепродуктов, несанкционированные свалки промышленных и строительных отходов) и состояние растительности (влияние на лесные насаждения атмосферных загрязнений, вспышек болезней, очагов размножения насекомых-фитофагов). Для осуществления мониторинга окружающей среды с целью идентификации очагов загрязнения ОС, НПЯ, условий их развития и влияния на объекты экологических систем и инфраструктуры, должны быть использованы: данные ДЗЗ разных типов, полученные различными видами аппаратуры дистанционного зондирования поверхности Земли, функционирующей в различных диапазонах спектра электромагнитных волн, средства приема-передачи спутниковых данных (непосредственно антенные комплексы приема спутниковых данных, либо средства коммуникации с информационными Интернет-ресурсами, предоставляющими заинтересованным пользователям необходимые спутниковые данные); информационно-аналитические центры обработки спутниковых данных; различные технические и программные средства обработки.

Физической основой дистанционного зондирования Земли с использованием оптико-электронных приборов является зависимость между зарегистрированными параметрами собственного либо отраженного излучения объектов (явлений) на подстилающей земной поверхности и ее физическими (химическими) характеристиками. Особенностью оптико-

электронного способа зондирования, реализуемого в приборах с зарядной связью (ПЗС) [192,193], является наличие линеек либо матриц чувствительных элементов (пикселей), каждый из которых фиксирует отражательную способность объектов на земной или водной поверхностях в определенной полосе спектра электромагнитного излучения. В силу этого ПЗС формируют спектрально-отражательные характеристики объектов поверхности, выполняют измерение отраженного (собственного) излучения от земной поверхности в определенной полосе спектра. Различимость объектов реализуется на основе разных значений их отражательной способности (разных значений коэффициента отраженной солнечной яркости [192, 193]). В этом случае задача мониторинга ОС с использованием данных ДЗЗ состоит в оценке динамики свойств земной поверхности, в распознавании объектов на основе измерений отраженного или собственного излучения.

С точки зрения способа фиксации данных об отражательной способности земной поверхности оптико-электронными приборами (ПЗС) различают следующие виды снимков:

– панхроматические – снимки, соответствующие характеристикам отражательной способности земной поверхности, измеренным в одном широком диапазоне спектра излучения;

– многозональные (многоспектральные) – снимки, соответствующие характеристикам отражательной способности земной поверхности, измеренным в разных диапазонах спектра.

На основе данных об отражательной способности земной поверхности, измеренных в различных диапазонах спектра излучения, определяются значения параметров, характеризующих ее (поверхности) состояние. На базе этих параметров в дальнейшем выполняется определение характеристик состояния окружающей среды и, как следствие, идентификация наличия, местоположения, динамики (на основе анализа разновременных данных),характера НПЯ и ТВ, условий их распространения, используемых при решении задачи прогнозирования их развития. Результатами обработки данных об отражательной способности поверхности являются формируемые изображения распределения значений параметров, характеризующих состояние ОС.

Снимки характеризуются величиной области (размера участка) земной поверхности, соответствующей каждой точке (пикселю) в формируемом итоговом изображении, для которой определяется значение отраженной спектральной яркости поверхности. Различают данные низкого разрешения (область 1×1 км, 500×500 м и 250×250 м соответствуют одному пикселю на изображении), среднего разрешения (области от 20×20 м до 50×50 м соответствуют одному пикселю) и высокого разрешения (области до 20×20 м соответствуют одному пикселю). Многоспектральные снимки с низким разрешением формируются спектрорадиометрами AVHRR спутника NOAA (США), MODIS спутников Aqua и Terra (ЕС), Vegetation спутника SPOT, приборами спутника «Метеор-М» (Россия) [192-198]. Данные среднего разрешения формируются приборами спутников Канопус-В, Ресурс-П, Обзор-О (Россия), LandSat-8 и EnviSat (ЕС) [192-

197]. Аппаратура OLI/TIRS среднего разрешения ИСЗ LandSat-8 обеспечивает съемку в различных спектральных диапазонах (инфракрасном, видимом, тепловом для обнаружения тепловых аномалий). Разрешающая способность аппаратуры составляет 30 м. Анализ характеристик приборов и алгоритмов обработки выполняется применительно к ИСЗ Aqua, Terra, LandSat, так как данные от них являются общедоступными, передаются на безоплатной основе с Интернет-ресурсов, обеспечивающих к ним доступ.

В зависимости от масштабов НПЯ и ТВ на ОС определение их наличия выполняется на основе измерений параметров отражательной способности земной поверхности, формируемых спектрорадиометром MODIS спутников Aqua, Terra (низкая разрешающая способность), либо спектрорадиометром OLI/TIRS ИСЗ LandSat-8 (средняя разрешающая способность). При этом спутниками формируется совокупность кадров (сцена), соответствующая различным регионам, состояние земной поверхности в которых фиксируется. Детектирование таких НПЯ и ТВ на ОС как несанкционированные свалки промышленных, бытовых и строительных отходов, разливы нефтепродуктов, почвенно-эрозийные процессы выполняется с использованием данных ДЗЗ среднего разрешения. В тоже время детальное описание явлений на больших пространствах является трудно разрешимой задачей, поэтому для уточнения характеристик (параметров) НПЯ и ТВ, определения условий их распространения также используются данные ИСЗ LandSat-8.

Физической основой использования данных ДЗЗ для детектирования НПЯ, связанных с деградацией лесных насаждений вследствие массового размножения насекомых-фитофагов, детектирования влияния техногенных воздействий на деградацию и гибель лесных насаждений, является фотосинтетическая активность растений и связанная с этим их отражательная способность [199]. В нормальном состоянии растительность характеризуется высокой фотосинтетической активностью, связанной с большой фитомассой растений [200]. Влияние болезней лесных насаждений обуславливает снижение содержания хлорофилла в зеленых фракциях растительности и изменение отражательной способности поврежденных участков [200]. В случае, если значения отражательной способности (коэффициента солнечной яркости (КСЯ)), позволяют идентифицировать открытую (безлесную) почву и наличие на ней травянистой либо кустарниковой растительности, тогда ее (поверхности) мониторинг связан с обнаружением и контролем почвенно-эрозийных процессов либо процессов механического воздействия на нее в виде свалок промышленных и строительных отходов [201]. Эрозийные процессы связаны с потерей органического вещества в почве и снижения ее гумусованности, наличие почвенно-эрозийных процессов характеризуется чередованием участков смытых почв и участков растительности. Наличие почвенно-эрозийных процессов вызывает изменение отражательных свойств подстилающей поверхности для отдельных ее участков (участков с эрозией) при неизменных во времени отражательных свойствах других участков [201, 202]. Наличие механических воздей-

ствий на почву в виде свалок также связано с чередованием участков растительности и участков с промышленными и бытовыми отходами. Поэтому физической основой идентификации наличия почвенно-эрозийных процессов и механических воздействий на почву (в виде свалок) является различие отражательных свойств отдельных участков земной поверхности [195]. Для участков, подверженных эрозии либо механическому воздействию, фиксируется отсутствие растительности на поверхности, наличие эрозии и механических воздействий идентифицируется путем выявления отклонений хода развития поверхностной растительности от ее нормального состояния и специфической формы явлений.

Физической основой детектирования наличия ТВ на ОС, связанных с разливами нефтепродуктов на поверхности Земли при аварии на нефтяных вышках, разрывах нефтепроводов, осуществляемого на основе многоспектральных данных, является [204,205]: 1) различие значений коэффициентов спектральной яркости между аномальными областями (разлив нефтепродуктов на поверхности) и фоном в различных участках электромагнитного спектра; под воздействием нефтепродуктов на травяной покров и почву изменяются яркостные характеристики поверхности в различных спектральных диапазонах, как следствие – изменение спектральной отражательной способности поверхности; 2) тепловые различия (различия значений отраженного излучения, зафиксированные в ближнем инфракрасном и тепловом инфракрасном диапазонах) между загрязненными участками поверхности и окружающим фоном.

Таким образом, основные НПЯ и ТВ на ОС идентифицируются с использованием многозональных снимков (спутниковых данных ДЗЗ). Многозональный снимок – это набор массивов значений отраженной спектральной яркости, измеренных в различных спектральных диапазонах для определенного региона земной поверхности. Каждый элемент одного массива представляет собой значение интенсивности отраженного (собственного) излучения земной поверхности (объектов на ней), измеренное для определенной точки земной поверхности в одном спектральном диапазоне.

Для обнаружения НПЯ и ТВ на ОС необходим контроль динамики отражательной способности подстилающей земной поверхности и растительности, реализуется сопоставление разновременных данных ДЗЗ для выявления изменений свойств подстилающей поверхности и растительности (отражательных свойств). При использовании разновременных данных ДЗЗ фиксируется факт различия значений отражательной способности для отдельных участков полигонов и на основе зафиксированного различия делается вывод о наличии НПЯ либо ТВ на ОС. Наличие различий отражательных свойств подстилающей поверхности на этих снимках является индикатором протекания НПЯ либо ТВ на ОС. Таким образом, идентификация (обнаружение) НПЯ и ТВ на ОС связана с обработкой разновременных данных ДЗЗ с целью контроля динамики отражательной способности поверхности. При этом временные масштабы раз-

вития рассматриваемых НПЯ имеют сезонный характер, а временные масштабы развития процесса разлива нефтепродуктов либо механического загрязнения поверхности имеют суточный характер. Наряду с идентификацией наличия НПЯ либо ТВ на ОС, выполняемой на основе спутниковых данных среднего разрешения, требуется определить их характеристики с целью дальнейшего контроля динамики и прогнозирования развития [186, 201]. Если обнаружение НПЯ либо ТВ на ОС выполняется для территорий большого размера (региона), где контролируется динамика отражательных свойств подстилающей поверхности и растительности на ней, то идентификация характеристик явлений (воздействий) должна быть выполнена на территории, на которой они зафиксированы (локальная территория незначительного размера). Поэтому определение характеристик явлений (воздействий), а также условий их распространения (развития) выполняется с использованием данных среднего либо высокого разрешения, соответствующих территории, на которой эти НПЯ (ТВ) зафиксированы (в области малого размера). Идентификация их характеристик и условий распространения обеспечивает прогнозирование их динамики, на основе чего реализуется принятий решений по устранению явлений либо снижению слияния техногенных воздействий на ОС. Тогда для каждого из рассматриваемых НПЯ либо ТВ на ОС требуется определение тех параметров среды, которые обеспечат прогнозирование их распространения. С этой целью также используются данные многозональной съемки.

Для каждого из рассматриваемых НПЯ и ТВ определены характеризующие их параметры, а также условия их распространения. Они сведены в Таблицу П2.1, в которой также указывается способ определения их характеристик и условий распространения (здесь ЦМР – цифровая модель рельефа). Анализ Таблицы П2.1 позволяет сделать вывод о том, что идентификация на рассматриваемом полигоне НПЯ и ТВ на ОС, их параметров, а также условий их распространения осуществляется на основе многозональных данных от ИСЗ разных типов.

Для получения информации о наличии и виде НПЯ и ТВ на ОС, их характеристик и условий распространения многозональные спутниковые данные должны быть подвергнуты предварительной и тематической обработке. Предварительная обработка снимков осуществляется в связи с устранением различного рода искажений во время проведения съемки и реализуется с целью повышения точности результатов. Современные технологии получения спутниковых данных предусматривают, что многозональные снимки указанных выше ИСЗ являются свободно распространяемыми, предоставляемыми к использованию различными Интернет-ресурсами (центрами хранения и предоставления данных). То есть подход к использованию многозональных данных предполагает реализацию технологии получения спутниковых снимков по требуемым территориям от нужных ИСЗ в соответствии с запросами к этим Интернет-ресурсам.

Таблица П2.1 – Параметры, характеризующие НПЯ и ТВ, влияющих на ОС

№	Природное явление/ техногенное воздействие на ОС	Параметры, характеризующие явление (воздействие)	Параметры, характеризующие условия распространения явлений и воздействий	Способ определения параметров, характеризующих условия развития
1	2	3	4	5
1	Болезни лесных насаждений (воздействие размножения насекомых- фитофагов, техногенные воздействия– загрязнение атмосферы).	– площадь повреждений [199]; – координаты линии контура [199].	– тип лесных насаждений [203]; – состав насаждений [203]; – состояние растительного покрова (степень усыхания растительности): слабо поврежденная/ ослабленная, сильно ослабленная, усыхающая [203]; – ЦМР [203].	Aqua, Terra (MODIS), LandSat 7,8 (OLI/TIRS), данные SRTM.
2	Эрозия почвы	– площадь и форма явления [201,202,207]; – координаты границы [201,202, 207].	– почвозащитная способность растительности (определяется по виду растительности на поверхности) [201,202]; – влагосодержание почвы (определяется по косвенным признакам, связанным с влагосодержанием растительности на поверхности) [207]; – температура подстилающей поверхности [201]; – степень эродируемости почвы (характеризуется составом, определяемым на основе почвенных карт); – ЦМР [206].	LandSat 7,8 (OLI/TIRS); данные SRTM.

1	2	3	4	5
3	Механические воздействия на почву (свалки промышленных и строительных отходов)	– площадные характеристики (форма, размеры) [186]; – степень нарушения земель (степень развития свалки) [208, 209].	– вид отходов, реализую-щих воздействие (строительные, бытовые, промышленные) [208,209]. – температура слоя отходов [186]; – ЦМР [208,209].	LandSat (OLI/TIRS); данные SRTM.
4	Загрязнение почвы нефтепродуктами	– площадь и форма пятна загрязнения [186]; – координаты контура [204,205]; – степень нарушения растительности [186,204,205].	– положение участка загрязнения на рельефе [186]; – степень деградации почвы – определяется по косвенным признакам на основе состояния расти тельности [186]; – тип и состояние естественной травянистой, кустарниковой и лесной растительности [186]; – наличие поверхностных водоемов – ручьи, реки, озера, пруды [186]; – рельеф территории (учет поверхностного стока с территории) [186]; – тип почвенного покрова (глина, гравий, песок) – характеризуется ее составом, определяемым на основе почвенных карт ; – гидрометеорологический прогноз: температура воздуха и поверхности [186].	LandSat (OLI/TIRS); данные SRTM.

Особенностью данных, получаемых с указанных ресурсов, является реализованная для них предварительная обработка. Тогда на основе полученных с этих ресурсов спутниковых снимков выполняется первоначальное формирование значений отраженной солнечной яркости точек (пикселей) на поверхности (в требуемых спектральных диапазонах), а затем реализуется их тематическая обработка.Тематическая обработка спутниковых данных низкого и среднего (для идентификации наличия НПЯ и ТВ на ОС на земной поверхности) и среднего (для определения их характеристик и условий развития) разрешения для решаемых задач предполагает:

– размещение данных, полученных от центров их хранения и предоставления, на носителях и их каталогизация;

– определение по полученным в соответствии с пользовательскими запросами данным в заданных каналах, представляющими собой значения градаций серого цвета для каждой точки на поверхности, значений отражательной способности поверхности в этих каналах;

– идентификацию на основе спектрально-отражательных характеристик подстилающей поверхности соответствующих объектов (соотнесение точек на поверхности определенным кластерам с учетом значений отражательной способности поверхности);

– расчет для каждого из кластеров значений определенных индексов, характеризующих состояние подстилающей земной поверхности (либо расчет значений оттенков цветов в RGB-модели по значениям отражательной способности в соответствующих каналах);

– формирование итоговых (индексных) массивов значений параметров, отражающих текущее состояние подстилающей поверхности с точки зрения рассматриваемых явлений – формирование итоговых изображений, характеризующих состояние поверхности.

Идентификация наличия НПЯ и ТВ на ОС реализуется путем анализа динамики многозональных данных об отражательной способности поверхности в определенных спектральных каналах. Для классификации объектов (явлений) в рассмотрение вводится набор признаков распознавания, определение значений которых на основе спутниковых данных позволяет получить пространственную динамику спектрально-отраженных характеристик поверхности. Признаки распознавания идентифицируются на основе значений отражательной способности поверхности, измеренных в различных спектральных каналах приборов ИСЗ. Каждый класс объектов характеризуется своим описанием в этом пространстве признаков.

Одним из способов распределения точек на поверхности по кластерам с учетом значений отражательной способности, измеренной в различных каналах, является необучаемая кластеризация в соответствии с алгоритмом ISODATA [210] (с целью объединения отсчетов с сходными свойствами в отдельные кластеры), после реализации которой каждый из сформированных кластеров характеризуется определенными признаками. Для идентификации наличия НПЯ и ТВ на ОС реализуется контроль динамики отражательных свойств поверхности в рассматри-

ваемом полигоне [211]. Одним из возможных способов контроля динамики отражательных свойств подстилающей поверхности является использование разновременных значений индекса NDVI, сопоставляемых с каждым из сформированных кластеров. Зафиксированные значительные различия в значениях индекса NDVI для определенных участков земной поверхности являются свидетельством наличия некоторого НПЯ либо ТВ на ОС. В частности, для лесных насаждений степень их повреждения определяется следующим образом [199]: 25%– слабое, 50%– среднее, 75%– сильное. Определение степени отличия отражательных свойств подстилающей поверхности для текущего момента времени по сравнению с ее «нормальными» отражательными свойствами реализуется с использованием значений индекса NDVI на основе выражения вида [201]:

$$\Delta = \frac{(NDVI_{current} - NDVI_{norm})}{NDVI_{norm}} \cdot 100,$$

где $NDVI_{current}$ – значение индекса NDVI, полученное для соответствующих точек поверхности на текущий момент времени, $NDVI_{norm}$ – «нормальное» значение индекса, полученное на основе ретроспективных данных. После идентификации наличия некоторого НПЯ и ТВ на ОС в рассматриваемом полигоне, который задан пользователем, необходимо определить тип этого явления, его характеристик и условия распространения. Типизация явлений, обнаруженных в заданных полигонах, предполагает применение визуального дешифрирования. Для его реализации выполняется обработка дополнительных данных, полученных в пакете, связанном с датой, наиболее близкой к заданной пользователем. Визуальное дешифрирование обеспечивает определение параметров НПЯ и ТВ на ОС, характеризующих условия их распространения:

1) болезни лесных насаждений – тип лесных насаждений (лиственные, хвойные и смешанные), состав лесных насаждений (лиственный смешанный с небольшим количеством хвойных насаждений, смешанные с преобладанием хвойных пород, хвойные с преобладанием еловых насаждений и с небольшим количеством сосны и т.д.);

2) эрозия почвы – состояние почвенного покрова с точки зрения его гумусированности и, как следствие, почвозащитная способность растительности, влагосодержание почвенного покрова (по состоянию растительности), почвозащитная способность растительности.

Дешифровочными признаками являются фотометрические и морфологические характеристики (цвет и оттенок участка поверхности, а также его текстура). При этом цвет и тон на формируемом изображении могут быть как «естественными» (полученными в результате измерения отражательной способности в видимых диапазонах излучения– красном, синем и зеленом каналах), так и «искусственными» (полученными путем сопоставления цвета с определенной комбинацией значений отраженной яркости, измеренных в различных диапазонах спектра из-

лучения). Для визуализации многоспектрального снимка в трех любых спектральных каналах реализуется отображение каждого канала в основных цветах – красном, зелёном и синем (RGB) [211-213]. Например, комбинация каналов 5-6-2 ИСЗ Landsat 8 означает, что ближний ИК-диапазон (0,845–0,885 мкм) отображается на экране красным цветом, диапазон 1,560–1,660 мкм – зелёным, видимый диапазон 0,450–0,515 мкм – синим.

Для идентификации типов НПЯ и ТВ на ОС, их характеристик и условий распространения используются результаты обработки данных ИСЗ Landsat 8 в различных спектральных каналах. В Таблице П2.2 приведены диапазоны длин волн, которые используются его приборами для определения отражательной способности поверхности.

Таблица П2.2 – Спектральные диапазоны ИСЗ Landsat 8

№	Спектральный канал	Длины волн	Разрешение
Канал 1	Побережья и аэрозоли	0.433 - 0.453 мкм	30 м
Канал 2	Синий	0.450 - 0.515 мкм	30 м
Канал 3	Зеленый	0.525 - 0.600 мкм	30 м
Канал 4	Красный	0.630 - 0.680 мкм	30 м
Канал 5	Ближний ИК	0.845 - 0.885 мкм	30 м
Канал 6	Средний ИК 1	1.560 - 1.660 мкм	30 м
Канал 7	Средний ИК 2	2.100 - 2.300 мкм	30 м
Канал 8	Панхроматический	0.500 - 0.680 мкм	15 м
Канал 9	Перистые облака	1.360 -1.390 мкм	30 м
Канал 10 и 11	Тепловое ИК	11000 -13000 мкм	30 м

В Таблице П2.3 приведены основные дешифровочные признаки, в соответствии с которыми идентифицируются типы НПЯ и ТВ на ОС, которые зафиксированы в заданных полигонах на земной поверхности, а также определяются условия их развития НПЯ и ТВ. При реализации дешифрирования лесных насаждений (типа и состава лесных насаждений) методы автоматического дешифрирования не могут быть использованы ввиду особенностей их отражательной способности для разных регионов. Определение типа и состава лесных насаждений реализуется путем визуального дешифрирования. С целью повышения достоверности результатов по различению видов растительности (мелколиственная, хвойная) визуальное дешифрирование выполняется с использованием снимков за осенние месяцы (сентябрь/октябрь), на основе результатов обработки которых виды насаждений могут быть дифференцированы. В этом случае возникает возможность идентификации преобладающей породы в смешанных лесных насаждениях, так как представление на сформированном результирующем изображении лиственных и хвойных пород является более контрастным. С другой стороны использование весенних снимков позволяет отделять различные породы хвойных насаждений: сосна на весенних снимках (в видимом диапазоне) отображается более светлым зеленым цветом, чем ель.

Таблица П2.3 – Дешифровочные признаки, используемые для типизации НПЯ, ТВ на ОС и определения условий их развития и распространения

Тип явления (воздействия)/ условия развития	Прямые признаки дешифрирования	Косвенные признаки дешифрирования
1	2	3
Типизация явлений/ воздействий на ОС		
Эрозия почвы	**Цвет и оттенок** участка поверхности, в котором зафиксировано явление: –каналы 7-5-3 (здоровая растительность ярко-зеленая, открытая почва ярко-розовых оттенков) [207]; –каналы 4-3-2 (открытая почва – светлые оттенки (светло-коричневый, желтый цвета)) [207, 213]. **Форма** участка поверхности [207]: –неправильная форма, вытянутая в направлении форм рельефа.	Балочно-овражная форма рельефа [207]. Повреждение травянистого и кустарникового покрова [207].
Несанкционированные свалки бытовых и промышленных отходов	**Цвет, оттенок и текстура** участка поверхности: –каналы 4-3-2 (цвет участка поверхности, на котором фиксируется свалка – белый, светло- серый с белыми или светло-желтыми вкраплениями, светло-желтый, светло-голубой (серый)) [209, 214]. **Форма** участка поверхности [214]: –неправильная форма участка поверхности, на котором зафиксировано воздействие.	Наличие подъездных путей/ грунтовых дорог[209,214]. Вытянутая линейная форма вдоль автодорог и ж/д путей [214]. Повреждение травянистого покрова [209, 214]. **Цвет** растительности вокруг свалки – коричневая/ желтая в естественных цветах [214].
Разливы нефтепродуктов	**Наличие теплового контраста** участка поверхности с разливом нефтепродуктов по сравнению с окружающими участками поверхности [205]. Повреждение травянистого покрова на участке [205].	Наличие объектов транспортирования и хранения нефтепродуктов [205].

1	2	3
Характеристики, условия развития и распространения НПЯ и ТВ на ОС		
Болезни насаждений: – тип и состав лесных насаждений	**Цвет и тон:** –каналы 4-3-2 [213]: • на весенних и летних снимках хвойные леса – темно-зеленая окраска, смешанные леса с преобладанием мелколиственных пород – светло- зеленая окраска с вкраплениями темно-зеленых пятен, мелколиственные леса– светло-зеленый цвет; • на осенних снимках смешанные лесные насаждения – неравномерный светло-красный тон с привлечением темно-зеленых пятен (береза/ осина и ель/сосна); • еловые леса – неравномерный тон с привлечением темно-зеленых пятен; • сосновые леса– светло-серый или сине-зеленый. –каналы 5-4-3 [213]: растительность – в оттенках красного цвета, хвойные леса– более темно-красные/коричневые по сравнению с лиственными лесами; более светлые оттенки–травянистая или кустарниковую растительность.	
– степень угнетения лесных насаждений	**Цвет и тон:** –каналы 4-3-2 [213]: угнетенная растительность – коричневая и желтая; –каналы 7-5-3 [213]: сухостойная растительность – оранжевая.	

1	2	3
Эрозия почвы: – почвозащитная способность растительности – степень увлажнения открытой почвы – степень эродируемости почвы	**Цвет и тон:** – каналы 4-3-2 [202,207]: • на весенних и летних снимках лесные насаждения представляются оттенками зеленого цвета; • на весенних и летних снимках травянистая и кустарниковая растительность представляется светло-зеленым (салатным) оттенком зеленого цвета. **Тон (оттенок) цвета открытого участка поверхности:** – каналы 7-5-3 (более влажной почве соответствует более темный оттенок (тон) розового цвета в рассматриваемом участке открытой почвы) [207]; – каналы 7-5-3 (почва с большим содержанием гумуса отображается более темным оттенком, чем истощенная (без содержания гумуса) почва) [202,207].	

По аналогии с идентификацией типа и состава лесных насаждений вопрос обнаружения свалок (идентификации техногенного воздействия на подстилающую поверхность в виде свалок бытовых и промышленных отходов) решается путем визуального анализа цветных изображений, полученных на основе данных об отражательной способности в видимом диапазоне спектра излучения. При этом дополнительным признаком, используемым при обнаружении свалок, является их местоположение на границах населенных пунктов [209].

Эрозия почвы является следствием снижения ее гумусованности, поэтому в естественных цветах, соответствующих видимым диапазонам измерения отражательной способности поверхности, цвет участка поверхности, подверженного этому виду воздействия, является светло-коричневым либо желтым. В том случае, если оттенок цвета участка поверхности, в котором зафиксирована эрозия почвы, является более темным, то это соответствует повышенному содержанию гумуса, что характеризует меньшую степень эродируемости почвы [202,213]. Более светлый оттенок участка с эрозией (в «естественных» цветах) свидетельствует о снижении содержания гумуса и о повышенной эродируемости почвы. В тоже время на основе визуального

анализа (визуального дешифрирования) может быть определен вид окружающей растительности (древесная либо травянистая и кустарниковая), который характеризует ее (растительности) почвозащитную способность [205,213,216]. Древесная растительность обладает меньшей почвозащитной способностью (коэффициент почвозащитной способности растительности – 0.1), почвозащитная способность кустарниковой и травянистой растительности выше (коэффициент почвозащитной способности растительности – 0.3). Степень увлажнения почвы является определяющим фактором, влияющим на развитие ветровой и водной эрозии [202, 207]. Повышенная влажность почвы может обеспечить более высокие темпы водной эрозии. Более темный оттенок цвета участка с эрозией характеризует большее влагосодержание.

Особенность применения индекса NDVI для определения наличия НПЯ и ТВ на ОС на основе контроля динамики отражательных свойств растительности и подстилающей поверхности предполагает, что поверхность должна быть покрыта растительностью не менее, чем на 30 %. При сильно разреженной растительности на подстилающей поверхности либо в сезон ослабленной или не вегетирующей растительности применение индекса NDVI не является целесообразным [217]. Учет этой особенности необходим, в частности, при определении наличия разливов нефтепродуктов в зоне тундры или болот с пониженной активностью растительности (покрытие растительностью не более 30%). В случае не достаточной развитости растительности определение отражательных свойств поверхности может быть выполнено с использованием индекса SAVI – индекса растительности с коррекцией по почве (почвенного вегетационного индекса). Использование этого индекса необходимо, когда покрытие поверхности растительностью не менее 15% [217,218]. Для расчета характеристик отражательной способности поверхности с использованием индекса SAVI используется выражение вида:

$$SAVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{GREEN} + L} \cdot (1 + L),$$

где L– коэффициент, учитывающий влияние почвы на ее отражательные характеристики ($L=1$ при полном отсутствии растительного покрова, $L=0.5$ при умеренном растительном покрове (травянистом и кустарниковом), $L=0$ при густом растительном покрове. В силу того, что в невегетационный период растительный покров не является развитым, но он имеется на поверхности, то при расчетах SAVI используют значение $L=0.5$ [218].

Идентификация НПЯ и ТВ на ОС обуславливает необходимость уточнения их характеристик и условий распространения по многозональным данным среднего разрешения в области меньшего размера, содержащей только рассматриваемое явление (воздействие). Тематическая обработка данных из различных каналов Landsat 8 для областей, в которых зафиксировано наличие НПЯ и ТВ, выполняется в соответствии с приведенными выше этапами и является аналогичной тематической обработке с целью идентификации динамики отражательных

свойств поверхности. Выполнение тематической обработки данных Landsat 8 для рассматриваемых областей позволяет идентифицировать следующие характеристики НПЯ и ТВ:

– площадь повреждения лесных насаждений, площадь участка эрозии почвы, площадь пятна нефтяного загрязнения на поверхности, площадь механического воздействия на почву в виде свалок бытовых, промышленных и строительных отходов;

– координаты границ рассматриваемых НПЯ и ТВ на ОС;

– тип лесных насаждений, их состав (развитие НПЯ, связанных с деградацией и гибелью растительности), разреженность насаждений, степень угнетения, влагосодержание;

– тип растительности на подстилающей поверхности (развитие процессов эрозии почвы и разливов нефтепродуктов на поверхности);

– почвозащитная способность растительности, степень увлажнения и эродируемости.

Идентификация характеристик выполняется как посредством визуального дешифрирования (Таблица П2.3), так и путем вычисления дополнительных вегетационных, влажностных, температурных индексов. Характеристики определяются в ходе тематической обработки в зависимости от вида явления, условиями распространения которого они являются.

Индексы NDVI и SAVI используются при идентификации наличия НПЯ и ТВ на ОС. В тоже время ряд индексов используются при определении условий распространения рассматриваемых НПЯ и ТВ на ОС. Значения этих индексов сопоставляются с выделенными в результате необучаемой классификации кластерами и характеризуют в рассматриваемой области локального размера, в которой обнаружено явление или воздействие, условия их распространения. Дополнительная интерпретация полученных значений NDVI позволяет определить степень разреженности растительности, которая влияет на скорость развития НПЯ, связанных с распространением болезней лесных насаждений и их поражением насекомыми. Идентификация степени разреженности лесных насаждений определяется в соответствии со шкалой, значения которой сведены в Таблицу П2.4.

Таблица П2.4– Значение NDVI для различных природных объектов [217]

Тип объекта	Значение NDVI
Густая растительность	0,7
Разряженная растительность	0,5
Открытая почва	0,025
Облака	0
Снег и лед	-0,05
Вода	-0,25

В зависимости от вида идентифицируемого НПЯ либо ТВ на ОС необходимо использовать данные ДЗЗ разного разрешения. Для идентификации болезней лесных насаждений и воздействий на них биотических факторов (вспышек размножения насекомых-фитофагов) достаточно использовать данных низкого разрешения (250 м), формируемых спектрорадиометром MODIS ИСЗ Terra/ Aqua, и последующее уточнение параметров этих природных явлений с использованием данных среднего разрешения (30 м) спектрорадиометра OLI/TIRS ИСЗ Landsat 8. Для идентификации такого НПЯ, как почвенная эрозия, а также для идентификации ТВ, связанных с механическим (свалки бытовых, промышленных и строительных отходов) и химическим (разливы нефтепродуктов) воздействиями на почву, необходимо использование данных среднего разрешения (30 м) спектрорадиометра OLI/TIRS ИСЗ Landsat 8.

Также для идентификации текущего состояния НПЯ (ТВ) с целью контроля его динамики и дальнейшего прогнозирования его развития, определения последствий влияния на ОС требуется зафиксировать степень нарушения растительности на поверхности. Данный параметр является характеристикой следующих явлений и воздействий на ОС:

– деградации лесных насаждений вследствие влияния размножения насекомых-фитофагов, техногенных воздействий и болезней; в этом случае растительность характеризуется как слабо поврежденная, ослабленная, сильно ослабленная, усыхающая либо погибшая;

– загрязнения почвы нефтепродуктами, вызывающего угнетение растительности;

– механического загрязнения поверхности почвы (свалки), также вызывающего угнетение растительности по ее краям (по краям свалки).

Идентификация степени угнетения лесной растительности выполняется посредством сравнения отражательной способности поверхности для текущих данных в соответствующих спектральных каналах с ретроспективными данными в этих же каналах. Для идентификации степени угнетения растительности используется либо введенный ранее в рассмотрение критерий NDVI либо дополнительный критерий – зеленый нормализованный разностный вегетационный индекс GNDVI, являющийся более чувствительным к изменениям содержания хлорофилла в листьях, определяемый следующим образом [213]:

$$GNDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{GREEN}}{\rho_{NIR} + \rho_{GREEN}},$$

где ρ_{NIR} – количество солнечной отраженной радиации, измеренное в БИК диапазоне спектра, ρ_{GREEN} – количество солнечной отраженной радиации, измеренное в видимом (зеленом) диапазоне спектра. Значения данного индекса изменяются в диапазоне [-1,1].

Анализ влагосодержания растительности позволяет определить условия их (явлений и воздействий) развития или распространения [217,218]. Количество влаги в растениях свидетельствует об их состоянии и, как следствие, о возможности распространения болезней и влияния техногенных воздействий (здоровые растения характеризуются большим количеством влаги в них). В тоже время влагосодержание растений косвенным образом характеризует количество влаги в почве, которое определяет степень развития эрозии (при малом количестве влаги в почве развитие ветровой эрозии является более вероятным). Для идентификации количества влаги в растительности наиболее информативным является влажностный индекс NDWI [219, 220]:

$$NDWI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR}},$$

где ρ_{NIR} – количество солнечной отраженной радиации, измеренное в БИК-диапазоне спектра, ρ_{SWIR} – количество солнечной отраженной радиации, измеренное в среднем инфракрасном (СИК) диапазоне. Значения индекса NDWI изменяются в диапазоне [-1;1]. При большом количестве влаги в здоровых растениях значение индекса NDWI стремится к 1. Уменьшение влагосодержания растительности приводит к уменьшению значений индекса NDWI. Таким образом, контроль влагосодержания окружающей растительности позволяет охарактеризовать ее состояние и определить тем самым степень подверженности воздействию наблюдаемых НПЯ и ТВ, то есть охарактеризовать условие их распространения. Определение содержания влаги в почве, выполняемое косвенно на основе содержания влаги в растительности, также позволяет охарактеризовать условия развития эрозии.

Температура земной поверхности является условием, влияющим на развитие: эрозийных процессов почвы; процессов, происходящих в слое бытовых, промышленных и строительных отходов на несанкционированных свалках (возможное изменение состояния отходов); процессов распространения нефтепродуктов в почве. Способы определения температуры земной поверхности подразумевают использование данных тепловых каналов 31 и 32 спектрорадиометра MODIS ИСЗ Terra/Aqua [221-223], данных тепловых каналов 61 и 62 спектрорадиометра ETM+ ИСЗ Landsat 7 [222], данных тепловых каналов 10 и 11 спектрорадиометра OLI/TIRS ИСЗ Landsat 8 [222, 223]. Разрешение сенсоров каналов 31 и 32 спектрорадиометра MODIS составляет 1 км, а разрешение сенсоров каналов 61 и 62 спектрорадиометра ETM+ и сенсоров каналов 10 и 11 спектрорадиометра OLI/TIRS составляет 30 м.

Рассматриваемые НПЯ и ТВ на ОС являются мезомасштабными. В этом случае для идентификации температуры необходимо использование данных Landsat 7,8. Для расчета температуры поверхности на основе данных Landsat 7,8 используется формула [224-226]:

$$T_{пов} = \frac{K_2}{ln(\frac{K_1}{\rho_t} + 1)},$$

где $T_{пов}$ – температура поверхности, K_1, K_2 – калибровочные константы, ρ_t – значение отраженной солнечной яркости, измеренное в одном из тепловых каналов. Значения калибровочных констант для Landsat 7 являются заданными: K_1 = 666.09, K_2 = 1282.71. Для Landsat 8 значения K_1, K_2 извлекаются из файла метаданных, сопровождающего сцену, передаваемую с Интернет-ресурса. В зависимости от типа спутника значение ρ_t определяется на основе дискретного калиброванного значения пикселя Q_{cal}, представляющего собой значение оттенка серого цвета, получаемое из снимка (из файла сцены), по различным формулам. Для Landsat 7 выражение имеет следующий вид [224-226]:

$$\rho_t = \frac{L_{max_\rho} - L_{min_\rho}}{Q_{cal_max} - Q_{cal_min}}(Q_{cal} - Q_{cal_min}) + L_{min_\rho},$$

где L_{max_ρ} – максимальное количество приходящего излучения (L_{max_ρ} = 12.65 для ETM+), L_{min_ρ} – минимальное количество приходящего излучения (L_{min_ρ} = 3.2 для ETM+), Q_{cal_max} – максимальное калиброванное значение яркости пикселя на снимке (Q_{cal_max} =255), Q_{cal_min} – минимальное калиброванное значение яркости пикселя на снимке (Q_{cal_min} =1).

Для Landsat 8 выражение для вычисления ρ_t имеет вид [224-226]:

$$\rho_t = M_\rho \cdot Q_{cal} + A_\rho,$$

где M_ρ и A_ρ – калибровочные коэффициенты, извлекаемые из файла метаданных, сопровождающего спутниковый снимок (сцену).

Вещества, находящиеся в твердых бытовых, промышленных и строительных отходах являются легко растворимыми и легко вымываемыми, поэтому вместе с дождевой водой они проникают в почву, где реализуется их последующее распространение [189]. Также в приповерхностном слое реализуется распространение нефти и нефтепродуктов, поступающих в почву в результате их разлива из поврежденных мест хранения и транспортировки. Тогда для определения распространения в почве вредных веществ, вымываемых из бытовых, промышленных и строительных отходов дождевыми водами, нефтепродуктов, разлитых по поверхности, необходима фиксация параметров почвы – ее гранулометрического состава и структуры

[227-228]. Гранулометрический состав почв является их физико-механичесским свойством, которое определяет степень просачивания жидкостей. Степень просачивания жидкости характеризуется также возможностью формирования (образования) агрегатов из твердых элементов почвы, то есть структурой почвы.

Использование многозональных данных для идентификации свойств почвы предполагает применение прямых либо косвенных методов [228,229]. Прямые методы распознавания почв предполагают анализ их цвета и текстуры на снимках, полученных на основе многозональных данных. Эти методы применимы при типизации открытых почв, свободных от растительности (пашня, эрозия). Однако на тон, цвет, рисунок текстуры изображения влияют различные характеристики самих почв: эродированность, засоленность, солонцеватость, окарбоначенность, степень увлажнения, содержание гумуса и другие [230]. Поэтому однозначно дешифрировать тип почвы на основе многозональных данных ДЗЗ только по прямым дешифровочным признакам (цвет, тон, текстура изображения открытой почвы) представляется затруднительным. То есть яркостные дешифровочные признаки не обладают требуемой надежностью при определении свойств почв [230]. Косвенные методы предусматривают анализ характера растительности, наземного покрова, рельефа и т.д. [230]. Однако использование характера изображения растительности на снимках как дешифровочного признака ограничивается не изученностью ее индикационной роли по отношению к почвам, а также динамичностью растительности, связанной с антропогенными воздействиями и естественными процессами [229,230]. По этой причине использование многозональных снимков для идентификации свойств почв является затруднительным [229,230].

В силу того, что для идентификации физико-механических свойств почвы не могут быть задействованы многозональные снимки, тогда для этой цели предпринимаются попытки использования радиолокационного способа дистанционного зондирования. Радиолокационная съемка земной поверхностей выполняется с использованием радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА), реализующих излучение и прием отраженных от поверхности радиоволн [192,194,231-235]. В соответствии с [233] могут быть определены виды взаимодействия радиосигналов с растительностью и подстилающей поверхностью: 1) объемное рассеяние – обратное рассеяние непосредственно от частей растения (листьев, веток, стеблей), включающее множественное отражение и возникающее в случае, если длина радиоволны соизмерима с размерами этих частей; 2) двукратное рассеяние – двойное отражение между поверхностью почвы, воды и растительностью с вертикальной структурой, которое характеризуется высокими значениями мощности отраженного сигнала; 3) однократное, или поверхностное, рассеяние – обратное рассеяние от поверхности почвы с небольшой шероховатостью.

При зондировании открытой почвы травянистая и кустарниковая растительность в меньшей мере формирует отраженный сигнал, излучаемый сигнал проникает в подповерхностный слой почвы, где формируется отраженный сигнал. Глубина проникновения сигнала в подповерхностный слой зависит от длины волны и влажности грунта. Свободно распространяемыми радиолокационными данными, предоставляемыми службой USGS, являются данные ИСЗ Sentinel, который реализует излучение и прием радиоволн в С-диапазоне. Свойствами грунта, определяющими степень рассеивания радиолокационного сигнала, являются [232,233,235, 236]:

– физический размер элементов, реализующих рассеивание сигнала (степень неровности поверхности, а при условии распространения сигнала в подповерхностный слой– гранулометрический состав почвы и ее структура);

– влажность грунта подстилающей поверхности;

– физико-химического состава почвы (засоленность, содержание гумуса и другие).

Наличие поверхностной растительности изменяет картину отражения от подповерхностных слоев почвы [235]. Наибольшее соответствие наблюдается для вспаханных и боронованных полей. Сильное отражение радиосигнала от поверхности и более яркий тон на снимке соответствует более крупным размерам рассеивателей в подповерхностном слое, менее яркий тон – малым размерам рассеивателей в подповерхностном слое на контролируемом участке [236]. Однако большая яркость пикселя на изображении указывает не только на более крупные частицы почвы, образующие ее гранулометрический состав (структуру), а меньшая – на мелкие частицы гранулометрического состава. На отражение сигнала от поверхности влияют диэлектрические свойства грунта, зависящие от влажности, физико-химические свойства почвы, а также ее шероховатость [232,233,235,236]. В частности, при высокой влажности фиксируется значительное отражение и, как следствие, светлый тон на снимке. Влажный с тонким гранулометрическим составом слой почвы имеет такое же отражение, как и сухой грунт с крупным гранулометрическим составом. Таким образом, грунту с крупным гранулометрическим составом при незначительной влажности соответствует сильное отражение радиосигнала от поверхности и более яркий тон на снимке, также как грунту с мелким гранулометрическим составов и высокой влажностью почвы. Поэтому однозначное определение гранулометрического состава почв является затруднительным. В настоящее время не существует методов, позволяющих однозначно определять с использование данных ДЗЗ гранулометрический состав подповерхностного слоя почвы, учитывая при этом другие ее (почвы) характеристики.

Развитие НПЯ и ТВ является также зависящим от рельефа местности. Влияние рельефа проявляется следующим образом:

– рост интенсивности эрозии с увеличением угла наклона поверхности; мощность почвенного профиля на склоне изменяется в соответствии с его углом наклона и высотой;

– увеличение поверхностного стока и дренирования приповерхностного слоя почвы для большего угла наклона поверхности (угол наклона поверхности определяет режим инфильтрации нефтепродуктов в почву);

– увеличение угла падения солнечных лучей на поверхность при росте ее угла наклона, как следствие– увеличение количества энергии, которую получает поверхность, что определяет микроклиматические особенности конкретных участков.

В силу сказанного для прогнозирования развития НПЯ и распространения ТВ на определенном участке земной поверхности (полигоне) требуется формирование цифровой модели рельефа (ЦМР). Базовыми характеристиками (морфометрическими параметрами) рельефа являются угол наклона склона (крутизна слона, уклон склона) и экспозиция склона [237, 239]. Так как экспозиция склона характеризует локальный климат, тогда она определяет отличие в почвенном и растительном покрове различных участков подстилающей поверхности. Таким образом, уклон поверхности (склона) характеризует относительную интенсивность сноса материалов, экспозиция склона– направление этого сноса. Значения морфометрических параметров рельефа (крутизны склона и экспозиции) определяются с использованием данных SRTM, сформированных по результатам интерферометрической обработки пар радарных снимков, выполненных с временными интервалами [237- 239].

В силу сказанного для идентификации НПЯ и ТВ на ОС, определения их параметров и условий распространения необходима различная обработка разных типов данных (многозональных данных различного разрешения, формируемых разными спектрорадиометрами (на различных ИСЗ). В итоге необходима обработка значительных объемов разнотипных данных от различных ИСЗ, характеризующих разные НПЯ и ТВ на ОС, возникающие в различных контролируемых регионах. При этом тематическая обработка этих данных представляет определенную (одинаковую для данных разных типов) последовательность этапов выполнения операций с ними. В этом случае тематическая обработка многозональных данных ДЗЗ должна быть конвейеризирована с целью снижения задержек с получением результатов.

П2.3. Анализ существующих систем мониторинга негативных природных явлений и техногенных воздействий на окружающую среду с использованием данных дистанционного зондирования Земли

Для идентификации наличия НПЯ и ТВ на ОС используется подход, основывающийся на контроле изменения отражательных свойств подстилающей поверхности, зафиксированного с использованием серии разновременных данных ДЗЗ. Вариантом реализации данного подхода является его использование для мониторинга и контроля динамики развития сельскохозяй-

ственных культур [240-247]. При этом на основе контроля динамики отражательной способности поверхности в различных спектральных каналах (и, соответственно, вегетационных индексов) идентифицируется их (культур) процесс развития, отклонения этого процесса от нормы. Особенностью реализации данного подхода является использование данных низкого разрешения (спектрорадиометр MODIS ИСЗ Terra/Aqua) для идентификации явлений и среднего разрешения (спектрорадиометр ETM+ ИСЗ Landsat 7) для определения уточненных характеристик процесса. Наряду с идентификацией вида растительности, степени созревания (развития растений), определяется ее состояние, на основе которого делается вывод о необходимости внесения удобрений (в случае отклонения развития процесса от установленной нормы [246]). Необходимость полива идентифицируется на основе анализа влагосодержания растений [246]. В качестве характеристик, определяющих процесс созревания сельхозкультур, определяются: температура подстилающей поверхности [241], содержание гумуса в приповерхностном слое почвы [247]. При этом комплексного определения характеристик, влияющих на развитие процесса, ни в одной из систем не осуществляется. Примером реализации рассматриваемого подхода является система мониторинга земель сельскохозяйственного назначения на уровне регионов и крупных агропромышленных предприятий, разработанная Институтом Космических исследований РАН (ИКИ РАН) и Главным вычислительным центром МСХ РФ (ГВЦ МСХ РФ) (http://www.agrocosmos.gvc.ru) [241,242], система дистанционного мониторинга земель сельскохозяйственного назначения, разработанная компанией «Совзонд» (http://sdmz.gvc.ru) [247]. Дальнейшее развитие рассматриваемого подхода связано с изменением способа получения информации, позволяющего повысить ее оперативность [248].

Класс задач, решение которых также осуществляется на основе контроля динамики отражательной способности поверхности с использованием разновременных снимков, связан с идентификацией влияния размножения насекомых-фитофагов на хвойную либо лиственную растительность. Системы, осуществляющие выявление в лесах очагов массового размножения насекомых-вредителей, реализуют анализ динамики отражательных свойств растительного покрова для одинаковых дат (один вегетационный период) разных лет наблюдений путем сравнения значений вегетационных индексов [249-252]. При этом для идентификации наличия НПЯ используются снимки низкого разрешения (MODIS), а для уточнения характеристик этого явления – данные среднего разрешения (Landsat). Однако при этом фиксируется наличие НПЯ и площадь леса, ему подверженного. Задача разработанной технологии состоит как в обнаружении НПЯ, так и в картировании последствий его воздействия на ОС [251]. Параметры, определяющие характер развития этого НПЯ, в этих системах не идентифицируются.

Наряду с технологиями идентификации воздействий очагов размножения насекомых-фитофагов на растительный покров, разработаны технологии контроля степени деградации

лесной растительности под воздействием различных факторов (в частном случае – антропогенных факторов) [253, 254]. Выявление аномалий в динамике развития растений осуществляется на основе анализа разновременных спутниковых данных (использование многолетних данных мониторинга растительности). Примером реализации рассматриваемой технологии является система мониторинга состояния растительности, созданная в ИКИ РАН, которая осуществляет межгодовой анализ и выявление аномалий в развитии растительности (http://maps.terranorte.ru). При этом системой выполняется фиксация факта деградации растительности, определение характеристик явления на поверхности (площадь, координаты контура и т.д.). Условия развития явлений системой не контролируются (параметры, на основе которых может быть выполнено прогнозирование развития НПЯ, в системе не определяются).

Аналогичное назначение, связанное с контролем динамики развития растительности (сельскохозяйственной и лесной) в вегетационный период, анализом состояния растительности и ее мониторингом, имеет система дистанционного спутникового мониторинга ВЕГА, разработанная в ИКИ РАН (http:// vega.smislab.ru) [255,256]. Выполняемый в этой системе контроль внутри сезонной динамики развития растительности связан с изменением отражательной способности листьев по мере их роста и вызревания. Учет данных многолетних наблюдений за динамикой развития растительности в вегетационный период позволяет идентифицировать отклонения в процессе развития растений и определять их деградацию и угнетение. При этом анализируется внутри сезонная динамика значений индексов.

Обобщением технологий, разработанных в ИКИ РАН, является созданная Информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз) [258-261]. Идентификация НПЯ и ТВ на ОС, связанных с лесной растительностью, обеспечивается блоком лесопатологического мониторинга (системой дистанционного лесопатологического мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства). Использование данной системы позволяет контролировать участки масштабного усыхания и гибели лесов не пирогенного характера (повреждение насаждений не пирогенного характера). Идентификация наличия НПЯ, влияющих на лесную растительность, и ТВ на нее, осуществляется путем контроля динамики развития растений в вегетационный период на основе спутниковых многоспектральных данных многолетних наблюдений. При этом для обнаружения явления в системе используются данные низкого разрешения (спектрорадиометр MODIS), а для уточнения характеристик явлений– данные среднего разрешения ИСЗ Landsat, которые поставляются по запросу с задержкой в одну неделю. Один раз в месяц система генерирует ведомости лесных участков с подозрениями на повреждения не пирогенного характера, используя для их формирования данные низкого разрешения. Идентификация повреждений насаждений на региональном уровне доступна для региональных центров ФБУ «Рослесзащита».

В соответствии с выполненным анализом существующих систем и технологий дистанционного мониторинга окружающей среды с использованием спутниковых данных ДЗЗ, определены следующие их особенности:

– системы являются отраслевыми и узко специализированными, решающими задачу идентификации ограниченного количества НПЯ и ТВ на ОС; доступ к данным ДЗЗ и результатам их обработки со стороны пользователей других организаций является затруднительным (результаты обработки не являются общедоступными при определении НПЯ и ТВ);

– системы реализуют сбор и обработку обобщенной статистической информации о территориях большого размера; детальная информация в системах не рассматривается и не интерпретируется либо рассматривается со значительной задержкой в соответствии с запросом;

– системы идентифицируют наличие НПЯ и ТВ на ОС, определяют основные их характеристики; определение условий распространения и развития НПЯ и ТВ, а также условий воздействия их на ОС в этих системах не выполняется;

– системы интерпретируют спутниковые данные определенного типа; комплексное использование данных от ИСЗ разных типов и методов их обработки для идентификации характеристик явлений и условий их распространения в системах не реализуется;

– в системах не реализовано комплексное определение наличия НПЯ и ТВ на ОС разных типов и разных масштабов (контролируется наличие определенного узкого круга явлений и воздействий), идентификация их характеристик, а также условий их распространения.

Дополнительные средства обработки данных ДЗЗ реализованы в системе Scanex Terminal, выполняющей формирование тематических продуктов на основе метеорологических данных ДЗЗ. Этот ресурс может быть рассмотрен как дополнительное средство, обеспечивающее определение некоторых характеристик НПЯ и ТВ на ОС. Однако использование тематических продуктов, формируемых этим программным комплексом, является затруднительным для определение различного вида характеристик НПЯ и ТВ на ОС. Результаты обработки данных ДЗЗ в системе Scanex Terminal никак не привязаны к широкому кругу характеристик негативных явлений и техногенных воздействий и не учитывают особенности каждого из рассматриваемых явлений и воздействий. Параметры, формируемые этой системой, имеют «общий» характер и не связаны с конкретными НПЯ и ТВ (не характеризуют условия распространения).

Также современной системой обработки данных ДЗЗ, предоставляющей пользователям условно свободный доступ к данным и средствам их обработки, является LandViewer. Данная система предоставляет возможность получения различных тематических продуктов обработки данных ДЗЗ для текущего момента времени либо для сцен с некоторой заблаговременностью, определяемой пользователем (бесплатно при условии получения не более 10 сцен, затем при реализации оплаты). Система выполняет анализ динамики индексов NDVI, NDWI и других

для заданного полигона и формирует осредненную кривую значений одного из этих индексов (одно среднее значение индекса, формируемое для всех точек полигона, соответствует одному отсчету на указанной кривой). Попиксельно для выделенного пользователем полигона анализ динамики значений индексов системой не проводится. В силу этого пользователю необходимо самостоятельно выбирать серию разновременных снимков (сцен), формировать тематические изображения (результаты расчета индекса NDVI) и сравнивать визуально на этой серии разновременных снимков участки поверхности с целью обнаружения изменения отражательных свойств поверхности (индекса NDVI). Данный способ анализа динамики значений индексов не обеспечивает однозначной идентификации НПЯ и ТВ на ОС на земной поверхности, либо значительно ее затрудняет. В соответствии с особенностями построения и функционирования систем мониторинга ОС с использованием данных ДЗЗ возможно их совершенствование, предполагающее: 1) задание разрешения спутниковых данных, позволяющего идентифицировать наличие НПЯ и ТВ на ОС на начальной стадии развития при их малом масштабе; 2) автоматическое определение как основных характеристик НПЯ и ТВ на ОС, так и условий их распространения и развития; 3) доступ к данным различных ИСЗ в зависимости от идентифицируемого явления с целью определения его характеристик и условий распространения; 4) использование для получения спутниковых снимков с целью их последующей тематической обработки центров предоставления данных ДЗЗ, что позволяет повысить оперативность информации и снизить стоимость получения результатов обработки; 5) комплексное использование разработанных и усовершенствованных методов оценки состояния НПЯ и ТВ на ОС с целью идентификации их характеристик и условий распространения, переход от разработки систем мониторинга ОС, ориентированных на отдельные разделы науки, к совместному комплексному использованию данных ДЗЗ в различных разделах; 6) многопользовательский доступ распределенных региональных пользователей к спутниковым данным о территориях ограниченного масштаба; 7) реализацию усовершенствованных алгоритмов и методов управления обработкой данных с целью повышения оперативности мониторинга ОС.

П2.4. Анализ способов управления обработкой спутниковых снимков в системах мониторинга окружающей среды с использованием данных дистанционного зондирования Земли

Современный подход к получению спутниковых данных разных типов от различных ИСЗ предполагает обращение с запросами к центрам их хранения, доступ к которым возможен средствами Web-технологий [262-264]. Свободно распространяемыми являются данные ИСЗ

Aqua/Terra, Landsat, Sentinel. Центрами свободного распространения спутниковых данных являются сервисы Геологической службы США (United States Geological Survey– USGS) с адресами для скачивания данных ИСЗ Landsat (спектрорадиометры ETM+, OLI/TIRS): http://earthexplorer.usgs.gov, http://glovis.usgs.gov, http://landsatlook.usgs.gov, система Lance-Modis, обеспечивающая доступ к данным ИСЗ Aqua/Terra (спектрорадиометр MODIS) с адресом http:// lance-modis.eosdis.nasa.gov. Организация систем мониторинга ОС с использованием данных ДЗЗ, а также способы получения и последующей обработки спутниковых данных ориентированы на взаимодействие с этими ресурсами [261,262].

Работы по созданию систем мониторинга ОС с использованием данных ДЗЗ ведутся в различных научных организациях (ИКИ РАН, ИВТ СО РАН, ИАПУ ДВО РАН). Результаты работ по реализации таких систем изложены в [261-271]. В работах [264,265] описываются базовые принципы построения и функционирования программно-аппаратных комплексов сбора, обработки и архивации спутниковых данных. В соответствии с запросами пользователей на получение спутниковых данных определенных типов и реализацию требуемой их тематической обработки системой генерируются запросы к центрам хранения и предоставления. В соответствии с запросами пользователей сервером диспетчеризации формируются сценарии обработки, которые в виде файлов конфигурации загружаются на соответствующие рабочие станции (вычислительные устройства (ВУ)) при получении данных. Способ управления обработкой предусматривает определение свободного ВУ, куда будут направлены данные и сценарий их обработки. Свободному ВУ назначаются для реализации определенные сценарии обработки, выполняется загрузка данных, обрабатывающих процедур и самих сценариев для их интерпретации. Базовыми компонентами архитектуры программно-аппаратных комплексов сбора, обработки данных и архивации результатов являются:

– сервер диспетчеризации заданий, реализующий прием запросов от пользователей, формирование соответствующих им заданий и распределение заданий по ВУ;

– сервер хранения данных, выполняющий в соответствии с заданиями генерацию запросов на данные к центрам хранения, получение данных и их передачу на рабочие станции для обработки в соответствии со сценарием;

– рабочие станции, реализующие интерпретацию сформированных сценариев обработки.

Таким образом, для полученных данных формируется сценарий на обработку, который загружается вместе с данными на ВУ для его интерпретации, типизации данных по какому-либо признаку, группирования однотипных данных для их обработки в соответствии с одинаковым сценарием в системе не выполняется.

Технология построения информационной системы мониторинга ОС, рассмотренная в [261, 262], также предусматривает использование свободно распространяемых спутниковых данных,

получаемых от центров их хранения. Обработка данных выполняется на нескольких параллельно функционирующих ВУ, которые при реализации этого процесса друг с другом не взаимодействуют. Вычислительный ресурс выделяется целиком для выполнения тематической обработки данных только одного типа. Организация процесса обработки предполагает:

– формирование наборов данных, обработка которых обеспечивает идентификацию требуемых параметров подстилающей поверхности и явлений на ней;

– выбор и управление свободными вычислительными ресурсами для проведения обработки назначенных на это устройство данных;

– управление процессом запуска процедур на выбранном устройстве в соответствии со сценарием, обеспечивающим реализацию обработки данных определенного типа;

– управление размещением данных и результатов их обработки в архивах.

Тогда обработка данных является иерархически распределенной, использующей совместно функционирующие блоки: формирования наборов данных, предназначенных для выполнения тематической обработки определенного типа; выполнения тематической обработки данных (каждый блок (ВУ) реализует определенный назначенный ему вид тематической обработки данных); архивации результатов обработки. Каждый обработчик реализует полный цикл тематической обработки в соответствии со сценарием и заданным набором процедур. Каждое ВУ содержит все требуемые процедуры, которые активизируются в соответствии с типом данных, подаваемых на обработку. Обработка данных разных типов выполняется путем использования нескольких параллельно функционирующих ВУ, которые реализуют назначенные им сценарии обработки, соответствующие типам данных, поступающих на вход системы. Способ управления обработкой предполагает, что в случае освобождения какого-либо ВУ из очереди извлекается задание на обработку данных и направляется вместе с сформированным сценарием на соответствующее ВУ. Управление обработкой реализуется путем интерпретации эвристической процедуры, позволяющую предотвратить загрузку всех вычислительных мощностей системы обработкой данных одного типа в ущерб обработке данных других типов (предусматривает равномерное распределение данных разных типов по ВУ для их обработки).

Уточненное описание приведенной технологии обработки данных рассмотрено в [266]. Управление процессом обработки данных выполняется сервером диспетчеризации, который реализует следующие функции:

– формирование заданий на обработку (задание включает в себя указание: процедур, используемых при обработке, последовательности запуска этих процедур на выполнение в виде сценария обработки, набора данных, обработка которых реализуется);

– на основе информации о состоянии ВУ реализуется распределение заданий.

Новый процесс обработки генерируется на соответствующем вычислительном устройстве в случае наличия необходимого для обработки данных количества ресурсов. При этом от сервера диспетчеризации на станции обработки (ВУ) реализуется передача файлов конфигураций (сценариев), определяющих последовательность операций с данными определенных типов.

Обобщению результатов работ [264-266] посвящена работа [267]. Система ([267]) реализует обработку спутниковых снимков, поступающих от центров хранения данных в соответствии с запросами пользователей. Интерпретация запросов пользователей на получение данных и их тематическую обработку реализуется менеджерами заданий, каждый из которых ориентирован на работу с определенным типом данных и видом их обработки. Распределенная обработка запросов пользователей предполагает выделение сервера-диспетчера для каждого типа данных. Тогда менеджер заданий в случае освобождения требуемого сервера-диспетчера для соответствующего типа данных извлекает из очереди задание на обработку и направляет его диспетчеру для генерации запросов к удаленным ресурсам хранения. Выполнение задания предполагает как получение данных по запросу, так и их тематическую обработку.

Так как для каждого типа данных выделяется свой сервер-диспетчер, тогда генерация запросов к различным ресурсам, предоставляющим доступ к спутниковым снимкам, выполняется параллельно. Сервера-хранилища данных реализуют как буферизацию принимаемых снимков, так и их последующую тематическую обработку. Сервер-диспетчер и сервер-хранилище соответствуют типу данных, они реализуют предопределенный сценарий обработки.

Работа [268] посвящена применению технологий получения спутниковых данных от центров их хранения и архивации и построению систем мониторинга ОС с использованием данных ДЗЗ, рассмотренных в [264-267]. Если работы [264-268] рассматривают организацию базовых технологий получения и обработки данных, то работа [269] описывает модификации этой технологии. Элементами архитектуры системы являются: сервер, который формирует задания на обработку; сервер, который реализует хранение скриптов (сценариев обработки). Модификации связаны с реализацией многопотоковой обработки данных разных типов на каждом параллельно действующем ВУ. Если на ВУ имеются свободные ресурсы, то может быть активизирован еще один поток обработки данных (процесс, который реализует обработку набора данных другого типа). Модификация способа управления процессом обработки связана с возможностью выполнения вычислений на одном устройстве над данными разных типов, реализуемых с использованием нескольких потоков. Управление выполнением заданий (реализации потоков) на каждом ВУ реализуется уже средствами локальных ОС.

Работа [270] обобщает результаты работ, проводимых в ИВТ СО РАН по созданию информационных систем мониторинга территорий на основе обработки спутниковых данных. Прием данных, их предварительная обработка и архивация являются распределенными. Ин-

фраструктура сегмента системы, входящего в состав ИВТ СО РАН, обеспечивает обработку «сырых» данных и архивацию результатов предварительной обработки. Web-интерфейс обеспечивает выбор сенсора (измерительного прибора ИСЗ), координат области и задание временного интервала для определения разновременных данных.

В составе распределенной системы мониторинга ОС [271] создан центр коллективного пользования (ЦКП) спутниковыми данными, в основе которого – распределенная система обработки данных, реализующая тематическую обработку с использованием комплекса программ, обеспечивающих статистическую обработку, классификацию данных в соответствии с выбранными признаками. Тематическая обработка данных обеспечивается исполнением соответствующих сценариев, определяющих последовательность запуска процедур на соответствующем выбранном устройстве. В этом случае выполняемое задание представляет собой указание исполняемого сценария и передаваемых в процедуры данных. Планировщик заданий запускает выполнение задания на свободном ВУ, подходящим для определенного сценария (содержащего требуемые процедуры). Обработка спутниковых данных, позволяющих идентифицировать НПЯ и ТВ на ОС, обеспечивается формированием сценария и передачей этого сценария на подходящее для его интерпретации устройство. При этом данные не группируются в соответствии с типом обработки. Для каждого массива данных, обеспечивающего идентификацию состояния подстилающей поверхности, формируется свой сценарий, который передается на обрабатывающее устройство.

Управление процессом обработки в ЦКП осуществляется с использованием системы управления Taverna [272,273]. В ней процесс обработки данных определенного типа представляется в виде графа рабочего процесса (графа потоков данных, передаваемых между обрабатывающими процедурами). Граф рабочего процесса представляет собой указание идентификаторов процедур, активизация которых обеспечивает обработку данных одного типа, порядка запуска этих процедур и связей между процедурами по данным. Для каждого рабочего процесса подсистемой управления формируется свой сценарий обработки, указывающий идентификаторы ВУ и процедур, которые будут использоваться при обработке данных определенного типа. Сценарий, определяющий порядок активизации процедур на ВУ для данных требуемого типа, рассылается по этим ВУ и интерпретируется на них при обработке данных. Для каждых новых данных некоторого типа, поступающих в систему, повторно формируется свой сценарий выполнения их обработки с учетом текущей загрузки вычислительных ресурсов (ВУ) и графа рабочего процесса. Текущий сформированный порядок выполнения рабочих процессов на ВУ при поступлении новых данных не модифицируется.

В [274,275] опубликованы результаты работ по созданию ЦКП спутниковыми данными (регионального спутникового мониторинга), разработанного в ИАПУ ДВО РАН. Система реа-

лизует концепцию заказа на обработку. Заказ на обработку, формируемый пользователем, предусматривает указание вида спутниковых данных (типа сенсора), технологий (способов) и параметров обработки. На основе заказа формируется задание на получение данных, а также на их тематическую распределенную обработку. Обработка реализуется в соответствии с предварительно заданной для каждого типа данных схемой выполнения операций (процедур). Для данных, поступающих по заданию, реализуется формирование сценария в соответствии со схемой их обработки и ее параметрами. Выполнение сценария закрепляется за свободным ВУ, способным обеспечить его реализацию (на носителе которого имеются требуемые процедуры). Для вновь поступающих данных в системе выполняется формирование нового сценария обработки, закрепление ВУ для его интерпретации, передача на ВУ как сценария, так и данных. Группирование данных в соответствии с признаками в системе не производится.

Развитие систем обработки спутниковых данных за рубежом описано в работах [276,277]. Работа [276] посвящена организации распределенной первичной обработки спутниковых данных средствами Grid-технологий (выполнение задания геометрической коррекции «сырых» данных– коррекции пространственного местоположения и ориентации спутниковых снимков). Вычислительные ресурсы (ВУ), используемые при реализации первичной обработки снимков, являются географически распределенными. Использование Grid-технологий предполагает выделение частей заданий и разделение данных для их независимого выполнения и обработки на географически распределенных вычислительных ресурсах.

В работе [277] рассматривается подход, обеспечивающий управление параллельной распределенной обработкой разнотипных данных. С учетом типа данных определяется вид их тематической обработки, идентифицируются приложения, которые должны быть активизированы на всех обрабатывающих устройствах (ВУ) (все ВУ одновременно интерпретируют одинаковые приложения, обрабатывающие однотипные данные в составе вычислительной системы). Каждому ВУ назначается для обработки определенное подмножество данных. В качестве параметров обработки задаются пути к файлам данных, размеры изображений и т.д. Управляющий процесс реализует на каждом подчиненном ВУ создание и запуск обрабатывающих процессов с передачей им соответствующих параметров. Вычислительное устройство по окончании обработки данных информирует диспетчирующий процесс, что позволяет ему идентифицировать освобождение ресурса для обработки данных другого типа.

Анализ способов управления обработкой показывает, что наличие не обработанных заданий и требуемого количества ресурсов на ВУ для их выполнения, приводит к необходимости повторного формирования диспетчирующим устройством сценария обработки, который вновь передается на ВУ для его интерпретации. Это приводит к повторной активизации обрабатывающих процедур. Исключить указанные недостатки позволяет подход, предусматривающий

объединение однотипных данных в соответствии с заданными признаками. В частности, объединение данных возможно в соответствии с видом их тематической обработки (типом параметров, характеризующих подстилающую поверхность, получаемых путем реализации соответствующего вида тематической обработки). Для объединения данных в рассмотрение введено понятие пакета, как совокупности данных, формируемой в соответствии с заданными признаками. Пакет данных – это совокупность данных одного типа, обрабатываемых в вычислительной системе без ее переналадки на обработку данных другого типа. Объединение данных в соответствии с некоторыми признаками (формирование пакетов) позволяет исключить повторяющееся построение сценариев обработки для однотипных данных и передачу их на ВУ. В тоже время формируемое распределение заданий на обработку данных по ВУ является статичным, не изменяющимся до завершения его полной реализации. Поступление новых данных, в том числе данных с высоким приоритетом, не приводит к перестроению сформированного распределения заданий. В силу того, что методы стандартной тематической обработки спутниковых данных предполагают ее реализацию в виде последовательности этапов (стадий), поэтому для снижения временных затрат на выполнение она должна быть конвейеризирована. Конвейеризация обработки данных позволяет снизить затраты на организацию системы, так как состав ВУ, входящих в нее, не изменяется. В тоже время в параллельных системах при увеличении нагрузки реализуется подключение новых устройств, что связано с финансовыми затратами.

П2.5. Обоснование архитектурной организации Web-ориентированных сервисов мониторинга окружающей среды с использованием данных дистанционного зондирования Земли

Основное назначение разрабатываемого сервиса состоит в решении задач регионального мониторинга окружающей среды, контроля за возникновением и развитием НПЯ и ТВ на ОС на территориях малых масштабов (региональный и территориальный уровни). Базовыми функциями сервисов (систем), обеспечивающими реализацию мониторинга, являются:

– идентификация наличия на заданных полигонах НПЯ и ТВ на ОС, определение их вида на основе их знаний пользователей этих сервисов (типизация явлений и воздействий выполняется пользователем по заданным дешифрационным признакам);

– определение характеристик идентифицированных на заданных полигонах НПЯ и ТВ на ОС (площадь, координаты контура и т.д.);

– идентификация динамики рассматриваемых НПЯ и ТВ на ОС;

– определение условий распространения НПЯ и ТВ на ОС.

Реализация названных функций осуществляется с применением спутниковых данных ДЗЗ от ИСЗ разных типов. Современный подход к получению спутниковых данных разных типов от различных ИСЗ [262-271,274,275] предполагает обращение с запросами к центрам их хранения, доступ к которым возможен посредством Web-технологий. Центрами свободного распространения спутниковых данных являются сервисы Геологической службы США (United States Geological Survey– USGS): http://earthexplorer.usgs.gov, http://glovis.usgs.gov, http://landsatlook.usgs.gov, система Lance-Modis, обеспечивающая доступ к данным ИСЗ Aqua/Terra (спектрорадиометр MODIS) с адресом http:// lance-modis.eosdis.nasa.gov.

В работах [262-269] авторами охарактеризована унифицированная технология автоматического получения наборов данных из центров их хранения, разработанная в ИКИ РАН. В соответствии с этой технологией процесс автоматического получения данных организован с использованием стандартных блоков, обеспечивающих выполнение следующих функций: 1) поиск, контроль обновления и доступности спутниковых данных в архивах центров их хранения и предоставления; 2) авторизация на Web-ресурсах центров предоставления данных; 3) запрос на получение данных и загрузка данных с ресурсов; 4) контроль целостности получаемых данных; 5) экспорт данных из архива.

Обеспечение этих функций реализуется следующим составом блоков системы автоматического получения данных [262-268]: 1) программное ядро, реализующее функции обновления очередей, выборки типа данных из очереди для скачивания, заказ данных (формирование запроса на данные), скачивание данных; также ядро реализует подключение источников данных; 2) исполняемые сценарии, вызывающие процедуры ядра для выполнения действий; 3) система управления очередями. В соответствии с рассматриваемой технологией алгоритм получения данных из центров их хранения и предоставления имеет следующий порядок шагов:

– построение очереди на скачивание данных (от оперативных данных к устаревшим);

– авторизация и генерация запросов на скачивание данных в соответствии с очередью;

– получение данных, обеспечиваемое системой скачивания данных;

– размещение данных в выходном каталоге и передача данных в систему ведения архива.

Функционирование систем мониторинга ОС с использованием данных ДЗЗ должно обеспечиваться получением разновременных данных разных типов (от разных ИСЗ) в заданных интервалах времени. Данные, поступающие из центров хранения и их предоставления, являются стабильными, геометрически и радиометрически откалиброванными, скорректированными по условиям освещенности и состояния атмосферы, географически привязанными. Использование рассматриваемой технологии позволяет исключить необходимость построения центра приема и первичной обработки разнотипных данных от различных ИСЗ, снизив тем самым стоимость реализации системы. С точки зрения современного подхода к использованию данных ДЗЗ

предполагается переход от простого предоставления данных (получения данных по запросу) к реализации обработки этих данных непосредственно в Web-среде (на сетевых ресурсах, предоставляющих возможность обработки этих данных). Таким образом, реализуется переход от статичного представления данных к представлению данных совместно со средствами их обработки (реализация предоставления Web-сервиса обработки спутниковых данных) [278].

В том случае, если Web-ресурс реализует возможность комплексной тематической обработки различного вида спутниковых снимков от разных ИСЗ в интересах широкого круга отраслей, то есть обеспечивает функционирование локальных Web-сервисов либо подключение к Web-сервисам, располагающимся на других ресурсах, тогда этот ресурс является геопорталом [278,279]. Геопортал обеспечивает разнотипную тематическую обработку спутниковых данных от разных ИСЗ в интересах различных отраслей для получения исходных снимков и предоставления результатов заинтересованным пользователям с использованием Web-технологий.

Подход к построению систем мониторинга ОС, предусматривающий реализацию заказов пользователей на данные из центров их хранения и предоставления, последующую их тематическую обработку с целью мониторинга ОС, положен в основу организации геопартала (геосервиса), обобщенная структурная схема которого представлена на рисунке П2.1.

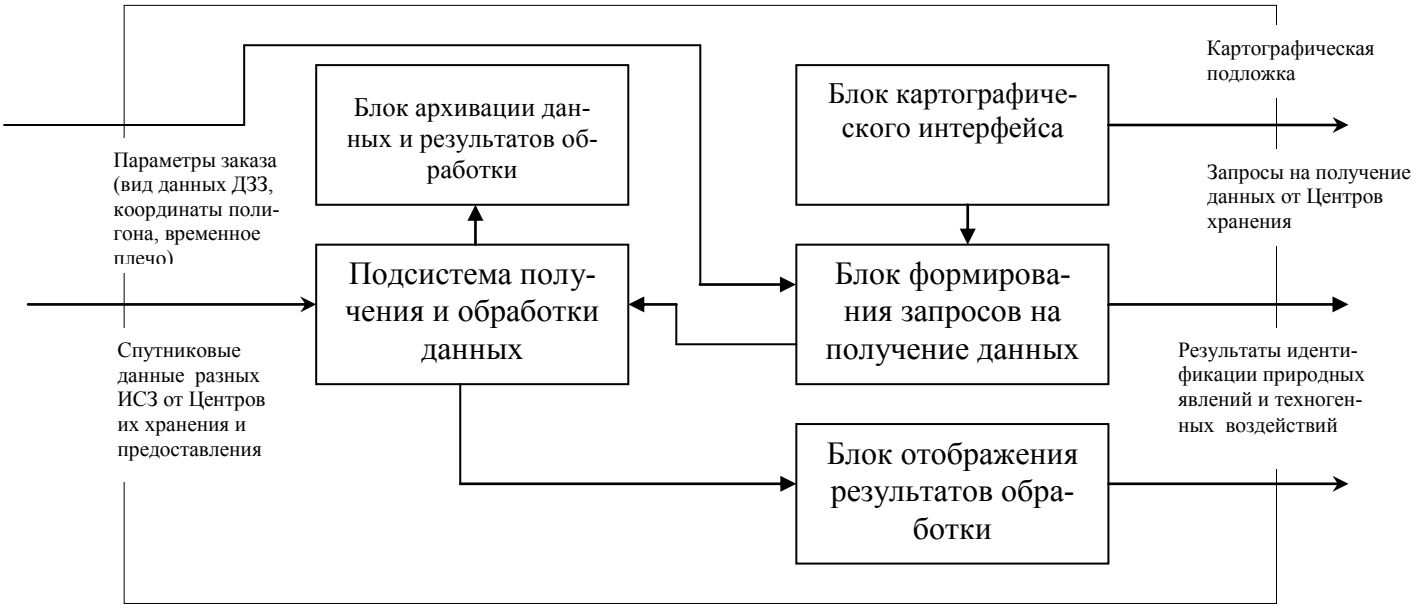


Рисунок П2.1– Обобщенная структурная схема Web-ориентированного сервиса (системы) мониторинга ОС с использованием данных ДЗЗ

Решение задач мониторинга ОС с использованием данных ДЗЗ обеспечивается следующими функциями рассматриваемого геосервиса [262-269,278,279]: автоматизированным получением данных ДЗЗ за счет генерации запросов к центрам их хранения; тематической обработ-

кой разнотипнных данных ДЗЗ; отображением пользователям результатов идентификации наличия НПЯ и ТВ на ОС с целью их типизации; автоматическим определением характеристик в соответствии с идентифицированным видом явления, условий распространения; управлением вычислительными ресурсами, реализующими обработку данных.

Результаты обоснования архитектуры Web-ориентированного сервиса мониторинга ОС с использованием данных ДЗЗ, реализующего идентификацию наличия НПЯ и ТВ на ОС, их характеристик и условий распространения, представлены в работе [280]. Обоснование алгоритма функционирования Web-ориентированного сервиса мониторинга ОС с использованием данных ДЗЗ, реализующего идентификацию наличия НПЯ и ТВ на ОС, их характеристик и условий распространения, представлены в работе [281]. Обоснование возможности конвейеризации тематической обработки данных ДЗЗ при решении задач мониторинга ОС – в работе [282].

Детальное описание НПЯ и ТВ (определение их характеристик) на полигонах больших размеров по данным низкого разрешения является трудно разрешимой задачей. Поэтому в случае, если НПЯ и ТВ зафиксированы на полигоне большого размера (с использованием данных низкого либо среднего разрешения), то в соответствии с определенными их приближенными характеристиками выполняется идентификация размера области меньшего размера, для которой с использованием снимков среднего разрешения будут определены их точные параметры и условия распространения. Для идентификации характеристик НПЯ и ТВ на ОС, условий их распространения требуется реализовать переход от полигона большого размера к области стандартного размера, в которой обнаружено явление или воздействие (выбирается один из стандартных размеров областей, заданных в системе, соответствующий масштабу обнаруженного явления или воздействия).

Рассматриваемая система мониторинга ОС на основе данных ДЗЗ реализуют предоставление многопользовательского доступа к распределено хранящимся данным (в центрах хранения и предоставления данных), а также обеспечивает многопользовательский доступ к средствам обработки данных (реализуют функции геосервиса (геопартала)). Следствием является поступление значительного количества запросов на данные и их обработку. Идентификация наличия НПЯ и ТВ на ОС, их характеристик и условий распространения связана с обработкой больших объемов данных (значительного количества массивов числовых значений отражательной способности в нескольких спектральных каналах спектрорадиометров). Для пользователей условием эффективного функционирования системы является время ее реакции на их запросы. Функционирование системы должно обеспечивать минимизацию данного параметра. Время реакции на запрос пользователя, связанный с получением данных и доступа к средствам их обработки, определяется временем получения снимков непосредственно из центров их хранения и предоставления, а также временем выполнения операций с ними. Снижение времен-

ных затрат связано с использованием параллельно функционирующих ВУ, что обеспечивает увеличение скорости обработки данных. Таким образом, основными причинами, определяющими необходимость параллельного выполнения операций с данными ДЗЗ являются: значительные объемы данных, поступающих на вход системы и подлежащих обработке, необходимость минимизации времени ожидания пользователями системы результатов тематической обработки спутниковых данных, являющихся откликом системы на их запросы. Причинами, обуславливающими возможность обработки данных на параллельно функционирующих вычислительных устройствах, являются: независимость обработки данных одного типа от результатов обработки данных других типов (независимо обрабатываемые потоки данных); независимость реализации программы одного типа, выполняющей обработку данных, от функционирования (реализации) программ других типов. Процесс получения и обработки данных представляется определенной выше последовательностью этапов выполнения действий с массивами значений КСЯ, измеренных в разных каналах приборов ИСЗ. При этом порядок выполнения работ с многозональными данными разных типов является одинаковым. В случае, если обработка данных представляется в виде последовательности этапов, тогда увеличение ее производительности с использованием параллельно функционирующих ВУ обеспечивается ее конвейеризацией (реализацией обработки данных в конвейерной системе). Принципы организации конвейеризированной обработки данных предложены в [283-289]. При этом программные модули, реализующие эти этапы и выполняющие обработку данных, используют один и тот же набор вычислительных ресурсов. Последовательность приборов, реализующих выполнение программ обработки данных, образует конвейерную систему. Функциональная схема конвейера обработки данных представлена на рисунке П2.2. Анализ схемы показывает наличие этапов обработки, которые могут быть конвейеризированы, и этапов POST-тематической обработки, не подлежащих конвейеризации. Функциональная схема конвейеризированной обработки данных ДЗЗ предусматривает следующий порядок выполнения операций для идентификации НПЯ и ТВ на ОС, а также условий их распространения: 1) буферизация и каталогизация массивов значений; 2) расчет значений отраженной яркости (КСЯ) для данных, хранящихся в буфере и используемых при идентификации наличия НПЯ и ТВ на ОС; 3) на основе массивов значений отраженной яркости реализуется выделение объектов и явлений на поверхности посредством необучаемой классификации (формирование кластеров); 4) для объектов и явлений, идентификация которых выполнена в результате необучаемой классификации, реализуется формирование осредненных значений вегетационных индексов, либо формирование значений оттенков цветов в RGB-модели, получаемых на основе значений КСЯ в различных каналах спектрорадиометров (с целью визуального дешифрирования при типизации явлений/воздействий, определения их характеристик и т.д.); 5) формирование результирующих изображений и их архивация.

Рисунок П2.2 – Функциональная схема конвейера выполнения работ по обработке спутниковых данных разных типов для решения задач мониторинга ОС с использованием данных ДЗЗ

Этапы обработки, являющиеся частью схемы выполнения операций с данными (рисунок П2.2), но не входящие в состав конвейера: 1) идентификация динамики отражательной способности земной поверхности для определения наличия НПЯ и ТВ на ОС; 2) формирование комплектов параметров, характеризующих условия распространения явлений (воздействий на ОС); 3) выделение подобластей, для которых будет выполняться уточнение характеристик явлений и воздействий, привязка этих подобластей к географическим координатам; 4) формирование и вывод тематических изображений пользователю.

Таким образом, за счет конвейеризации выполнения операций с данными разных типов реализуется объединение разных этапов различных программ их обработки. В силу того, что на вход конвейера поступают данные разных типов (от разных ИСЗ), обрабатываемые различными программами, поэтому эффективная реализация процесса обработки обеспечивается построением расписаний этого процесса и управлением его реализацией. С этой целью в состав системы мониторинга ОС с использованием данных ДЗЗ введена подсистемы построения расписаний и управления (супервизор), осуществляющая координацию выполнения операций.

Модуль построения расписаний процессов выполнения заданий на обработку данных осуществляет формирование порядков реализации действий с ними, оперируя с информацией о текущем состоянии системы и схемах обработки данных. Текущее состояние системы характеризуется идентификаторами типов данных, находящихся в буфере приема и накопления, количеством данных каждого типа в буфере, идентификаторами ресурсов, которые используются для их обработки, идентификаторами программных модулей (ПМ), которые загружены в блоки ОП приборов КС для обработки данных соответствующих типов. Схема задания представляет собой идентификаторы ПМ, используемых для обработки данных определенного типа, порядок запуска этих модулей на выполнение на приборах.

Результатом построения расписаний процессов выполнения заданий является:

– определение приборов КС, в блоках ОП которых необходимо разместить ПМ, соответствующие схемам выполнения заданий;

– определение порядка активизации ПМ обработки данных соответствующих типов на приборах КС и моментов времени начала выполнения ПМ обработки данных.

Функционирование подсистемы управления процессом выполнения заданий (процессом обработки данных) обеспечивается совместной работой программ, реализующих формирование расписаний, управление загрузкой и инициализацией ПМ, управление активизацией ПМ, генерацию управляющих команд и прием сообщений о текущем его (процесса) состоянии. Построение расписаний процессов выполнения заданий на обработку данных осуществляется для трех режимов функционирования системы.

Первый режим функционирования связан с обработкой многозональных данных ДЗЗ разных каналов от спектрорадиометров различных ИСЗ при обнаружении НПЯ и ТВ на ОС. Для их обнаружения размеры полигонов задаются пользователями и, как следствие, эти размеры являются произвольными и различными. Тогда произвольным является количество точек на поверхности, для которых идентифицируются значения отражательной способности. Поэтому массивы данных содержат произвольное (соответствующее размеру полигона) количество элементов. Если для разных полигонов массивы данных получены из одних и тех же каналов одного спетрорадиометра определенного ИСЗ (количество точек для каждого полигона является произвольным, не совпадающим с количеством точек других полигонов), тогда длительность выполнения программ, обрабатывающих эти массивы, будет различной. В этом случае массивы разного размера (соответствующие разным полигонам), обрабатываемые одной программой, с точки зрения расписания их обработки могут быть проинтерпретированы как входные данные разных типов. Тогда массивы значений отражательной способности в заданных каналах, характеризующие области одного размера, обрабатываются независимо от массивов значений отражательной способности в этих же каналах, но характеризующие области другого размера. В тоже время данные, формируемые в каналах спектрорадиометров разных ИСЗ и обрабатываемые различными программами, относятся к разным типам.

Если наличие НПЯ и ТВ на ОС в заданном полигоне определено, тогда рассмотрение всех точек полигона для уточнения характеристик этого явления/ воздействия является не целесообразным. В этом случае реализуется уменьшение размера анализируемой сцены (рассматриваемого полигона) путем выделения части в исходном полигоне (подизображения), содержащей идентифицированное явление (воздействие). Для этой цели выполняется выбор размера подизображения, соответствующего размеру одной из стандартных областей, заданных в системе, и выполняется его (подизображения) географическая привязка. Тогда реализация обработки данных для уточнения параметров идентифицированного явления (воздействия) выполняется для области одного из стандартных размеров.

Указанный подход, связанный с переходом от полигона с большим размером (задаваемого пользователем) к подобласти меньшего размера, в которой определяются характеристики зафиксированных НПЯ и ТВ, реализуется для всех идентифицированных явлений/воздействий. Для областей стандартных размеров осуществляется объединение заданий на обработку массивов данных из одинаковых каналов одного ИСЗ о явлениях одного и того же вида в пакеты. То есть в пакеты объединяются задания на обработку массивов спутниковых данных из одинаковых каналов, полученные от одного ИСЗ, соответствующие областям одинаковых размеров, характеризующих однотипные НПЯ и ТВ на ОС.

Выделение областей стандартных размеров для определения характеристик явлений, идентифицированных на полигонах произвольных размеров, призвано обеспечить снижение трудоемкости выполнения операций по обработке данных за счет уменьшения количества элементов в массивах. В случае объединения в пакеты массивов данных из одинаковых каналов одного ИСЗ с одинаковым количеством элементов реализуется их обработка без переопределения вида работ в КС (без переналадки приборов КС на выполнение другого вида работ).

Объединение в пакеты заданий на обработку массивов данных, соответствующих рассмотренным выше параметрами, реализуется во втором режиме функционирования системы. В этот режиме определяются характеристики (параметры) НПЯ и ТВ на ОС путем обработки массивов данных для одинаковых явлений. Типизация данных для этого режима предполагает указание: каналов ИСЗ, из которых получены данные, размеров областей, в которых реализуется определение локальных характеристик НПЯ и ТВ.

Для определения условий распространения НПЯ и ТВ на ОС необходимо комплексирование результатов, полученных в ходе обработки, предполагающее формирование из них комплектов. Функционирование системы в третьем режиме обеспечивает определение условий распространения НПЯ и ТВ на ОС, формирование комплектов этих характеристик для каждого явления. Для каждого явления (воздействия) определяются условия его распространения в области ограниченного размера, соответствующей этому явлению. Так как при обработке данных могут быть определены условия развития явлений одинакового вида в областях одного размера, тогда массивы данных, соответствующие условиям их развития объединяются в пакеты.

Из результатов, полученных после обработки массивов данных, определяющих условия распространения одного явления, формируется комплект, ему соответствующий. Для явлений одного вида, условия развития которых определяются в областях одинаковых размеров, формируются комплекты результатов одного состава. Для явлений разных видов формируются комплекты результатов различного состава (различные составы характеристик определяют условия развития явлений разного вида). Таким образом, особенностями функционирования системы в третьем режиме обработки являются: 1) формирование из массивов данных, полученных из одинаковых каналов одного ИСЗ, соответствующих областям на поверхности одного размера, пакетов, которые будут обрабатываться без переналадки конвейера на выполнение другого вида работ; 2) формирование комплектов из результатов обработки данных, соответствующих определенным видам явлений, идентифицированным в областях заданного размера.

Таким образом, функционирование системы в первом режиме обеспечивает обработку массивов данных об отражательной способности поверхности, получаемым из каналов различных ИСЗ, соответствующих произвольным размерам полигонов, задаваемых пользователями. На основе результатов обработки в этом режиме реализуется идентификация наличия НПЯ и

ТВ на ОС. Функционирование системы во втором режиме обеспечивает определение характеристик НПЯ и ТВ на ОС, идентифицированных в первом режиме. Типизация данных при их обработке в этом режиме выполняется с точки зрения следующих признаков: тип ИСЗ, виды спектральных каналов, данные из которого обрабатываются, размер области, в которой реализуется определение характеристик явлений (воздействий). Функционирование системы в третьем режиме обеспечивает определение условий распространения (развития) природных явлений (техногенных воздействий). Этот режим предусматривает формирование пакетов из массивов данных, соответствующих одинаковым каналам спектрорадиометров при одинаковых размерах областей (подизображений), используемых для идентификации этих условий. Особенностью режима функционирования системы является требование формирования комплектов из результатов обработки данных в пакетах массивов значений отражательной способности.

В связи с этим реализация подсистемы построения расписаний процессов выполнения заданий на обработку, должно обеспечивать функционирование системы мониторинга ОС в этих трех режимах. Для каждого из трех режимов указанной подсистемой должно быть реализовано построение расписаний выполнения заданий на обработку:

– массивов данных из каналов спектрорадиометров различных ИСЗ с разным разрешением, с количеством элементов в каждом из них, соответствующем произвольным размерам полигонов (для первого режима, единичные задания);

– пакетов массивов данных, где каждому пакету соответствуют одинаковые спектральные каналы ИСЗ с одинаковым количеством элементов в массивах (для второго режима);

– пакетов массивов данных, где каждому пакету соответствуют одинаковые спектральные каналы ИСЗ с одинаковым количеством элементов в массивах при реализации требования формирования комплектов результатов обработки, соответствующих условиям распространения НПЯ и ТВ (для третьего режима). В тоже время системой должна быть реализована функция, связанная с построением расписаний выполнения заданий на обработку массивов данных при наличии ограничений на время функционирования конвейерной системы. Результаты разработки системы представлены в [283].

П2.6. Обоснование понятий, используемых при решении задачи построения расписаний процессов обработки данных дистанционного зондирования Земли в конвейерных системах

Определение наличия НПЯ и ТВ на ОС в задаваемых пользователями полигонах, идентификация их характеристик и условий распространения осуществляется на основе значений отражательной способности земной поверхности (коэффициента солнечной яркости – КСЯ),

измеренных в различных диапазонах спектра излучения, формируемых оптико-электронными средствами ДЗЗ с различным разрешением (приборами с зарядной связью – ПЗС).

Обработка спутниковых данных (наборов массивов значений КСЯ) из определенных каналов ИСЗ выполняется соответствующими программами. Так как. обработка данных выполняется в составе КС, тогда требуется выполнить конвейеризацию программ обработки. Конвейеризация программы предусматривает задание ПМ, реализующих последовательность этапов обработки данных (в составе КС) [2,3,6-8]. Конвейеризация программ обработки данных ДЗЗ разных типов предусматривает закрепление за каждым из приборов КС определенного ПМ, являющегося частью программы обработки. Последовательная реализация ПМ в заданном порядке позволяет осуществить обработку данных каждого типа в составе КС.

Выполнение обработки данных на каждом приборе характеризуются длительностью реализации операций с ними. Так как длительности обработки данных разных типов на приборах КС различны, тогда эффективность обработки обеспечивается построением расписаний реализации действий с данными ДЗЗ на приборах [6-8]. Расписание выполнение заданий на обработку данных представляет собой набор последовательностей реализации действий с ними на приборах КС (последовательностей запуска на выполнение на каждом приборе ПМ обработки соответствующих им данных) [6-8]. Последовательность обработки данных разных типов на одном из приборов КС соответствует порядку выполнения ПМ на нем, осуществляющих обработку. Тогда построение расписаний выполнения заданий на обработку данных ДЗЗ предполагает определение порядков запуска на выполнение ПМ на приборах КС.

Данные, обрабатываемые в первом режиме функционирования системы, характеризуются видом каналов и типом ИСЗ, от которых они получены. Размеры полигонов, в которых выполняется идентификация наличия НПЯ и ТВ на ОС, являются различными. Поэтому объемы выполняемых вычислений над этими данными являются разными, следовательно, будут являться различными и длительности их обработки. С точки зрения построения расписаний обработка данных, реализуемая одной программой, но при разных размерах массивов, должна быть интерпретирована различным образом. Эти данные с учетом разных длительностей обработки массивов, характеризующих разные размеры полигонов, интерпретируются как разнотипные.

Данные, обрабатываемые во втором и третьем режимах функционирования системы, характеризуются видом каналов и типом ИСЗ, от которых они получены, а также стандартными размерами областей, заданными в системе, в которых выполняется идентификация характеристик НПЯ и ТВ либо их условий распространения. Объемы выполняемых вычислений над такими данными являются равными, а, следовательно, будут являться равными длительности их обработки. Поэтому обработка данных, реализуемых одной программой для областей одинакового размера (равных размерах массивов), интерпретируется одинаковым образом. Тогда

данные из одинаковых каналов одного ИСЗ, соответствующие областям одинаковых размеров, в которых определяются параметры поверхности, с точки зрения построения расписаний интерпретируются как данные одного типа. Однотипные данные, полученные из одинаковых каналов приборов одного ИСЗ, соответствующие различным выделенным областям на поверхности с одинаковыми размерами, требуется объеденить в пакеты с целью их совместной обработки без переналадки конвейера на выполнение другого вида работ.

В соответствии с выполненными рассуждениями в первом режиме функционирования системы все обрабатываемые данные являются разнотипными и интерпретируются как единичные. Отсюда в первом режиме функционирования системы реализуется выполнение единичных заданий (ЕЗ) на обработку данных ДЗЗ разных типов. Синтез расписаний выполнения ЕЗ на обработку данных предусматривает построение статических расписаний. В тоже время на процесс обработки, реализуемый в соответствии со статическим расписанием, оказывают влияния возмущающие воздействия разного вида. При фиксации возмущающего воздействия сформированное статическое расписание должно быть изменено (в соответствии с видом воздействия) путем построения динамического расписания. Тем самым реализуется адаптация процесса выполнения ЕЗ на обработку данных ДЗЗ к возмущающим воздействиям с целью снижения их влияния. Тогда задача построения расписаний выполнения ЕЗ на обработку данных при идентификации НПЯ и ТВ на ОС предусматривает построение: статических расписаний выполнения ЕЗ в КС, динамических расписаний, учитывающих возмущающие воздействие на ход процесса обработки.

Второй режим функционирования системы обработки данных ДЗЗ предполагает объединение массивов данных, используемых при идентификации характеристик НПЯ и ТВ, в пакеты в соответствии с их типами. В соответствии с понятием пакета заданий (ПЗ) задача построения расписаний процессов их выполнения предусматривает определение локально оптимальных составов этих пакетов и расписаний их обработки. Повышение эффективности обработки ПЗ возможно путем задания интервалов времени, по истечении которых выполняется выдача результатов. В данном случае функционирование системы обработки данных ограничено интервалами времени, по истечении каждого из которых выдаются результаты обработки. Тогда для пакетов, обрабатываемых в течение одного из заданных интервалов времени, используется понятие группы пакетов. Группа пакетов – это совокупность пакетов, обрабатываемых в течение одного из интервалов времени функционирования системы, длительность которого задана.

Рассматриваемая система мониторинга ОС на основе данных ДЗЗ реализует идентификацию НПЯ и ТВ на ОС, определение их характеристик и условий распространения. Каждое НПЯ либо ТВ характеризуется своим набором условий распространения, которые также определяются с использованием данных ДЗЗ. С целью идентификации условий распространения

НПЯ и ТВ на ОС требуется определить все необходимые параметры поверхности, которые входят в задаваемые для каждого типа явления (воздействия) наборы. При этом значения параметров из задаваемого перечня для соответствующего НПЯ (ТВ) определяются для области, в которой оно идентифицировано (для области стандартного размера). Для определения условий распространения различных НПЯ, находящихся в разных областях одинаковых размеров, требуется объединение массивов данных ДЗЗ в пакеты, обрабатываемые в системе.

В дальнейшем набор результатов обработки данных, характеризующих условия распространения одного из НПЯ (ТВ), соответствует понятию комплекта результатов. Комплект результатов обработки – это набор параметров, характеризующих состояние подстилающей поверхности, определяющих условия распространения соответствующего НПЯ (ТВ). Обработка данных ДЗЗ с целью идентификации условий распространения различных зафиксированных на поверхности НПЯ (ТВ) выполняется в составе пакетов с последующим формированием из результатов обработки соответствующих комплектов заданных составов. Результаты разработки Web-ориентированного сервиса мониторинга ОС с использованием данных ДЗЗ и организации конвейеризированной обработки данных в нем представлены в работах [280-283].

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

П3. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПОСТРОЕНИЯ РАСПИСАНИЙ МНОГОСТАДИЙНЫХ ПРОЦЕССОВ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЙ В КОНВЕЙЕРНЫХ СИСТЕМАХ

П3.1 Определение временной сложности этапов обработки данных дистанционного зондирования Земли в конвейерных системах

В соответствии с разработанным подходом к конвейеризированной обработке данных ДЗЗ реализовано построение расписаний выполнения операций с единичными данными (ЕД) и пакетами данных (ПД) в конвейерной системе с использованием рассмотренных в работе методов и разработанного комплекса программ. Блоками конвейеризированной обработки данных, входящими в состав КС, реализующими соответствующие этапы, являются:1) блок буферизации и каталогизации данных, выполняющий как накопление данных, так и их размещение на постоянных носителях с целью последующего использования; 2) блок определения значений отражательной способности точек поверхности, измеренных в соответствующих диапазонах приборов ИСЗ, на основе данных, полученных из центров их хранения и предоставления; 3) блок необучаемой классификации данных с использованием алгоритма ISODATA; 4) блок идентификации классов объектов на поверхности, реализующий сопоставление кластерам, полученным на предыдущем этапе, осредненных значений вегетационных индексов, либо значений соответствующих цветов, характеризующих классы объектов; 5) блок сохранения результатов обработки, связанной с классификацией объектов на поверхности с использованием вегетационных индексов и определением естественных цветов, характеризующих объекты.

С целью построения расписаний обработки данных ДЗЗ в КС определены временные сложности выполнения действий с ними на каждом из рассмотренных этапов. Временная сложность алгоритма – это функция от размера входных данных, равная максимальному количеству элементарных операций, проделываемых алгоритмом для решения экземпляра задачи указанного размера [101, 102, 284, 285]. С целью построения расписаний выполнения заданий на обработку данных ДЗЗ в КС синтезированы выражения для определения временной сложности реализации действий с данными на каждом из приборов.

В соответствии с подходом к определению временной сложности выполнения программ ([286, 287]), предполагающим определение верхней оценки трудоемкости, различают следующие программные конструкции (операций): следования (выполнения вычислительных дей-

ствий); ветвления; цикла; обращения к элементу одномерного массива (вектора) – одна операция; обращение к элементу двумерного массива – две операции.

Временная сложность выполнения блока операций следования определяется вычислительными действиями, в нем реализуемыми (формируется сложностью вычислений, выполняемыми в этом блоке операции):

$$f_{следования} = f_1 + f_2 + .. + f_m,$$

где m-количество операций в блоке следования.

Временная сложность операции ветвления определяется по следующей формуле:

$$f_{ветвления} = f_1 + f_{then} * p_{then} + f_{else} * p_{else}$$

где f_1 – временная сложность определения условия в блоке ***Если***, f_{then}, f_{else} – временные сложность определения результатов в блоках ***then*** и ***else*** блока ветвления, p_{then}, p_{else} – соответствующие вероятности перехода к блокам при выполнении (не выполнении) условия в блоке ***Если.***

Временная сложность цикла определяется по следующей формуле:

$$f_{цикла} = 1 + 3 * n + n * f_{тело}$$

где $f_{тело}$ – временная сложность определения результатов в теле цикла.

Временная сложность обращения к элементу одномерного массива составляет 1, временная сложность обращения к элементу двумерного массива составляет 2 [284, 285]. Временная сложность определяется как сумма значений этого параметра для отдельных блоков программы. Параметр временной сложности отдельных операций обозначен как $T(\cdot)$.

В ответ на запросы пользователей на данные ДЗЗ, соответствующие определенным выбранным ими на земной поверхности областям, центрами хранения и предоставления этих данных передаются наборы массивов значений, характеризующих отражательную способность, называемые сценами. То есть сцена, соответствующая выбранной пользователем области, включает в себя набор массивов значений, характеризующих отражательную способность поверхности, измеренных во всех каналах спектрорадиометров ИСЗ. Так как ИСЗ Modis обеспечивает измерение значений отражательной способности поверхности в 36 каналах, то сцена, передаваемая центром хранения и предоставления данных ДЗЗ, включает в себя 36 массивов значений, характеризующих отражательную способность. В свою очередь Landsast 7 обеспечивает измерение отражательной способности в 7 каналах, Landsast 8 обеспечивает измерение отражательной способности в 11 каналах, поэтому сцены, соответствующие областям, заданным пользователями, содержат 7 и 11 массивов.

При каталогизации данных ДЗЗ, реализуемой на соответствующем обрабатывающем приборе КС, осуществляется сохранение массивов значений, характеризующих отражательную способность, на диске. Каждый массив значений характеризуется количеством элементов в нем, значение каждого элемента массива соответствует измеренной в определенном диапазоне отражательной способности одной точки на земной поверхности. Тогда размерность массива характеризует количество точек на поверхности, для которых получены значения отражательной способности, измеренной в определенном диапазоне спектра.

Обозначим через N количество точек на поверхности, для которых получены значения отражательной способности, измеренные в каждом диапазоне спектра приборами ИСЗ. Тогда количество полученных от центров хранения и предоставления данных ДЗЗ значений в массивах определяется для каждого ИСЗ следующим образом: ИСЗ Modis – 36N, ИСЗ Landsast 7– 7N, ИСЗ Landsast 8 – 11N. Механизмы сохранения данных на постоянных носителях [286,287] предусматривают: 1) промежуточную буферизацию данных в кэш'е с последующей из перезаписью на постоянный носитель; 2) непосредственную запись данных на постоянный носитель, минуя кэш. С целью построения расписаний выполнения заданий на обработку данных в ДЗЗ в КС рассмотрен второй подход к их сохранению на постоянных носителях, не предусматривающий использование кэш'а. Временная сложность процедур сохранения данных определена следующим образом:

– ИСЗ Modis – **36N** операций сохранения данных,

– ИСЗ Landsast 7– **7N** операций сохранения данных,

– ИСЗ Landsast 8 – **11N** операций сохранения данных,

где N – количество элементов в одном массиве, значения которых характеризуют отражательную способность подстилающей поверхности в одном из диапазонов спектра излучения.

Значения элементов массивов, передаваемых центрами их хранения и предоставления, характеризуют отражательную способность поверхности, измеренную в различных диапазонах спектра излучения. Количество градаций значений отражательной способности определяется радиометрическим разрешением измерительных приборов ИСЗ и составляет: ИСЗ Modis – 12 бит, ИСЗ Landsast 7– 8 бит, ИСЗ Landsast 8 – 12 бит. С учетом этих значений для ИСЗ Modis возможно 4096 градаций значений отражательной способности, для ИСЗ Landsast 7 – 256 градаций и для ИСЗ Landsast 8 – 4096 градаций отражательной способности. Значения градаций отражательной способности, измеренной в соответствующих спектральных диапазонах, передаются от центров хранения и предоставления данных в качестве значений элементов массивов. Определение значения отраженной яркости для некоторой точки поверхности предусматривает вычисление произведения полученного в массиве значения градации на уровень ее (отраженной яркости) квантования. В этом случае псевдокод программы определения значений отра-

женной солнечной яркости для некоторой области на земной поверхности, характеризуемой размерами $N_1 \times N_2$ точек, для которой получен массив значений ее (яркости) градаций, имеет следующий вид (М1– массив с исходными данными – степенями градации значений, М2– массив со значениями степени отраженной солнечной яркости, измеренными в одном из диапазонов, $K_{s_диапазон}$ – величина уровня квантования для s-го диапазона изменения отраженной яркости):

```
Цикл i=1 до N1
  Цикл j=1 до N2
    M2_1[i,j] = K_s_диапазон * M1_1[i,j];
```

Рассмотренный псевдокод активизируется требуемое число раз для получения значений отраженной яркости в определенных диапазонах (в частном случае, дважды, при использовании двух массивов значений с целью кластеризации и вычисления осредненных значений вегетационных индексов, сопоставляемых с каждым из объектов на поверхности). После того, как сформированы два массива значений отраженной солнечной яркости, измеренной в двух различных диапазонах, требуется сформировать массивы из N отсчетов, которые будет использован при кластеризации методом ISODATA. Псевдокод фрагмента формирования массива *X[i,l]* отсчетов ($i = \overline{1,2}$, $l = \overline{1,N}$, *l*-ый отсчет, *i*-я компонента) имеет следующий вид:

```
l=1;
Цикл i=1 до N1
  Цикл j=1 до N2
    X[1,l] = M2_1[i,j];
    X[2,l] = M2_2[i,j];
    l=l+1;
```

Для первого программного фрагмента временная сложность определена следующим образом. В соответствии с подходом, рассмотренным в [284,285], временная сложность цикла по *j* составляет $1+9N_2$, временная сложность цикла по *i* составляет $1+4N_1+9N_1N_2$.

Так как с использованием представленного кода необходимо обработать минимум два массива значений градаций отраженной яркости, тогда суммарная временная сложность составит $2+8N_1+18N_1N_2$.

Для второго программного фрагмента временная сложность определена следующим образом. Временная сложность цикла по *j* составляет $1+15N_2$, временная сложность цикла по *i* составляет $1+4N_1+15N_1N_2$. Тогда суммарная временная сложность фрагмента программы, формирующей массивы значений отражательной способности поверхности на основе значений

ее градаций и массив *X[i,l]* ($i=\overline{1,2}, l=\overline{1,N}$) отсчетов, который будет использован в процедуре кластеризации, составляет **33** N_1N_2 **+12** N_1 **+3.**

При построении выражений для определения временной сложности алгоритма метода ISODATA использованы следующие обозначения его (алгоритма) параметров [210, 288, 289]:

K– требуемое количество кластеров, которые желательно сформировать в результате кластеризации; N– количество отсчетов;

θ_k – минимально возможное количество отсчетов в формируемых кластерах; θ_σ – ограничение снизу на внутри кластерное среднеквадратическое отклонение в блоке расщепления кластеров; θ_c – ограничение сверху на расстояние между центрами кластеров в блоке их слияния (параметр компактности);

L– максимальное количество пар центров кластеров, которые можно объединить в блоке их слияния;

KL[k,l] – массив состава кластеров (*k*– номер кластера, *l*– индекс отсчета в кластере), элемент массива *KL[k,l]* представляет собой номер отсчета, который включен в *k*-ый кластер;

N[k] – вектор количества отсчетов в кластерах (первоначально все значения элементов этого вектора равны 0);

M[i,k] ($i=\overline{1,2},\ k=\overline{1,K}$) – массив координат центров кластеров;

X[i,l] ($i=\overline{1,2}, l=\overline{1,N}$) – массив отсчетов (*l*-ый отсчет, *i*-я компонента);

КОРЕНЬ()– вызов функции, вычисляющей квадратный корень;

$D_{cp}[k]$– вектор значений средних расстояний отсчетов до центров кластеров;

D_{cp} – обобщенное среднее расстояние по всем кластерам;

Sr[i,k]– массив среднеквадратических отклонений по *i*-ых компонентам *k*-ых кластеров;

Sr_max[k]– вектор максимальных значений среднеквадратических отклонений среди *i*-ых компонент ($i=\overline{1,2}$) для каждого *k*-го кластера;

j_max[k]– вектор *i*-ых ($i=\overline{1,2}$) координат, для которых для *k*-ых кластеров фиксируются максимальные значения среднеквадратических отклонений;

D[k,k]–массив расстояний между кластерами

SL-Clast1[k,count] – массив для размещения пар кластеров, для которых выполняется условие $D[k,k]<\theta_c$; *SL-Clast2[k,L]* – массив для упорядочивания по возрастанию значений $D[k,k]<\theta_c$ пар кластеров.

В соответствии с методом ISODATA [210, 289, 289], разработана программа, реализующей классификацию данных ДЗЗ с использованием этого алгоритма. При этом учитывается, что с каждой точкой земной поверхности сопоставляется пара значений отражательной спо-

собности поверхности, измеренных в различных спектральных каналах приборов ИСЗ (каждой *l*-ой точке на поверхности поставлены в соответствие два элемента *X[i,l]* ($i=\overline{1,2}$, $l=\overline{1,N}$) массива *X*, характеризующего пары значений отражательной способности поверхности в двух разных спектральных каналах для *N* отсчетов). Код программы кластеризации представлен ниже.

// Пункт 1. Распределение отсчетов по кластерам с учетом минимума расстояния до их центров (все элементы вектора N[k] предварительно проинициализированы значением 0).

Цикл *l=1* до *N*
  Min=10000; *K_temp*=0;
  Цикл *k=1* до *K*
    Если КОРЕНЬ($((X[1,l]-M[1,k])^2+(X[2,l]-M[2,k])^2)<Min$, то
      $Min=(X[1,l]-M[1,k])^2+(X[2,l]-M[2,k])^2$;
      k_temp=k;
  N[k_temp]= N[k_temp]+1;
  KL[k_temp ,N[k_temp]]=l;

// Пункт 2. Проверка размеров сформированных кластеров, исключение слишком мелких из них.

K_new=K;
Цикл *k=1* до *K*
    Если *N[k]*< θ_k, то
    // удаление центра кластера
    Цикл *k1=k* до *K-1*
      Цикл *i=1* до 2
        $M[i,k1]=M[i,k1+1]$;
    K_new= K_new -1;

Если *K_new<K* , то перейти на пункт 12;

// Пункт 3. Определение значений координат новых центров кластеров.

Цикл *k=1* до *K*
  Sum_k=0;
  Цикл *i=1* до 2
    Цикл *l=1* до *N[k]*
      Sum_k= Sum_k + X[i, KL[k,l]];
  $M[i,k]=Sum_k/N[k]$;

// Пункт 4. Вычисление для отсчетов среднего расстояния до центра соответствующего кластера

Цикл *k=1* до *K*
    D_{cp}[k]=0; *Sum_k=0;*
    Цикл *l=1* до *N[k]*
      Sum_k= Sum_k +КОРЕНЬ((X[1, KL[k,l]]-M[1,k])^2+(X[2, KL[k,l]]-M[2,k])^2);
    $D_{cp}[k]=Sum_k/N[k]$;

// Пункт 5. Вычисление обобщенного среднего расстояния по всем кластерам

Sum_k=0;
Цикл *k=1* до *K*
  Sum_k= Sum_k + N[k]$D_{cp}[k]$*;
$D_{cp}=Sum_k/K$;

// Пункт 6. Ветвление процесса

Если $I=I_{max}$, то $\theta_c=0$, перейти на пункт 12;

Если $K<N/2$, то перейти к пункту 7;

Если $K\geq N/2$ или Imod2=0, то перейти к пункту 12;

*// **Пункт 7. Расчет вектора среднеквадратического отклонения для каждого кластера (подготовка исходных данных перед расщеплением кластеров)***

Цикл *k=1* до *K*
  Цикл *i=1* до 2
    Sum_k=0;
    Цикл *l=1* до *N[k]*
      Sum_k= Sum_k + (X[i, KL[k,l]]-M[i,k])^2;
    Sr[i,k]= КОРЕНЬ(Sum_k/N[k]);

*// **Пункт 8. Определение для кластеров максимального расстояния (максимальной из компонент** Sr[i,k] ($i=\overline{1,2}$) **для каждого k-го кластера***

Цикл *k=1* до *K*
  Sr_max[k]=100000;
  Цикл *i=1* до 2
    Если *Sr_max[k]< Sr[i,k]*, то
      Sr_max[k]= Sr[i,k];
      j_max[k]=I;

*// **Пункт 9. Определение порядка дальнейших действий : переход к расщеплению кластеров (пункты 10,11) либо переход к слиянию кластеров (шаг 12)***

Count=0;
Цикл *k=1* до *K*
  Если *Sr_max[k]>* θ_σ, то
    Count= Count +1;
  Если *Count =K*, то перейти на пункт 10;
    Иначе перейти на пункт 12;

*// **Пункты 10,11. Расщепление кластеров***

New_clast=0;
Цикл *k=1* до *K*
  Если ((*$D_{ср}$[k]> $D_{ср}$*) и (*N[k]>2*(θ_s +1)*))или ($K \le N / 2$), то
    Цикл *i=1* до *2 // определение компонент формируемых кластеров*
      Если (*i<> j_max[k]), то*
        M_1[i,k]= M[i,k]; //i-я компонента формируемого первого кластера, которая не // изменяется
        M_2[i,k]= M[i,k]; //i-я компонента формируемого второго кластера, которая не // изменяется
      Если (*i= j_max[k]), то*
        *M_1[i,k]= M[i,k]+ γ * Sr_max[k]; //i-я компонента первого кластера*
        *M_2[i,k]= M[i,k]- γ * Sr_max[k]; //i-я компонента второго кластера*
    New_clast= New_clast+1;
    Цикл *i=1* до *2 // запись компонент сформированных кластеров в массив кластеров*
      M[i,K+ New_clast]= M_1[i,k]; // запись первого кластера
    New_clast= New_clast+1;
    Цикл *i=1* до *2 // запись компонент сформированных кластеров в массив кластеров*
      M[i,K+ New_clast]= M_2[i,k]; // запись второго кластера
    K=K+ New_clast;
    // удаление k-го кластера, который был расщеплен
    Цикл *k1=k+1* до *K*
      Цикл *i=1* до *2*
        M[i,k1-1]= M[i,k1];
    K=K-1;

Перейти на пункт 15;

*// **Пункт 12. Вычисление расстояний между кластерами***

Цикл *k=1* до *K-1*
  Цикл *k1=k+1* до *K*
    D[k,k1]=КОРЕНЬ((M[1,k]- M[1,k1])^2+(M[2,k]- M[2,k1]))^2);

// Пункт 13.1. Размещение пар кластеров, для которых выполняется условие D[k,k]<[ ], в массиве SL-Clast1[k,k]

k2=0;
Цикл *k=1* до *K-1*
  Цикл *k1=k+1* до *K*
    Если D[k,k1]<[ ], то
      SL-Clast1[1,k2+1]=k;
      SL-Clast1[2,k2+1]=k1;
      D[k,k1]=10000;
      k2=k2+1;

// Пункт 13.2. Упорядочивание пар кластеров (в количестве не более L), для которых выполняется условие D[k,k]<[ ], в массиве SL-Clast2[k,k]

Count_Sl_Clast=0;
Если *k2<L,* то *L=k2*
Min_d_clast=10000;
//минимальное расстояние между кластерами
Цикл *l=1* до *L*
  Цикл *k=1* до *k2*
    i1= SL-Clast1[1,k];
    i2= SL-Clast1[2,k];
    //определение пары кластеров с минимальным расстоянием
    Если *Min_d_clast <D[i1,12], то*
      Min_d_clast =D[i1,12];
      Min_d_clast_k1=i1;
      Min_d_clast_k2=i2;
  D[Min_d_clast_k1, Min_d_clast_k2]=10000;
  SL_Clast2[1,l]= Min_d_clast_k1;
  SL_Clast2[2,l]= Min_d_clast_k2;
  Count_Sl_Clast= Count_Sl_Clast+1;

// Пункт 14.1. Слияние кластеров (количество пар кластеров равно** Count_Sl_Clast**)
Если *Count_Sl_Clast<>0,* то
  Цикл *l=1* до *Count_Sl_Clast*
    Цикл *i=1* до 2
      *M[i,K+l]= N[SL_Clast2[1,l]]*M[i,SL_Clast2[1,l]]+*
                *N[SL_Clast2[2,l]]*M[i,SL_Clast2[2,l]];*
      M[i,K+l]= M[i,K+l]/(N[SL_Clast2[1,l]] N[SL_Clast2[2,l]]);*
  K=K+ Count_Sl_Clast;

// Пункт 14.2. Удаление кластеров, которые были слиты
  Цикл *l=1* до *Count_Sl_Clast*
    Цикл *i=1* до 2
      M[i, SL_Clast2[1,l]]= 0;
    Цикл *i=1* до 2
      M[i, SL_Clast2[2,l]]=0;

Цикл *l=1* до 2**Count_Sl_Clast*
  Цикл *k=1* до *K*
    Если *((M[1,k]=0)* и *(M[2,k]=0))*, то
      Цикл *k1=k+1* до K-1
        Цикл *i=1* до 2
          M[i, k1]= M[i, k1+1];
          N[k1]=N[k1+1];

K=K–Count_Sl_Clast;
// Пункт 15. Увеличения номера итерации, продолжение кластеризации
I=I+1;
Если $I \le I_{max}$, то перейти на Пункт 1;
Конец алгоритма.

В общем виде временная сложность программы кластеризации точек на земной поверхности с учетом значений отражательной способности, измеренной в двух спектральных каналах, является случайной, так как она зависит от исходных данных и от последующей интерпретации алгоритма, предусматривающей как расщепление, так и слияние кластеров (количество расщепляемых кластеров и кластеров, подвергающихся слиянию, является случайным). То есть в общем виде временная сложность программы кластеризации получена быть не может. Оценка временной сложности программы кластеризации может быть получена только при введении упрощающих предположений. Построение выражения для определения временной сложности программы кластеризации отсчетов отражательной способности поверхности, измеренной в двух спектральных каналах реализовано в предположении, что она выполняет две итерации ($I_{max} = 2$). На первой итерации программа выполняет разделение кластеров, на второй итерации программа реализует их слияние. Также введено предположение, что при реализации пункта 2 с вероятностью 0.2 уменьшается количество кластеров (с вероятностью 0.8 количество кластеров не изменяется). Так как выполняется построение выражения для определения верхней оценки временной сложности, то при реализации первой итерации количество кластеров рассматривается равным K.

Так как по предположению на первой итерации реализуется разделение кластеров, тогда порядок выполнения пунктов алгоритма следующий: 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11. Временная сложность первой итерации формируется как сумма временных сложностей указанных пунктов. Так как по предположению на второй итерации реализуется слияние кластеров, тогда порядок выполнения пунктов алгоритма следующий: 1,2,3,4,5,6,12,13,14. Поэтому временная сложность этой итерации формируется как сумма временных сложностей указанных пунктов. Суммарная временная сложность кластеризации определена как сумма временных сложностей указанных двух итераций алгоритма метода ISODATA.

// Пункт 1. Распределение отсчетов по кластерам с учетом минимума расстояния до их центров — *T(NK)*

Цикл *l=1* до *N* — *1+3*N*
  Min=10000; *k_temp*=0; — *2*
  Цикл *k=1* до *K* — *1+3*K*
    Если КОРЕНЬ($((X[1,l]-M[1,k])^2+(X[2,l]-M[2,k])^2)<Min$, то — *15*
      $Min=(X[1,l]-M[1,k])^2+(X[2,l]-M[2,k])^2$; — *14*
      k_temp=k; — *1*
  N[k_temp]= N[k_temp]+1; — *4*
  KL[k_temp ,N[k_temp]]=l; — *3*

Временная сложность блока **Если** составляет 30 операций. Временная сложность цикла по *k* составляет: 1+3K+K*30=1+33K. Временная сложность ***тела*** цикла по *l* составляет: 2+(1+33K)+4+3=10+33K. Временная сложность цикла по *l* составляет 1+3N+N*(10+33K)=**1+13N+33NK**.

// Пункт 2. Проверка размеров сформированных кластеров, исключение слишком мелких из них. — *T(K)*

K_new=K; — *1*
Цикл *k=1* до *K* — *1+3*K*
  Если $N[k]<\theta_k$, то — *2*
  // удаление центра кластера
  Цикл *k1=k* до *K-1* — *1+3*(K-1)*
    Цикл *i=1* до 2 — *1+3*2*
      $M[i,k1]=M[i,k1+1]$; — *6*
  K= K -1; — *2*

Временная сложность цикла по *i* составляет: 1+3*2+2*6=19. Временная сложность цикла по *k1* составляет (в силу того, что формируется верхняя оценки, использовано значение K): 1+3(K-1)+(K-1)*19=22K-21. Так как по предположению вероятность выполнения условия составляет 0.2, то временная сложность блока **Если** равна: 2+0.2*(22K-21)= 2+5K-5=5K-3. Временная сложность цикла по k: 1+3K+K*(5K-3)=1+5K^2. Временная сложность всего фрагмента (пункта 2) составляет **5K^2+2**.

// Пункт 3. Определение значений координат новых центров кластеров.

Цикл *k=1* до *K* — *T(NK)*
  Sum_k=0; — *1+3K*
  Цикл *i=1* до 2
    Цикл *l=1* до *N[k]*
      Sum_k= Sum_k + X[i, KL[k,l]];
  $M[i,k]=Sum_k/N[k]$;

Для определения временной сложности пункта 3 цикл по *k* развернут следующим образом (представлена форма реализации вычислений при *k=1*): — *T(NK)*

k=1;
Sum_k=0; — *1*
— *1+3*2*

Цикл *i=1* до 2	*1+3*N[k]*
Цикл *l=1* до *N[k]*	*6*
Sum_k= Sum_k + X[i, KL[k,l]];	*5*
M [i,k] = Sum _ k / N [k];	

Временная сложность цикла по *l* составляет (при k=1): 1+3N[1]+N[1]*6=1+9N[1]. Временная сложность цикла по *i* составляет: 1+3*2+2*(1+9 N[1]+5)= 19+18N[1]. Таким образом, временные сложности при $k = \overline{1,K}$ получены в следующем виде:

k=1:
19+18N[1];
k=2:
19+18N[2];
…
k=K:
19+18N[K].

Просуммировав временные сложности отдельных итераций при различных значениях *k* получим временную сложность тела цикла по *k*: 19K+18K(N[1]+ N[2]+..+ N[K])=19K+18NK. Тогда временная сложность цикла по *k* составит: 1+3K+K*(19K+18NK)=**$18K^2N+19K^2+3K+1$.**

// Пункт 4. Вычисление для отсчетов среднего расстояния до центра соответствующего кластера

Цикл *k=1* до *K*
$D_{ср}[k]=0$; Sum_k=0;
Цикл *l=1* до *N[k]*
Sum_k= Sum_k +КОРЕНЬ((X[1, KL[k,l]]-M[1,k])^2+(X[2, KL[k,l]]– M[2,k])^2);
$D_{ср}[k]$= Sum_k/N[k];

Для определения временной сложности пункта 4 цикл по *k* развернут следующим образом (представлена возможная форма реализации вычислений при *k=1*):

	T(NK)
k=1;	*1*
$D_{ср}[k]=0$; Sum_k=0;	*3*
Цикл *l=1* до *N[k]*	*1+3N[k]*
Sum_k= Sum_k +КОРЕНЬ((X[1, KL[k,l]]-M[1,k])^2+(X[2, KL[k,l]]–M[2,k])^2);	*18*
$D_{ср}[k]$= Sum_k/N[k];	*4*

Временная сложность цикла по *l* составляет (при *k=1*): 1+3N[1]+N[1]*18= 1+21N[1]. Временная сложность фрагмента при *k=1* получена в виде: 3+1+21N[1]+4=8+21N[1].

Тогда при $k = \overline{2,K}$:

k=2:
8+21N[2];
…
k=K:

8+21N[K].

Просуммировав временные сложности отдельных итераций при различных значениях *k*, получим временную сложность тела цикла по *k*: 8K+21K(N[1]+ N[2]+..+ N[K])=8**K+21NK.** Тогда временная сложность цикла по k составит 1+3K+K(8K+21NK)**=21K^{2}N+8K^2+3K+1.**

// Пункт 5. Вычисление обобщенного среднего расстояния по всем кластерам

	T(NK)
Sum_k=0;	1
Цикл *k=1* до *K*	1+3K
*Sum_k= Sum_k + N[k]*D$_{cp}$[k];*	5
D$_{cp}$= Sum_k/K;	2

Временная сложность цикла по *k* составляет: 1+3K+K*5=1+8K. Временная сложность всего фрагмента (пункта 5) определена в виде: **4+8K.**

// Пункт 6. Ветвление процесса	*T(NK)*
Если $I = I_{max}$, то $\theta_c = 0$, перейти на пункт 12;	3
Если $K < N / 2$, то перейти к пункту 7;	3
Если $K \geq N / 2$ или Imod2=0, то перейти к пункту 12;	6

Временная сложность блока **Если** для первого условия составляет 3 операции, для второго условия– 3 операции, для третьего условия – 6 операций.

// Пункт 7. Расчет вектора среднеквадратического отклонения для каждого кластера (подготовка исходных данных перед расщеплением кластеров)

	T(NK)
Цикл *k=1* до *K*	1+3K
Цикл *i=1* до 2	
Sum_k=0;	
Цикл *l=1* до *N[k]*	
Sum_k= Sum_k + (X[i, KL[k,l]]-M[i,k])^2;	
Sr[i,k]= КОРЕНЬ(Sum_k/N[k]);	

Для определения временной сложности пункта 7 цикл по *k* развернут следующим образом (представлена возможная форма реализации вычислений при *k=1*):

	T(NK)
k=1;	
Цикл *i=1* до 2	1+3*2
Sum_k=0;	1
Цикл *l=1* до *N[k]*	1+3*N[k]
Sum_k= Sum_k + (X[i, KL[k,l]]-M[i,k])^2;	9
Sr[i,k]= КОРЕНЬ(Sum_k/N[k]);	6

Временная сложность цикла по *l* составляет (при *k=1*): 1+3N[1]+N[1]*9= 1+12N[1]. Временная сложность цикла по *i* составляет:

1+3*2+2*(1+12N[1]+6)= 21+24N[1]. Временная сложность фрагмента при *k=1* получена в виде: 21+24N[1].

k=2:
21+24N[1];
k=3:
21+24N[1];
…
k=K:
21+24N[1].

Просуммировав временные сложности отдельных итераций при различных значениях *k*, получим: 21K+24K(N[1]+N[2]+..+N[K])=21K+ +24KN. Тогда временная сложность цикла по k (пункта 7) составит: 1+3K+K(21K+24KN)= **$24K^2N+ 21K^2+3K+1$**

	T(K)
// Пункт 8. Определение для кластеров максимального расстояния (максимальной из компонент $Sr[i,k]\ (i=\overline{1,2})$ ***для каждого k-го кластера***	
Цикл *k=1* до *K*	1+3*K
Sr_max[k]=100000;	2
Цикл *i=1* до 2	1+3*2
Если *Sr_max[k]< Sr[i,k]*, то	4
Sr_max[k]= Sr[i,k];	4
j_max[k]=i;	2

Временная сложность блока **Если** составляет: 4+6=10. Временная сложность цикла по *i* составляет: 1+3*2+2*10= 27. Временная сложность цикла по *k* и всего фрагмента в целом составляет: 1+3*K+K*(2+27)=**1+31K**.

	T(K)
// Пункт 9. Определение порядка дальнейших действий: переход к расщеплению кластеров (пункты 10,11) либо переход к слиянию кластеров (шаг 12)	
Count=0;	*1*
Цикл *k=1* до *K*	*1+3K*
Если *Sr_max[k]>* θ_σ, то	*2*
Count= Count +1;	*2*
Если *Count =K*, то перейти на пункт 10;	*2*
Иначе перейти на пункт 12;	*2*

Временная сложность блока **Если** (с условием *Sr_max[k]>*) составляет 4 операции. Временная сложность цикла по *k* составляет: 1+3K+K*4=1+7K. Временная сложность **Если** (с условием *Count =K*) составляет 2 операции при его (условии истинности) и 2 операции (при ложности условия). Временная сложность всего фрагмента (пункта 9) составляет **4+7K** (при условии, что *Count =K* является истинным либо ложным).

// Пункты 10,11. Расщепление кластеров	*T(K)*
New_clast=0;	*1*
Цикл *k=1* до *K*	*1+3K*
Если ((*$D_{ср}$[k]> $D_{ср}$*) и (*N[k]>2*(θ_s +1))*)или *($K \le N/2$)*, то	*10*
Цикл *i=1* до *2 // определение компонент формируемых кластеров*	*1+3*2*
Если (*i<> j_max[k]), то*	*2*
M_1[i,k]= M[i,k]; //i-я компонента формируемого первого кластера, // которая не изменяется	*5*
M_2[i,k]= M[i,k]; //i-я компонента формируемого второго // кластера, которая не изменяется	*5*
Если (*i= j_max[k]), то*	*2*
*M_1[i,k]= M[i,k]+ γ * Sr_max[k]; //i-я компонента первого класте- // ра, которая формируется*	*8*
*M_2[i,k]= M[i,k]- γ * Sr_max[k]; //i-я компонента второго класте- //ра, которая формируется*	*8*
New_clast= New_clast+1;	*2*
Цикл *i=1* до *2 // запись компонент кластеров в массив*	*1+3*2*
M[i,K+ New_clast]= M_1[i,k]; // запись первого кластера	*6*
New_clast= New_clast+1;	*2*
Цикл *i=1* до *2 // запись компонент кластеров в массив*	*1+3*2*
M[i,K+ New_clast]= M_2[i,k]; // запись второго кластера	*6*
K=K+ New_clast;	*2*
// удаление k-го кластера, который был расщеплен	
Цикл *k1=k+1* до *K*	*1+3K*
Цикл *i=1* до *2*	*1+3*2*
M[i,k1-1]= M[i,k1];	*6*
K=K-1;	*2*
Перейти на пункт 15;	

Временная сложность блока **Если** (с условием (*i<> j_max[k]*)) составляет 10 операций. Временная сложность блока **Если** (с условием (*i= j_max[k]*)) составляет 18 операций. Временная сложность цикла по *i* (в фрагменте формирования компонент кластеров) составляет 1+3*2+2*(12+18)=67 операций. Временная сложность циклов по *i* (фрагмент записи сформированных компонент кластера в массив кластеров) составляет 2*(2+1+3*2+2*6)+2=43 операции. Верхняя оценка временной сложности цикла по *k1* (фрагмент удаления кластера, который был разделен) 1+3K+K*19+2= 3+21K. Временная сложность блока **Если** (условие ((*$D_{ср}$[k]> $D_{ср}$*) и (*N[k]>2*(θ_s +1))*)или *($K \le N/2$)*) составляет 10+67+43+(3+21K)=123+21K. Общая временная сложность пунктов 10,11 (с учетом цикла по *k*) составляет: 1+1+3K+K*(123+21K)=**$21K^2+126K+2$.**

// Пункт 12. Вычисление расстояний между кластерами	
Цикл *k=1* до *K-1*	*T(K)*
Цикл *k1=k+1* до *K*	*1+3(K-1)*
D[k,k1]=КОРЕНЬ((M[1,k]- M[1,k1])^2+(M[2,k]- M[2,k1]))^2);	*17*

Для анализа временной сложности рассматриваемого фрагмента (**Пункта 12**) применим следующий подход. При *k=1* получим:

k1=2: *D[1,2]=КОРЕНЬ((M[1,1]- M[1,2])^2+(M[2,1]- M[2,2]))^2);*
k1=3: *D[1,3]=КОРЕНЬ((M[1,1]- M[1,3])^2+(M[2,1]- M[2,3]))^2);*
...
k1=K: *D[1,K]=КОРЕНЬ((M[1,1]- M[1,K])^2+(M[2,1]- M[2,K]))^2).*

В результате при *k=1* имеем временную сложность **17*(K-1)+(K-1)** ((K-1) операция инициализации значений *k1*).

При *k=2* получим:

k1=3: *D[2,3]=КОРЕНЬ((M[1,2]- M[1,3])^2+(M[2,2]- M[2,3]))^2);*
...
k1=K: *D[2,K]=КОРЕНЬ((M[1,2]- M[1,K])^2+(M[2,2]- M[2,K]))^2).*

В результате при *k=2* имеем временную сложность **17*(K-2)+(K-2)** (((K-2) операции инициализации значений *k1*). При *k=(K-1)* получим:

k1=K: *D[K-1,K]=КОРЕНЬ((M[1,K-1]- M[1,K])^2+(M[2,K-1]- M[2,K]))^2).*

В результате при *k=(K-1)* имеем временную сложность ***17*(K-(K-1))+1=17+1*** (1 операции инициализации значения *k1*). Суммируя временные сложности каждой итерации по *k*, в итоге получим: *18*(K-1)+ 18*(K-2)+..+ 18= 18*((K-1)+(K-2)+..+1).* Имеем в скобках арифметическую прогрессию от $a_1=1$ до $a_{K-1}=(K-1)$ с шагом 1. По формуле суммы арифметической прогрессии, получим:

$(18*(\frac{2*1+1*(K-2)}{2})*(K-1))=9*(8K^2-8K)=72K^2-72K.$ Полученное выражение ***72K^2-72K*** характеризует временную сложность **тела** цикла по *k*. Временная сложность пункта 12 составит: 1+*3(K-1)+ (K-1)(72K^2-72K)=**72K^3- 72K^2+75K-2***.

// Пункт 13.1. Размещение пар кластеров, для которых выполняется условие D[k,k]<θ_c , в массиве SL-Clast1[k,k]	*T(K)*
k2=0;	*1*
Цикл *k=1* до *K-1*	*1+3(K-1)*
Цикл *k1=k+1* до *K*	
Если *D[k,k1]<* θ_c, *то*	*3*
SL-Clast1[1,k2+1]=k;	*4*
SL-Clast1[2,k2+1]=k1;	*4*
D[k,k1]=10000;	*3*
k2=k2+1;	*2*

Для анализа временной сложности рассматриваемого фрагмента (**Пункта 13.1**) применим подход, рассмотренный для пункта 12. Так как определяется верхняя оценка временной сложности, то предполагается, что в массиве *SL-Clast1[i,k]* размещается максимальное количество пар кластеров, для которых выполняется условие *D[k,k1]<* θ_c. При *k=1* получим:

k1=2: *Если D[k,k1]<* θ_c, *то* *3*

SL-Clast1[1,k2+1]=k; 4
SL-Clast1[2,k2+1]=k1; 4
D[k,k1]=10000; *3*
k2=k2+1; *2*

Временная сложность фрагмента (при *k=1*) составит 17 операций (1 операция инициализации значения *k1*).

k1=3: *Если D[k,k1]< θ_c, то* *3*
SL-Clast1[1,k2+1]=k; 4
SL-Clast1[2,k2+1]=k1; 4
D[k,k1]=10000; *3*
k2=k2+1; *2*

Временная сложность фрагмента (при *k=1*) составит 17 операций (1 операция инициализации значения *k1*).

...

k1=K: *Если D[k,k1]< θ_c, то* *3*
SL-Clast1[1,k2+1]=k; 4
SL-Clast1[2,k2+1]=k1; 4
D[k,k1]=10000; *3*
k2=k2+1; *2*

Временная сложность фрагмента (при *k=1*) составит 17 операций. Суммарная временная сложность (при $k1 = \overline{2,K}$) равна **17*(K-1).** По аналогии при *k=2* суммарная временная сложность выполнения итерации составит **17*(K-2),** и так далее при *k=K-1* суммарная временная сложность выполнения итерации составит **17** операций. В итоге получим: *17*(K-1)+ 17*(K-2)+..+17= 17*((K-1)+(K-2)+..+1).* Имеем в скобках арифметическую прогрессию от $a_1=1$ до $a_{K-1}=(K-1)$ с шагом 1. По формуле суммы арифметической прогрессии, получим:

$17*(\frac{2*1+1*(K-2)}{2})*(K-1)=8*(8K^2-8K)=64K^2-64K$. Выражение **$64K^2$-64K** характеризует временную сложность тела цикла по *k*. Временная сложность цикла по *k* определена в виде:$1+3(K-1)+(K-1)*(64K^2-64K)=64K^3-128K^2+67K-2$.

// Пункт 13.2. Упорядочивание пар кластеров (в количестве не более L), для которых выполняется условие D[k,k]< θ_c , в массиве SL-Clast2[k,k]	*T(KL)*
Count_Sl_Clast=0;	*1*
Если *k2<L*, то *L=k2*	*2*
Цикл *l=1* до *L*	*1+3L*
Min_d_clast=10000;	*1*
//минимальное расстояние между кластерами	
Цикл *k=1* до *k2*	*1+3k2*
i1= SL-Clast1[1,k];	*3*
i2= SL-Clast1[2,k];	*3*
//определение пары кластеров с минимальным расстоянием	
Если *Min_d_clast <D[i1,i2], то*	*3*
Min_d_clast =D[i1,i2];	*3*
Min_d_clast_k1=i1;	*1*
Min_d_clast_k2=i2;	*1*

```
D[Min_d_clast_k1, Min_d_clast_k2]=10000;                    3
SL_Clast2[1,l]= Min_d_clast_k1;                             3
SL_Clast2[2,l]= Min_d_clast_k2;                             3
Count_Sl_Clast= Count_Sl_Clast+1;                           2
```

При определении верхней оценки временной сложности пункта 13.2 предполагается, что *k2 = K/2* (максимальное количество пар кластеров, которые сливаются, равно *K/2*) . Временная сложность блока **Если** составляет 8 операций. Так как при определении пары кластеров с минимальным значением *D[k,k]* требуется просмотреть все пары *k2* кластеров (*k2 = K/2*) , тогда временная сложность цикла по *k* : 1+3(K/2)+(K/2)*(3+3+8)=2+17K. Временная сложность цикла по *l*: 1+3L+L*(1+2+17K+3+3+3+2)=1+17L+17LK. С учетом первых двух операторов временная сложность фрагмента (пункта 13.2) составит **3+17L+17LK.**

```
// Пункт 14.1. Слияние кластеров (количество пар кластеров равно
Count_Sl_Clast)
| Если Count_Sl_Clast<>0, то                                T(L )
|  | Цикл  l=1  до Count_Sl_Clast                           1
|  |   | Цикл  i=1  до 2                                    1+3L
|  |   |  M[i,K+l]= N[SL_Clast2[1,l]]*M[i,SL_Clast2[1,l]]+  1+3*2
|  |   |           N[SL_Clast2[2,l]]*M[i,SL_Clast2[2,l]];   21
|  |   |  M[i,K+l]= M[i,K+l]/( N[SL_Clast2[1,l]]* N[SL_Clast2[2,l]]);
|  | K=K+ Count_Sl_Clast;                                   15
|  |                                                        2
```

При определении верхней оценки временной сложности пункта 14.1 предполагается, что *Count_Sl_Clast =L* (максимально возможное количество сливаемых кластеров равно *L*). Временная сложность цикла по *i* составляет 1+3*2+2*(21+15)= 79. Временная сложность цикла по *l* составляет 1+3L+L*(79+2)=1+84L. Общая вычислительная сложность фрагмента составляет **2+84L**.

```
// Пункт 14.2. Удаление кластеров, которые были слиты        T(KL )
|  Цикл  l=1  до Count_Sl_Clast                              1+3L
|     | Цикл  i=1  до 2                                      1+3*2
|     |  M[i, SL_Clast2[1,l]]= 0;                            5
|     | Цикл  i=1  до 2                                      1+3*2
|     |  M[i, SL_Clast2[2,l]]=0;                             5

| Цикл  l=1  до 2*Count_Sl_Clast                             1+6L
|     | Цикл k=1  до K-Count_Sl_Clast                        1+3*(K-L)
|     |  | Если ((M[1,k]=0) и (M[2,k]=0)), то                7
|     |  | Цикл  k1=k+1  до K-1
|     |  |  | Цикл  i=1  до 2                                 1+3*2
|     |  |  |  M[i, k1]= M[i, k1+1];                         5
|     |  |  |  N[k1]=N[k1+1];                                3

K=K–Count_Sl_Clast;
```

Для вычисления верхней оценки временной сложности принято, что *Count_Sl_Clast=L*, где *Count_Sl_Clast* – количество пар сливаемых кластеров или количество кластеров, сформированных в результате слияния, параметры центров которых добавлены справа в *Count_Sl_Clast* столбцов массива *M*. Временная сложность (**Цикл** *l=1* до *Count_Sl_Clast*), реализующего обнуление элементов в массиве *M* центров кластеров, соответствующих идентификаторам слитых кластеров, определена как: 1+37L.

Для вычисления временной сложности цикла (**Цикл** *l=1* до 2**Count_Sl_Clast*) реализованы следующие действия:

– *k=1* (при условии, что блок (**Если** *((M[1,k]=0)* и *(M[2,k]=0))*, то) выполняется):

k1=2: временная сложность цикла по *i* равна 1+3*2+2*5=17; вычислительная сложность итерации при *k1=2* равна 17+3+1=21 (одна операция инициализации параметра *k1* значением 2);

k1=3: временная сложность цикла по *i* равна 17; временная сложность итерации при *k1=3* равна 21 (одна операция инициализации параметра *k1* значением 3);

…

k1=K-1: временная сложность цикла по *i* равна 17; временная сложность итерации при *k1=K-1* равна 21 (одна операция инициализации параметра *k1* значением *K-1*);

Тогда временная сложность итерации цикла по *k* при *k=1* составляет: 21*(K-2).

– *k=2* (при условии, что блок (**Если** *((M[1,k]=0)* и *(M[2,k]=0))*, то) выполняется):

k1=3: временная сложность цикла по *i* равна 17; временная сложность итерации при *k1=3* равна 21 (одна операция инициализации параметра *k1* значением 3);

k1=4: временная сложность цикла по *i* равна 17; временная сложность итерации при *k1=4* равна 21 (одна операция инициализации параметра *k1* значением 4);

…

k1=K-1: временная сложность цикла по *i* равна 1+3*2+2*5=17; вычислительная сложность итерации при *k1=K-1* равна 17+3+1=21 (одна операция инициализации параметра *k1* значением *K-1*);

Тогда временная сложность итерации цикла по *k* при *k=2* составляет: 21*(K-3).

– *k=K-Count_Sl_Clast* (при *Count_Sl_Clast=L):*

k1=(K-Count_Sl_Clast)+1: временная сложность цикла по *i* равна =17; временная сложность итерации при *k1=(K-Count_Sl_Clast)+1* равна 21;

…

k1=K-1: временная сложность цикла по *i* равна 17; временная сложность итерации при *k1=K-1* равна 17+3=21;

Тогда временная сложность итерации цикла по *k* при *k=2* составляет: 21*(K-L) (при условии, что с целью расчета верхней оценки временной сложности принято

Count_Sl_Clast=L. Просуммировав построенные временные сложности , получим выражение для вычисления временной сложности *тела* цикла по *k*: 21(K-2)+21(K- 3)+..+21(K-L)= 21((K--L)+..+(K-3)+(K-2)). Получим арифметическую прогрессию с шагом 1 от (K-L) до (K-2) (всего ((K-2)-(K-L)+1)=(L-1) элементов). Используя формулу суммы первых *n* членов прогрессии, получим верхнюю оценку временной сложности тела цикла по *k* в виде:

$$21*(\frac{(K-L)+(K-2)}{2})*(L-1)=11*(2KL-L^2-2K+L+2)=(22KL-11L^2-22K+11L+22).$$

Временная сложность цикла по *k* получена в виде (при условии, *Count_Sl_Clast=L*): **$11L^3+22K^2L-33L^2K-22K^2-11L^2+33KL+25K-25L+1$**. Временная сложность цикла по *l* получена в виде (при условии, *Count_Sl_Clast=L*): **$66L^4$**+132**$K^2L^2-198L^3K-132K^2L--66L^3+198L^2K+150KL-150L^2+12L+1$**. Временная сложность всего фрагмента, соответствующего пункту 14.2 равна: **$66L^4$**+132**$K^2L^2-198L^3K-132K^2L--66L^3+198L^2K+150KL-150L^2+49L+2$**.

Полученные временные сложности пунктов алгоритма кластеризации данных сведены в Таблицу П3.1. Выражение для определения временной сложности первой итерации алгоритма кластеризации точек (отсчетов), предусматривающей разделение кластеров и содержащей пункты алгоритма 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11, получено в виде:

$63K^2N+74K^2+33NK+181K+13N+20$.

Таблицу П3.1 – Временные сложности пунктов алгоритма кластеризации точек земной поверхности с учетом значений отражательной способности в двух каналах

№ пункта алгоритма	Временные сложности пунктов алгоритма
1	33NK +13N +1
2	$5K^2$ +2
3	$18K^2N+19K^2$ +3K +1
4	$21K^2N+8K^2$ +3K +1
5	+8K +4
6	3, 3, 6
7	$24K^2N+21K^2$ +3K +1
8	31K +1
9	7K +4
10,11	$21K^2$ +126K +2
12	$72K^3$ - $72K^2$ +75K -2
13	$64K^3$ $-128K^2+17KL+67K+17L$ +1
14	$66L^4+132K^2L^2-198L^3K-66L^3-132K^2L+198L^2K+150KL-150L^2+49L+2$

Выражение для определения временной сложности второй итерации алгоритма кластеризации точек (отсчетов), предусматривающей слияние кластеров и содержащей пункты алгоритма 1,2,3,4,5,6,12,13,14 получено в виде:

$66L^4+136K^3+132K^2L^2-198L^3K-66L^3-132K^2L+39K^2N+198L^2K-168K^2+167KL-150L^2+156K+33N+66L+13$.

Полученные выражения использованы для определения количества операций при реализации алгоритма кластеризации (с учетом, что реализуются две его итерации).

Результатом операции кластеризации является массив *KL[k,q]*, в котором каждому *k*-му кластеру поставлены в соответствие индексы (номера) *l*-ых отсчетов, входящих в него, которым соответствуют значения элементов массива *X[i,l]* (то есть, *KL[k,q]=l*, где *l*– индекс (номер) отсчета, входящего в *k*-ый кластер). Также результатом кластеризации является вектор *N[k]*, элементы которого – это количество отсчетов в *k*-ых кластерах. После окончания кластеризации для точки на поверхности, характеризуемой *l*-ым отсчетом, вычисляется значений одного (требуемого) из вегетационных индексов, в частности, NDVI, либо значения цветов в RGB-модели, используемых для формирования цветного изображения с целью идентификации характеристик НПЯ и ТВ на ОС. После того, как значения вегетационного индекса для каждой точки поверхности вычислены, осуществляется их осреднение для отсчетов, входящих в каждый кластер. Тем самым определенные посредством кластеризации объекты на земной поверхности идентифицируются осредненными (по всем отсчетам, входящим в кластеры) значениями вегетационного индекса. Это же осредненное значение используется для инициализации значений вегетационных индексов, сопоставляемых с каждой точкой на земной поверхности, входящей в рассматриваемую область (с целью последующей идентификации динамики отражательных свойств поверхности либо определения характеристик НПЯ и ТВ на ОС и условий их развития).

Псевдокод фрагмента программы, реализующего вычисление значения вегетационного индекса для каждой точки рассматриваемой области (для каждого из *N* отсчетов), определение средних значений вегетационного индекса по всем отсчетам, входящих в кластеры, инициализацию значений вегетационного индекса, сопоставляемых с отсчетами, входящими в кластеры, полученными осредненными значениями, имеет следующий вид (*N*– количество отсчетов):

```
Цикл  l=1  до N
  Veg_ind_otschet[l]=(X[1,l]-X[2,l])/( (X[1,l]-X[2,l]));

Цикл  k=1  до K
   Veg_ind_clast[k]=0;
   | Цикл q=1  до N[k]
   |   Veg_ind_clast[k]= Veg_ind_clast[k] +  Veg_ind_otschet[KL[k,q]];
    Veg_ind_clast[k]= Veg_ind_clast[k]/N[k];

Цикл  k=1  до K
   | Цикл q=1  до N[k]
   |  Veg_ind_otschet[KL[k,q]]= Veg_ind_clast[k];
```

Временная сложность **тела** цикла по *l* составляет 13 операций, а самого цикла по *l* : 1+3N+ +N*13=**1+16N**. Для определения временной сложности цикла по *q* представим второй фрагмент программы в виде:

k=1;

Цикл *q=1* до *N[k]*

Veg_ind_clast[k]= Veg_ind_clast[k] + Veg_ind_otschet[KL[k,q]];

При *k=1* временная сложность цикла по *q* составляет 1+10N[k].

k=2;

Цикл *q=1* до *N[k]*

Veg_ind_clast[k]= Veg_ind_clast[k] + Veg_ind_otschet[KL[k,q]];

При *k=2* временная сложность цикла по *q* составляет 1+10N[k].

...

k=K;

Цикл *q=1* до *N[k]*

Veg_ind_clast[k]= Veg_ind_clast[k] + Veg_ind_otschet[KL[k,q]];

При *k=K* временная сложность цикла по *q* составляет 1+10N[k].

Просуммировав полученные выражения, придем к временной сложности тела цикла по *k* в виде: K+10K(N[1]+ N[2]+…+ N[K])= K+10NK. Тогда временная сложность цикла по *k* во втором фрагменте составляет: 1+3K+K*(K+10NK)=$\mathbf{10K^2N+K^2+3K+1}$.

Для определения временной сложности цикла по *q* представим третий фрагмент программы в виде:

k=1;

Цикл *q=1* до *N[k]*

Veg_ind_otschet[KL[k,q]]= Veg_ind_clast[k];

При *k=1* временная сложность цикла по *q* составляет 1+8N[k].

k=2;

Цикл *q=1* до *N[k]*

Veg_ind_otschet[KL[k,q]]= Veg_ind_clast[k];

При *k=2* временная сложность цикла по *q* составляет 1+8N[k].

...

k=K;

Цикл *q=1* до *N[k]*

Veg_ind_otschet[KL[k,q]]= Veg_ind_clast[k];

При *k=K* временная сложность цикла по *q* составляет 1+8N[k].

Просуммировав полученные выражения, придем к временной сложности тела цикла по *k* в виде: K+8K(N[1]+ N[2]+…+ N[K])= K+8NK. Тогда временная сложность цикла по *k* в третьем фрагменте составляет: 1+3K+K*(K+8NK)=$\mathbf{8K^2N+K^2+3K+1}$. Общая временная сложность трех рассмотренных фрагментов, сопоставляющих с каждым кластером осредненной значение вегетационного индекса, определяемое на основе значений этого индекса в каждой точке (отсчете), входящей в этот кластер, составляет $\mathbf{18K^2N+2K^2+6K+16N+2.}$

После определения значений вегетационных индексов для отсчетов, входящих в кластеры, полученный массив значений записывается на постоянный носитель. Количество операций записи значений на диск составляет N.

П3.2. Построение расписаний выполнения единичных заданий на обработку данных в конвейерной системе для идентификации наличия негативных природных явлений и техногенных воздействий на окружающую среду

В качестве исходных данных для построения расписаний заданы размерности массивов (количество элементов в каждом из них) и тип ИСЗ, с которого получены значения отражательной способности:

– массивы 1 (Modis): $100\times100=10^4$ элементов;

– массивы 2 (Landsat 8): $100\times50= 0.5*10^4$ элементов;

– массивы 3 (Modis):$100\times150= 1.5*10^4$ элементов;

– массивы 4 (Landsat 8): $100\times50= 0.5*10^4$ элементов;

– массивы 5 (Landsat 8): $100\times50= 0.5*10^4$ элементов;

– массивы 6 (Landsat 8): $100\times50= 0.5*10^4$ элементов;

– массивы 7 (Modis): $100\times100=10^4$ элементов.

Для построения расписаний каждому из введенных массивов поставлено в соответствие задание, выполнение которого в КС обеспечит его обработку. В соответствии с полученными выражениями для расчета временной сложности выполнения ЕЗ в КС, определено количество операций, выполняемых приборами КС с массивами значений заданных размеров.

В соответствии с исходными данными для построения расписаний временная сложность операций сохранения данных на постоянных носителях (1 этап) и формирования массивов значений отраженной солнечной яркости по значениям степеней градации этого параметра, переданным от центров хранения и предоставления данных ДЗЗ (2 этап) составит:

– 1 этап: задание 1 на обработку массивов 1 – $36*10^4$ операций; задание 2 на обработку массивов 2 – $5.5*10^4$ операций; задание 3 на обработку массивов 3 – $54*10^4$ операций; задание 4 на обработку массивов 4 – $5.5*10^4$ операций; задание 5 на обработку массивов 5 – $5.5*10^4$

операций; задание 6 на обработку массивов 6 – $5.5*10^4$ операций; задание 7 на обработку массивов 7 – $36*10^4$ операций;

– 2 этап: задание 1 на обработку массивов 1 – $33.12*10^4$ операций; задание 2 на обработку массивов 2 – $16.62*10^4$ операций; задание 3 на обработку массивов 3 – $49.62*10^4$ операций; задание 4 на обработку массивов 4 – $16.62*10^4$ операций; задание 5 на обработку массивов 5 – $16.62*10^4$ операций; задание 6 на обработку массивов 6 – $16.62*10^4$ операций; задание 7 на обработку массивов 7 – $33.12*10^4$ операций.

Для реализации кластеризации с использованием метода ISODATA введены параметры, используемые при построении расписаний: количество кластеров $K=7$, количество пар кластеров, которые могут быть слиты вместе при реализации процедуры кластеризации $L=2$.

В соответствии с исходными данными для построения расписаний временная сложность кластеризации отсчетов для каждого массива составит (при условии, что программой выполнено две итерации: первая, связанная с разделением кластеров, вторая, связанная с слиянием кластеров):

– задание 1 – $5281*10^4$ операций; задание 2 – $2640*10^4$ операций; задание 3 – $7921*10^4$ операций; задание 4 – $2640*10^4$ операций; задание 5 – $2640*10^4$ операций; задание 6 – $2640*10^4$ операций; задание 7 – $5281*10^4$ операций.

В соответствии с исходными данными для построения расписаний временная сложность процедуры вычисления значений вегетационных индексов для каждой точки области на земной поверхности, средних значений вегетационных индексов для сформированных кластеров (4 этап) составит:

– задание 1 – $900*10^4$ операций; задание 2 – $450*10^4$ операций; задание 3 – $1350*10^4$ операций; задание 4 – $450*10^4$ операций; задание 5 – $450*10^4$ операций; задание 6 – $450*10^4$ операций; задание 7 – $900*10^4$ операций.

Последующее сохранение результатов обработки на 5 этапе (сохраняется массив средних значений индексов) предполагает следующую временную сложность: задание 1 - 10^4 операций; задание 2– $0.5*10^4$ операций; задание 3 – $1.5*10^4$ операций; задание 4 – $0.5*10^4$ операций; задание 5 – $0.5*10^4$ операций; задание 6 – $0.5*10^4$ операций; задание 7 – 10^4 операций.

В качестве характеристики быстродействия приборов конвейерной системы задана величина 10^6 операций в секунду. В соответствии с этим значением длительности выполнения операций на этапах (приборах) их обработки определены следующим образом: – 1 этап: задание 1 – 0.36 с; задание 2 – 0.06 с; задание 3 – 0.54 с; задание 4 – 0.06 с; задание 5 – 0.06 с; задание 6 – 0.06 с; задание 7 – 0.36 с;

– 2 этап: задание 1 – 0.33 с; задание 2 – 0.17 с; задание 3 – 0.5 с; задание 4 – 0.17 с; задание 5– 0.17 с; задание 6 – 0.17 с; задание 7 – 0.33 с;

– 3 этап: задание 1 – 52 с; задание 2 – 26 с; задание 3 – 79 с; задание 4 – 26 с; задание 5 – 26 с; задание 6 – 26 с; задание 7 – 52 с;

– 4 этап: задание 1 – 9 с; задание 2 – 4.5 с; задание 3 – 13.5 с; задание 4 – 4.5 с; задание 5 – 4.5 с; задание 6 – 4.5 с; задание 7 – 9с;

– 5 этап: задание 1 – 0.01 с; задание 2 – 0.005 с; задание 3 – 0.015 с; задание 4 – 0.005 с; задание 5 – 0.005 с; задание 6 – 0.005 с; задание 7 – 0.01 с.

При определенных таким образом значениях входных параметров реализовано построение статического расписания выполнения ЕЗ в КС, построение динамических расписаний при $d_i \geq 0$ (приоритеты поступивших в моменты времени $d_i > 0$ ЕЗ равны приоритетами заданий, выполняемых в КС в соответствии со статическим расписанием), построение динамических расписаний при $d_i > 0$ (приоритеты поступивших в моменты времени $d_i > 0$ заданий больше приоритетов заданий, выполняемых в КС). Диаграммы Ганта, соответствующие статическому расписанию, представлены на рисунке П3.1.

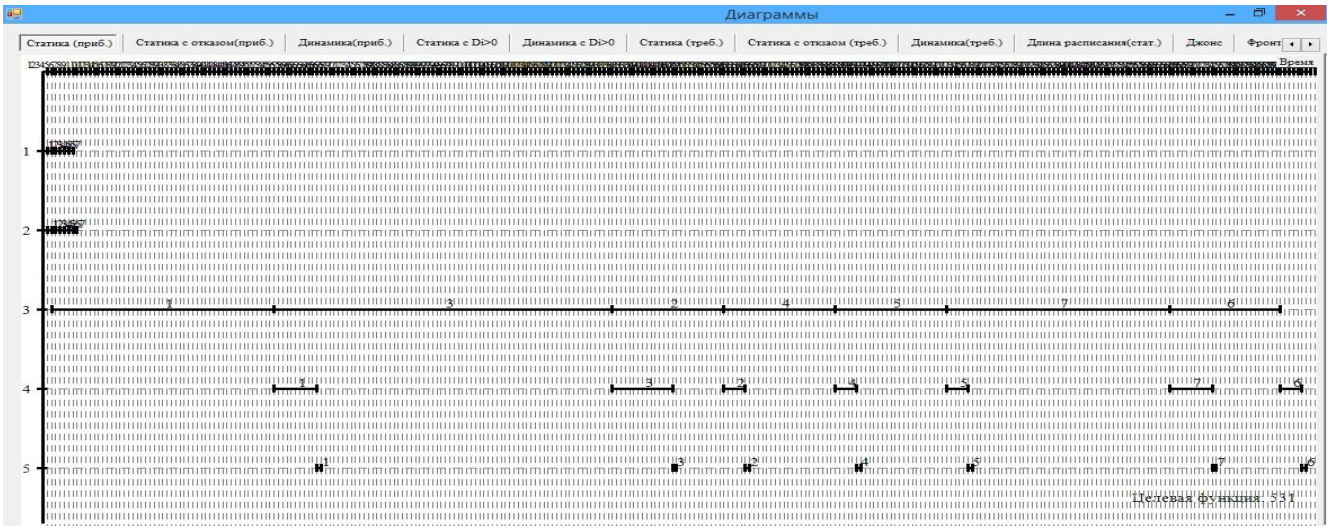


Рисунок П3.1– Диаграммы Ганта статического расписания выполнения ЕЗ в КС

Значение критерия соответствует простоям приборов КС при реализации статического расписания и равно 531 с. При построении динамических расписаний при $d_i \geq 0$ (приоритеты поступивших в моменты времени $d_i > 0$ заданий на обработку данных равны приоритетами заданий, выполняемых в КС) рассматривались следующие задания: задание 8 на обработку массива 8 (Landsat 8): 100×50= $0.5*10^4$ элементов; задание 9 на обработку массива 9 (Modis): $100\times100=10^4$ элементов. Значения длительностей обработки массивов на приборах КС получены ранее. Моменты времени поступления заданий 8 и 9 в КС: $d_8 = 50$ с., $d_9 = 150$ с. Диаграммы Ганта статического расписания, модифицированного путем добавления заданий 8 и 9 в конец каждой последовательности обработки, представлены на рисунке П3.2.

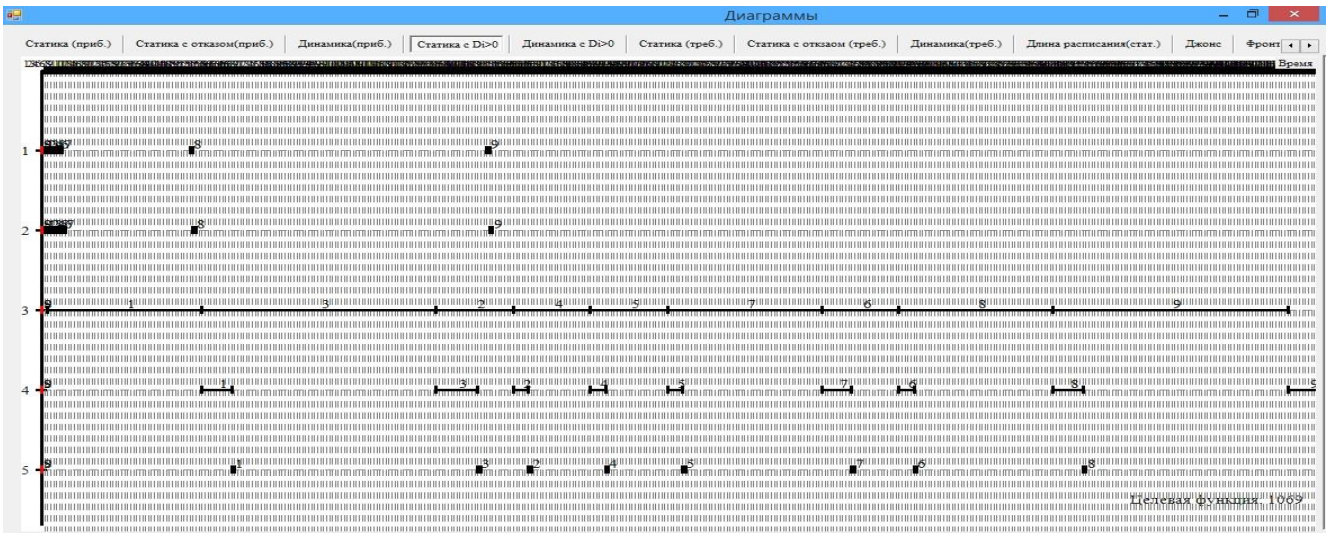


Рисунок П3.2– Диаграммы Ганта статического расписания выполнения ЕЗ на обработку массивов 8,9, модифицированного путем их добавления в конец последовательностей

Значение критерия для сформированного расписания составляет 1069с простоев приборов при выполнении ЕЗ. Диаграммы Ганта для динамического расписания, сформированного с учетом поступления в КС на выполнение в моменты времени $d_8 = 50$ с, $d_9 = 150$ с заданий на обработку массивов 8,9, представлены на рисунке П3.3.

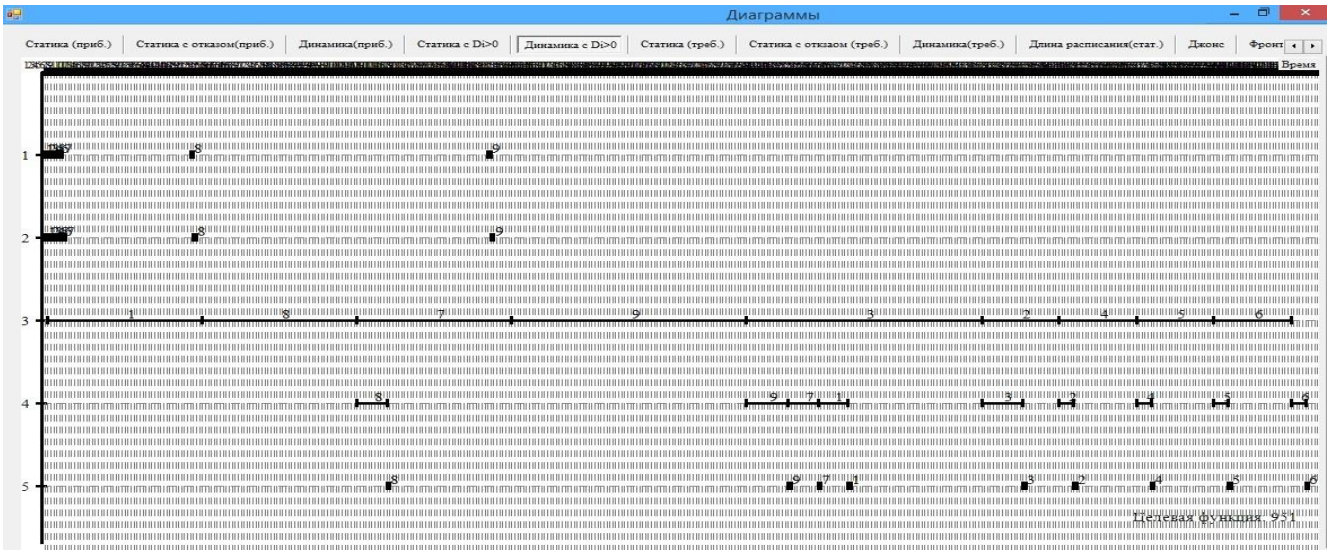


Рисунок П3.3– Диаграммы Ганта динамического расписания выполнения ЕЗ 8,9 в КС, сформированного с учетом их поступления в моменты $d_8 = 50$ с, $d_9 = 150$ с.

Значение критерия для сформированного динамического расписания составляет 951 с простоев приборов КС при обработке массивов данных ДЗЗ. Для рассмотренных исходных данных построение динамического расписания обеспечивает на 11% снижение простоев при-

боров в сравнении со статическим расписанием, сформированным путем добавления заданий на обработку массивов 8 и 9 в конец последовательностей без изменения их вида.

Реализовано построение расписаний выполнения заданий на обработку ЕЗ в КС при условии поступления в моменты времени $d_i > 0$ трех массивов. При построении динамических расписаний с $d_i \geq 0$ (приоритеты поступивших заданий равны приоритетам заданий, выполняемым в КС в соответствии со статическим расписанием) рассматривались следующие задания:

– задание 8 на обработку массива 8 (Landsat 8): 100×50= $0.5*10^4$ элементов;

– задание 9 на обработку массива 9 (Modis): 100×100=10^4 элементов;

– задание 10 на обработку массива 10 (Modis): 100×100=10^4 элементов.

Значения длительностей выполнения заданий на обработку массивов на каждом из приборов КС получены ранее. Моменты времени поступления заданий 8,9,10 в КС: $d_8 = 50$ с, $d_9 = 80$ с, $d_{10} = 120$ с. Диаграммы Ганта статического расписания, модифицированного путем добавления заданий на обработку массивов 8, 9,10 в конец каждой последовательности без формирования динамического расписания, представлены на рисунке П3.4.

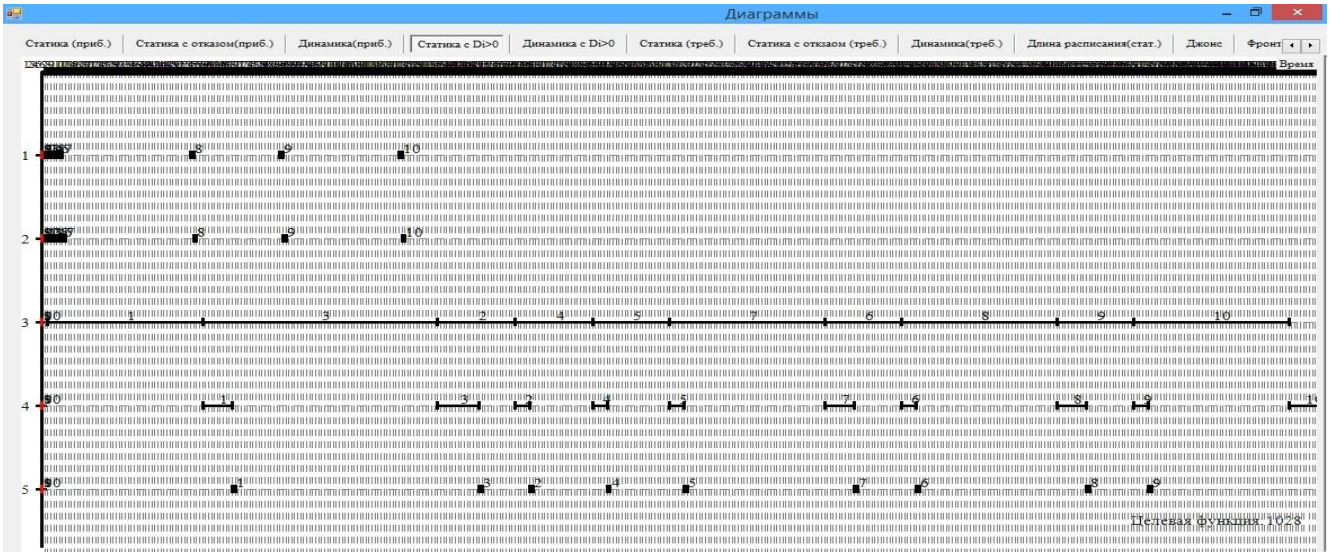


Рисунок П3.4– Диаграммы Ганта статического расписания выполнения ЕЗ в КС, модифицированного путем добавления заданий на обработку массивов 8, 9, 10 в конец каждой из последовательностей без формирования динамического расписания

Значение критерия для модифицированного статического расписания (не предполагающего перестроение последовательностей выполнения заданий на обработку массивов данных на приборах КС) составляет 1028 с. простоев приборов КС. Диаграммы Ганта динамического расписания, сформированного с учетом поступления в КС для выполнения заданий на обра-

ботку массивов 8,9,10 в моменты времени $d_8 = 50$ с., $d_9 = 80$ с., $d_{10} = 120$ с представлены на рисунке П3.5.

Рисунок П3.5– Диаграммы Ганта динамического расписания выполнения ЕЗ в КС, сформированного с учетом их поступления в КС в моменты $d_8 = 50$ с., $d_9 = 80$ с., $d_{10} = 120$

Значение критерия для сформированного динамического расписания составляет 918 с. Построение динамического расписаний обеспечивает на 10 % более эффективное использование ресурса времени приборов КС в сравнении со статическим расписанием, сформированным путем добавления заданий на обработку массивов 8,9,10 в конец последовательностей без их изменения (на 10% снижены простои приборов при формировании динамического расписания).

Реализовано построение расписаний процесса выполнения заданий на обработку массивов данных ДЗЗ в КС при условии, что приоритеты заданий, поступающих в моменты времени $d_i > 0$, превышают приоритеты заданий, выполняемых в КС в соответствии со статическим расписанием. При построении динамических расписаний с $d_i > 0$ рассматривались следующие задания: задание 8 на обработку массива 8 (Lavdsat 8): 100×50= $0.5*10^4$ элементов; задание 9 на обработку массива 9 (Modis): $100\times100=10^4$ элементов.

Значения длительностей обработки этих массивов данных на каждом из приборов КС получены ранее. Моменты времени поступления массивов 8 и 9 на обработку в КС: $d_8 = 150$ с, $d_9 = 300$ с. Диаграммы Ганта статического расписания, модифицированного путем прерывания выполнения заданиий на обработку данных с $d_i = 0$ поступившими заданиями 8,9 на обработку данных с $d_i > 0$ и с высоким приоритетом без формирования динамического расписания, представлены на рисунке П3.6. Значение критерия для этого расписания составляет 680 с. простоев приборов КС. Реализовано построение динамического расписания процесса выпол-

нения заданий с учетом поступления в КС заданий 8,9. Вид диаграмм Ганта для динамического расписания, сформированного с учетом поступления в моменты времени $d_i > 0$ высоко приоритетных заданий 8, 9 на обработку данных, представлен на рисунке П3.7.

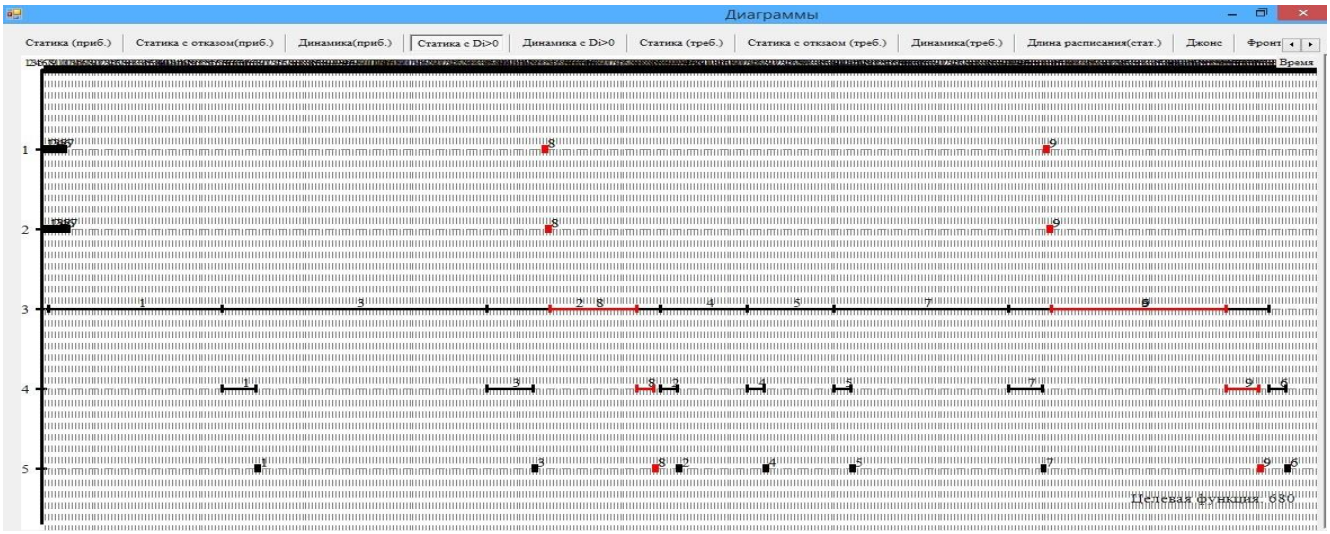


Рисунок П3.6.– Диаграммы Ганта статического расписания, модифицированного путем прерывания выполнения заданий на обработку данных ДЗЗ поступившими заданиями на обработку данных с $d_i > 0$ и высоким приоритетом без формирования динамического расписания (массивы 8,9)

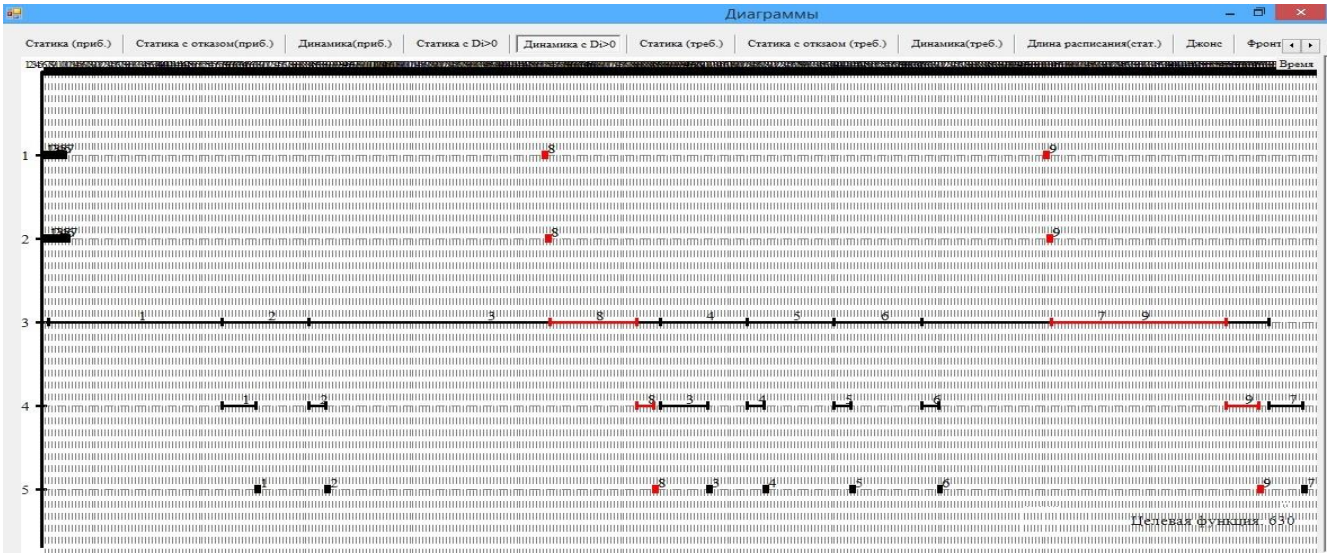


Рисунок П3.7– Диаграммы Ганта динамического расписания выполнения ЕЗ в КС, сформированного с учетом поступления в КС в моменты $d_8 = 150$ с, $d_9 = 300$ с массивов 8, 9 с высокими приоритетами

Значение критерия для сформированного динамического расписания, учитывающего поступление высоко приоритетных заданий, равно 630 с. По сравнению со статическим расписа-

нием, не предполагающем изменения вида последовательностей при поступлении в КС высоко приоритетных заданий, построение динамического расписания позволяет на 7.4 % повысить эффективность использования ресурса времени приборов КС (на 7.4 % снизить простои приборов КС при обработке данных ДЗЗ по сравнению со статическим расписанием).

Реализовано построение динамических расписаний выполнения заданий на обработку массивов 8,9,10 данных ДЗЗ с приоритетами, превышающими приоритеты заданий на обработку данных, выполняющимися в КС в соответствии со статическим расписанием. Вид заданий на обработку массивов данных ДЗЗ с высокими приоритетами следующий:

– задание 8 на обработку массива 8 (Landsat 8) размером 100×50= $0.5*10^4$ элементов;

– задание 9 на обработку массива 9 (Modis) размером: 100×100=10^4 элементов;

– задание 10 на обработку массива 10 (Modis) размером: 100×100=10^4 элементов.

Длительности обработки данных, включенных в массивы 8,9,10, получены ранее. Реализовано построение модифицированных статических расписаний, в которых выполнение заданий на обработку низко приоритетных данных прерывается выполнением заданий на обработку высоко приоритетных данных, при этом вид последовательностей выполнения заданий на приборах не меняется. Вид диаграмм Ганта для модифицированных статических расписаний, сформированных с учетом поступления в КС в моменты времени $d_i > 0$ высоко приоритетных заданий на обработку массивов 8,9,10, представлен на рисунке П3.8 (поступление высоко приоритетных данных осуществляется в следующие моменты времени: $d_8 = 100$ с, $d_9 = 200$ с, $d_{10} = 300$ с). Значение критерия для модифицированного статического расписания, в котором выполнение заданий на обработку данных на приборах КС прерывается поступлением высокоприоритетных заданий, а порядки выполнения заданий на приборах не меняются, равно 773 с простоев приборов КС.

При этих же исходных данных реализовано формирование динамического расписания выполнения заданий на обработку массивов 8,9,10, поступающих в систему в моменты времени $d_8 = 100$ с., $d_9 = 200$ с., $d_{10} = 300$ с. Вид диаграмм Ганта для динамического расписания, сформированного с учетом поступления в КС в моменты времени $d_i > 0$ высоко приоритетных заданий на обработку данных (массивов 8,9.10), представлен на рисунке П3.9 (поступление заданий в моменты времени: $d_8 = 100$ с., $d_9 = 200$ с., $d_{10} = 300$ с.). Значение критерия для сформированного динамического расписания равно 713 с простоев приборов КС при обработке массивов данных в КС. По сравнению со статическим расписанием, не предполагающим изменения вида последовательностей при поступлении в КС высоко приоритетных заданий на обработку данных, построение динамического расписания позволяет на 8% повысить эффективность ис-

пользования ресурса времени приборов КС (на 8% снизить простои приборов КС при выполнении заданий на обработку данных ДЗЗ по сравнению со статическим расписанием).

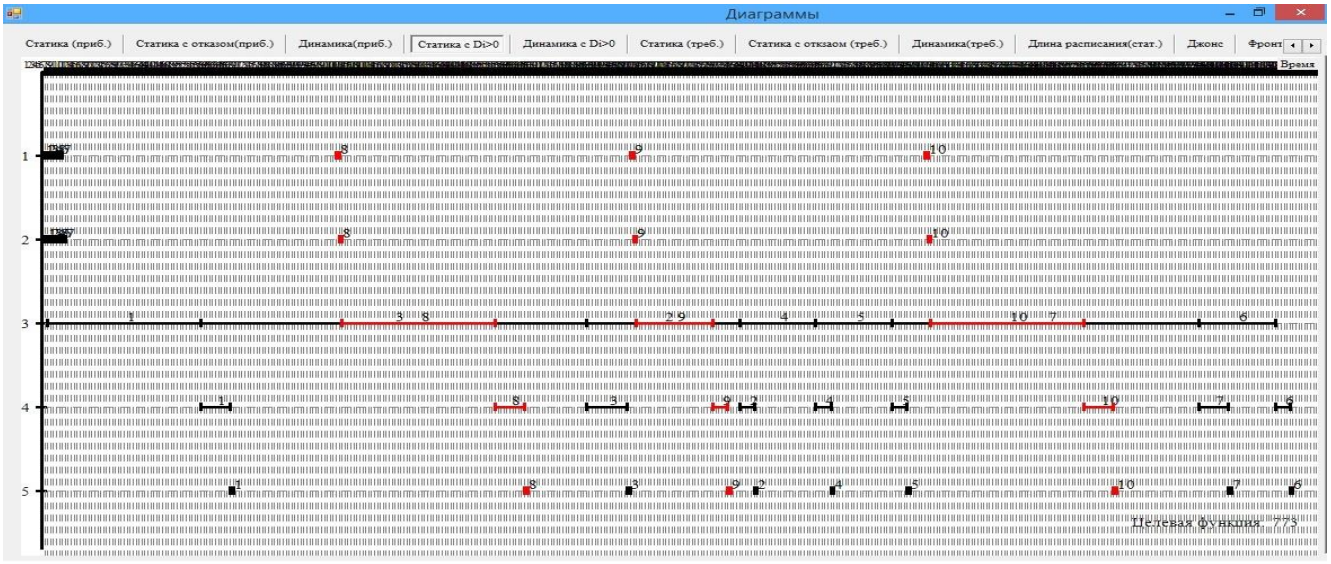


Рисунок П3.8.– Диаграммы Ганта статического расписания, модифицированного путем прерывания выполнения заданий на обработку данных ДЗЗ с $d_i = 0$ поступившими заданиями с высоким приоритетом (массивы 8,9,10, моменты времени $d_8 = 100$ с, $d_9 = 200$ с, $d_{10} = 300$ с)

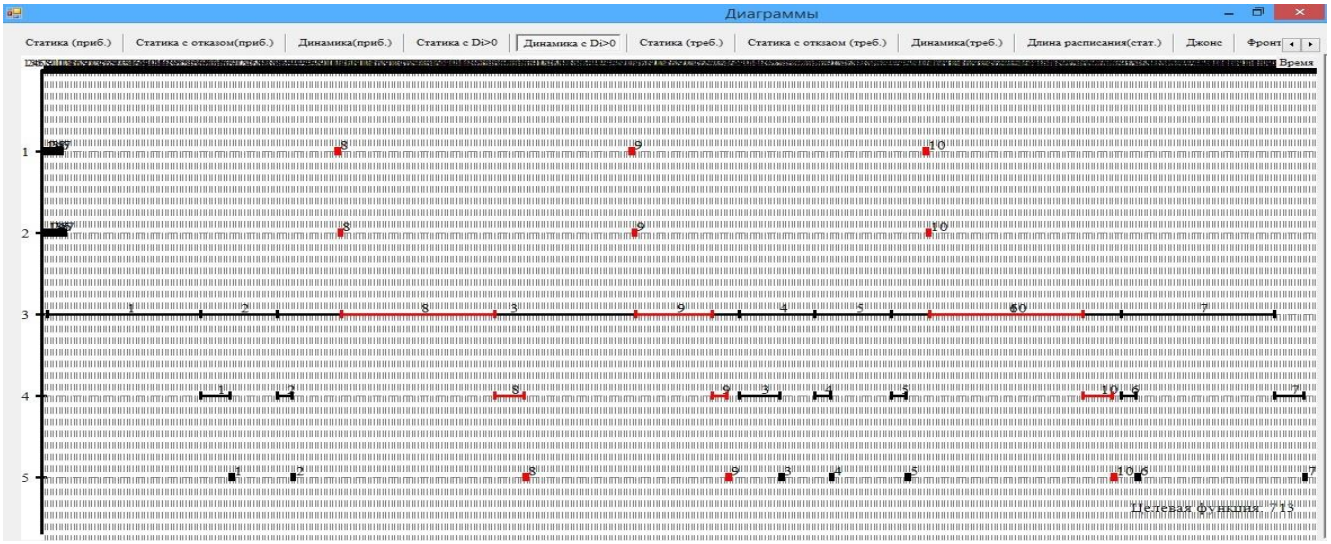


Рисунок П3.9.– Диаграммы Ганта динамического расписания, сформированного с учетом поступления в КС заданий на обработку данных с высоким приоритетом с $d_i > 0$ (массивы 8,9,10, моменты времени $d_8 = 100$ с, $d_9 = 200$ с, $d_{10} = 300$ с)

Проведенные исследования метода построения динамических расписаний процесса выполнения заданий на обработку данных ДЗЗ в КС показали его работоспособность при различных значениях входных параметров.

П3.3.Построение расписаний процессов выполнения пакетов заданий на обработку данных дистанционного зондирования Земли при определении характеристик негативных природных явлений и техногенных воздействия на ОС

Обработка единичных данных обеспечивает получение результатов, позволяющих идентифицировать наличие НПЯ и ТВ на ОС на земной поверхности в областях (полигонах), задаваемых пользователями. После того, как идентифицировано наличие НПЯ и ТВ на ОС на земной поверхности в этих полигонах, необходимо определить их характеристики. Для этого в системе обработки данных ДЗЗ реализуется переход от полигонов произвольных размеров к областям стандартных размеров, которые заданы в системе и в максимальной степени соответствуют размерам обнаруженных на поверхности НПЯ и ТВ на ОС. В том случае, если размеры однотипных НПЯ и ТВ на ОС соответствуют областям одинаковых размеров, идентификация их характеристик обеспечивается обработкой данных ДЗЗ по одному алгоритму, тогда вычислительные действия с этими данными ДЗЗ требуется выполнить в составе ПЗ. Выполнение одного задания по обработке данных ДЗЗ обеспечивает определение одной из характеристик НПЯ или ТВ на ОС, идентифицированных на земной поверхности, в области стандартного размера. Типизация данных ДЗЗ (заданий на обработку данных) при определении характеристик НПЯ и ТВ на ОС осуществляется как по виду ИСЗ, от которого эти данные получены, так и по размеру области, в которой определяются характеристики явлений либо воздействий.

Так как болезни лесных насаждений фиксируются в области большего размера, масштабы этих явлений являются более значительными, потому для определения характеристик этого НПЯ используются данные ДЗЗ от ИСЗ Modis для областей стандартных размеров, заданных в системе. Для идентификации характеристик мезомасштабных явлений (эрозийные процессы, свалки отходов, разливы нефтепродуктов) применены данные ДЗЗ от ИСЗ Landsat 8.

Определение характеристик НПЯ типа болезней лесных насаждений осуществляется на основе анализа степени их угнетения, определяемой с использованием данных ДЗЗ из каналов 16-12-7 ИСЗ Modis. Определение степени угнетения растительности осуществляется для области заданного стандартного размера, который соответствует этому НПЯ. Для получения характеристик одного НПЯ типа болезней лесных насаждений выполняется одно задание на обработку данных ДЗЗ в рассматриваемой области.

Определение размера и контура ТВ на ОС типа свалок промышленных, бытовых и строительных отходов осуществляется на основе анализа изображений поверхности в искусственно сгенерированных цветах, формируемых на основе значений отражательной способности, полученных в каналах 4-3-2 ИСЗ Landsat 8 (цвет участка поверхности, на котором фиксируется ТВ на ОС данного вида – белый, светло- серый с белыми или светло-желтыми вкраплениями,

светло-желтый, светло-голубой (серый)). Третья характеристика– степень угнетения растительности вокруг ТВ на ОС– определяется либо на основе значений отражательной способности в каналах 7-5-3 ИСЗ Landsat 8 (здоровая растительность ярко-зеленая, угнетенная растительность – коричневая и желтая), либо на основе данных из каналов 3–5 ИСЗ Landsat 8, позволяющих фиксировать степень угнетения растительности по коэффициенту NDVI.

Определение размера и контура НПЯ типа эрозийных процессов земной поверхности осуществляется на основе анализа изображений поверхности в искусственно сгенерированных цветах, формируемых на основе значений отражательной способности, полученных в каналах 4-3-2 ИСЗ Landsat 8 (открытая почва – светлые оттенки (светло-коричневый, желтый цвета)).

Определение размера и контура ТВ на ОС типа разлива нефтепродуктов осуществляется на основе анализа изображений поверхности в искусственно сгенерированных цветах, формируемых на основе значений отражательной способности, полученных в каналах 4-3-2 ИСЗ Landsat 8, путем идентификации угнетения окружающей растительности.

Для идентификации характеристик одного НПЯ типа болезней лесных насаждений требуется выполнить одно задание на обработку данных ДЗЗ, полученных в каналах 16-12-7 ИСЗ Modis. Для идентификации характеристик одного ТВ на ОС типа свалок промышленных, бытовых и строительных отходов требуется выполнить два задания на обработку данных ДЗЗ, полученных в каналах 4-3-2 и 7-5-3 ИСЗ Landsat 8. Для идентификации характеристик одного НПЯ типа эрозийных процессов земной поверхности требуется выполнить одно задание на обработку данных ДЗЗ, полученных в каналах 4-3-2 ИСЗ Landsat 8. Для идентификации характеристик одного ТВ на ОС типа разливов нефтепродуктов на земной поверхности требуется выполнить одно задание на обработку данных ДЗЗ, полученных в каналах 4-3-2 ИСЗ Landsat 8.

В качестве исходных данных для построения расписаний определены параметры массивы, обработка которых позволяет идентифицировать характеристики НПЯ и ТВ:

– задание 1 – три массива данных ДЗЗ Modis $100\times100=10^4$ элементов (для НПЯ типа болезней лесных насаждений);

– задание 2 – три массива данных ДЗЗ ИСЗ Landsat 8 $100\times100= 10^4$ элементов (для НПЯ типа эрозийных процессов земной поверхности);

– задание 3 – три массива данных ДЗЗ ИСЗ Landsat 8 $100\times150= 1.5*10^4$ элементов (для ТВ на ОС типа свалок промышленных и бытовых отходов);

– задание 4 – три массива данных ДЗЗ ИСЗ Landsat 8 $150\times100= 1.5*10^4$ элементов (для ТВ на ОС типа разливов нефтепродуктов на земной поверхности).

. В соответствии с исходными данными для построения расписаний временная сложность операций сохранения данных на постоянных носителях (1 этап– сохранение сцены, состоящей из 36 наборов данных для каналов ИСЗ Modis, либо сохранение сцены из 11 каналов ИСЗ Lav-

dsat 8) и формирования массивов значений отраженной солнечной яркости по значениям степеней градации этого параметра, переданным от центров хранения и предоставления данных ДЗЗ (2 этап) составит:

– 1 этап: задание 1 – $36*10^4$ операций; задание 2 – $11*10^4$ операций; задание 3 – $16.5*10^4$ операций; задание 4 – $16.5*10^4$ операций;

– 2 этап: задание 1 – $33.12*10^4$ операций; задание 2 – $33.12*10^4$ операций; задание 3 – $49.7*10^4$ операций; задание 4 – $49.7*10^4$ операций.

Для реализации кластеризации с использованием метода ISODATA введены параметры, используемые при построении расписаний: количество кластеров $K=7$, количество пар кластеров, которые могут быть слиты вместе при реализации процедуры кластеризации $L=2$.

В соответствии с исходными данными для построения расписаний временная сложность кластеризации отсчетов для каждого массива составит (при условии, что программой выполнено две итерации– первая, связанная с разделением кластеров, вторая, связанная с слиянием кластеров): задание 1 – $5281*10^4$ операций; задание 2 – $5281*10^4$ операций; задание 3 – $7921*10^4$ операций; задание 4 – $7921*10^4$ операций.

В соответствии с исходными данными для построения расписаний временная сложность процедуры вычисления значений искусственно сгенерированных цветов, соответствующих состоянию поверхности (4 этап) составит: задание 1 – $900*10^4$ операций; задание 2 – $900*10^4$ операций; задание 3 – $1350*10^4$ операций; задание 4 – $1350*10^4$ операций.

Последующее сохранение результатов обработки на 5 этапе (сохраняются массивы значений вегетационных индексов либо кодов естественных цветов) предполагает следующую временную сложность: 1 задание - 10^4 операций; 2 задание –10^4 операций; 3 задание – $1.5*10^4$ операций; 4 задание– $1.5*10^4$ операций.

В качестве характеристики быстродействия приборов КС задана величина 10^6 операций в секунду. В соответствии с этим значением длительности выполнения операций на этапах (приборах) обработки данных определены следующим образом:

– 1 этап: задание 1 – 0.36 с; задание 2 – 0.36 с; задание 3 – 0.17 с; задание 4 – 0.17 с;

– 2 этап: задание 1 – 0.33 с; задание 2 – 0.33 с; задание 3– 0.49 с; задание 4 – 0.49 с;

– 3 этап: задание 1 – 52 с; задание 2 – 52 с; задание 3 – 79 с; задание 4 – 79 с;

– 4 этап: задание 1 – 9 с; задание 2 – 9 с; задание 3 – 13.5 с; задание 4 – 13.5 с;

– 5 этап: задание 1 – 0.01 с; задание 2 – 0.01 с; задание 3 – 0.015 с; задание 4 – 0.015 с.

В силу того, что ограничения на объемы памяти отсутствуют, тогда все программы, реализующие обработку данных находятся в памяти в готовности к активизации. Тогда переопределение вида работ на приборе предполагает перезапись результатов обработки данных, полученных при выполнении задания, с этого устройства на последующее устройство. Выполнение

задания, реализующего обработку определенного количества массивов данных на приборе, завершается перезаписью этих массивов из памяти этого прибора в память последующего прибора. Через SN обозначено количество операций, которое необходимо реализовать для записи S массивов данных из памяти предшествующего прибора (после окончания выполнения задания по обработке данных на нем) в память последующего прибора с целью реализации следующего этапа выполнения задания. Переопределение вида работ на приборах КС для выполнения *i*-ых заданий (при $i = \overline{1,2}$) связано с выполнением $3*10^4$ операций перезаписи данных из памяти предшествующего прибора (на котором выполнение задания закончено) в память последующего прибора. Переопределение вида работ на приборах КС для выполнения *i*-ых заданий (при $i = \overline{3,4}$) связано с выполнением $4.5*10^4$ операций перезаписи данных из памяти предшествующего прибора (на котором выполнение задания обработки данных закончено) в память последующего прибора. С учетом производительности приборов КС, равной 10^6 операций в секунду, матрица длительностей переналадок (переопределения видов работ на приборах) получена в следующем виде:

$$T^l = \begin{vmatrix} 0.03 & 0.03 & 0.03 & 0.03 \\ 0.03 & 0.03 & 0.03 & 0.03 \\ 0.045 & 0.045 & 0.045 & 0.045 \\ 0.045 & 0.045 & 0.045 & 0.045 \end{vmatrix},$$

при $l = \overline{1,5}$. Количество заданий n^i ($i = \overline{1,4}$) каждого типа задано равным 12 ($n^i = 12$).

Решение *[M,A]* получено в следующем виде:

$$M = \begin{vmatrix} 2 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \end{vmatrix}; \quad A = \begin{vmatrix} 8 & 4 \\ 6 & 6 \\ 6 & 6 \\ 7 & 5 \\ 8 & 4 \\ 8 & 4 \end{vmatrix}.$$

Матрицы *P* и *R* получены в следующем виде:

$$P = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{vmatrix}; \quad R = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 0 \\ 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 6 & 0 & 0 & 0 & 6 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 \\ 0 & 0 & 0 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 \end{vmatrix}.$$

В результате сформировано решение, в соответствии с которым реализуется выполнение ПЗ на обработку данных ДЗЗ в КС. Выполненные исследования метода построения расписаний выполнения заданий на обработку данных ДЗЗ в составе пакетов показали его работоспособность при различных значениях входных параметров.

П3.4. Построение расписаний процессов выполнения пакетов заданий на обработку данных дистанционного зондирования Земли при определении условий распространения негативных природных явлений и техногенных воздействий на ОС

С целью идентификации условий распространения НПЯ и ТВ на ОС реализуется обработка массивов данных разных типов, из результатов действий с которыми формируются комплекты, соответствующие этим явлениям или техногенным воздействиям. Каждый тип комплектов соответствует определенному типу НПЯ или ТВ на ОС (болезни лесных насаждений и размножение насекомых фитофагов, разливы нефтепродуктов, свалки промышленных, бытовых отходов и так далее) Каждый из сформированных комплектов результатов соотносится строго с одним НПЯ либо ТВ на ОС определенного типа. Всего рассматривается $g^{ком}$ типов комплектов (то есть $g^{ком}$ комплектов результатов соответствуют видам НПЯ и ТВ на ОС, каждый тип комплекта– своему виду НПЯ либо ТВ на ОС). Также одновременно определяются $n_g^{ком}$ условий развития каждого из $n_g^{ком}$ НПЯ и ТВ на ОС.

В случае обнаружения болезней лесных насаждений либо размножения насекомых фитофагов условия развития этих явлений идентифицируются с использованием данных ДЗЗ из следующих каналов ИСЗ Modis:

– тип и состав лесных насаждений (хвойные, лиственные, смешанные с преобладанием хвойных, смешанные с преобладанием лиственных и т.д.) – каналы 16 -13-12;

– степень угнетения лесных насаждений (здоровая, слабо угнетены, сильно угнетенная) – каналы 7 -16-12;

– влагосодержание растительности – каналы 7-5.

В случае обнаружения эрозии почвы условия развития этого НПЯ идентифицируются с использованием данных ДЗЗ из следующих каналов ИСЗ Landsat 8:

– почвозащитные свойства растительности (определяются на основе вида растительности на поверхности) – каналы 5-4-3;

– состояние растительности (характеризует состояние почвы) – каналы 7-5-3;

– влагосодержание почвы (характеризуется влагосодержанием растений)– каналы 6–5.

В случае обнаружения механических воздействий на почву (свалки бытовых, промышленных, строительных отходов) условия развития этого ТВ на ОС идентифицируются с использованием данных ДЗЗ из следующих каналов ИСЗ Landsat 8:

– тип отходов– каналы 4–3-2;

– тип растительности и ее состояние в районе свалки – каналы 5-4-3;

– влагосодержание растительности – каналы 6–5.

В случае обнаружения загрязнения земной поверхности разлившимися нефтепродуктами условия развития этого ТВ на ОС идентифицируются с использованием данных ДЗЗ из следующих каналов ИСЗ Landsat 8:

– степень деградации почвы (по состоянию почвенного покрова) – каналы 7 -5-3;

– тип почвы в месте разлива нефтепродуктов (идентифицируется по типу растительности и ее состоянии в районе разлива нефтепродуктов (травянистая, кустарниковая растительность)) – каналы каналы 5-4-3.

Таким образом, для идентификации условий распространения болезней лесных насаждений (одного НПЯ данного типа) требуется выполнения трех заданий по обработки массивов значений отражательной способности (в первом и втором заданиях – по 3 массива значений, в третьем задании – 2 массива значений). Тогда комплект результатов обработки данных ДЗЗ от ИСЗ Modis соответствует трем условиям развития (распространения) одного НПЯ типа болезней лесных насаждений. Для идентификации условий распространения НПЯ типа эрозии почвенного покрова необходимо выполнить 3 задания по обработке массивов данных ДЗЗ: в первом и втором задании обрабатываются по 3 массива, в третьем задании обрабатывается два массива. Тогда комплект результатов обработки данных ДЗЗ от ИСЗ Landsat 8 соответствует трем условиям развития (распространения) одного НПЯ типа эрозии почвенного покрова. Для идентификации условий распространения ТВ на ОС типа свалок промышленных, бытовых и строительных отходов необходимо выполнить 3 задания по обработке массивов данных ДЗЗ: в первом и втором задании обрабатываются по 3 массива, в третьем задании обрабатывается два массива. Тогда комплект результатов обработки данных ДЗЗ ИСЗ Landsat 8 соответствует трем условиям развития (распространения) одного ТВ на ОС типа свалок промышленных, бытовых и строительных отходов. Для идентификации условий распространения ТВ на ОС типа разливов нефтепродуктов необходимо выполнить 2 задания по обработке массивов данных ДЗЗ: в первом и втором задании обрабатываются по 3 массива. Тогда комплект результатов обработки данных ДЗЗ от ИСЗ Landsat 8 соответствует двум условиям развития одного ТВ на ОС типа разливов нефтепродуктов.

Построение расписаний процессов выполнения заданий на обработку данных ДЗЗ реализовано в предположении, что определяются условия распространения двух видов НПЯ – болезней лесных насаждений и процесса эрозии почвы. Параметрами задачи являются:

– количество типов заданий *n=6* (три задания на обработку данных ДЗЗ ИСЗ Modis, три задания на обработку данных ДЗЗ Landsat 8);

– типы заданий $i=\overline{1,3}$ соответствуют обработке данных ИСЗ MODIS, типы заданий $i=\overline{4,6}$ соответствуют обработке данных ИСЗ Landsat 8;

– количество комплектов $g^{ком}=2$;

– матрица составов комплектов имеет вид:

$$W=\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

– количество комплектов каждого типа равно 8 ($n_g^{ком}=8$, $g=\overline{1,g^{ком}}$).

В качестве исходных данных для построения расписаний заданы размерности массивов (количество элементов в каждом из них), тип ИСЗ, с которого получены значения отражательной способности, номер задания *i,* при выполнении которого реализуется обработка этих массивов:

– задание 1 – три массива данных ДЗЗ ИСЗ Modis 100×100=10^4 элементов;

– задание 2– три массива данных ДЗЗ ИСЗ Modis 100×100=10^4 элементов;

– задание 3– три массива данных ДЗЗ ИСЗ Modis 100×100=10^4 элементов;

– задание 4 – три массива данных ДЗЗ ИСЗ Landsat 8 100×150= 1.5*10^4 элементов;

– задание 5 – три массива данных ДЗЗ ИСЗ Landsat 8 100×150= 1.5*10^4 элементов;

– задание 6 – три массива данных ДЗЗ ИСЗ Landsat 8 100×150= 1.5*10^4 элементов.

Из результатов выполнения заданий 1,2,3 формируются комплекты *(g=1)*-го типа (болезни лесных насаждений). Из результатов выполнения заданий 4,5,6 формируются комплекты *(g=2)*-го типа (эрозия почвенного покрова). В соответствии с полученными выше выражениями для расчета временной сложности выполнения ЕЗ на обработку данных в КС, определено количество операций, выполняемых приборами с массивами значений отражательной способности поверхности.

В соответствии с исходными данными для построения расписаний временная сложность операций сохранения данных на постоянных носителях (1 этап– сохранение сцены, состоящей

из 36 наборов данных для каждого канала ИСЗ Modis, либо сохранение сцены из 11 каналов ИСЗ Lavdsat 8) и формирования массивов значений отраженной солнечной яркости по значениям степеней градации этого параметра, переданным от центров хранения и предоставления данных ДЗЗ (2 этап) составит:

– 1 этап: задание 1 – $36*10^4$ операций; задание 2 – $36*10^4$ операций; задание 3 – $36*10^4$ операций; задание 4 – $16.5*10^4$ операций; задание 5 – $16.5*10^4$ операций; задание 6 – $16.5*10^4$ операций;

– 2 этап: задание 1 – $33.12*10^4$ операций; задание 2 – $33.12*10^4$ операций; задание 3 – $33.12*10^4$ операций; задание 4 – $49.62*10^4$ операций; задание 5– $49.62*10^4$ операций; задание 6 – $49.62*10^4$ операций.

Для реализации кластеризации с использованием метода ISODATA введены параметры, используемые при построении расписаний: количество кластеров $K=7$, количество пар кластеров, которые могут быть слиты вместе при реализации процедуры кластеризации $L=2$.

В соответствии с исходными данными для построения расписаний временная сложность кластеризации отсчетов для каждого массива составит (при условии, что программой выполнено две итерации– первая, связанная с разделением кластеров, вторая, связанная с слиянием кластеров): задание 1 – $5281*10^4$ операций; задание 2 – $5281*10^4$ операций; задание 3 – $5281*10^4$ операций; задание 4 – $7921*10^4$ операций; задание 5 – $7921*10^4$ операций; задание 6 – $7921*10^4$ операций.

В соответствии с исходными данными временная сложность процедуры вычисления значений вегетационных индексов для каждой точки области на земной поверхности, средних значений вегетационных индексов для сформированных кластеров (4 этап) составит: задание 1 – $900*10^4$ операций; задание 2 – $900*10^4$ операций; задание 3 – $900*10^4$ операций; задание 4 – $1350*10^4$ операций; задание 5 – $1350*10^4$ операций; задание 6 – $1350*10^4$ операций.

Последующее сохранение результатов обработки на 5 этапе (сохраняются массивы значений вегетационных индексов либо кодов естественных цветов) предполагает следующую временную сложность: 1 задание - 10^4 операций; 2 задание –10^4 операций; 3 задание –10^4 операций; 4 задание – $1.5*10^4$ операций; 5 задание – $1.5*10^4$ операций; 6 задание– $1.5*10^4$ операций. В качестве характеристики быстродействия приборов КС задана величина 10^6 операций в секунду. В соответствии с этим значением длительности выполнения операций на этапах (приборах) их обработки определены следующим образом:

– 1 этап: задание 1 – 0.36 с; задание 2 – 0.36 с; задание 3 – 0.36 с; задание 4 – 0.17 с; задание 5 – 0.17 с; задание 6 – 0.17 с;

– 2 этап: задание 1 – 0.33 с; задание 2 – 0.33 с; задание 3 – 0.33 с; задание 4 – 0.49 с; задание 5– 0.49 с; задание 6 – 0.49 с;

– 3 этап: задание 1 – 52 с; задание 2 – 52 с; задание 3 – 52с; задание 4 – 79 с; задание 5 – 79 с; задание 6 – 79 с;

– 4 этап: – задание 1 – 9 с; задание 2 – 9 с; задание 3 – 9 с; задание 4 – 13.5 с; задание 5 – 13.5 с; задание 6 – 13.5 с;

. – 5 этап: – задание 1 – 0.01 с; задание 2 – 0.01 с; задание 3 – 0.01 с; задание 4 – 0.015 с; задание 5 – 0.015 с; задание 6 – 0.015 с; массив 7 – 0.015 с.

В силу того, что ограничения на объемы памяти отсутствуют, тогда все программы, реализующие обработку данных находятся в памяти в готовности к активизации. Переопределение вида работ на приборе предполагает перезапись результатов обработки данных, полученных при выполнении задания, с этого устройства на последующее устройство. Выполнение задания, реализующего обработку определенного количества массивов данных на приборе, завершается перезаписью этих массивов из памяти этого прибора в память последующего прибора. Через SN обозначено количество операций, которое необходимо реализовать для записи S массивов данных из памяти предшествующего прибора (после окончания выполнения задания по обработке данных на нем) в память последующего прибора с целью реализации следующего этапа выполнения задания. Переопределение вида работ на приборах КС для выполнения *i*-ых заданий (при $i=\overline{1,3}$) связано с выполнением $3*10^4$ операций перезаписи данных из памяти предшествующего прибора в память последующего прибора. Переопределение вида работ на приборах КС для выполнения *i*-ых заданий (при $i=\overline{4,6}$) связано с выполнением $4.5*10^4$ операций перезаписи данных из памяти предшествующего прибора в память последующего прибора. С учетом производительности приборов КС, равной 10^6 операций в секунду, матрица длительностей переналадок (переопределения видов работ на приборах) получена в следующем виде:

$$T^l = \begin{vmatrix} 0.03 & 0.03 & 0.03 & 0.03 & 0.03 & 0.03 \\ 0.03 & 0.03 & 0.03 & 0.03 & 0.03 & 0.03 \\ 0.03 & 0.03 & 0.03 & 0.03 & 0.03 & 0.03 \\ 0.045 & 0.045 & 0.045 & 0.045 & 0.045 & 0.045 \\ 0.045 & 0.045 & 0.045 & 0.045 & 0.045 & 0.045 \\ 0.045 & 0.045 & 0.045 & 0.045 & 0.045 & 0.045 \end{vmatrix},$$

при $l=\overline{1,5}$.

Ограничение на количество интервалов времени функционирования КС, выделенных для выполнения рассматриваемых заданий, задано в виде: $t^z = 600$ ($z=\overline{1,4}$). В результате формируются решения по составам ПЗ по обработке массивов данных ДЗЗ от соответствующих ИСЗ, составам групп ПЗ, выполняемых в течение временных интервалов заданной длительности, расписаниям выполнения ПЗ, включенных в группы.

Ниже представлены решения по составам ПЗ и составам групп ПЗ, являющиеся локально оптимальными с точки зрения введенных в рассмотрение критериев на уровнях иерархической игры. Решение по составам ПЗ имеет вид:

– 1 тип – (5, 3) – пакеты из 5 и 3 заданий 1-го типа;

– 2 тип – (6,2)– пакеты из 6 и 2 заданий 2-го типа;

– 3 тип – (5,3) – пакеты из 5 и 3 заданий 3-го типа;

– 4 тип – (4,4) – пакеты из 4 и 4 заданий 4-го типа;

– 5 тип – (4,4)– пакеты из 4 и 4 заданий 5-го типа;

– 6 тип – (4,4) – пакеты из 5 и 3 заданий 6-го типа.

Решение по составам групп ПЗ имеет вид:

– состав группы 1: 5–1, 6--2 (пакет из 5 заданий 1-го типа, пакет из 6 заданий 2-го типа); время окончания обработки данных в КС – 589 с (из заданных 600 с));

– состав группы 2: 4–4, 5--3 (пакет из 4 заданий 4-го типа, пакет из 5 заданий 3-го типа); время окончания обработки данных в КС – 593 с (из заданных 600 с));

– состав группы 3: 4–5, 3–1, 2–2 (пакет из 4 заданий 5-го типа, пакет из 3 заданий 1-го типа, пакет из 2 заданий 2-го типа); время окончания обработки данных в КС – 595 с (из заданных 600 с));

– состав группы 4: 4–6, 3--3 (пакет из 4 заданий 6-го типа, пакет из 3 заданий 3-го типа); время окончания обработки данных в КС – 489 с (из заданных 600 с));

– не включенные в состав групп пакеты: 4–4, 4–5, 4–6 (пакет из 4 заданий 4-го типа, пакет из 4 заданий 5-го типа, пакет из 4-х заданий 6-го типа).

Всего в соответствии с решением обработаны массивы данных ДЗЗ, из результатов которых сформировано 12 комплектов (при заданном их количестве 16)– значение критерия оптимальности решений на первом уровне по составам ПЗ.

Также реализовано построение расписаний выполнения заданий на обработку данных ДЗЗ в КС с целью определяются условий распространения трех видов НПЯ и ТВ на ОС – процесса эрозии почвы, механического воздействия на земную поверхность, разлива нефтепродуктов на земной поверхности. Параметрами задачи построения расписаний являются:

– количество типов заданий $n=8$ (три задания на обработку данных ДЗЗ ИСЗ Landsat 8 для НПЯ эрозии почвы; три задания на обработку данных ДЗЗ Landsat 8 для свалок промышленных, бытовых и строительных отходов; два задания на обработку данных ДЗЗ Landsat 8 для разлива нефтепродуктов);

– типы заданий $i=\overline{1,3}$ соответствуют обработке данных ИСЗ Landsat 8 для НПЯ эрозии почвы, типы заданий $i=\overline{4,6}$ соответствуют обработке данных ИСЗ Landsat 8 для свалок про-

мышленных, бытовых и строительных отходов; типы заданий $i=\overline{7,8}$ соответствуют обработке данных ИСЗ Landsat 8 для разлива нефтепродуктов;

– количество комплектов $g^{ком}=3$ (рассматриваются НПЯ и ТВ на ОС трех видов);

– матрица составов комплектов имеет вид:

$$W=\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

– количество комплектов каждого типа равно $n_g^{ком}=8$ ($g=\overline{1,g^{ком}}$).

В качестве исходных данных для построения расписаний заданы размеры массивов (количество элементов в каждом из них), тип ИСЗ, с которого получены значения отражательной способности, и номер задания *i,* при выполнении которого реализуется обработка этих массивов:

– задание 1 – три массива данных ДЗЗ ИСЗ Landsat 8 $100\times100=10^4$ элементов;

– задание 2– три массива данных ДЗЗ ИСЗ Landsat 8 $100\times100=10^4$ элементов;

– задание 3– два массива данных ДЗЗ ИСЗ Landsat 8 $100\times100=10^4$ элементов;

– задание 4 – три массива данных ДЗЗ ИСЗ Landsat 8 $100\times150=1.5*10^4$ элементов;

– задание 5 – три массива данных ДЗЗ ИСЗ Landsat 8 $100\times150=1.5*10^4$ элементов;

– задание 6 – два массива данных ДЗЗ ИСЗ Landsat 8 $100\times150=1.5*10^4$ элементов;

– задание 7 – три массива данных ДЗЗ ИСЗ Landsat 8 $100\times50=0.5*10^4$ элементов;

– задание 8 – два массива данных ДЗЗ ИСЗ Landsat 8 $100\times50=0.5*10^4$ элементов.

Из результатов выполнения заданий 1,2,3 формируются комплекты *(g=1)*-го типа (НПЯ эрозии почвы). Из результатов выполнения заданий 4,5,6 формируются комплекты *(g=2)*-го типа (механическое воздействие на почвы в виде свалок промышленных, бытовых и строительных отходов). Из результатов выполнения заданий 7,8 формируются комплекты *(g=3)*-го типа (разливы нефтепродуктов на земной поверхности).

В соответствии с полученными выше выражениями для расчета временной сложности обработки данных в КС, определено количество операций, выполняемых приборами КС с массивами значений отражательной способности поверхности заданных размеров.

В соответствии с исходными данными для построения расписаний временная сложность операций сохранения данных на постоянных носителях (1 этап– сохранение сцены из 11 каналов ИСЗ Lavdsat 8) и формирования массивов значений отраженной солнечной яркости по значениям степеней градации этого параметра, переданным от центров хранения и предоставления данных ДЗЗ (2 этап) составит:

– 1 этап: задание 1 – $11*10^4$ операций; задание 2 – $11*10^4$ операций; задание 3 – $11*10^4$ операций; задание 4 – $16.5*10^4$ операций; задание 5 – $16.5*10^4$ операций; задание 6 – $16.5*10^4$ операций; задание 7 – $5.5*10^4$ операций; задание 6 – $5.5*10^4$ операций;

– 2 этап: задание 1 – $33.12*10^4$ операций; задание 2 – $33.12*10^4$ операций; задание 3 – $33.12*10^4$ операций; задание 4 – $49.68*10^4$ операций; задание 5– $49.68*10^4$ операций; задание 6 – $49.68*10^4$ операций; задание 7 – $16.56*10^4$ операций; задание 6 – $16.56*10^4$ операций.

.Для реализации кластеризации с использованием метода ISODATA введены параметры, используемые при построении расписаний: количество кластеров $K=7$, количество пар кластеров, которые могут быть слиты вместе при реализации процедуры кластеризации $L=2$.

В соответствии с исходными данными для построения расписаний временная сложность кластеризации отсчетов для каждого массива составит (при условии, что программой выполнено две итерации– первая, связанная с разделением кластеров, вторая, связанная с слиянием кластеров): задание 1 – $5281*10^4$ операций; задание 2 – $5281*10^4$ операций; задание 3 – $5281*10^4$ операций; задание 4 – $7921*10^4$ операций; задание 5 – $7921*10^4$ операций; задание 6 – $7921*10^4$ операций; задание 7 – $2640*10^4$ операций; задание 8 – $2640*10^4$ операций.

В соответствии с исходными данными для построения расписаний временная сложность процедуры вычисления значений вегетационных индексов и значений естественных цветов для каждой точки области на земной поверхности, средних значений вегетационных индексов и цветов для сформированных кластеров (4 этап) составит: задание 1 – $900*10^4$ операций; задание 2 – $900*10^4$ операций; задание 3 – $900*10^4$ операций; задание 4 – $1350*10^4$ операций; задание 5 – $1350*10^4$ операций; задание 6 – $1350*10^4$ операций; задание 7 – $450*10^4$ операций; задание 8 – $450*10^4$ операций

Последующее сохранение результатов обработки на 5 этапе (сохраняются массивы значений вегетационных индексов либо кодов естественных цветов) предполагает следующую временную сложность: 1 задание - 10^4 операций; 2 задание –10^4 операций; 3 задание –10^4 операций; 4 задание – $1.5*10^4$ операций; 5 задание – $1.5*10^4$ операций; 6 задание– $1.5*10^4$ операций; задание 7 – $0.5*10^4$ операций; задание 8 – $0.5*10^4$ операций.

В качестве характеристики быстродействия приборов многостадийной системы задана величина 10^6 операций в секунду. В соответствии с этим значением длительности выполнения операций на этапах (приборах) их обработки определены следующим образом:

– 1 этап: задание 1 – 0.11 с; задание 2 – 0.11 с; задание 3 – 0.11 с; задание 4 – 0.17 с; задание 5 – 0.17 с; задание 6 – 0.17 с; задание 7 – 0.055 с; задание 6 – 0.055 с;

– 2 этап: задание 1 – 0.33 с; задание 2 – 0.33 с; задание 3 – 0.33 с; задание 4 – 0.49 с; задание 5– 0.49 с; задание 6 – 0.49 с;

– 3 этап: задание 1 – 52 с; задание 2 – 52 с; задание 3 – 52 с; задание 4 – 79 с; задание 5 – 79 с; задание 6 – 79 с; задание 7 – 26 с; задание 8 – 26 с;

– 4 этап: задание 1 – 9 с; задание 2 – 9 с; задание 3 – 9 с; задание 4 – 13.5 с; задание 5 – 13.5 с; задание 6 – 13.5 с; задание 7 – 4.5 с; задание 8 – 4.5 с;

– 5 этап: задание 1 – 0.01 с; задание 2 – 0.01 с; задание 3 – 0.01 с; задание 4 – 0.015 с; задание 5 – 0.015 с; задание 6 – 0.015 с; массив 7 – 0.005 с; задание 8 – 0.05 с.

В силу того, что ограничения на объемы памяти отсутствуют, тогда все программы, реализующие обработку данных находятся в памяти в готовности к активизации. Тогда переопределение вида работ на приборе предполагает перезапись результатов обработки данных, полученных при выполнении задания, с этого устройства на последующее устройство. Выполнение задания, реализующего обработку определенного количества массивов данных на приборе, завершается перезаписью этих массивов из памяти этого прибора в память последующего прибора. Через SN обозначено количество операций, которое необходимо реализовать для записи S массивов данных из памяти предшествующего прибора (после окончания выполнения задания по обработке данных на нем) в память последующего прибора с целью реализации следующего этапа выполнения задания. Переопределение вида работ на приборах КС для выполнения *i*-ых заданий (при $i=\overline{1,2}$) связано с выполнением $3*10^4$ операций перезаписи данных из памяти предшествующего прибора (на котором выполнение задания закончено) в память последующего прибора (реализуется перезапись 3 массивов). Для задания *i=3* выполняются $2*10^4$ операций перезаписи данных из памяти предшествующего прибора (на котором выполнение задания закончено) в память последующего прибора (реализуется перезапись 2 массивов). Переопределение вида работ на приборах КС для выполнения *i*-ых заданий (при $i=\overline{4,5}$) связано с выполнением $4.5*10^4$ операций перезаписи данных из памяти предшествующего прибора (на котором выполнение задания обработки данных закончено) в память последующего прибора (реализуется запись 2 массивов в память последующего прибора). Для задания *i=6* выполняются $3*10^4$ операций перезаписи данных из памяти предшествующего прибора (на котором выполнение задания закончено) в память последующего прибора (реализуется перезапись 2 массивов). Переопределение вида работ на приборах КС для выполнения *i*-ых заданий (при $i=\overline{7,8}$) связано с выполнением $1.5*10^4$ операций перезаписи данных из памяти предшествующего прибора (на

котором выполнение задания обработки данных закончено) в память последующего прибора (реализуется запись 3 массивов в память последующего прибора).

С учетом производительности приборов КС, равной 10^6 операций в секунду, матрицы длительностей переналадок (переопределения видов работ на приборах) получена в следующем виде:

$$T^l = \begin{vmatrix} 0.03 & 0.03 & 0.03 & 0.03 & 0.03 & 0.03 & 0.03 & 0.03 \\ 0.03 & 0.03 & 0.03 & 0.03 & 0.03 & 0.03 & 0.03 & 0.03 \\ 0.02 & 0.02 & 0.02 & 0.02 & 0.02 & 0.02 & 0.02 & 0.02 \\ 0.05 & 0.05 & 0.05 & 0.05 & 0.05 & 0.05 & 0.05 & 0.05 \\ 0.05 & 0.05 & 0.05 & 0.05 & 0.05 & 0.05 & 0.05 & 0.05 \\ 0.03 & 0.03 & 0.03 & 0.03 & 0.03 & 0.03 & 0.03 & 0.03 \\ 0.02 & 0.02 & 0.02 & 0.02 & 0.02 & 0.02 & 0.02 & 0.02 \\ 0.02 & 0.02 & 0.02 & 0.02 & 0.02 & 0.02 & 0.02 & 0.02 \end{vmatrix},$$

при $l = \overline{1,5}$.

Ограничение на количество интервалов времени функционирования КС, выделенных для выполнения рассматриваемых заданий, задано в виде: $t^z = 600$ (при этом параметр Z (количество интервалов времени функционирования КС) принимал значения 4, 6). В результате построения расписаний сформированы решения по составам ПЗ на обработку массивов данных ДЗЗ от соответствующих ИСЗ, составам групп ПЗ, выполняемых в течение временных интервалов заданной длительности, расписаниям выполнения ПЗ, включенных в группы.

При $t^z = 600$ и $Z = 6$ получены решения следующего вида:

– решение по составам ПЗ:

– 1 тип – (5, 3) – пакеты из 5 и 3 заданий 1-го типа;

– 2 тип – (5,3)– пакеты из 5 и 3 заданий 2-го типа;

– 3 тип – (6,2) – пакеты из 6 и 2 заданий 3-го типа;

– 4 тип – (6,2) – пакеты из 6 и 2 заданий 4-го типа;

– 5 тип – (6,2)– пакеты из 6 и 2 заданий 5-го типа;

– 6 тип – (4,4) – пакеты из 4 и 4 заданий 6-го типа;

– 7 тип – (4,4) – пакеты из 4 и 4 заданий 7-го типа;

– 8 тип – (4,4) – пакеты из 4 и 4 заданий 8-го типа.

Решение по составам групп ПЗ имеет вид:

– состав группы 1: 5–1, 5–2, 2–7 (пакет из 5 заданий 1-го типа, пакет из 5 заданий 2-го типа, пакет из 2 заданий 7-го типа); время окончания обработки данных в КС – 586 с (из заданных 600 с));

– состав группы 2: 6–3, 2–3, 6–7 (пакет из 6 заданий 3-го типа, пакет из 2 заданий 3-го типа, пакет из 6 заданий 7-го типа); время окончания обработки данных в КС – 584 с (из заданных 600 с));

– состав группы 3: 6–4, 2–8 (пакет из 6 заданий 4-го типа, пакет из 2 заданий 8-го типа); время окончания обработки данных в КС – 538 с (из заданных 600 с))'

– состав группы 4: 6–5 (пакет из 6 заданий 5-го типа); время окончания обработки данных в КС – 494 с (из заданных 600 с));

– состав группы 5: 6–6 (пакет из 6 заданий 6-го типа); время окончания обработки данных в КС – 494 с (из заданных 600 с));

– состав группы 6: 3–1, 3–2, 6–8 (пакет из 3 заданий 1-го типа, пакет из 3 заданий 2-го типа, пакет из 6 заданий 8-го типа,); время окончания обработки данных – 494 с (из заданных 600 с));

– не включенные в состав групп пакеты: 2–4, 2–5, 2–6 (пакет из 2 заданий 4-го типа, пакет из 2 заданий 5-го типа, пакет из 2-х заданий 6-го типа).

Всего в соответствии с решением обработаны массивы данных ДЗЗ, из результатов которых сформировано 22 комплекта (при заданном их количестве 24).

При $t^z = 600$ и $Z = 4$ получены решения следующего вида:

– решение по составам ПЗ:

– 1 тип – (5, 3) – пакеты из 5 и 3 заданий 1-го типа;

– 2 тип – (5,3)– пакеты из 5 и 3 заданий 2-го типа;

– 3 тип – (5,3) – пакеты из 5 и 3 заданий 3-го типа;

– 4 тип – (4,4) – пакеты из 4 и 4 заданий 4-го типа;

– 5 тип – (4,4)– пакеты из 4 и 4 заданий 5-го типа;

– 6 тип – (4,4) – пакеты из 4 и 4 заданий 6-го типа;

– 7 тип – (6,2) – пакеты из 6 и 2 заданий 7-го типа;

– 8 тип – (6,2) – пакеты из 6 и 2 заданий 8-го типа.

Решение по составам групп ПЗ имеет вид:

– состав группы 1: 5–1, 5–2, 2–7 (пакет из 5 заданий 1-го типа, пакет из 5 заданий 2-го типа, пакет из 2 заданий 7-го типа); время окончания обработки данных в КС – 584 с (из заданных 600 с));

– состав группы 2: 4–4 5–3 (пакет из 4 заданий 4-го типа, пакет из 5 заданий 3-го типа); время окончания обработки данных в КС – 576 с (из заданных 600 с));

– состав группы 3: 4–5, 6–7, 2–8 (пакет из 4 заданий 5-го типа, пакет из 6 заданий 7-го типа, пакет из 2 заданий 8-го типа); время окончания обработки данных в КС – 524 с (из заданных 600 с)).

– состав группы 4: 4–6, 6–8 (пакет из 4 заданий 6-го типа, пакет из 6 заданий 8-го типа); время окончания обработки данных в КС – 534 с (из заданных 600 с));

– не включенные в состав групп пакеты: 3–1, 3–2, 3–3, 4–4, 4–5, 4–6, (пакет из 3 заданий 1-го типа, пакет из 3 заданий 2-го типа, пакет из 3-х заданий 3-го типа, пакет из 4-х заданий 4-го типа, пакет из 4-х заданий 5-го типа, пакет из 4-х заданий 6-го типа).

Всего в соответствии с решением обработаны массивы данных ДЗЗ, из результатов которых сформировано 17 комплекта (при заданном их количестве 24).

П3.5 Применение разработанных математических моделей и методов оптимизации при построении расписаний восстановления деталей узлов и агрегатов технологического и транспортного оборудования в конвейерных системах на специализированных ремонтных предприятиях

Современные специализированные ремонтные предприятия выполняют ремонт узлов и агрегатов транспортного и промышленного оборудования. Детали узлов и агрегатов в результате износа в процессе эксплуатации теряют свою работоспособность. Дефекты деталей узлов и агрегатов транспортного и технологического оборудования связаны с изменением их формы и размеров. В результате дефектации определяется возможность ремонта (восстановления) формы и размеров деталей. Возможность восстановления деталей связана с наличием у них остаточного ресурса, который может быть использован. Затраты на восстановление составляют 10-50% от стоимости деталей [290, 291]. Дефекты деталей узлов и агрегатов транспортного и технологического оборудования разбиты на группы [290, 291]: 1) износ цилиндрической наружной поверхности (задиры, риски, износ, овальность); 2) износ конической и сферической поверхностей; 3) износ шлицев; 4) износ пазов и канавок (нарушение каналов под шпонку); 5) износ поверхности под шкив; 6) износ и повреждение резьбы; 7) износ зубьев цилиндрических и конических шестерен. Износ цилиндрической поверхности составляет 52% [290, 291] от общего количества дефектов деталей. Поэтому восстановлению деталей цилиндрической формы уделяется большое внимание на специализированных ремонтных предприятиях.

В зависимости от видов дефектов определяются технологические процессы восстановления деталей (способы устранения дефектов). Организация технологических процессов восстановления деталей предусматривает упорядочивание операций в виде поточных (конвейерных) линий, каждое рабочее место в которых выполняет определенную технологическую операцию. Технологический процесс восстановления деталей цилиндрической формы предполагает: 1) удаление следов износа и создание микрорельефа путем предварительной механической обра-

ботки; 2) реализацию операций восстановления (наплавка, сварка, металлизация и т.д.); 3) токарную механическую обработку после восстановления; 4) шлифование.

По окончанию ремонта возможно формирование комплектов деталей разных типов, прошедших восстановление, входящих в состав одного устройства или агрегата.

Выполнение ремонта на специализированных предприятиях предполагает использование специального оборудования, реализующего автоматическое или автоматизированное восстановление размеров и формы цилиндрических деталей после их износа (наплавочные автоматы, устанавливаемые на токарные станки общего назначения, либо специальные наплавочные станции со сменными кассетами с проволокой разных диаметров). К основным технологическим операциям, обеспечивающим восстановление деталей цилиндрической формы относятся: автоматическая электродуговая наплавка под слоем флюса; вибродуговая наплавка; металлизация (напыление расплавленного металла на поверхность деталей).

Операция наплавки применяется в 50% случаев восстановления деталей [290, 291]. Наиболее распространенными способами восстановления деталей цилиндрической формы являются автоматическая электродуговая наплавка под слоем флюса и вибродуговая наплавка.

Выполнение ремонта деталей цилиндрической формы обеспечивается объединением их в партии [290-292]. При объединении деталей в партии учитываются: 1) общность технологического способа устранения дефектов (разные дефекты устраняются одним способом); 2) общность дефектов восстанавливаемых деталей (одинаковые дефекты цилиндрических деталей устраняются путем реализации одинакового технологического процесса – маршрутная технология). В качестве способа группирования деталей в партии использована маршрутная технология восстановления деталей с однотипными дефектами.

Восстанавливаемые детали относятся к одному типу, если они имеют одинаковую форму и размеры, а также дефекты одинаковых видов, которые могут быть устранены посредством одного технологического процесса. Тогда в соответствии с маршрутной технологией реализуется восстановление деталей разных типов, обладающих одинаковыми видами дефектов.

Количество типов восстанавливаемых деталей и количество деталей каждого типа, с которыми реализуются действия в поточных системах на специализированных ремонтных предприятиях, достаточно велико. Это ограничивает применение методов целочисленного линейного программирования при построении расписаний восстановления партий деталей разных типов (для оптимизации составов партий деталей разных типов и расписаний их восстановления) в поточных системах. При значительной размерности задачи планирования (построения расписаний) ее решение не может быть получено известными методами. В связи с этим возникает необходимость в применении разработанных в диссертации математических моделей многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС (процессов восстановления партий деталей в по-

точных системах), численных методов оптимизации составов партий и расписаний реализации действий с ними для построения расписаний восстановления деталей разных типов.

Так как восстанавливаемые детали разных типов могут входить в состав одних и тех же узлов и агрегатов технологического и транспортного оборудования, то оптимизацию составов партий необходимо выполнять с учетом требования формирования комплектов. В тоже время построение расписаний многостадийных процессов восстановления деталей разных типов реализуется для ограниченных временных интервалов работы оборудования предприятия (планирование сменно-суточных заданий, либо заданий на восстановление в течение определенных интервалов времени). В связи с этим требуется решение задачи оптимизации составов партий, составов групп партий, восстанавливаемых в течение временных интервалов заданной длительности (смены), расписаний восстановления деталей из партий, включенных в группы. При этом требуется учет условия включения восстановленных деталей разных типов в состав одних и тех же узлов и агрегатов технологического и транспортного оборудования (условия формирования комплектов из результатов выполнения заданий в составе пакетов, включенных в их группы, действия с которыми реализуются в течение временных интервалов ограниченной длительности). Так как в настоящее время отсутствуют методы совместной оптимизации составов партий деталей, составов групп партий и расписаний выполнения партий, включенных в группы в КС, поэтому решение указанной задачи может быть получено только с использованием математических моделей процессов выполнения пакетов заданий и численных методов оптимизации решений, рассмотренных в работе. Применение рассмотренных в работе математических моделей и численных методов оптимизации решений позволяет увеличить количество деталей, восстанавливаемых в течение интервалов времени ограниченной длительности, а также увеличить количество узлов и агрегатов, в которые входят восстановленные детали, снизив тем самым сроки ремонта оборудования и повысив эффективность использования приборов КС.

При построении расписаний обработки партий деталей рассчитываются режимы их обработки и нормы времени выполнения операций. Типы деталей обозначены через i ($i=\overline{1,n}$), индексы приборов через l ($l=\overline{1,4}$). К параметрам операций предварительной токарной обработки, выполняемой на ($l=1$)-м приборе (продольное точение), относятся [290-292]:

– L_i – длина обрабатываемой поверхности детали i-го типа с учетом врезания и перебега ($i=\overline{1,n}$);

– l_i – длина обрабатываемой поверхности детали i-го типа по чертежу ($i=\overline{1,n}$);

– y_i – величина врезания и перебега для детали i-го типа ($i=\overline{1,n}$);

– D_i^1 – диаметры деталей *i*-ых типов перед токарной обработкой (продольное точение) ($i=\overline{1,n}$), d_i^1 – диаметры деталей *i*-ых типов после токарной обработки ($i=\overline{1,n}$);

– h_i^1 – припуск на обработку деталей *i*-ых типов на первом приборе ($i=\overline{1,n}$) (мм);

– g_i^1 – глубина резания для деталей *i*-ых типов на первом приборе ($i=\overline{1,n}$) (мм);

– k_i^1 – количество проходов для снятия припуска на обработку h_i^1 при глубине резания g_i^1 для деталей *i*-ых типов ($i=\overline{1,n}$);

– s_i^1 – подача режущего инструмента для деталей *i*-ых типов ($i=\overline{1,n}$) (мм/об);

– v_i^1 – скорость резания для деталей *i*-ых типов ($i=\overline{1,n}$) (м/ч);

– n_i^1 – число оборотов деталей *i*-ых типа в минуту ($i=\overline{1,n}$) (об/мин);

– t_i^{o1} – длительность основной токарной обработки деталей *i*-ых типов при продольном точении ($i=\overline{1,n}$) (мин);

– $t_i^{в1}$ – длительность вспомогательных операций токарной обработки деталей при продольном точении ($i=\overline{1,n}$) (мин).

Значение l_i является заданным (определяется по чертежу восстанавливаемой детали), значение y_i определяется по таблице [293, 294], значение L_i определяется выражением вида:

$$L_i = l_i + y_i . \qquad \text{(П3.5.1)}$$

Припуск на обработку h_i^1 определяется для заданных значений D_i^1 и d_i^1 по формуле [294]:

$$h_i^1 = \frac{D_i^1 - d_i^1}{2} . \qquad \text{(П3.5.2)}$$

Значение g_i^1 определяется для вычисленного значения h_i^1 и заданного количества проходов k_i^1 ($i=\overline{1,n}$): $g_i^1 = h_i^1 / k_i^1$. Подача режущего инструмента за один оборот детали *i*-го типа s_i^1 ($i=\overline{1,n}$), а также скорость резания v_i^1 ($i=\overline{1,n}$) для деталей *i*-го типа определяются по таблицам [294]. Количество оборотов n_i^1 ($i=\overline{1,n}$) детали *i*-го типа определяется выражением [294]:

$$n_i^1 = 318\frac{v_i^1}{D_i^1}, \qquad \text{(П3.5.3)}$$

где D_i^1 – диаметр детали, мм. В соответствии с полученными значениями основное время t_i^{o1} токарной обработки деталей на первом приборе определяется выражением вида [294]:

$$t_i^{o1} = \frac{L_i \cdot k_i^1}{n_i^1 \cdot s_i^1}. \qquad (П3.5.4)$$

Вспомогательное время $t_i^{в1}$, связанное с основным временем t_i^{o1} обработки детали *i*-го типа, определяется по таблицам [294]. В соответствии со значениями t_i^{o1} и $t_i^{в1}$ суммарная длительность выполнения операции предварительной токарной обработки детали *i*-го типа на первом приборе перед реализацией операции направки определяется следующим образом:

$$t_i^1 = t_i^{o1} + t_i^{в1}.$$

В качестве способов восстановления формы и размеров цилиндрических деталей рассмотрена электродуговая наплавка и вибродуговая наплавка. Для параметров процесса электродуговой наплавки детали *i*-го типа введены следующие обозначения (наплавка выполняется на приборе с номером *l=2,* все параметры проиндексированы номером этого прибора) [291, 293]:

– $I_i^{св2}$ – сварочный ток для наплавки детали *i*-го типа на *(l=2)*-ом приборе ($i = \overline{1,n}$) (А);

– $d_{эi}^{пр}$ – диаметр проволоки, используемой в наплавочной головке для реализации восстановления детали *i*-го типа на втором приборе с использованием электродуговой наплавки ($i = \overline{1,n}$) (мм);

– $k_{эi}^2$ – количество проходов при электродуговой наплавке детали *i*-го типа ($i = \overline{1,n}$);

– $K_{нi}^2$ – коэффициент наплавки детали *i*-го типа ($i = \overline{1,n}$) (г/(А*ч));

– *F* – площадь поперечного сечения наплавленного валика см^2);

– $\rho_{пi}$ – плотность металла проволоки, используемой при наплавке детали *i*-го типа – плотность наплавляемого шва ($i = \overline{1,n}$) (г/см^3);

– $v_{эi}^2$ – скорость восстановления детали *i*-го типа с использованием электродуговой наплавки (скорость наплавки) ($i = \overline{1,n}$) (м/ч);

– $n_{эi}^2$ – количество оборотов детали при реализации наплавки (об/мин);

– $s_{эi}^2$ – шаг наплавки детали *i*-го типа ($i = \overline{1,n}$) (мм/об);

– $t_{эi}^{o2}$ – длительность основной операции по восстановлению детали электродуговой наплавкой на втором приборе ($i = \overline{1,n}$) (основное время выполнения операции, мин);

– $t_{эi}^{в2}$ – длительность вспомогательных операций по восстановлению детали электродуговой наплавкой на втором приборе ($i=\overline{1,n}$) (мин).

Величина $I_i^{св2}$ определяется выражением вида: $I_i^{св2} = 40 * \sqrt[3]{D_i}$, где D_i – диаметр восстанавливаемой детали. Значение $K_{нi}^2$ определяется выражением вида [291, 293]:

$$K_{нi}^2 = 2{,}3 + 0{,}065 \frac{I_i^{св2}}{d_{эi}^{пр}}. \qquad \text{(П3.5.5)}$$

Скорость электродуговой наплавки $v_{энi}^2$ детали *i*-го типа на (*l=2*)-м приборе определяется в соответствии с выражением вида [291, 293]:

$$v_{эi}^2 = \frac{K_{нi}^2 \cdot I_i^{св2}}{100 \cdot F \cdot \rho_{пi}}, \qquad \text{(П3.5.6)}$$

где $F = 0.06 - 0.2$ см^2 при $d_{эi}^{пр} = 1.2 - 2.0$ мм. В качестве значения плотности наплавочной проволоки $\rho_{пi}$, используемой при наплавке деталей, принята плотность металла электрода УОНИ 13/55 (низкоуглеродистая и низколегированная сталь марки СВ-08Г, 7,81 г/см3.). Частота вращения детали (об/мин) определяется выражением вида [291, 293]:

$$n_{эi}^2 = \frac{1000 v_{эi}^2}{60 \cdot \pi \cdot D_i}. \qquad \text{(П3.5.7)}$$

Шаг наплавки детали *i*-го типа $s_{эi}^2$ ($i=\overline{1,n}$) (мм/об) в соответствии с [291, 293] определяется выражением вида: $s_{эi}^2 = (2..2.5) d_{эi}^{пр}$. Значение основного времени выполнения операции электродуговой наплавки определяется выражением [291, 293]:

$$t_{эi}^{о2} = \frac{k_{эi}^2 \cdot L_i}{n_{эi}^2 \cdot s_{эi}^2}. \qquad \text{(П3.5.8)}$$

В соответствии с [291, 293]: вспомогательное время $t_{энi}^{в2}$ определяется как 15% от основного времени электродуговой наплавки $t_{энi}^{о2}$. Подготовительно-заключительное время, связанное с установкой оснастки и подготовкой ее к работе, составляет 16 мин [291, 293].

Для параметров процесса вибродуговой наплавки детали *i*-го типа введены следующие обозначения (наплавка выполняется на приборе с номером *l=2,* все параметры проиндексированы номером прибора) [291, 293]::

– $d_{вi}^{пр}$ – диаметр проволоки, используемой в наплавочной готовке для реализации восстановления детали *i*-го типа с использованием вибродуговой наплавки ($i=\overline{1,n}$) (мм);

– $I_i^{св2}$ – сварочный ток для вибродуговой наплавки детали *i*-го типа ($i=\overline{1,n}$) (А), U_i – напряжение вибродуговой наплавки детали *i*-го типа ($i=\overline{1,n}$);

– v_{ni} – скорость подачи проволоки при вибродуговой наплавке детали *i*-го типа ($i=\overline{1,n}$) (м/ч);

– $v_{вні}^2$ – скорость вибродуговой наплавки детали *i*-го типа (м/ч);

– $n_{ві}^2$ – количество оборотов детали при реализации наплавки (об/мин);

– η – коэффициент перехода электродного материала в наплавляемый металл ($\eta = 0.8 \div 0.9$) [291, 293];

– $s_{ві}^2$ – шаг наплавки детали *i*-го типа ($i=\overline{1,n}$) (мм/об);

– $h_{ві}^2$ – толщина наплавляемого слоя при вибродуговой наплавке детали *i*-го типа ($i=\overline{1,n}$) (мм);

– $k_{ві}^2$ – количество проходов при реализации наплавки ($i=\overline{1,n}$) ;

– a – коэффициент, учитывающий отклонение фактической толщины наплавляемого слоя от требуемой ($a = 0.7 \div 0.85$)[291, 293];

– $t_{ві}^{о2}$ – длительность основной операции по восстановлению детали вибродуговой наплавкой ($i=\overline{1,n}$) (основное время выполнения операции, мин);

– $t_{ві}^{в2}$ – длительность вспомогательных операций по восстановлению детали вибродуговой наплавкой ($i=\overline{1,n}$) (мин).

Величина тока $I_i^{св2}$ при вибродуговой наплавке определяется выражением вида: $I_i^{св2} = (60..75) d_{ві}^{пр}$ [291, 293]. Величина подачи проволоки при вибродуговой наплавке v_{ni} определяется выражением вида [291, 293]:

$$v_{ni} = \frac{0.1 \cdot I_i^{св2} \cdot U_i}{(d_{ві}^{пр})^2}. \qquad \text{(П3.5.9)}$$

Шаг наплавки $s_{ві}^2$ ($i=\overline{1,n}$) определяется выражением вида: $s_{ві}^2 = (1.6..2.2) d_{ві}^{пр}$ [291, 293]. Скорость вибродуговой наплавки $v_{вні}^2$ детали *i*-го типа на (*l*=2)-м приборе определяется в соответствии с выражением вида [291, 293]:

$$v_{ві}^2 = \frac{0.785 (d_{ві}^{пр})^2 \cdot v_{ni} \cdot \eta}{h_{ві}^2 \cdot s_{ві}^2 \cdot a}. \qquad \text{(П3.5.10)}$$

Частота вращения детали (число оборотов, об/мин) определяется выражением [291, 293]:

$$n_{ві}^2 = \frac{1000v_{ві}^2}{60 \cdot \pi \cdot D_i}. \qquad (П3.5.11)$$

Значение основного времени выполнения операции вибродуговой наплавки определяется выражением [291, 293]:

$$t_{ві}^{o2} = \frac{k_{ві}^2 \cdot L_i}{n_{ві}^2 \cdot s_{ві}^2}. \qquad (П3.5.12)$$

Если толщина наплавляемого слоя $h_{ві}^2$ составляет 1.0-1.5 мм, то $d_{ві}^{np} = 2.0$ мм, а $U_i = 15 \div 20$ В [291, 293]. Если толщина наплавляемого слоя $h_{ві}^2$ составляет 2.0-2.5 мм, то $d_{ві}^{np} = 2.5$ мм, $U_i = 20 \div 25$ В [291, 293].

Если дефекты, связанные с изменением формы и размеров цилиндрических деталей, зафиксированы на их краях, тогда восстанавливаемые участки тоже находятся на краях деталей. По этой причине в результате наплавки формируется слой металла, который необходимо выровнять путем торцевого точения. Тогда механическая обработка деталей после реализации наплавки предполагает выполнение двух операций: 1) выравнивание наплавленного слоя путем продольной токарной обработки; 2) выравнивание торцов деталей путем торцевой токарной обработки. Таком образом, механическая обработка деталей на третьем приборе после реализации наплавки предусматривает как продольное точение, так и срезание кромок металла на торцах деталей.

Обозначения параметров операции токарной обработки, выполняемой на третьем приборе в КС (продольное точение) после реализации наплавки (первая операция на третьем приборе), аналогичны обозначениям параметров для предварительной обработки с изменением индекса *l* обрабатывающего прибора (*l*=*3*) [294]:

– L_{i1} – длина обрабатываемой поверхности детали *i*-го типа с учетом врезания и перебега ($i = \overline{1,n}$);

– l_{i1} – длина обрабатываемой поверхности детали *i*-го типа по чертежу ($i = \overline{1,n}$);

– y_{i1} – величина врезания и перебега для детали *i*-го типа ($i = \overline{1,n}$);

– D_i^3 – требуемые диаметры деталей *i*-ых типов (продольное точение) ($i = \overline{1,n}$), d_i^3 – диаметры деталей *i*-ых типов перед токарной обработкой ($i = \overline{1,n}$);

– h_i^3 – припуск на обработку деталей *i*-ых типов на третьем приборе ($i = \overline{1,n}$) (мм);

– g_{i1}^3 – глубина резания для деталей *i*-ых типов ($i = \overline{1,n}$) (мм);

– k_{i1}^{3} – количество проходов для снятия припуска на обработку h_i^3 при глубине резания g_{i1}^{3} для деталей *i*-ых типов ($i=\overline{1,n}$);

– s_{i1}^{3} – подача режущего инструмента для деталей *i*-ых типов ($i=\overline{1,n}$) (мм/об);

– v_{i1}^{3} – скорость резания для деталей *i*-ых типов ($i=\overline{1,n}$) (м/ч);

–число оборотов детали *i*-го типа в минуту n_{i1}^{3} ($i=\overline{1,n}$) (об/мин);

– t_{i1}^{o3} – длительность основной токарной обработки деталей при продольном точении на третьем приборе ($i=\overline{1,n}$) (мин);

– $t_{i1}^{в3}$ – длительность вспомогательных операций токарной обработки деталей при продольном точении на третьем приборе ($i=\overline{1,n}$) (мин).

Определение значений введенных параметров осуществляется аналогично способам вычисления значений этих же параметров для первого прибора, рассмотренным выше.

В качестве параметров процесса торцевого точения (вторая операция на третьем приборе) рассматриваются [294]:

– L_{i2} – длина обрабатываемой поверхности детали *i*-го типа при торцевом точении с учетом врезания и перебега ($i=\overline{1,n}$);

– l_{i2} – длина обрабатываемой поверхности детали *i*-го типа при торцевом точении ($i=\overline{1,n}$);

– y_{i2} – величина врезания и перебега для детали *i*-го типа при торцевом точении ($i=\overline{1,n}$);

– g_{i2}^{3} – глубина резания для деталей *i*-ых типов ($i=\overline{1,n}$) (мм);

– k_{i2}^{3} – количество проходов при глубине резания g_{i2}^{3} для деталей *i*-ых типов ($i=\overline{1,n}$);

– s_{i2}^{3} – подача инструмента для деталей *i*-ых типов ($i=\overline{1,n}$) (мм/об);

– v_{i2}^{3} – скорость резания для деталей *i*-ых типов ($i=\overline{1,n}$) (м/ч);

– n_{i2}^{3} – число оборотов детали *i*-го типа ($i=\overline{1,n}$) (об/мин);

– t_{i2}^{o3} – длительность основной токарной обработки деталей при торцевом точении ($i=\overline{1,n}$) (мин);

– $t_{i2}^{в3}$ – длительность вспомогательных операций токарной обработки деталей при торцевом точении ($i=\overline{1,n}$) (мин).

Величина l_{i2} определяется как $l_{i2} = D_i / 2$, значение y_{i2} определяется по таблице [294], тогда значение L_{i2} определяется выражением вида:

$$L_{i2} = l_{i2} + y_{i2}. \qquad \text{(П3.5.13)}$$

Глубина резания g_{i2}^3 и количество проходов k_{i2}^3 ($i = \overline{1,n}$) являются заданными входными параметрами. В соответствии со значением g_{i2}^3 подача режущего инструмента за один оборот детали *i*-го типа s_{i2}^3 ($i = \overline{1,n}$), а также скорость резания v_{i2}^3 ($i = \overline{1,n}$) для деталей *i*-го типа определяются по таблицам [296]. Количество оборотов n_{i2}^3 ($i = \overline{1,n}$) детали *i*-го типа определяется выражением [294]:

$$n_{i2}^3 = 318 \frac{v_{i2}^3}{D_i}, \qquad \text{(П3.5.14)}$$

где D_i – диаметр детали *i*-го типа, мм. В соответствии с полученными значениями основное время t_{i2}^{o3} торцевой токарной обработки деталей на первом приборе определяется выражением вида [294]:

$$t_{i2}^{o3} = \frac{L_{i2} \cdot k_{i2}^3}{n_{i2}^3 \cdot s_{i2}^3}. \qquad \text{(П3.5.15)}$$

Вспомогательное время $t_{i2}^{в3}$, связанное с основным временем t_{i2}^{o1} обработки детали *i*-го типа, определяется по таблице [294]. В соответствии со значениями t_{i1}^{o3}, t_{i2}^{o13}, $t_{i1}^{в3}$, $t_{i2}^{в2}$ суммарная длительность выполнения операции токарной обработки детали *i*-го типа на третьем приборе после реализацией направки детали определяется следующим образом:

$$t_i^3 = t_{i1}^{o3} + t_{i1}^{в3} + t_{i2}^{o3} + t_{i2}^{в3}. \qquad \text{(П3.5.16)}$$

Технологическая операция, выполняемая на (*l=4*)-м приборе предусматривает шлифование восстановленной детали после ее механической обработки. Обозначения параметров операции шлифования деталей, выполняемой на четвертом (*l=4*) приборе в многостадийной (поточной) системы после реализации токарной обработки, имеют следующий вид [294]:

– D_i^4 – диаметры деталей *i*-ых типов, подвергающиеся шлифовальной обработке ($i = \overline{1,n}$);

– L_{i4} – длина обрабатываемой поверхности детали *i*-го типа при продольном точении с учетом врезания и перебега ($i = \overline{1,n}$);

– l_{i4} – длина обрабатываемой поверхности детали *i*-го типа при шлифовании по чертежу ($i=\overline{1,n}$);

– y_{i4} – величина врезания и перебега для детали *i*-го типа при шлифовании ($i=\overline{1,n}$);

– s_i^{n4} – поперечная подача инструмента (шлифовального круга) для деталей *i*-ых типов – глубина шлифования ($i=\overline{1,n}$) (мм/об);

– k_i^4 – количество проходов при глубине шлифования s_i^{n4} для деталей *i*-ых типов ($i=\overline{1,n}$);

– s_i^{np4} – продольная подача инструмента (шлифовального круга) для деталей *i*-ых типов ($i=\overline{1,n}$) (мм/об);

– v_i^4 – скорость шлифования деталей *i*-ых типов ($i=\overline{1,n}$) (м/ч);

– n_i^4 – число оборотов детали *i*-го типа в минуту ($i=\overline{1,n}$) (об/мин);

– $K_э$ – коэффициент зачистных ходов (принимает значения 1.2-1.7 в зависимости от требуемой чистоты обработки) [294];

– t_i^{o4} – длительность основной операции шлифования детали *i*-го типа ($i=\overline{1,n}$) (мин);

– $t_i^{в4}$ – длительность вспомогательных операций при шлифовании детали *i*-го типа ($i=\overline{1,n}$) (мин);

– t_i^4 – общая длительность выполнения операции шлифования восстановленной детали ($i=\overline{1,n}$) (мин);

Значения параметров s_i^{n4} и s_i^{np4}, а также v_i^4 определяются по таблицам [294]. Значения параметра n_i^4 определяются в соответствии с выражениями вида [294]:

$$n_i^4 = 318\frac{v_i^4}{D_i^4}. \qquad \text{(П3.5.17)}$$

Основное время шлифования t_i^{o4} деталей *i*-ых типов ($i=\overline{1,n}$) определяются выражением вида [294]:

$$t_i^{o4} = \frac{L_i \cdot k_i^4}{n_i^4 \cdot s_i^{np4}} \cdot K_э. \qquad \text{(П3.5.18)}$$

Время вспомогательных операций при шлифовании деталей *i*-ых типов ($t_i^{в4}$) определяется по таблицам [294].

Общее время выполнения операций шлифования с деталями *i*-ых типов определяется следующим образом:

$$t_i^4 = t_i^{o4} + t_i^{в4}. \qquad \text{(П3.5.19)}$$

Рассмотренные в работе математическая модель многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС, математическая модель иерархической игры оптимизации составов ПЗ и расписаний их выполнения, методы оптимизации составов ПЗ и расписаний, реализованные в виде соответствующего комплекса программ, применены для решения задач построения расписаний процесса восстановления деталей цилиндрической формы в составе партий. Для реализации восстановления формы и размеров деталей разных типов применены электродуговая и вибродуговая наплавки. Технологический процесс восстановления включает этап предварительной механической обработки (продольная токарная обработка на первом приборе), этап непосредственно наплавки (на втором приборе), этап последующей механической обработки (продольная и торцевая токарные обработки на третьем приборе), этап шлифования (на четвертом приборе).

Восстановлению подлежат детали четырех типов ($n=4$). Параметрами восстанавливаемых деталей и параметрами, характеризующими износ, являются:

– деталь ($i=1$)-го типа – вал $\varnothing 40$ мм ($D_1 = 40$ мм), износу подвержены два участка по 50 мм на обоих концах детали, износ составляет 0.8 мм относительно начального диаметра;

– деталь ($i=2$)-го типа – вал $\varnothing 60$ мм ($D_2 = 60$ мм), износу подвержены два участка по 50 мм на обоих концах детали, износ составляет 1.0 мм относительно начального диаметра;

– деталь ($i=3$)-го типа – вал $\varnothing 80$ мм ($D_3 = 80$ мм), износу подвержены два участка по 50 мм на обоих концах детали, износ составляет 1.5 мм относительно начального диаметра;

– деталь ($i=4$)-го типа – вал $\varnothing 100$ мм ($D_4 = 100$ мм), износу подвержены два участка по 50 мм на обоих концах детали, износ составляет 2.0 мм относительно начального диаметра.

Этап предварительной механической обработки деталей перед наплавкой. На этапе предварительной механической обработки детали подвергаются продольной токарной обработке с целью выравнивания участков с износом под наплавку. В результате токарной обработки значения диаметров участков, подлежащих восстановлению, будут получены следующими: $d_1 = 38.5$ мм, $d_2 = 58$ мм, $d_3 = 78$ мм, $d_4 = 97.5$ мм. Значения припусков на продольную токарную обработку на ($l=1$)-ом приборе: для детали ($i=1$)-го типа $h_1^1 = 1.5$ мм; для детали ($i=2$)-го типа $h_2^1 = 2.0$ мм; для детали ($i=3$)-го типа $h_3^1 = 2.0$ мм; для детали ($i=4$)-го типа $h_4^1 = 2.5$ мм. Припуски на деталях каждого *i*-го типа снимаются целиком за один проход. То-

гда $k_i^1 = 1$ (при $i = \overline{1,4}$). В этом случае глубина резания составит: $g_1^1 = 1.5$ мм, $g_2^1 = 2.0$ мм, $g_3^1 = 2.0$ мм, $g_4^1 = 2.5$ мм. В соответствии с глубиной резания $g_i^1 \le 3$ ($i = \overline{1,4}$) и диаметром деталей по таблицам [296] определены следующие значения подачи инструмента s_i^1 ($i = \overline{1,4}$): $s_1^1 = 0.4$ мм/об, $s_2^1 = 0.5$ мм/об, $s_3^1 = 0.6$ мм/об, $s_4^1 = 0.7$ мм/об. По таблице [294] на основе значений s_i^1 ($i = \overline{1,n}$) получены следующие значения скоростей резания v_i^1 деталей *i*-ых типов ($i = \overline{1,4}$): $v_1^1 = 55$ м/мин; $v_2^1 = 48$ м/мин; $v_3^1 = 37$ м/мин; $v_4^1 = 33$ м/мин. В соответствии со значениями v_i^1 ($i = \overline{1,4}$) и заданными значениями D_i^1 ($i = \overline{1,4}$) по формуле (П3.5.3) вычислены значения количества оборотов деталей каждого типа при предварительной токарной обработке [296]: $n_1^1 = 437$ об/мин, $n_2^1 = 254$ об/мин, $n_3^1 = 147$ об/мин, $n_4^1 = 104$ об/мин.

Длины обрабатываемых поверхностей L_i для деталей каждого типа определены по формуле (П3.5.1) с учетом врезания и перебега y_i ($i = \overline{1,n}$), полученного для заданной глубины резания по таблице [294]: $y_1 = 3.5$, $y_2 = 3.5$, $y_3 = 3.5$, $y_4 = 5$. Так как обрабатываются два участка по 50 мм, то значения L_i определены следующим образом: $L_i = 2 \cdot (l_i + y_i)$. Тогда $L_1 = 107$ мм, $L_2 = 107$ мм, $L_3 = 107$ мм, $L_4 = 110$ мм. По формуле (П3.5.4) определены значения основного времени предварительной токарной обработки деталей: $t_1^{o1} = 0.61$ мин, $t_2^{o1} = 0.84$ мин, $t_3^{o1} = 1.21$ мин, $t_4^{o1} = 1.51$ мин.

Продолжительность вспомогательного времени, связанного с установкой, выверкой, снятием детали зависит от массы детали, типа приспособления, в которое устанавливается деталь, наличием и характером выверки (рассматривался четырех кулачковый шпиндель). Также во вспомогательное время входят операции, связанные с установкой оборотов и подач, включением и выключением вращения шпинделя и т.д. С использованием [294] вспомогательное время для каждой детали определено следующим образом: $t_1^{в1} = 2.5$ мин, $t_2^{в1} = 2.5$ мин, $t_3^{в1} = 2.5$ мин, $t_4^{в1} = 3.0$ мин.

Тогда общее время предварительной механической обработки деталей *i*-ых типов ($i = \overline{1,4}$) на (l=1)-ом приборе составляет: $t_1^1 = 3.11$ мин, $t_2^1 = 3.34$ мин, $t_3^1 = 3.71$ мин, $t_4^1 = 4.51$ мин.

Этап восстановления деталей с использованием электродуговой и вибродуговой наплавок. Восстановление формы и размеров деталей *i*-ых типов ($i = \overline{1,4}$) реализуется двумя способами: детали первого и второго типов восстанавливаются с использованием электродуговой наплавки, детали третьего и четвертого типов восстанавливаются с использованием

вибродуговой наплавки. Значение силы тока наплавки для восстановления детали (*i=1)*-го типа определено по формуле $I_1^{св2} = 40 * \sqrt[3]{D_1}$: $I_1^{св2} = 135$ А. Так как диаметр детали после предварительной механической обработке $d_1 = 38.5$ мм, а требуемый диаметр $D_1 = 40$ мм, то для наплавки используется проволока с $d_{э1}^{пр} = 2.5$ мм (восстановление детали наплавкой реализуется за один проход, $k_{э1}^2 = 1$). Значение коэффициента наплавки детали (*i=1*)-го типа $K_{н1}^2$ определено по формуле (П3.5.5): $K_{н1}^2 = 5.81$(г/(Ач)). Значение скорости наплавки $v_{э1}^2$ определено по формуле (П3.5.6) с учетом значения $\rho_{ni} = 7.81$ г/см^3: $v_{э1}^2 = 5.02$ м/ч. Количество оборотов детали (*i=1*)-го типа при реализации наплавки определено по формуле (П3.5.7) и составляет $n_{э1}^2 = 0.66$ (об/мин).

Значение основного времени выполнения операции электродуговой наплавки $t_{э1}^{о2}$ определено по формуле (П3.5.8): $t_{э1}^{о2} = 24.2$ мин. (при условии, что $k_{э1}^2 = 1$, $s_{э1}^2 = 6.25$ мм/об, $L_1 = 100$ мм). При условии, что время вспомогательных операций $t_{э1}^{в2}$ составляет 15% от $t_{э1}^{о2}$, то $t_{э1}^{в2} = 3.6$ мин. Тогда время выполнения операции электродуговой наплавки детали (*i=1*)-го типа $t_1^2 = 27.8$ мин.

Аналогичным образом выполнен расчет времени восстановления детали (*i=2*)-го типа ($D_2 = 60$ мм) с использованием электродуговой наплавки проволоки с $d_{э2}^{пр} = 2.5$ мм. Значение основного времени выполнения операции электродуговой наплавки $t_{э2}^{о2} = 36$ мин. Значение вспомогательного времени $t_{э1}^{в2} = 5.4$ мин. Время выполнения операции электродуговой наплавки одной детали (*i=2*)-го типа на (*l=2*)-ом приборе $t_2^2 = 41.4$ мин.

Подготовительно-заключительное время, связанное с установкой и наладкой оснастки, составляет 16 мин (время переналадки прибора на выполнение электродуговой наплавки деталей разных типов, связанное со сменой кассеты с проволокой либо наплавочной головки) [290, 293].

Детали третьего и четвертого типов восстанавливаются с использованием вибродуговой наплавки. Так как диаметр детали после предварительной механической обработки $d_3 = 78$ мм, а требуемый диаметр $D_3 = 80$ мм, то для наплавки используется проволока с $d_{в3}^{пр} = 3$ мм (восстановление детали наплавкой реализуется за один проход $k_{в3}^2 = 1$). Значение силы тока наплавки для восстановления детали (*i=3)*-го типа определено по формуле

$I_3^{св2} = (60..75) \cdot d_{в3}^{пр}$: $I_3^{св2} = 180$ А. Значение напряжения наплавки U_3 выбрано равным 20 В. Скорость подачи проволоки $v_{п3}$ определена по формуле (П3.5.9): $v_{п3} = 40$ м/ч. Скорость вибродуговой наплавки $v_{в3}^2$ определена по формуле (П3.5.10) при условии, что толщина слоя наплавки $h_{в3}^2 = 3$ мм, шаг наплавки $s_{в3}^2 = 6.6$ мм/об ($s_{в3}^2 = (1.6..2.2) d_{в3}^{пр}$). Получено значение $v_{в3}^2 = 13.43$ м/ч. Количество оборотов детали (i=3)-го типа при реализации вибродуговой наплавки определено по формуле (П3.5.11) и составляет $n_{в3}^2 = 0.88$ (об/мин). Значение основного времени выполнения операции вибродуговой наплавки $t_{в3}^{о2}$ определено по формуле (П3.5.12): $t_{в3}^{о2} = 17.2$ мин (при условии, что $k_{в3}^2 = 1$, $s_{в3}^2 = 6.6$ мм/об, $L_3 = 100$ мм). Так как время вспомогательных операций $t_{в3}^{в2}$ составляет 15% от $t_{в3}^{о2}$ [290, 293], то $t_{в3}^{в2} = 2.58$ мин. Тогда время выполнения операции вибродуговой наплавки одной детали (i=3)-го типа на (l=2)-ом приборе $t_3^2 = 19.78$ мин.

Расчет времени восстановления детали четвертого типа выполнен по аналогии. Так как диаметр детали после предварительной механической обработки $d_4 = 97.5$ мм, а требуемый диаметр $D_4 = 100$ мм, то для наплавки используется проволока с $d_{в4}^{пр} = 3$ мм (восстановление детали наплавкой реализуется за один проход $k_{в4}^2 = 1$). Значение силы тока наплавки для восстановления детали (i=4)-го типа определено по формуле [290,293] $I_4^{св2} = (60..75) d_{в4}^{пр}$: $I_4^{св2} = 180$ А. Значение напряжения наплавки U_4 выбрано равным 25 В. Скорость подачи проволоки $v_{п4}$ определена по формуле (П3.5.9): $v_{п4} = 50$ м/ч. Скорость вибродуговой наплавки $v_{в4}^2$ определена по формуле (П3.5.10) при условии, что толщина слоя наплавки $h_{в4}^2 = 3$ мм, шаг наплавки $s_{в4}^2 = 6.6$ мм/об. Получено значение $v_{в4}^2 = 20.3$ м/ч. Количество оборотов детали (i=4)-го типа при реализации вибродуговой наплавки определено по формуле (П3.5.11) и составляет $n_{в3}^2 = 1.07$ (об/мин). Значение основного времени выполнения операции вибродуговой наплавки $t_{в4}^{о2}$ определено по формуле (П3.5.12): $t_{в4}^{о2} = 14.16$ мин. (при условии, что $k_{в4}^2 = 1$, $s_{в4}^2 = 6.6$ мм/об, $L_4 = 100$ мм). Так как время вспомогательных операций $t_{в4}^{в2}$ составляет 15% от $t_{в4}^{о2}$ [290,293], то $t_{в3}^{в2} = 2.1$ мин. Тогда время выполнения операции вибродуговой наплавки одной детали (i=4)-го типа $t_4^2 = 16.26$ мин.

Подготовительно-заключительное время, связанное с установкой и наладкой оснастки, составляет 20 мин (время переналадки прибора на выполнение вибродуговой наплавки деталей разных типов, связанное со сменой кассеты с проволокой либо наплавочной головки) [290, 293].

Этап механической обработки деталей после реализации восстановления деталей с использованием наплавки. После реализации операции наплавки диаметры деталей следующие: $d_1^3 = 41$ мм (требуемый диаметр $D_1^3 = 40$ мм), $d_2^3 = 60.5$ мм (требуемый диаметр $D_2^3 = 60$ мм), $d_3^3 = 81$ мм (требуемый диаметр $D_3^3 = 80$ мм), $d_4^3 = 100.5$ мм (требуемый диаметр $D_4^3 = 100$ мм). Приведение диаметров деталей к требуемым значениям D_i^3 ($i = \overline{1,4}$) реализуется на третьем приборе путем токарной обработки наплавленных участков и торцов деталей, а также на четвертом приборе путем реализации шлифования.

В соответствии с приведенными значениями d_i^3 и D_i^3 ($i = \overline{1,4}$) припуски на выполнение операций токарной обработки и шлифования получены в виде: $h_1^3 = 0.8$ мм, $h_2^3 = 0.4$ мм, $h_3^3 = 0.8$ мм, $h_4^3 = 0.4$ мм, $h_1^4 = 0.2$ мм, $h_2^4 = 0.1$ мм, $h_3^4 = 0.2$ мм, $h_4^4 = 0.1$ мм. При этом предполагается, что при продольном точении все припуски на третьем приборе снимаются за один проход режущего инструмента, то есть $k_{i1}^3 = 1$ ($i = \overline{1,4}$). Глубины резания для деталей *i*-ых типов на третьем приборе при продольном точении (при условии, что $k_{i1}^3 = 1$ ($i = \overline{1,4}$)) соответствуют припускам на обработку, то есть $g_{11}^3 = 0.8$ мм, $g_{21}^3 = 0.4$ мм, $g_{31}^3 = 0.8$ мм, $g_{41}^3 = 0.4$ мм.

Для заданных глубин резания g_{i1}^3 ($i = \overline{1,4}$) и заданных диаметров деталей D_i^3 ($i = \overline{1,4}$) по таблицам [294] определены следующие значения подач s_{i1}^3 и скоростей резания v_{i1}^3 ($i = \overline{1,4}$): $s_{11}^3 = 0.4$ мм/об, $s_{21}^3 = 0.5$ мм/об, $s_{31}^3 = 0.6$ мм/об, $s_{41}^3 = 0.7$ мм/об, $v_{11}^3 = 70$ м/мин, $v_{21}^3 = 52$ м/мин, $v_{31}^3 = 37$ м/мин, $v_{41}^3 = 33$ м/мин. В соответствии с полученными значениями по формуле (П3.5.3) рассчитаны значения количества оборотов деталей n_{i1}^3 ($i = \overline{1,4}$): $n_{11}^3 = 556$ об/мин, $n_{21}^3 = 275$ об/мин, $n_{31}^3 = 147$ об/мин, $n_{41}^3 = 104$ об/мин. С учетом значений n_{i1}^3 ($i = \overline{1,4}$) и значений $L_{11} = 107$ мм, $L_{21} = 107$ мм, $L_{31} = 107$ мм, $L_{41} = 110$ мм, полученных выше, рассчитаны значения основного времени токарной обработки деталей (продольное точение): $t_{11}^{o3} = 0.5$ мин, $t_{21}^{o3} = 0.8$ мин, $t_{31}^{o3} = 1.21$ мин, $t_{41}^{o3} = 1.5$ мин. С использованием таблиц

[294] вспомогательное время при обработке деталей каждого типа определено следующим образом: $t_{11}^{в3} = 2.5$ мин, $t_{21}^{в3} = 2.5$ мин, $t_{31}^{в3} = 2.5$ мин, $t_{41}^{в3} = 3.0$ мин.

После окончания продольной токарной обработки выполняется операция обработки торцов деталей (вторая операция с каждой деталью на (l=3)-м рабочем месте). Так как толщина слоя наплавки для детали (i=1)-го типа $h_{э1}^{2} = 2.5$ мм, то глубину резания при торцевой обработке примем равной 3.5 мм ($g_{12}^{3} = 3.5$ мм). Так как толщина слоя наплавки для детали (i=2)-го типа $h_{э2}^{2} = 2.5$ мм, то глубину резания при торцевой обработке примем равной 3.5 мм ($g_{22}^{3} = 3.5$ мм). Так как толщина слоя наплавки для детали (i=3)-го типа $h_{в3}^{2} = 3$ мм, то глубину резания при торцевой обработке примем равной 4 мм ($g_{32}^{3} = 4$ мм). Так как толщина слоя наплавки для детали (i=4)-го типа $h_{в4}^{2} = 3$ мм, то глубину резания при торцевой обработке примем равной 4 мм ($g_{42}^{3} = 4$ мм). В соответствии со значениями g_{i2}^{3} ($i = \overline{1,4}$) и D_i^3 ($i = \overline{1,4}$) по таблицам [294] определены значения подачи s_{i2}^{3} и скорости резания v_{i2}^{3} ($i = \overline{1,4}$): $s_{12}^{3} = 0.3$ мм/об, $s_{22}^{3} = 0.4$ мм/об, $s_{32}^{3} = 0.45$ мм/об, $s_{42}^{3} = 0.35$ мм/об; $v_{12}^{3} = 50$ м/ч, $v_{22}^{3} = 44$ м/ч, $v_{32}^{3} = 48$ м/ч, $v_{42}^{3} = 60$ м/ч. В соответствии с значениями D_i^3 ($i = \overline{1,4}$) и полученными значениями v_{i2}^{3} ($i = \overline{1,4}$) по формуле (П3.5.14) определены значения параметра n_{i2}^{3} ($i = \overline{1,n}$): $n_{12}^{3} = 397$ об/мин; $n_{22}^{3} = 233$ об/мин; $n_{32}^{3} = 190$ об/мин; $n_{42}^{3} = 190$ об/мин.

Величина врезания и перебега для деталей i-ых типов при торцевом точении y_{i2} ($i = \overline{1,4}$) определены по таблице [294]: $y_{12} = 6$; $y_{22} = 6$; $y_{32} = 7$; $y_{42} = 7$. С учетом того, что $l_{i2} = D_i / 2$, по формуле (П3.5.13) вычислены значения L_{i2}, а по формуле (П3.5.15) значения t_{i2}^{o3}: $t_{12}^{o3} = 0.21$ мин, $t_{22}^{o3} = 0.38$ мин, $t_{32}^{o3} = 0.54$ мин, $t_{42}^{o3} = 0.85$ мин.

С использованием таблиц [294] вспомогательное время при торцевой обработке деталей каждого типа определено следующим образом: $t_{12}^{в3} = 2.5$ мин, $t_{22}^{в3} = 2.5$ мин, $t_{32}^{в3} = 2.5$ мин, $t_{42}^{в3} = 3.0$ мин. Суммируя значения основного и вспомогательного времени выполнения первой и второй операций на третьем приборе, получим общее время обработки детали каждого типа: $t_1^3 = 5.71$ мин, $t_2^3 = 6.2$ мин, $t_3^3 = 6.75$ мин, $t_4^3 = 8.4$ мин.

Этап шлифования деталей после реализации их токарной обработки. В соответствии с [294] при учете диаметров D_i ($i=\overline{1,4}$) деталей по таблицам определены значения поперечной подачи шлифовального круга s_i^{n4} (при условии, что длина деталей на менее 10 диаметров): $s_1^{n4}=0.02$ мм/об; $s_2^{n4}=0.025$ мм/об; $s_3^{n4}=0.025$ мм/об; $s_4^{n4}=0.03$ мм/об. В соответствии с полученными выше припусками на шлифование ($h_1^4=0.2$ мм, $h_2^4=0.1$ мм, $h_3^4=0.2$ мм, $h_4^4=0.1$ мм) количество проходов при выполнении операции определено следующим образом: $k_1^4=10$; $k_2^4=4$; $k_3^4=8$; $k_4^4=3$. В соответствии со значениями поперечной подачи s_i^{n4} ($i=\overline{1,4}$) по [294] определены значения продольной подачи шлифовального круга s_i^{np4} ($i=\overline{1,4}$): $s_1^{np4}=0.5$ мм/об; $s_2^{np4}=0.4$ мм/об; $s_3^{np4}=0.4$ мм/об; $s_4^{np4}=0.4$ мм/об. Скорость шлифования v_i^4 ($i=\overline{1,4}$) определена по таблицам [294] с учетом поперечной s_i^{n4} и продольной s_i^{np4} подач: $v_1^4=20$ м/мин; $v_2^4=24$ м/мин; $v_3^4=20$ м/мин; $v_4^4=20$ м/мин. По формуле (П3.5.17) рассчитаны значения количества оборотов n_i^4 деталей *i*-ых типов ($i=\overline{1,4}$): $n_1^4=159$ об/мин; $n_2^4=127$ об/мин; $n_3^4=79$ об/мин; $n_4^4=63$ об/мин. В соответствии с полученными значениями L_i ($L_1=107$ мм, $L_2=107$ мм, $L_3=107$ мм, $L_4=110$ мм), s_i^{np4}, k_i^4, n_i^4 ($i=\overline{1,4}$) по формуле (П3.5.18) рассчитаны значения основного времени выполнения операции шлифования t_i^{o4}: $t_1^{o4}=13.5$ мин, $t_2^{o4}=8.4$ мин, $t_3^{o4}=27$ мин, $t_4^{o4}=20.23$ мин. Вспомогательное время на установку и снятие детали, а также на вспомогательные операции, связанные с проходом (по таблицам [294]): $t_1^{в4}=2.9$ мин, $t_2^{в4}=2.7$ мин, $t_1^{в4}=3.32$ мин, $t_1^{в4}=3.4$ мин. Тогда общее время выполнения операций составляет: $t_1^4=16.4$ мин, $t_2^4=11.1$ мин, $t_3^4=30.32$ мин, $t_1^{в4}=23.64$ мин. Подготовительно-заключительное время, связанное с установкой и наладкой оснастки, составляет 8-10 мин (время переналадки прибора на выполнение шлифования деталей разных типов, связанное со сменой шлифовального круга) [294].

С целью построения расписаний восстановления деталей узлов и агрегатов технологического и транспортного оборудования решены две задачи: 1) задача построения расписаний восстановления деталей разных типов (*n=4*), включенных в партии, в КС на специализированных ремонтных предприятиях (предусматривается определение решений по составам партий деталей и расписаниям их выполнения на приборах); 2) задача построения расписаний восстанов-

ления деталей разных типов ($n=4$), включенных в партии, в течение интервалов времени заданной длительности и условии формирования комплектов.

Значения длительностей выполнения операций с восстанавливаемыми деталями на каждом из приборов КС сведены в матрицу длительностей (в минутах) выполнения операций на соответствующих приборах системы $T = \| t_{li} \|_{L \times n}$ (где $L=4$ – количество приборов в поточной системе, $n=4$– количество типов восстанавливаемых деталей). Значения длительностей определены выше при нормировании процесса восстановления. Вид матрицы T следующий:

$$T = \begin{vmatrix} 3.1 & 3.3 & 3.7 & 4.5 \\ 27.8 & 41.4 & 19.8 & 16.3 \\ 5.7 & 6.2 & 6.8 & 8.4 \\ 16.4 & 11.1 & 30.3 & 23.6 \end{vmatrix}$$

Длительности переналадки приборов сведены в матрицы переналадок $T^l = \| t^{\,l}_{ii'} \|_{n \times n}$ ($l = \overline{1,4}$), которые имеют следующий вид [290-294]:

$$T^1 = \begin{vmatrix} 8 & 8 & 8 & 8 \\ 8 & 8 & 8 & 8 \\ 8 & 8 & 8 & 8 \\ 8 & 8 & 8 & 8 \end{vmatrix}; \; T^2 = \begin{vmatrix} 16 & 16 & 20 & 20 \\ 16 & 16 & 20 & 20 \\ 16 & 16 & 20 & 20 \\ 16 & 16 & 20 & 20 \end{vmatrix}; \; T^3 = \begin{vmatrix} 8 & 8 & 8 & 8 \\ 8 & 8 & 8 & 8 \\ 8 & 8 & 8 & 8 \\ 8 & 8 & 8 & 8 \end{vmatrix}; T^4 = \begin{vmatrix} 10 & 10 & 10 & 10 \\ 10 & 10 & 10 & 10 \\ 10 & 10 & 10 & 10 \\ 10 & 10 & 10 & 10 \end{vmatrix}.$$

Для первой задачи построения расписаний восстановления деталей формировались решения при различных значениях параметра n^i ($i = \overline{1,4}$) – количества заданий каждого i-го типа. Для сформированных решений по составам партий и расписаниям их выполнения фиксировались значения критерия (4.17) вида $f_1([M,A],[P,R,\{T^{0l} \mid l = \overline{1,L}\}]^*)$ для каждого набора значений входных параметров. Также определялись значения критерия (4.17) вида $f_1([M,A],[P,R,\{T^{0l} \mid l = \overline{1,L}\}]^*)$ для фиксированных партий, включающих все n^i деталей определенного i-го типа ($i = \overline{1,4}$).

В качестве параметра $f_{эмосп}$, характеризующего эффективность полученных решений, определялось уменьшение общей длительности выполнения всех партий деталей в решении, сформированном с использованием предложенного метода их оптимизации, по сравнению с фиксированными партиями (эффективность метода оптимизации составов партий – ЭМОСП). Для этого вычислялось отношение разности общих длительностей выполнения фиксированных пакетов и пакетов, сформированных в соответствии с рассмотренным методом, к общей длительности выполнения фиксированных партий: ($f_{эмосп} = (f_1^{фикс} - f_1^{мосп}) / f_1^{фикс}$, где

$f_1^{фикс}$ – значение критерия f_1, полученное для решения, не предполагающего оптимизацию составов партий (для фиксированных партий), $f_1^{мосп}$ – значение критерия f_1,, полученное для решений, оптимизированных с использованием предложенного метода. Результаты решения первой задачи (определение составов партий деталей и расписаний их выполнения) представлены в Таблице П3.5.1.

Таблица П3.5.1– Результаты построения расписаний процесса восстановления партий деталей с использованием рассмотренного метода оптимизации их составов и расписаний их выполнения

№	Значение n^i	Значение критерия $f_1(\cdot)$ для решений, оптимизированных с использованием рассмотренного метода (мин)	Значение критерия $f_1(\cdot)$ для фиксированных партий деталей (мин)	Эффективность полученных при оптимизации решений (значение $f_{эмосп}$)
1	10	1082	1276	0.15
2	20	2357	2640	0.11
3	30	3491	3910	0.11
4	40	4667	5280	0.12

Анализ полученных результатов планирования показал, что для представленных исходных данных, характеризуемых малыми значениями неоднородностей длительностей выполнения операций с деталями на приборах системы и малыми значениями неоднородностей длительностей переналадок приборов на выполнение операций с деталями соответствующих типов, эффективность использования метода построения расписаний восстановления деталей в КС варьируется в пределах 10-15 %.

Для второй задачи построения расписаний процесса восстановления деталей формировались решения при следующих значениях параметров: $g^{ком} = 2$; количество комплектов каждого типа $n_g^{ком} = 10$ (всего из восстановленных деталей должно быть сформировано 20 комплектов). Матрица составов комплектов имеет следующий вид:

$$W = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

В ходе построения расписаний варьировались значения длительностей интервалов времени t^z ($z = \overline{1,Z}$) функционирования системы и количество Z этих интервалов. Матрицы длительностей выполнения операций $T = \| t_{li} \|_{L \times n}$, а также длительностей переналадок приборов $T^l = \left\| t^{\,l}_{ii'} \right\|_{n \times n}$ ($l = \overline{1,4}$) аналогичны введенным выше. Для сформированных с использованием рассмотренного метода решений по составам партий деталей, составам групп партий деталей, восстанавливаемых в течение временных интервалов ограниченной длительности, и расписаниям обработки партий, включенных в группы, на приборах системы, определялись значения критерия (6.24) вида $f_1([M,A],[\{N^z \mid (z = \overline{1,Z})\}, Q, N_g]^*)$ для каждого набора значений входных параметров. Также определялись значения критерия (6.24) при условии, что составы групп партий не оптимизируются (формируются начальные составы групп, по которым распределены партий, полученные в решении с первого уровня, без их дальнейшей оптимизации).

В качестве результатов исследования эффективности построения расписаний с использованием рассмотренного метода фиксировались значения отношения $f_{эмосгп} = (f_1^{мосгп} - f_1^{фикс}) / f_1^{мосгп}$ от входных параметров задачи ($f_{эмосгп}$ – степень увеличения количества комплектов при использовании рассмотренного метода оптимизации групп партий деталей по сравнению с фиксированными группами партий, $f_1^{фикс}$ – значение критерия $f_1([M,A],[\{N^z \mid (z = \overline{1,Z})\}, Q, N_g]^*)$ при условии, что составы групп не оптимизируются, $f_1^{мосгп}$ – значение критерия $f_1([M,A],[\{N^z \mid (z = \overline{1,Z})\}, Q, N_g]^*)$ при условии, что решения по составам групп оптимизируются с использованием рассмотренного метода). Результаты решения второй задачи построения расписаний (определение составов партий деталей, составов групп партий и расписаний обработки партий в системе (при условии формирования комплектов)) представлены в Таблице П3.5.2.

Таблица П3.5.2– Результаты построения расписаний процесса восстановления деталей с использованием метода оптимизации составов партий, групп партий и расписаний их выполнения

№	Длительности интервалов времени функционирования системы, t^z	Количество интервалов времени функционирования системы, Z	Значение критерия $f_1(\cdot)$ для решений, оптимизированных с использованием рассмотренного метода	Значение критерия $f_1(\cdot)$ для решений, в которых составы групп не оптимизируются (фиксированные группы)	Эффективность полученных при оптимизации решений (значение $f_{эмосгп}$)
1	2	3	4	5	6
1	200	2	4	3	0.25
		3	7	5	0.28
		4	9	6	0.3
		5	11	8	0.27
2	250	2	7	6	0.14
		3	10	8	0.2
		4	12	9	0.25
		5	14	11	0.21
3	300	2	10	9	0.1
		3	13	11	0.15
		4	15	12	0.2
		5	16	13	0.18

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«СЕВАСТОПОЛЬЭНЕРГО»

299040 г. Севастополь
ул. Хрусталева, 44
www.sevenergo.net

канцелярия: (8692)53-96-54
факс: (8692)57-03-14

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель генерального директора-
Главный инженер Шульженко В.А.
«СЕВАСТОПОЛЬЭНЕРГО»
«__» _____ 2021 г.

АКТ

о внедрении научных результатов диссертационного исследования на соискание ученой степени доктора технических наук
Кротова Кирилла Викторовича

Комиссия в составе:
Председатель: начальник ПТО Федоров Н.В.
Члены комиссии: инженер ПТО Ивашкевич М.Н.
инженер ПТО Сейдаметов Э.Э.

составили настоящий акт о том, что полученные научные результаты диссертационного исследования на соискание ученой степени доктора технических наук Кротова К.В. являются актуальными и использованы при разработке систем планирования ремонта оборудования предприятия, а именно:

– математическая модель процесса выполнения пакетов заданий в конвейерных системах;

– метод построения решений по составам пакетов заданий и расписаниям их выполнения в конвейерных системах;

– математическая модель процесса выполнения пакетов заданий при ограничении на длительности интервалов времени функционирования конвейерных систем;

– метод построения решений по составам пакетов заданий, составам групп пакетов заданий, выполняемых в течение интервалов времени ограниченной длительности, и расписаниям выполнения пакетов из групп в конвейерных системах.

Математическая модель процесса выполнения пакетов заданий в конвейерных системах, численный метод построения решений по составам пакетов заданий и расписаниям их выполнения в конвейерных системах позволяют эффективно решать задачи планирования ремонта оборудования на предприятии ООО «Севастопольэнерго».

Настоящий акт не является основанием для проведения взаимных финансовых расчетов.

Председатель комиссии:
начальник ПТО Федоров Н.В._____

Члены комиссии:
инженер ПТО Ивашкевич М.Н._____
инженер ПТО Сейдаметов Э.Э._____

Акционерное Общество
«КБ Радиосвязи»
299053 г. Севастополь, Фиолентовское шоссе, д. 1/2
Тел. (0692) 53-76-17, 53-76-19
ОГРН 1149204009074
ИНН/КПП 9201003022/920101001

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный Директор
АО «КБ Радиосвязи»
_____ С.В. Долгушев
«___» _____ 2020 г.

АКТ

о внедрении научных результатов диссертационного исследования на соискание ученой степени доктора технических наук
Кротова Кирилла Викторовича

Комиссия в составе:

председатель главный конструктор АО «КБ Радиосвязи» к.т.н. Макогон В.П., члены комиссии: ведущий инженер Евстифеев Е.А., ведущий инженер Ломаков Г.В.

составили настоящий акт о том, что полученные научные результаты диссертационного исследования на соискание ученой степени доктора технических наук Кротова К.В. являются актуальными и использованы при разработке перспективных средств радиосвязи, а именно:

– информационная модель процессов выполнения заданий в многостадийной системе;

– численный метод построения статических расписаний выполнения единичных заданий;

– математическая модель учета влияния возмущающих воздействий на ход процесса выполнения заданий в многостадийных системах, предусмотренный статическим расписанием (в частности, учета влияния отказов и восстановления приборов системы на ход процесса выполнения заданий);

– численный метод построения динамических расписаний выполнения заданий в многостадийных системах, позволяющий учитывать влияние отказов и последующего восстановления приборов системы на ход процесса реализации действий с заданиями, предусмотренный статическим расписанием.

Информационная модель процессов выполнения заданий, численный метод построения статических расписаний выполнения единичных заданий, математическая модель учета влияния возмущающих воздействий и численный метод построения динамических расписаний выполнения заданий позволяют эффективно решать задачи планирования установления радиосвязи, в том числе с учетом отказов средств радиосвязи и совершенствовать алгоритмы контроля доступа к радиоканалу.

Настоящий акт не является основанием для проведения взаимных финансовых расчетов.

Председатель комиссии:
Главный конструктор АО «КБ Радиосвязи», к.т.н. В.П. Макогон

Члены комиссии:
ведущий инженер Е.А. Евстифеев
ведущий инженер Г.В. Ломаков

1С-РАРУС
Комплексная автоматизация предприятий и организаций

УТВЕРЖДАЮ
Директор
Савин А.Ю.
17 декабря 2021 г.

АКТ

о внедрении научных результатов диссертационного исследования на соискание ученой степени доктора технических наук
Кротова Кирилла Викторовича

Комиссия в составе:

председатель Виноградов Г.В., члены комиссии: руководитель группы разработки Жуков А.М., руководитель группы разработки Шкурла М.Ю. составили настоящий акт о том, что полученные научные результаты диссертационного исследования на соискание ученой степени доктора технических наук Кротова К.В. являются актуальными и использованы при разработке перспективных программных продуктов оперативного складского учета, а именно:

– математическая модель процесса выполнения единичных заданий в конвейерной системе;

– математическая модель учета влияния возмущающих воздействий на ход процесса выполнения единичных заданий, предусмотренный статическим расписанием (в частности, учета влияния отказов и восстановления приборов системы на ход процесса выполнения заданий, поступления единичных заданий в систему для выполнения);

– метод построения статических расписаний выполнения единичных заданий;

– метод построения динамических расписаний выполнения заданий, позволяющий учитывать влияние отказов и последующего восстановления приборов системы на ход процесса реализации действий с заданиями, предусмотренный статическим расписанием, а также поступление в систему новых заданий с разными приоритетами;

– математическая модель процесса выполнения пакетов заданий в конвейерной системе;

– метод построения расписаний выполнения пакетов заданий в конвейерных системах, предусматривающий оптимизацию их составов и порядка реализации действий с ними.

Математические модели процесса выполнения единичных заданий в конвейерной системе и учета влияния возмущающих воздействий на ход процесса выполнения единичных заданий; методы построения статических и динамических

расписаний выполнения единичных заданий позволяют реализовывать эффективное решение оперативных складских задач при распределении поступающих грузов на складе. Математическая модель процесса выполнения пакетов заданий в конвейерной системе и метод построения расписаний выполнения пакетов заданий в конвейерных системах, позволяют эффективно решать оперативные складские задачи при комплектации заказов отгружаемыми товарами и при формировании грузовых мест на паллетах.

Настоящий акт не является основанием для проведения взаимных финансовых расчетов.

Председатель комиссии: Е.В. Виноградов

Члены комиссии:

руководитель группы разработки А.М. Жуков

руководитель группы разработки М.Ю.Шкурла

УТВЕРЖДАЮ
Директор ФГУП «13 СРЗ ЧФ» МО РФ
_____П.Н. Флоря
«__» _____ 2022 г.

АКТ

о внедрении научных результатов диссертационного исследования на соискание ученой степени доктора технических наук
Кротова Кирилла Викторовича

Комиссия в составе:

– председатель: заместитель главного инженера – начальник технического отдела ФГУП «13 СРЗ ЧФ» МО РФ Вододохов Ларион Георгиевич,

члены комиссии:

– начальник специального конструкторского бюро ФГУП «13 СРЗ ЧФ» МО РФ Погорелый Леонид Иванович,

– начальник технологического бюро ФГУП «13 СРЗ ЧФ» МО РФ Рогожин Андрей Артурович

составили настоящий акт о том, что полученные научные результаты диссертационного исследования на соискание ученой степени доктора технических наук Кротова К.В. являются актуальными и использованы при разработке систем планирования ремонта узлов и агрегатов оборудования на предприятии, а именно:

– математическая модель процесса обработки передаточных партий деталей в конвейерных системах;

–метод определения составов передаточных партий деталей и расписаний их обработки в конвейерных системах;

– математическая модель процесса обработки передаточных партий деталей при ограничении на длительности интервалов времени функционирования конвейерных систем;

– метод определения составов передаточных партий деталей, составов групп передаточных партий деталей, выполняемых в течение интервалов времени ограниченной длительности, и расписаний обработки партий деталей, входящих в группы, в конвейерных системах (для формирования сменно-суточных заданий).

Математическая модель процесса обработки передаточных партий деталей в конвейерных системах, метод определения составов передаточных партий деталей и расписаний их выполнения в конвейерных системах позволяют эффективно решать задачи планирования ремонта узлов и агрегатов корабельного оборудования на предприятии ФГУП «13-й судоремонтный завод Черноморского флота» Министерства обороны Российской федерации.

Суммарный экономический эффект от внедрения результатов работы на предприятии является коммерческой тайной. Настоящий акт не является основанием для проведения взаимных финансовых расчетов.

Председатель комиссии:
заместитель главного инженера –
начальник технического отдела
ФГУП «13 СРЗ ЧФ» МО РФ — Вододохов Л. Г.

Члены комиссии:
начальник специального
конструкторского бюро
ФГУП «13 СРЗ ЧФ» МО РФ — Погорелый Л.И.

начальник технологического
бюро ФГУП «13 СРЗ ЧФ» МО РФ — Рогожин А. А.