На правах рукописи

КРОТОВ Кирилл Викторович

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ МНОГОУРОВНЕВОЙ ОПТИМИЗАЦИИ РАСПИСАНИЙ МНОГОСТАДИЙНЫХ ПРОЦЕССОВ С АДАПТАЦИЕЙ

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Севастополь – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Севастопольский государственный университет»

Научный консультант: **Скатков Александр Владимирович**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информационные технологии и компьютерные системы»
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

Официальные оппоненты: **Мезенцев Юрий Анатольевич,**
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Автоматизированные системы управления»
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

Скобцов Юрий Александрович
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры компьютерных технологий и программной инженерии
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

Бойченко Олег Валерьевич
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры бизнес-информатики и математического моделирования, физико-технического института ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждения высшего образования «Южный федеральный университет», г. Ростов-на-Дону.

Защита диссертации состоится 15 сентября 2022 г. в 14.00 часов на заседании объединенного диссертационного совета Д999.231.02 при Федеральном государственном бюджетном научном учреждении Институт природно-технических систем, Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Севастопольский государственный университет» (СевГУ) по адресу: 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33, аудитория 420.

С диссертацией можно ознакомиться у ученого секретаря ИПТС (или в библиотеке СевГУ) и на сайте www.иптс.рф. Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации http://vak.minobrnauki.gov.ru/ и на сайте www.иптс.рф .

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью составителя, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 299011, г. Севастополь, ул. Ленина, 28 на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «__» _____2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д.999.231.02
кандидат физико- математических наук В.П.Евстигнеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В различных сферах практической деятельности (обработка данных, мелкосерийное производство, ремонт оборудования) процесс выполнения работ предусматривает наличие последовательности образующих его этапов. Для уточнения понятия многостадийного процесса введено понятие задания. Под заданием подразумевается работа, состоящая из отдельных этапов, каждый из которых выполняется на соответствующем ему приборе обрабатывающей системы с целью получения результатов. Для всех заданий количество этапов их выполнения является одинаковым и равно количеству приборов в системе. Технологический маршрут выполнения заданий предусматривает последовательную реализацию их этапов и прохождение заданиями приборов в системе в строго заданной их последовательности. Тогда многостадийным процессом является процесс выполнения заданий в системе, предусматривающий последовательную реализацию действий с ними на каждом из приборов. Система в этом случае является конвейерной системой (КС).

Многостадийных процесс выполнения заданий в КС характеризуется длительностями реализации действий с ними на приборах, длительностями переналадок приборов на выполнение заданий разных типов. Типизация заданий выполнена с точки зрения одинаковых либо разных значений указанных параметров. Эффективная реализация многостадийных процессов обеспечивается решением задачи построения расписаний выполнения заданий в КС. Ход многостадийного процесса выполнения единичных заданий (ЕЗ) в КС, предусмотренный расписанием, подвержен влиянию возмущающих воздействий, которые снижают эффективность использования ресурсов и производительность системы. Адаптация многостадийных процессов к возмущающим воздействиям с целью снижения их влияния реализуется путем построения динамических расписаний, учитывающих виды воздействий. Построение динамических расписаний обеспечивает повышение эффективности использования ресурсов и производительности КС.

При выполнении в КС наборов заданий разных типов решение задачи построения расписаний обеспечивается определением решений двух подзадач: оптимизации составов пакетов заданий (ПЗ), оптимизации расписаний выполнения ПЗ на приборах КС. Под ПЗ подразумевается совокупность заданий одного типа, выполняемых без переналадки приборов КС на выполнение заданий других типов. Необходимость оптимизации составов ПЗ связана с неоднородностями длительностей выполнения заданий на разных приборах КС и длительностей переналадок приборов. Оптимизация составов ПЗ и расписаний реализации действий с ними в КС обеспечивает снижение общей длительности выполнения заданий.

В ряде практических задач требуется формирование комплектов результатов выполнения ПЗ в КС. В настоящее время задача построения расписаний процессов реализации действий с ПЗ в КС, решение которой предполагает определение их составов и расписаний выполнения при учете введенного условия, не решена. Не менее важным является решение задачи построения расписаний выполнения ПЗ в КС при ограничении на интервалы времени их функционирования. К настоящему времени эта задача также не решена.

Для решения задач построения статических и динамических расписаний выполнения ЕЗ в КС синтезированы точные и приближенные методы оптимизации

решений. Решение этих задач базируется на моделях: процессов выполнения ЕЗ в КС; влияния возмущающих воздействий на ход процессов выполнения заданий, предусмотренный статическим расписанием. Вопросы разработки моделей второго вида являются слабо проработанными. Поэтому актуальна разработка методов математического моделирования влияния возмущающих воздействий разных видов на ход процессов выполнения ЕЗ в КС. Актуальным является также разработка методов построения динамических расписаний, учитывающих влияние возмущающих воздействий разных видов.

Решение задачи построения расписаний выполнения ПЗ в КС, предусматривающее определение их составов и расписаний реализации действий с ними на приборах, требует привлечения приближенных либо метаэвристических методов. Применение этих методов базируется на математических моделях многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС. В настоящее время модели указанного вида являются слабо проработанными. По этой причине актуальной является разработка методов математического моделирования процессов выполнения ПЗ в КС.

Существующие методы построения расписаний выполнения ПЗ в КС имеют ряд ограничений. В связи с этим разработка методов построения расписаний многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС является актуальной.

Объектом исследований является процесс выполнения заданий в КС (выполнения ЕЗ и ПЗ в КС).

Предметом исследований являются методы математического моделирования многостадийных процессов выполнения ЕЗ и ПЗ в КС (в том числе, влияния возмущающих воздействий на ход этих процессов), методы построения расписаний выполнения ЕЗ и ПЗ в КС, комплекс программ построения расписаний выполнения ЕЗ и ПЗ в КС, использующий разработанные методы и модели.

Цель работы состоит в разработке новых методов математического моделирования многостадийных процессов выполнения ЕЗ и ПЗ в КС, разработке новых методов построения расписаний многостадийных процессов выполнения ЕЗ и ПЗ в КС, разработке комплекса программ построения расписаний процессов выполнения ЕЗ и ПЗ в КС. Для достижения 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, 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 методов построения расписаний выполнения ПЗ в КС, учитывающих, в том числе, требование формирования комплектов результатов и ограничения на ресурсы системы, и предусматривающих применение теории иерархических игр с целью оптимизации решений по составам ПЗ, составам

групп ПЗ и расписаниям их выполнения;

– разработки комплекса программ математического моделирования и построения расписаний многостадийных процессов выполнения ЕЗ и ПЗ в КС.

Методы исследований. Для решения указанных задач использовались методы системного анализа, теории множеств, теории многоуровневых систем, теории иерархических игр, теории расписаний, методы вычислительной математики и оптимизации, численные методы решения экстремальных задач, методы предметно-ориентированного анализа и проектирования программных систем, методы моделирования функционирования программных систем.

Научная новизна работы. **Основными результатами, выносимыми на защиту и обладающими научной новизной,** 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 расписаний 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 выполнения ЕЗ 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 способы оптимизации решений на уровнях иерархии;

4) разработан численный метод оптимизации статических расписаний выполнения ЕЗ в КС, позволяющий получить результаты, являющимися лучшими, чем результаты известных метаэвристических алгоритмов; разработан 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 КС, 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 процессов;

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 формирование 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 процессом решения задач, обеспечивающую его гибкость; с использованием комплекса программ получены результаты исследований эффективности применения математических моделей процессов выполнения ЕЗ и ПЗ в КС, математических моделей иерархических игр оптимизации решений, методов локальной оптимизации решений на разных уровнях иерархии.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов обеспечивается корректным использованием математического аппарата, строгостью выводов аналитических формул, верификацией результатов оптимизации расписании выполнения ЕЗ в сравнении с аналитическими методами (для малого количества приборов), верификацией результатов оптимизации составов ПЗ и расписаний их выполнения в сравнении с результатами решения задач с использованием метода ветвей и границ и полного перебора (для малой размерности задачи).

Практическая значимость работы заключается в том, что результаты исследований легли в основу построения алгоритмов синтеза расписаний выполнения ЕЗ и ПЗ разных типов в КС с использованием соответствующих программ; результаты экспериментов позволили определить особенности процессов выполнения единичных заданий и ПЗ в КС.

Апробация работы. Результаты работы были доложены на 12 научных конференциях, в том числе на: научной сессии НИЯУ МИФИ-2015. – Москва, НИЯУ МИФИ, 2015; 23-й международной научно-технической конференции «Прикладные задачи математики». – Севастополь, СевГУ, 2015; международной научно-практической конференции «Информационные технологии и информационная безопасность в науке, технике и образовании "Инфотех – 2015». – Севастополь, СевГУ, 2015; 24-й международной научно-технической конференции «Прикладные задачи математики».– Севастополь, СевГУ, 2016; I Междисциплинарной Всероссийской научно-практической конференции «Развитие методологии современной экономической науки и менеджмента».– Севастополь, СевГУ, 2017; Международной научно-практической конференции «Информационные технологии и информационная безопасность в науке, технике и образовании "Инфотех –

2017».– Севастополь, СевГУ, 2017; IV и V межрегиональных научно-практических конференциях «Перспективные направления развития отечественных информационных технологий».– Севастополь, СевГУ, 2018-19; Международной научно-практической конференции «Интеллектуальные информационные системы–2018».– Воронеж, ВГТУ, 2018; Международной конференции «Математическое моделирование». – Москва, МАИ, 2020; Международной научно-технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении 2021» (ICMTMTE 2021). – Севастополь, 2021.

Результаты работы внедрены в: АО «КБ Радиосвязи» (г. Севастополь) для решения задач планирования установления радиосвязи, в том числе с учетом отказов средств радиосвязи, ООО «Севастопольэнерго» (г. Севастополь) для решения задач планирования ремонта оборудования, 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 оптимизации складских операций.

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

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, 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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована научная проблема и цель исследования, дана общая постановка решаемых задач и краткое содержание диссертации, определены научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

В первой главе определены виды задач математического моделирования и построения расписаний многостадийных процессов выполнения заданий в КС, решение которых требуется в различных сферах практической деятельности. В соответствии со способом типизации определены виды заданий: ЕЗ (значения параметров длительностей выполнения заданий и переналадки приборов различны), наборы заданий (значения этих параметров являются одинаковыми для заданий, входящих в один набор, и разными для заданий их разных наборов). Наличие разных типов заданий обуславливает необходимость построения расписаний многостадийных процессов их выполнения в КС. Сформулированы причины, определяющие необходимость формирования пакетов, связанные с неоднородностями длительностей выполнения заданий на приборах КС и неоднородностями длительностей переналадок приборов на их выполнение. Определены типы расписаний выполнения ЕЗ: статические (моменты времени d_i поступления ЕЗ в КС рав-

ны 0), динамические, построение которых обеспечивает адаптацию процессов выполнения ЕЗ в КС к возмущающим воздействиям. В результате декомпозиции задач построения расписаний выполнения ПЗ в КС определены подзадачи оптимизации их составов и расписаний реализации действий с ними на приборах КС.

В Главе 1 выполнен анализ существующих математических моделей многостадийных процессов выполнения ЕЗ в КС, моделей влияния возмущающих воздействий на их ход, методов построения статических и динамических расписаний выполнения ЕЗ в КС. Существующие математические модели влияния возмущающих воздействий на процесс выполнения ЕЗ в КС, предусмотренный статическим расписанием, учитывают один вид воздействий – поступление заданий в моменты времени $d_i > 0$, приоритеты которых равны приоритетам выполняемых заданий. Другие виды воздействий в моделях не учитываются. Обосновывается актуальность разработки: метода математического моделирования влияния возмущающих воздействий разных видов на ход процессов выполнения заданий, методов построения динамических расписаний выполнения ЕЗ в КС, обеспечивающих адаптацию процессов к влиянию возмущающих воздействий.

Выполнен анализ существующих математических моделей процессов выполнения ПЗ в параллельных обрабатывающих системах и методов построения расписаний процессов выполнения ПЗ в них. Делается вывод об отсутствии математических моделей процессов выполнения ПЗ в КС, процессов выполнения ПЗ в КС при формировании комплектов, при ограничении на длительности интервалов времени функционирования систем, об отсутствии методов построения расписаний выполнения ПЗ в КС, реализуемых без ограничений на размерность задач, предусматривающих определение составов ПЗ и расписаний их выполнения.

Во второй главе синтезирована информационная модель системы построения расписаний многостадийных процессов выполнения заданий в КС и классификация задач построения расписаний. Построение информационной модели предваряется введением обозначений для типов заданий *i*, количества типов заданий *n*, количества заданий каждого типа n^i ($i = \overline{1,n}$), идентификаторов *l* приборов КС, количества приборов *L*. Вводятся обозначения параметров, характеризующих процесс выполнения заданий в КС: t_{li} – длительности выполнения заданий *i*-х типов на *l*-х приборах КС (вектора V_i трудоемкостей выполнения заданий *i*-х типов на приборах КС), d_i – время поступления заданий i -х типов в систему, D_i – директивные сроки окончания выполнения заданий *i*-х типов; tm_i – технологические маршруты выполнения заданий i -х типов, ds_i – дисциплины обслуживания заданий, pr_i – правила выполнения заданий, prt_i – приоритеты заданий, $t_i^{lн}$ – интервалы времени наладки *l*-х приборов на выполнение заданий i -х типов, $t_{ii'}^{l}$ – интервалы времени переналадки *l*-х приборов с выполнения заданий i -го типа на выполнение заданий i'-го типа ($T_i^{н}$ – вектора значений интервалов времени наладки *l*-х приборов на выполнение заданий *i*-х типов; T^l – матрицы значений времени переналадки *l*-х приборов на выполнения заданий i'-х типов).

Вид модели системы построения расписаний выполнения заданий в КС следующий: $Sys = < Nres, Zd >$, где $Nres$–множество наборов параметров, характеризующих ресурсы системы, Zd –множество задач z_h построения расписаний. Для каждого ресурса введен набор параметров: $Res_e = < Nr_e, L, \{ Vr_l^e \mid l = \overline{1,L} \} >$, где Nr_e – идентификатор ресурса, Vr_l^e – количество e-го ресурса, имеющегося на каждом l-м приборе КС. Для описания ресурсов введено множество наборов параметров Res_e вида: $Nres = \{ Res_e \mid e = \overline{1,E} \}$. Для задач z_h введено обозначение множества Q_h ограничений на ресурсы. Задания i-го типа характеризуются набором параметров: $x_i = < i, V_i, tm_i, ds_i, pr_i, T_i^н, \{ T^l \mid l = \overline{1,L} \} >$. Для комплектов использованы обозначения: $g^{ком}$ – количество типов комплектов, формируемых из результатов выполнения ПЗ, матрица W, элементы w_{ig} которой – это количество результатов выполнения ПЗ i-го типа, которые входят в один комплект g-го типа. Параметры $g^{ком}$ и W объединены в кортеж вида: $W^{ком} = < g^{ком}, W >$. Через $W_h^{ком}$ обозначено множество кортежей, определяющих характеристики комплектов для задачи z_h. Вид множества входных данных: $X_h = [\{ < x_i, n^i, d_i, D_i, prt_i > \mid i = \overline{1,n_h} \}, W_h^{ком}]$. Через Y_h обозначено множество решений для задачи z_h, Kr_h – множество критериев, используемых при решении задачи. Тогда решаемой в системе задаче $z_h \in Zd$ соответствует набор параметров вида: $z_h = < X_h, Y_h, Q_h, Kr_h >$.

Существующие классификации задач построения расписаний выполнения заданий в КС не предусматривают их декомпозицию на подзадачи, которые являются иерархически упорядоченными. Введение новой классификации позволяет типизировать задачи с точки зрения представления их в виде иерархически упорядоченных подзадач, определяя, тем самым, способы их решения в иерархических системах. Для задач построения расписаний введено обозначение вида: $z_{lev}^{type,qc}$, где lev – количество уровней иерархии подзадач, $type$– тип формируемого расписания (статическое (c), динамическое ($д$), выполнения ЕЗ (e), выполнения ПЗ (n)), qc (*quantity of criterion*) – количество критериев на уровнях иерархии. Определены типы задач построения расписаний, решаемые в работе: z_1^{ce1}, $z_1^{де1}$ – одноуровневые задачи построения статических расписаний (СР) и динамических расписаний (ДР); z_2^{cn1}, $z_2^{cnк1}$ – двухуровневые задачи построения СР выполнения ПЗ в КС и расписаний выполнения ПЗ в КС при формировании комплектов; z_3^{cn1}, $z_3^{cnк1}$ –трехуровневые задачи построения СР выполнения ПЗ при ограничении на длительности интервалов времени функционирования КС, при ограничении и формировании комплектов.

В третьей главе рассматривается решение задач построения статических расписаний многостадийных процессов выполнения ЕЗ в КС и динамических расписаний с целью адаптации процессов к возмущающим воздействиям разных ви-

дов. Совершенствование методов построения СР позволяет снизить простои приборов при выполнении заданий, повысить эффективность использования ресурсов. Разработка новых методов построения ДР позволяет уменьшить простои приборов по сравнению со статическими расписаниями, в которых при реализации воздействий порядок заданий не изменяется. Расписание выполнения ЕЗ в КС представляется совокупностью последовательностей π^l ($l=\overline{1,L}$) реализации действий с ними на приборах, обозначено как π, и имеет вид: $\pi=\{\pi^1,\pi,^2\pi^3,...,\pi^L\}$. Введены обозначения: P^l ($l=\overline{1,L}$) – матрицы порядков выполнения ЕЗ на *l*-х приборах, элемент $p_{ij}^l=1$, если ЕЗ *i*-го типа занимает в π^l *j*-ю позицию, $p_{ij}^l=0$ в противном случае, T^{0l} ($l=\overline{1,L}$) – матрицы моментов времени t_{ji}^{0l} начала выполнения ЕЗ *i*-х типов, занимающих в π^l *j*-е позиции. Вид расписания выполнения ЕЗ в КС: $\{[P^l,T^{0l}]|l=\overline{1,L}\}$.

Формулируется возможность использования «жадного» подхода в дискретной оптимизации при построении локально оптимальных СР выполнения ЕЗ, который предполагает формирование (*n-1*)-го частичного расписания. Порядок выполнения заданий, предшествующих добавляемому заданию *i*-го типа, оптимизирован на предыдущих шагах алгоритма в π^l ($l=\overline{1,L}$) и не меняется. На основе этого решения определяется новое расписание, связанное с определением позиций в π^l ($l=\overline{1,L}$) ЕЗ *i*-го типа. Критерий оптимизации расписаний выполнения ЕЗ в КС характеризует общие простои приборов:

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

где первое слагаемое определяет простои приборов перед началом выполнения заданий, второе слагаемое – простои приборов в ожидании готовности заданий к выполнению в π^l ($l=\overline{2,L}$). Построен алгоритм *Greedy Scheduler* определения СР выполнения ЕЗ в КС, реализующий поиск в окрестностях текущего локально оптимального решения (ТЛОР). Доказывается **Теорема** о получении с использованием алгоритма *Greedy Scheduler* локально оптимальных решений.

В главе 3 определены виды возмущающих воздействий, которые влияют на многостадийные процессы выполнения ЕЗ в КС: поступление в моменты времени $d_i>0$ заданий, приоритеты которых равны либо превышают приоритет выполняемых заданий; отказы и восстановление приборов КС. Метод математического моделирования влияния возмущающих воздействий на ход процесса выполнения ЕЗ в КС предусматривает определение в π^l двух последовательностей π_1^l и π_2^l ($l=\overline{1,L}$): порядки выполнения ЕЗ в π_1^l не изменяются, порядки ЕЗ в π_2^l оптимизируются с учетом вида воздействий. Построение моделей влияния возмущений предусматривает введение условий, позволяющих определять виды этих последовательностей. Получены условия формирования последовательностей π_1^l и π_2^l

($l=\overline{1,L}$) с учетом поступления в КС i_{n+g} -х ЕЗ с $d_{i_{n+g}}>0$ ($g=\overline{1,k}$):

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

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

где $d_{i_{n+g}}>0$ – момент времени поступления ЕЗ i_{n+g} -го типа ($g=\overline{1,k}$). Метод построения ДР для заданий с $d_i>0$ предполагает: 1) определение множеств N^l ($l=\overline{1,L}$) заданий, порядок которых в π^l будет изменен; формирование множества N_{np} ЕЗ, которые должны быть добавлены в π_2^l для определения в них позиций этих заданий: $N_{np}=\bigcup_{l=1}^{L}N^l$; 2) размещение в π_2^l заданий *i*-х типов, для которых $i\in\left[N_{np}\cap(\bigcup_{l=1}^{L}\pi_1^l)\right]$, определение позиций этих заданий в π_2^l ($l=\overline{1,L}$); 3) размещение в последовательностях π_2^l ($l=\overline{1,L}$) заданий *i*-ых типов, для которых $(i\in N_{np})\&(i\notin(\bigcup_{l=1}^{L}\pi_1^l))$, определение позиций этих заданий в π_2^l с использованием модификации алгоритма *Greedy Scheduler*.

Метод построения ДР для заданий с $d_i\ge 0$ реализован программно. В качестве результатов исследований эффективности его применения фиксировалось снижение простоев приборов КС в ДР по сравнению с СР, не предполагающими изменения порядков заданий в π^l : $(f_{cm}-f_{дин})/f_{cm}$, где f_{cm} –простои приборов в СР с добавлением в них заданий с $d_i>0$ без изменения вида π^l , $f_{дин}$ – простои приборов в ДР. Результаты исследования снижения простоев приборов в ДР, соответствующие максимальным значениям, представлены на рисунках 1,2.

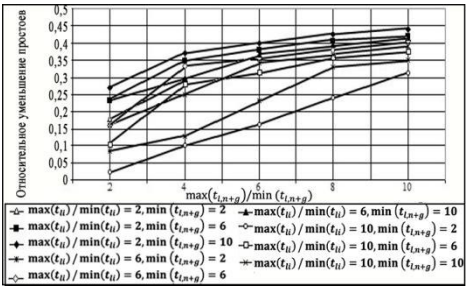

Рисунок 1 – Снижение общих простоев приборов КС при реализации ДР (с $d_i\ge 0$) по сравнению со СР ($g=\overline{1,2}$, $min(t_i^l)=2$)

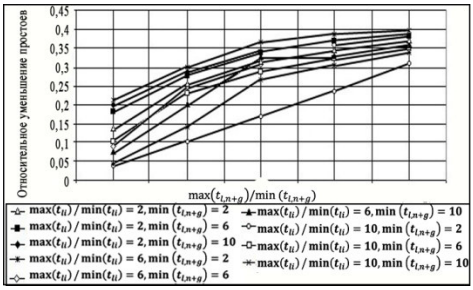

Рисунок 2 – Снижение общих простоев приборов КС при реализации ДР (с $d_i\ge 0$) по сравнению со СР ($g=\overline{1,4}$, $min(t_i^l)=2$)

Анализ результатов позволил сделать вывод о том, что использование метода позволяет сократить простои приборов КС до 40 % по сравнению с СР, в котором поступившие ЕЗ добавляются в π^l без изменения их вида.

Для уменьшения влияния воздействий второго вида на процесс выполнения заданий синтезированы модель и метод построения ДР. Задания с высоким приоритетом, обозначенные как i_{np}, прерывают выполнение заданий на *l*-х приборах КС ($d_{i_{np}}$ – момент времени поступления заданий i_{np} ($d_{i_{np}} > 0$), $R_{i_{np}}$ –приоритет заданий i_{np} ($R_{i_{np}} > R_i$, где R_i – приоритеты заданий с $d_i = 0$). Задания i_{np} прерывают выполнение заданий *i*-х типов в π^l, поэтому их позиции в π^l ($l = \overline{1, L}$) не определяются. Для каждого *l*-го прибора определяются моменты времени поступления заданий i_{np}, обозначенные как $t^{0l}_{i_{np}}$ (при $t^{01}_{i_{np}} = d_{i_{np}}$). Если задание i_{np} прерывает выполнение задания *i*-го типа в *j*-ой позиции в π^l (обозначенного как i^l_j, $t^{0l}_{i_{np}} \in [t^{0l}_{i_j}; \overline{t^l_{i_j}}]$, где $t^{0l}_{i_j}$ и $\overline{t^l_{i_j}}$ – моменты времени начала и окончания выполнения задания *i*-го типа в *j*-ой позиции на *l*-м приборе), то длительность его выполнения модифицируются: $(t_{li_j})' = t_{li_j} + t_{li_{np}}$. Если задание i_{np} поступает на *l*-й прибор в течение его простоя в ожидании готовности задания i^l_j ($t^{0l}_{i_{np}} \in [\overline{t^l_{i'_{j-1}}}; t^{0l}_{i_j}]$, где $\overline{t^l_{i'_{j-1}}}$ – момент времени окончания выполнения задания *i'*-го типа в *(j-1)*-ой позиции в π^l), то определяется момент времени начала выполнения задания $i^l_j : t^{0l}_{i_j} = max(\overline{t^{l-1}_{i_{j'}}}; \overline{t^l_{i_{np}}})$. Синтезированы условия включения заданий в π^l_1 и π^l_2. Построение ДР предполагает определение порядков выполнения заданий i^l_j в последовательностях π^l_2 с учетом модификации длительностей t_{li_j} выполнения заданий i^l_j (при $t^{0l}_{i_{np}} \in [t^{0l}_{i_j}; \overline{t^l_{i_j}}]$) либо значений $t^{0l}_{i_j}$ (при $t^{0l}_{i_{np}} \in [\overline{t^l_{i'_{j-1}}}; t^{0l}_{i_j}]$). Условия включения заданий i^l_j в последовательности π^l_1 и π^l_2, выражения для модификации значений t_{li_j} либо $t^{0l}_{i_j}$ являются моделью влияния возмущающего воздействия указанного вида на процесс выполнения ЕЗ.

Алгоритм метода построения ДР при поступлении в КС заданий i_{np} аналогичен рассмотренному выше алгоритму. Проведено исследование эффективности использования метода для построения ДР. В качестве результатов фиксировалось снижение простоев приборов в ДР по сравнению с СР, не предполагающих изменение порядков заданий в $\pi^l : (f_{ст} - f_{дин}) / f_{ст}$. Результаты исследований представлены на рисунках 3, 4.

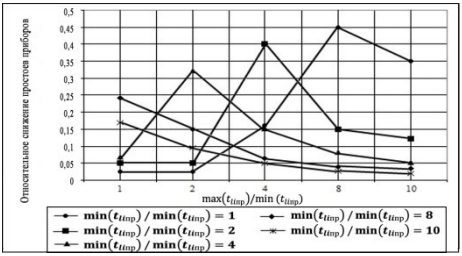

Рисунок 3– Снижение простоев приборов КС в ДР с учетом поступления задания i_{np} (одно задание i_{np}) по сравнению с СР

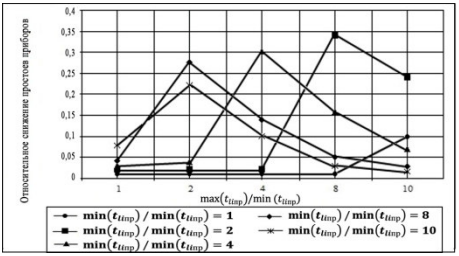

Рисунок 4– Снижение простоев приборов КС в ДР с учетом поступления заданий i_{np} (два задания i_{np}) по сравнению с СР

Анализ результатов показал, что использование модели влияния воздействий на ход процесса выполнения заданий и метода построения ДР позволяет сократить простои приборов КС в ДР до 40% по сравнению с СР, в котором порядки выполнение заданий не меняются.

В главе 3 синтезирован метод построения ДР с учетом отказов приборов КС. Отказ прибора КС и его восстановление отождествлен с поступлением задания с высоким приоритетом и обозначен как $i_{вос}$. Длительность восстановления прибора задана в качестве входного параметра задачи. Вводятся условия для определения последовательностей, порядок заданий в которых не изменяется (π_1^l, $\pi_1^{\hat{l}}$), и для которых изменяется порядок выполнения заданий (π_2^l, $\pi_2^{\hat{l}}$), где $\hat{l}$ – номер отказавшего прибора. Отказ прерывает выполнение задания $i_q^{\hat{l}}$ на $\hat{l}$ -м приборе КС, длительность выполнения которого модифицируется: $(t_{\hat{l}i_q})' = t_{\hat{l}i_q} + t_{\hat{l}i_{вос}}$. Формирование ДР предполагает размещение в π_2^l и $\pi_2^{\hat{l}}$ заданий, которые не были выполнены к моменту времени $t_{i_{вос}}^{0\hat{l}}$, при модификации значения $t_{\hat{l}i_q}$ для задания $i_q^{\hat{l}}$, выполнение которого прерывается отказом $\hat{l}$ -го прибора. Выполнена программная реализация метода построения ДР, проведено его исследование. В качестве результатов фиксировалось снижение простоев приборов в ДР по сравнению с СР, в котором порядки заданий в π^l не изменяются. Результаты исследований представлены на рисунках 5, 6. Их анализ показал, что использование метода позволяет сократить простои приборов КС до 20 % по сравнению с СР.

В главе 4 применяется иерархический подход к решению задачи построения расписаний выполнения ПЗ в КС. Синтез расписаний выполнения ПЗ предусматривает определение составов пакетов и порядка реализации действий с ними на приборах КС. Построение расписаний реализуется на основе значений параметров n и n^i, значений t_{li} длительностей выполнения заданий на приборах КС, значений $t_{ii'}^l$, длительностей переналадок приборов на выполнение заданий.

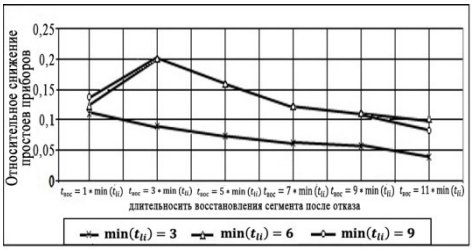

Рисунок 5 – Снижение простоев приборов КС при реализации ДР с учетом отказов по сравнению с СР (при $max(t_{\hat{l}i})/min(t_{li}) = 2$)

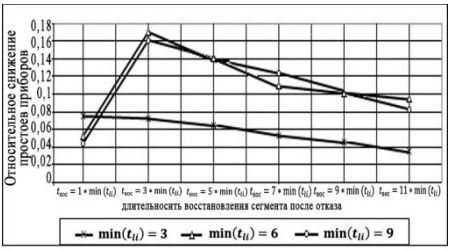

Рисунок 6 – Снижение простоев приборов КС при реализации ДР с учетом отказов по сравнению с СР (при $max(t_{\hat{l}i})/min(t_{li}) = 3$)

Метод математического моделирования процессов выполнения ПЗ в КС предусматривает представление моделей в виде совокупности иерархически упорядоченных компонент. Для синтеза модели процессов выполнения ПЗ в КС введены обозначения: $M = (m_1, m_2, .., m_n)^T$ – вектор количества ПЗ i-х типов, $A = \|a_{ih}\|_{n \times m}$ (где $m = \max\limits_{i=\overline{1,n}}(m_i)$) – матрица составов ПЗ i-х типов, элемент a_{ih} – количество заданий i-го типа в h-м ПЗ ($h \le m_i$)), $P = \|p_{ij}\|_{n \times n_p}$ – матрица порядка выполнения ПЗ в КС (элемент $p_{ij} = 1$, если ПЗ i-го типа занимает в последовательностях π^l j-ю позицию, $p_{ij} = 0$ в противном случае), $R = \|r_{ij}\|_{n \times n_p}$ – матрица количества заданий i-х типов в ПЗ, занимающих в π^l j-е позиции; T^{Ol} – матрицы моментов времени t_{jq}^{Ol} начала выполнения q-х заданий в пакетах, занимающих j-е позиции в π^l ($l = \overline{1,L}$). Компоненты модели процесса выполнения ПЗ в КС имеют вид: верхний уровень – $[M, A]$, нижний уровень – $[P, R, \{T^{Ol} \mid l = \overline{1,L}\}])$.

Метод построения расписаний выполнения ПЗ в КС предусматривает представление обобщенной задачи в виде совокупности иерархически взаимосвязанных подзадач, для каждой из которых на соответствующем ей уровне иерархии определяются локально оптимальные решения. Для указанного способа построения расписаний предусмотрен определенный порядок действий: первым формируется решение на верхнем уровне по составам ПЗ, затем на его основе формируется решение по порядкам выполнения ПЗ в КС. Формирование решений в системе обеспечивается их обменом между уровнями. Решение $[M, A]$ передается на нижний уровень для формирования на его основе расписания $[P, R, \{T^{Ol} \mid l = \overline{1,L}\}]^* \in N_2([M, A])$. Расписание $[P, R, \{T^{Ol} \mid l = \overline{1,L}\}]^*$ передается на верхний уровень для оценки оптимальности решения $[M, A]$. Предусмотрен определенный порядок формирования решений, обмен решениями между уровнями, поэтому построение расписаний выполнения ПЗ в КС осуществляется с привлечением теории иерархических игр. Первым ход делает

ведущий игрок первого уровня, формируя решение $[M, A]$, второй ход – ведомый игрок нижнего уровня, формируя расписание $[P, R, \{T^{Ol} \mid l = \overline{1, L}\}]^*$, передаваемое на первый уровень для оценки оптимальности решения по составам ПЗ.

Синтезированы выражения для определения значений t_{jq}^{0l} для заданий в каждом пакете в последовательностях π^l. Построена модель иерархической игры для оптимизации составов ПЗ и расписаний их выполнения следующего вида:
–первый (верхний) уровень (оптимизация составов ПЗ):

$$min\, f_1, \quad f_1 = t_{n_p, n_{n_p}}^{0L} + \sum_{h=1}^{n} t_{Lh} \cdot p_{h, n_p}; \tag{3}$$

– второй уровень (оптимизация расписаний выполнения ПЗ):

$$min\, f_2, \quad f_2 = \sum_{l=1}^{L} t_{11}^{0l} + \sum_{l=1}^{L} \sum_{j=2}^{n_p} \left[t_{j1}^{0l} - \left[t_{j-1, n_{j-1}}^{0l} + \sum_{h=1}^{n} t_{lh} \cdot p_{h, j-1} \right] \right] + . \tag{4}$$

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

Выражение (3) позволяет вычислить момент времени окончания выполнения последнего ПЗ в последовательности π^L (на последнем приборе), который минимизируется. Выражение (4) позволяет вычислить суммарные простои приборов КС при выполнении ПЗ в π^l. В модель игры введены ограничения на количество ПЗ и количество заданий в них, на количество ПЗ *i*-го типа в π^l и на количество ПЗ в π^l ($l = \overline{1, L}$). Стратегия поведения ведущего игрока основывается на применении им принципа оптимизма, предусматривающего ожидание от ведомого игрока формирования решений, обеспечивающих максимизацию его выигрыша. Стратегия поведения ведомого игрока состоит в выборе решений, которые обеспечивают принцип благожелательности (игрок формирует решения, обеспечивающие достижение цели ведущим игроком). Описана ситуация равновесия в иерархической игре двух лиц по оптимизации расписаний выполнения ПЗ в КС.

Способ оптимизации составов ПЗ на верхнем уровне предполагает поиск лучших решений в окрестностях O_k ТЛОР с разной метрикой и разного вида. С этой целью для каждого *i*-го типа заданий ($i = \overline{1, n}$) введены матрицы $A_{1i}^{буф}$ и $A_{2i}^{буф}$. В $A_{1i}^{буф}$ хранятся решения по составам ПЗ *i*-х типов в окрестности O_k, на основе которых формируются новые решения в окрестности O_{k+1} ТЛОР, которые размещаются в матрицах $A_{2i}^{буф}$. Первоначально в $A_{1i}^{буф}$ ($i = \overline{1, n}$) выполняется хранение решений по начальным составам ПЗ *i*-х типов. Формирование новых решений по составам ПЗ *i*-го типа в окрестностях первого вида ТЛОР предполагает выполнение действий:1) изменение составов ПЗ *i*-го типа в заданном количестве m_i при неизменных составах ПЗ других типов, 2) увеличение количества m_i ПЗ *i*-го типа и формирование начального решения по их составам. Формирование решений по составам ПЗ *i*-х типов в окрестности второго вида предполагает комби-

нирование решений, хранящихся в матрицах $A_{2i}^{буф}$ ($i=\overline{1,n}$).

Формирование новых решений по составам ПЗ *i*-го типа для текущего значения m_i предполагает увеличение количества заданий в *h*-х пакетах ($h=\overline{2,m_i}$) и уменьшение их количества в *(h=1)*-м пакете. При выполнении условия $a_{i1} \geq a_{ih}$ ($h=\overline{2,m_i}$) полученное решение интерпретируется, при $a_{i1} < a_{ih}$ формирование новых решений по составам ПЗ в количестве m_i завершается, выполняется увеличение m_i количества ПЗ и формирование начального решения по их составам.

Доказаны **Теоремы,** определяющие: условие окончания формирования ПЗ в количестве m_i, условие, позволяющее сократить количество решений в окрестности O_{k+1}, формируемых на основе решений из O_k. Способ изменения составов ПЗ *i*-го типа на базе решений из O_k предусматривает следующий порядок действий:

1) извлечь решение по составам ПЗ из матрицы $A_{1i}^{буф}$ (q_{1i} -ю строку $A_{1i}^{буф}$);

2) увеличить количество заданий в пакете с заданным индексом *h* (при неизменных составах других ПЗ), уменьшить количество заданий в (*h=1*)-м пакете, результат записывается в q_{2i} -ю строку матрицы $A_{2i}^{буф}$;

3) проверить условие $(a_{q2_i,1})_{2i}^{буф} < (a_{q2_i,h})_{2i}^{буф}$; при $(a_{q2_i,1})_{2i}^{буф} < (a_{q2_i,h})_{2i}^{буф}$ решение удаляется из матрицы $A_{2i}^{буф}$, формирование новых решений на основе текущего решения из матрицы $A_{1i}^{буф}$ прекращается, выполняется переход к другому решению в $A_{1i}^{буф}$ (перейти на пункт 1); при условии $(a_{q2_i,1})_{2i}^{буф} \geq (a_{q2_i,h})_{2i}^{буф}$ полученное решение принадлежит окрестности O_{k+1}, перейти на пункт 4;

4) проверить условие $(a_{q1_i,h})_{1i}^{буф} > (a_{q1_i,h+j})_{1i}^{буф}$ ($j=\overline{1,m_i-h}$) (определить возможность формирования решений, не дублирующих полученные ранее), при его выполнении модифицировать состав $(h+j)$-го ПЗ; если условие не выполняется, то перейти к следующему решению из O_k (из $A_{1i}^{буф}$) (перейти к пункту 1);

5) если $(a_{q2_i,1})_{2i}^{буф} < (a_{q2_i,h+j})_{2i}^{буф}$ (прекращается формирование решений на основе решения из q_{1i} -ой строки матрицы $A_{1i}^{буф}$), то перейти к следующему решению из O_k (в $A_{1i}^{буф}$) (перейти к пункту 1); аналогичные действия выполняются для всех решений, хранящихся в матрице $A_{1i}^{буф}$;

6) выполнить сравнение решений в O_{k+1} с точки зрения дублирования ими друг друга (сравнить решения, находящиеся в матрице $A_{2i}^{буф}$);

7) после формирования новых решений в окрестности O_{k+1}, хранимых в матрице $A_{2i}^{буф}$, среди них выбрать лучшее (которое обеспечивает максимальное

уменьшение значения f_1 среди решений по составам пакетов *i*-го типа и среди решений по составам пакетов *i'*-х типов ($i' \neq i$)).

Если в окрестности O_{k+1} первого вида не найдено решение, улучшающее текущее ТЛОР, то формируются решения, входящие в окрестность O_{k+1} второго вида. Для этого выполняется построение комбинаций составов ПЗ, хранящихся в матрицах $A_{2i}^{буф}$ ($i = \overline{1,n}$). Алгоритм определения ТЛОР по составам ПЗ *n* типов предусматривает выполнение следующих действий:

1) формирование решений по составам ПЗ в окрестностях O_{k+1} ТЛОР для каждого типа заданий; среди решений по составам ПЗ разных типов в окрестности O_{k+1} ТЛОР выбор лучшего, фиксация его как ТЛОР;

2) если среди решений в окрестностях O_{k+1} первого вида лучшего решения не найдено, тогда выполняется формирование решений, являющихся комбинациями решений, находящихся в матрицах $A_{2i}^{буф}$ для каждого *i*-го типа заданий ($i = \overline{1,n}$), входящих в окрестности O_{k+1} второго вида;

3) увеличение количества m_i ПЗ *i*-х типов ($i = \overline{1,n}$) и формирование начальных решений по их составам; действия, связанные с увеличением количества ПЗ продолжаются до тех пор, пока могут быть сформированы корректные начальные их составы в матрицах $A_{1i}^{буф}$ (условие вида $(a_{q1_i,h})_{2i}^{буф} \geq 2$, $h = \overline{1,m_i}$).

Проведено исследование эффективности применения предложенных моделей и метода построения расписаний выполнения ПЗ в КС.. В качестве результатов определялось уменьшение интервала времени выполнения ПЗ, составы которых сформированы с использованием метода, по сравнению с интервалом времени выполнения фиксированных ПЗ: $(f_1^{фикс} - f_1^{мосп}) / f_1^{фикс}$, где $f_1^{фикс}$ – значение критерия на верхнем уровне для фиксированных ПЗ, $f_1^{мосп}$ – значение критерия на верхнем уровне после оптимизации составов ПЗ. Результаты представлены на рисунках 7, 8 в сравнении с генетическими алгоритмами (ГА) (МО СП– метод оптимизации составов пакетов).

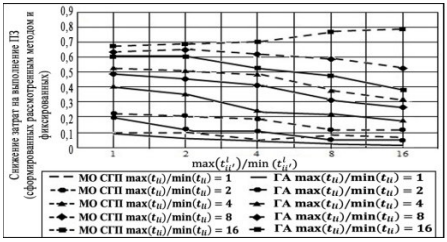

Рисунок 7 – Снижение временных затрат на выполнение ПЗ (при $n^i = 16$, *n=10, L=5*)

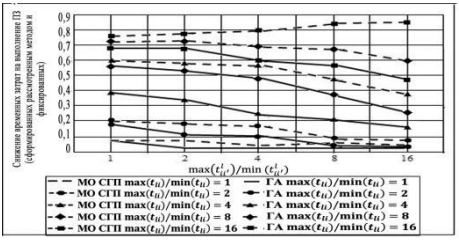

Рисунок 8 – Снижение временных затрат на выполнение ПЗ (при $n^i = 16$, *n=10, L=10)*

Анализ результатов позволил сделать вывод о том, что использование метода построения расписаний выполнения ПЗ в КС обеспечивает снижение времени их

выполнения в сравнении с фиксированными ПЗ в среднем на 40%. Алгоритм формирования составов ПЗ применен для оптимизации решений с использованием метода ветвей и границ (МВГ). Для задач малого размера выполнена оценка точности приближения решений, полученных МВГ и с использованием метода многоуровневой оптимизации, к решениям, полученным полным перебором. Точность приближения к решению, полученному полным перебором, составила 0.96-1.0 для МВГ и 0.9-0.94 для рассмотренного метода многоуровневой оптимизации.

В главе 5 реализовано решение задачи построения расписаний многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС при формировании комплектов результатов. Решение задачи построения расписаний выполнения ПЗ в КС с учетом формирования комплектов предполагает решение подзадач: определения составов ПЗ, определения расписаний выполнения ПЗ в КС, распределения результатов выполнения ПЗ по комплектам в соответствии с расписанием. Компонентами модели процесса выполнения ПЗ в КС являются: верхний уровень – составы ПЗ в виде *[M,A]*, нижний уровень – расписания выполнения ПЗ в КС в виде $[P,R,\{T^{0l} \mid l=\overline{1,L}\}]$. Решены задачи построения расписаний выполнения ПЗ в КС при: 1) оперативном формировании комплектов; 2) формировании комплектов в заданные директивные сроки. Оптимизация расписаний выполнения ПЗ в КС, обеспечивает уменьшение среднего времени формирования комплектов, а также снижение запаздываний с формированием комплектов относительно заданных директивных сроков.

В математической модели процесса выполнения ПЗ при распределении результатов по комплектам использованы обозначения: $g^{ком}$ – количество типов комплектов; $n_g^{ком}$ – количество формируемых комплектов *g*-х типов ($g=\overline{1,g^{ком}}$); h_g – номер формируемого комплекта *g*-го типа ($h_g=\overline{1,n_g^{ком}}$); w_{ig} – количество результатов выполнения заданий *i*-го типа, которые должны быть включены в один комплект *g*-го типа; t_{i,h_g}^{g} – момент времени окончания формирования *i*-ой компоненты h_g-го комплекта *g*-го типа ($h_g=\overline{1,n_g^{ком}}$, $g=\overline{1,g^{ком}}$); T^g ($g=\overline{1,g^{ком}}$) – матрицы моментов времени окончания формирования *i*-х компонент ($i=\overline{1,n}$) h_g-х комплектов ($h_g=\overline{1,n_g^{ком}}$) *g*-х типов; t_{g,h_g} – моменты времени окончания формирования h_g-х комплектов ($h_g=\overline{1,n_g^{ком}}$) *g*-х типов ($t_{g,h_g}=\max_i[(t_{i,h_g}^{g})]$). При решении задач применен подход, предполагающий построение моделей иерархических игр, аналогичный главе 4. В качестве критерия оптимальности составов ПЗ при решении первой задачи использован параметр – среднее время формирования комплектов. Вид критерия оптимальности решений по составам ПЗ, соответствующий этой задаче: $\left(\sum_{g=1}^{g^{ком}}\sum_{h_g=1}^{n_g^{ком}} t_{g,h_g}\right) / \left(\sum_{g=1}^{g^{ком}} n_g^{ком}\right)$. Критерием опти-

мизации расписаний являются общие простои приборов при выполнении ПЗ (по аналогии с главой 4). Модель иерархической игры оптимизации составов ПЗ, расписаний их выполнения при оперативном формировании комплектов имеет вид:

– первые уровень:

$$min\, f_1, \quad f_1 = \left(\sum_{g=1}^{g^{ком}} \sum_{h_g=1}^{n_g^{ком}} t_{g,h_g} \right) \Big/ \left(\sum_{g=1}^{g^{ком}} n_g^{ком} \right); \tag{5}$$

– второй уровень:

$$min\, f_2, \quad f_2 = \sum_{l=1}^{L} t_{11}^{0l} + \sum_{l=1}^{L} \sum_{j=2}^{n_p} \left[t_{j1}^{0l} - \left[t_{j-1,n_{j-1}}^{0l} + \sum_{h=1}^{n} t_h^l \cdot p_{h,j-1} \right] \right] + \tag{6}$$

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

В математическую модель процесса выполнения ПЗ при оперативном формировании комплектов входят выражения для расчета: моментов времени t_{g,h_g} окончания формирования h_g-х комплектов g-х типов; значений общих временных затрат на формирование комплектов g-го типа; среднего времени формирования комплектов $g^{ком}$ типов.

При решении задачи построения расписаний выполнения ПЗ при формировании комплектов в директивные сроки использованы обозначения: $d_{g,h_g}^{ком}$ – директивный срок формирования h_g-го комплекта g-го типа ($h_g = \overline{1, n_g^{ком}}$, $g = \overline{1, g^{ком}}$); $K_y^{ком}, D_y^{ком}$ – упорядоченные множества типов комплектов и значений директивных сроков формирования h_g-х комплектов ($h_g = \overline{1, n_g^{ком}}$) g-х типов ($g = \overline{1, g^{ком}}$); $t_{g_p}^{ком}$ – момент времени окончания формирования комплекта g-го типа, идентификатор которого занимает p-ю позицию в $K_y^{ком}$; $d_{g_p}^{ком}$ – директивный срок формирования комплекта g-го типа, занимающий p-ю позицию в $D_y^{ком}$; tz_{g_p} – запаздывание с формированием комплекта, тип g которого занимает p-ю позицию в множестве $K_y^{ком}$, относительно его директивного срока в p-й позиции в множестве $D_y^{ком}$ ($tz_{g_p} = max\{0, t_{g_p}^{ком} - d_{g_p}^{ком}\}$). Суммарное запаздывание с формированием комплектов: $\sum_{p=1}^{g_y^{ком}} tz_{g_p}$. Модель иерархической игры оптимизации составов ПЗ и расписаний их выполнения в КС при формировании комплектов в директивные сроки имеет вид:

– первый уровень:

$$min\, f_1,\ f_1 = \sum_{p=1}^{g_y^{ком}} tz_{g_p}\ ; \tag{7}$$

– второй уровень:

$$min\, f_2,\quad f_2 = \sum_{l=1}^{L} t_{11}^{0l} + \sum_{l=1}^{L}\sum_{j=2}^{n_p}\left[t_{j1}^{0l} - \left[t_{j-1,n_{j-1}}^{0l} + \sum_{h=1}^{n} t_h^l \cdot p_{h,j-1}\right]\right] + \tag{8}$$

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

Ограничения, которые определяют множества N_1 составов ПЗ и $N_2([M,A])$ расписаний их выполнения в моделях (5), (6) и (7), (8) аналогичны ограничениям для этих множеств, сформированным в модели (3),(4). Стратегия поведения ведущего и ведомого игроков предусматривают следование ими принципам оптимизма и благожелательности. Ситуация равновесия в иерархических играх (5), (6) и (7), (8) аналогична ситуации равновесия, сформулированной для задачи (3), (4).

Для расчета значений t_{g,h_g} сформулирован способ предварительного упорядочивания типов комплектов (формирования множества $K_y^{ком}$) и алгоритм распределения результатов по комплектам, при реализации которого определяются значения t_{i,h_g}^g ($i = \overline{1,n}$, $h_g = \overline{1,n_g^{ком}}$) элементов матриц T^g ($g = \overline{1,g^{ком}}$). Алгоритм распределения результатов по комплектам предусматривает для *i*-го типа заданий извлечение результатов из пакета, в котором их количество $r_{ij} > 0$. Если из рассматриваемого пакета *i*-я компонента h_g-го комплекта *g*-го типа заполнена, то t_{i,h_g}^g определяется как момент времени окончания выполнения ПЗ в *j*-ой позиции в $\pi^l : t_{i,h_g}^g = t_{j,n_j}^{0L} + \sum_{q=1}^{n} t_{Lq} \cdot p_{q,j}$. Если результатов в пакете не достаточно, то реализуется переход к следующему пакету *i*-го типа и извлечение из него результатов. В итоге формируются матрицы T^g ($g = \overline{1,g^{ком}}$), используемые при определении значений t_{g,h_g} и значений критерия f_1.

Во второй задаче построения расписаний выполнения ПЗ при формировании комплектов в множестве $K_y^{ком}$ упорядочиваются их типы g с точки зрения директивных сроков $d_{g,h_g}^{ком}$. Упорядочиваются директивные сроки для h_g-х комплектов *g*-х типов в $D_y^{ком}$. На основе множества $K_y^{ком}$ выполняется распределение результатов выполнения ПЗ по комплектам, определение значений t_{g,h_g} для комплектов соответствующих типов, а с использованием множества $D_y^{ком}$ реализует-

ся вычисление значений tz_{g_p} и значений критерия f_1. Оптимизация решений по составам ПЗ реализуется с использованием метода, рассмотренного в главе 4.

Выполнена программная реализация математических моделей процессов выполнения ПЗ в КС при формировании комплектов, математических моделей иерархических игр, методов оптимизации решений по составам ПЗ и расписаниям их выполнения, методов распределения результатов по комплектам. На ее основе проведено исследование эффективности использования рассмотренных методов. В качестве результатов фиксировалось: для первой задачи– снижение временных затрат на формирование всех комплектов g-х типов при определении составов ПЗ с использованием метода по сравнению с временными затратами на формирование комплектов из результатов выполнения фиксированных ПЗ; для второй задачи – снижение суммарного запаздывания с формированием комплектов относительно директивных сроков при определении составов ПЗ с использованием метода по сравнению фиксированными ПЗ. Задаваемые при исследовании значения параметров $n_g^{ком}$: *2* и *4*; $g^{ком} = 2$.Снижение временных затрат на выполнение ПЗ при формировании комплектов определяется выражением $(f_1^{фикс} - f_1^{мосп})/f_1^{фикс}$. Результаты исследований для первой задачи представлены на рисунках 9, 10 ($g^{ком} = 2$). Результаты исследований для второй задачи представлены на рисунках 11, 12 (при $g^{ком} = 2$, $max(w_{ig})/min(w_{ig}) = 1$).

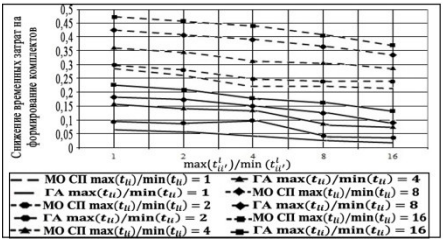

Рисунок 9–Снижение временных затрат на формирование комплектов ($n_g^{ком} = 2$)

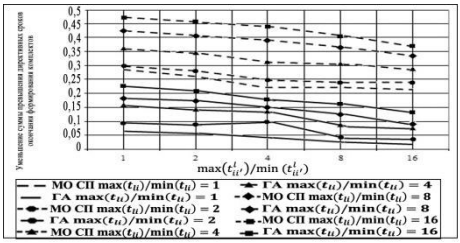

Рисунок 10– Снижение временных затрат на формирование комплектов ($n_g^{ком} = 4$)

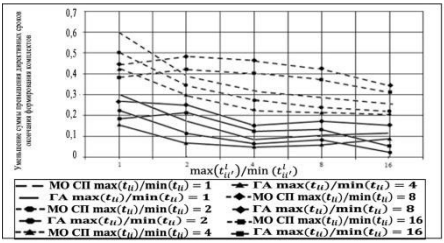

Рисунок 11– Уменьшение суммарного запаздывания с формированием комплектов($n_g^{ком} = 2$)

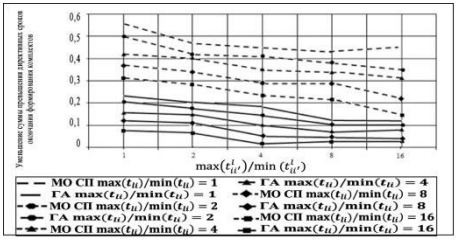

Рисунок 12–Уменьшение суммарного запаздывания с формированием комплектов($n_g^{ком} = 4$)

Метод оптимизации составов ПЗ позволил получить в среднем на 30% (первая задача) и в среднем на 35% (вторая задача) лучшие решения, чем при использовании фиксированных ПЗ.

В главе 6 применяется иерархический подход к решению задачи построения расписаний многостадийных процессов выполнения ПЗ в КС при ограничении на длительности интервалов времени их функционирования. Рассмотрены задачи: построения расписаний выполнения ПЗ в КС при ограничении на интервалы времени; построения расписаний выполнения ПЗ в КС при ограничении на интервалы времени функционирования и формировании комплектов. Построение расписаний выполнения ПЗ в течение задаваемых временных интервалов предполагает, что каждому из них поставлена в соответствие совокупность ПЗ, названная группой. Группа ПЗ – совокупность пакетов, выполняемых в течение одного интервала времени функционирования КС. Декомпозиция обобщенной функции системы построения расписаний позволила определить следующие ее подфункции, реализуемые на уровнях иерархии: 1) оптимизация составов ПЗ; 2) оптимизация составов групп ПЗ, выполняемых в течение заданных интервалов времени; 3) оптимизация расписаний выполнения ПЗ, входящих в группы. Оптимизация составов пакетов, составов групп пакетов, выполняемых в течение ограниченных временных интервалов, расписаний выполнения пакетов, включенных в группы, позволяет увеличить количество заданий, выполненных в течение ограниченных интервалов времени, а также снизить общие простои приборов при выполнении ПЗ в течение этих интервалов, что обеспечивает повышение производительности систем за счет увеличения эффективности использования их ресурсов (для первой задачи). Для второй задачи в результате оптимизации снижается количество заданий, которые должны быть выполнены в пакетах, включенных в составы групп, но результаты которых не будут использованы при формировании комплектов, и, как следствие, увеличивается количество комплектов, сформированных из результатов, полученных после выполнения заданий в группах.

В модели процессов выполнения ПЗ в КС использованы обозначения: t^z – длительности интервалов времени, в течение которых реализуется выполнение ПЗ ($z=\overline{1,Z}$); N^z – группа ПЗ, выполняемых в течение интервала 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 ПЗ в группе N^z. Кортеж $[i, m_i^z, (A)_i^z]$ соответствует ПЗ i-го типа, входящим в группу N^z. Группа N^z – множество кортежей: $N^z = \{[i, m_i^z, (A)_i^z]_k \mid k=\overline{1,k_z}\}^z$, где k_z – количество типов заданий, пакеты которых входят в N^z. Для ПЗ, не вошедших в группы, введено множество Q вида $Q=\{[i, m_i^q, (A)_i^q]_k \mid k=\overline{1,k_q}\}$, в котором параметры интерпретируются по аналогии с кортежами групп N^z. Порядок выполнения ПЗ, входящих в одну группу N^z, является одинаковым для всех приборов. Вид расписаний π^z для групп N^z ($z=\overline{1,Z}$) на третьем уровне определен по аналогии с главой 4 (вид решения $\{[P^z, R^z, \{(T^{0l})^z \mid l=\overline{1,L}\}] \mid z=\overline{1,Z}\}$). Матема-

тическая модель процессов выполнения ПЗ в КС в течение ограниченных временных интервалов имеет вид: 1) компонента первого уровня – составы ПЗ $[M,A]$, 2) компонента второго уровня – составы групп ПЗ $[\{N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q]$, 3) компонента третьего уровня – расписания $\{[P^z,R^z,\{(T^{0l})^z \mid l=\overline{1,L}\}] \mid z=\overline{1,Z}\}$.

Построение расписаний выполнения ПЗ в КС предусматривает решение иерархически упорядоченных подзадач, которое позволит оптимизировать составы ПЗ, составы групп ПЗ, расписания выполнения ПЗ, входящих в группы, в КС. Порядок формирования решений на уровнях является заданным, в процессе оптимизации реализуется обмен решениями между уровнями. В связи с этим построение расписаний выполнения ПЗ в КС при ограничении на длительности интервалов времени их функционирования реализуется с использованием теории иерархических игр. На первом уровне игры ведущий игрок формирует решение $[M,A] \in N_1$ по составам ПЗ; игрок на втором уровне формирует решение $[\{N^z \mid (z=\overline{1,Z})\},Q] \in N_2([M,A])$ по составам групп ПЗ; игрок на третьем уровне формирует расписания выполнения ПЗ, включенных в группы N^z, в КС в виде $\{[P^z,R^z,\{(T^{0l})^z \mid l=\overline{1,L}\}] \mid z=\overline{1,Z}\} \in N_3([\{N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q])$.Решение $[M,A]$ передается на второй уровень для формирования решения $[\{N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q] \in N_2([M,A])$, решение со второго уровня передается на третий для формирования расписаний $\{[P^z,R^z,\{(T^{0l})^z \mid l=\overline{1,L}\}] \mid z=\overline{1,Z}\} \in N_3([\{N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q])$. Сформированные на третьем уровне расписания передаются на второй уровень для оценки оптимальности решения по составам групп. Решение $[\{N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q]^* \in N_2([M,A])$передается на первый уровень для оценки оптимальности решения $[M,A] \in N_1$.

Критерий на первом уровне игры идентифицирует количество заданий, которые не будут выполнены в течение интервалов времени t^z(в группах N^z, $z=\overline{1,Z}$).Выражение $\sum_{i=1}^{n} n^i$ определяет общее количество заданий, которые требуется выполнить в КС, выражение $\sum_{z=1}^{Z}\sum_{k=1}^{k_z}\sum_{h=1}^{[m_i^z]_k}[(a_h)_i^z]_k$ – количество заданий, выполненных в составе ПЗ, включенных в группы N^z ($z=\overline{1,Z}$) ($[(a_h)_i^z]_k$ – h-й элемент вектора $(A)_i^z$ в k-м кортеже $[i,m_i^z,(A)_i^z]_k \in N^z$, $[m_i^z]_k$ – количество ПЗ i-го типа в k-м кортеже в N^z). Критерий на втором уровне соответствует общим простоям приборов КС при выполнении ПЗ, входящих в группы N^z, в течение интервалов времени t^z. В главе 4 сформированы выражения, определяющие: простои приборов на стадии «заполнения» КС, простои приборов в ожидании начала выполнения каждого ПЗ в последовательностях π^l, простои в ожидании готовности к выполнению заданий в каждом ПЗ. Получено выражение, позволяющее определить простои приборов на стадии «освобождения» КС (интервалы времени между

окончанием выполнения ПЗ на приборах и окончанием интервалов t^z): $\sum_{l=1}^{L}\left[t^z - [(t^{0l}_{n_p^z, n_{n_p^z}})^z + \sum_{h=1}^{k_z}(t_{lh})^z \cdot p^z_{h,n_p^z}]\right]$ ($z=\overline{1,Z}$), где n_p^z – номер ПЗ, занимающего последнюю позицию в последовательностях π^l ($l=\overline{1,L}$); $n_{n_p^z}$ –количество заданий, входящих в этот пакет. Модель иерархической игры оптимизации решений при построении расписаний выполнения ПЗ с учетом ограничения на длительности интервалов времени t^z ($z=\overline{1,Z}$) функционирования КС имеет вид:

– первый уровень иерархии (оптимизация составов ПЗ):

$$min\, f_1 \text{, где } f_1 = \sum_{i=1}^{n} n^i - \sum_{z=1}^{Z}\sum_{k=1}^{k_z}\sum_{h=1}^{[m_i^z]_k}[(a_h)_i^z]_k\,; \tag{9}$$

– второй уровень иерархии (оптимизация составов групп N^z): $min\, f_2$, где

$$f_2 = \sum_{z=1}^{Z}\left[\sum_{l=2}^{L}(t^{0l}_{11})^z + \sum_{l=1}^{L}\sum_{j=2}^{n_p^z}\left[(t^{0l}_{j1})^z - \left[(t^{0l}_{j-1,n_{j-1}})^z + \sum_{h=1}^{k_z}(t_{lh})^z \cdot p^z_{h,j-1}\right]\right]+\right. \tag{10}$$

$$\left. + \sum_{l=2}^{L}\sum_{j=1}^{n_p^z}\sum_{q=2}^{n_j^z}\left[(t^{0l}_{jq})^z - \left[(t^{0l}_{j,q-1})^z + \sum_{h=1}^{k_z}(t_{lh})^z \cdot p^z_{hj}\right]\right] + \left[\sum_{l=1}^{L}(t^z - [(t^{0l}_{n_p^z, n_{n_p^z}})^z + \sum_{h=1}^{k_z}(t_{lh})^z \cdot p^z_{h,n_p^z}]\right]\right];$$

– третий уровень иерархии (расписания выполнения ПЗ из группы N^z):

$$min\, f_3^z \text{ ($z=\overline{1,Z}$), где}$$

$$f_3^z = \sum_{l=1}^{L}(t^{0l}_{11})^z + \sum_{l=1}^{L}\sum_{j=2}^{n_p^z}\left[(t^{0l}_{j1})^z - \left[(t^{0l}_{j-1,n_{j-1}})^z + \sum_{h=1}^{k_z}(t_{lh})^z \cdot p^z_{h,j-1}\right]\right]+$$
$$+ \sum_{l=2}^{L}\sum_{j=1}^{n_p^z}\sum_{q=2}^{n_j^z}\left[(t^{0l}_{jq})^z - \left[(t^{0l}_{j,q-1})^z + \sum_{h=1}^{k_z}(t_{lh})^z \cdot p^z_{hj}\right]\right]; \tag{11}$$

– ограничение на третьем уровне иерархии для длительности реализации расписаний выполнения ПЗ групп N^z ($z=\overline{1,Z}$):

$$\max_l\left[(t^{0l}_{n_p^z, n_{n_p^z}})^z + \sum_{h=1}^{k_z}(t_{lh})^z \cdot p^z_{h,n_p^z}\right] \le t^z \ (z=\overline{1,Z}). \tag{12}$$

В дополнение к ограничению (12) введены ограничения для множеств $N_1, N_2([M,A])$, $N_3([\{N^z \mid (z=\overline{1,Z})\},Q])$. Стратегии игроков в игре определены в соответствии с моделью (9)-(12) следующим образом: 1) ведущий игрок (первый уровень) – стратегия, реализующая принцип оптимизма; 2) игрок второго уровня – стратегия, реализующая принцип благожелательности (по отношению к ведущему игроку) и стратегия, реализующая принцип оптимизма (по отношению к игроку третьего уровня); 3) игрок третьего уровня – стратегия, реализующая

принцип благожелательности (по отношению к игроку второго уровня).

Для формирования решений на первом и третьем уровнях системы построения расписаний использованы рассмотренные в главе 4 методы оптимизации составов ПЗ и расписаний их выполнения в КС. Для оптимизации решений на втором уровне игры синтезирован метод определения локально оптимальных решений по составам групп N^z, выполняемых в течение интервалов t^z ($z=\overline{1,Z}$). Метод определения составов групп N^z предполагает формирование начальных их составов и переход к локально оптимальным решениям по составам групп ПЗ $[\{N^z \mid z=\overline{1,Z}\},Q]^*$. Формирование начального решения предусматривает распределение ПЗ, полученных в решении *[M,A]* с первого уровня, 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 условия (12).

Оптимизация составов групп N^z ($z=\overline{1,Z}$) предусматривает формирование решений, в которых общие простои приборов КС при выполнении ПЗ, включенных в эти группы, минимизированы. Для минимизации значений критерия f_2 из групп N^z исключаются ПЗ, выполнение которых (либо переналадка на выполнение которых) является причиной простоев приборов КС, и добавляются в группы ПЗ (из множества *Q*), выполнение которых обеспечивает уменьшение значений f_2. Для построения ТЛОР по составам групп N^z в соответствии с расписанием в одной из групп определяется ПЗ, занимающий *j*-ю позицию в последовательностях π^l ($l=\overline{1,L}$), выполнение которого (либо переналадка на выполнение которого) на всех приборах КС вызывает максимальные (по сравнению с другими ПЗ) простои. Первое условие (*p=1*) определяет *j*-ю позицию в π^l ПЗ, наладка либо переналадка приборов КС на выполнение которого вызывает их максимальные простои по сравнению с другими ПЗ, и имеет вид:

$$j_1=\begin{cases} 1, \text{если} \ \sum\limits_{l=1}^{L}(t_{11}^{0l})^z > \max\limits_{j}\{\sum\limits_{l=1}^{L}[(t_{j1}^{0l})^z-[(t_{j-1,n_{j-1}^z}^{0l})^z+\sum\limits_{h=1}^{n_p^z}(t_{lh})^z\cdot p_{h,j-1}^z]]\}, \\ j', \text{если} \ \sum\limits_{l=1}^{L}(t_{11}^{0l})^z \le \max\limits_{j}\{\sum\limits_{l=1}^{L}[(t_{j1}^{0l})^z-[(t_{j-1,n_{j-1}^z}^{0l})^z+\sum\limits_{h=1}^{n_p^z}(t_{lh})^z\cdot p_{h,j-1}^z]]\}. \end{cases} \quad (13)$$

Так как порядок выполнения ПЗ, входящих в одну группу N^z, является одинаковым для всех приборов КС, второе условие (*p=2*) определяет *j*-ю позицию в π^l ПЗ, выполнение которого вызывает максимальные простои приборов при реализации действий с заданиями в нем, и имеет вид:

$$\max_{j}[\sum_{l=1}^{L}\sum_{q=1}^{n_j^z-1}[(t_{j,q+1}^{0l})^z-[(t_{jq}^{0l})^z+\sum_{h=1}^{k_z}(t_{lh})^z\cdot p_{h,j}^z]]. \quad (14)$$

Алгоритм поиска локально оптимальных решений в окрестности ТЛОР $[\{N^z \mid (z=\overline{1,Z})\},Q]^*$ предполагает исключение из каждой группы N^z таких ПЗ, выполнение которых обуславливает максимальные простои приборов КС, определяемых в соответствии с условиями (13), (14), и размещение в группах ПЗ из

множества Q. Полученное в результате решение $[\{ N^z \mid (z = \overline{1,Z})\},Q]^*$ передается на первый уровень для оценки оптимальности решения *[M,A]* по составам ПЗ.

С использованием комплекса программ проведены исследования эффективности применения модели многостадийного процесса выполнения ПЗ при ограничении на длительности интервалов времени функционирования системы, модели иерархической игры оптимизации решений, метода построения локально оптимальных решений по составам групп ПЗ. Фиксировалось снижение простоев приборов при оптимизации решений по составам групп N^z по сравнению с составами групп, полученными при формировании начального решения (фиксированные группы без оптимизации): $f_{эмосгп} = (f_2^{мосгп} - f_2^{фикс}) / f_2^{фикс}$ ($f_{эмосгп}$ – степень снижения простоев приборов при использовании метода оптимизации по сравнению с фиксированными группами ПЗ; $f_2^{фикс}$ – значение критерия f_2 при условии, что составы групп N^z ($z = \overline{1,Z}$) не оптимизированы, $f_2^{мосгп}$ – значение критерия f_2 при условии, что составы групп N^z ($z = \overline{1,Z}$) оптимизированы). Задаваемые при исследовании значения параметров *n=5, L=5,* $n^i = 24$. Значения параметра t^z задавались равными 100 и 200, значения параметра Z равными 2 и 4. Результаты исследований применения метода оптимизации составов групп ПЗ представлены на рисунках 13, 14 (при *n=5, L=5, Z=2*).

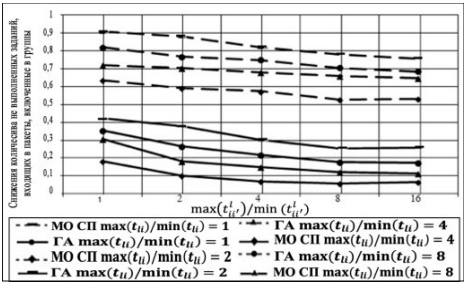

Рисунок 13–Снижение количества не выполненных заданий в пакетах при оптимизации составов групп ($t^z = 100$)

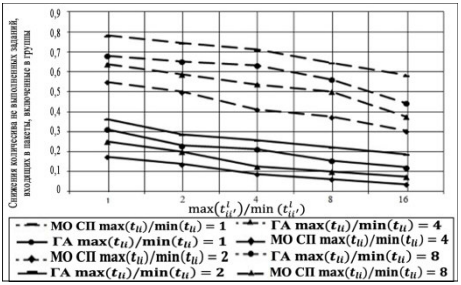

Рисунок 14–Снижение количества не выполненных заданий в пакетах при оптимизации составов групп ($t^z = 200$)

Анализ результатов позволил сделать вывод о том, что использование метода оптимизации групп ПЗ позволяет уменьшить простои приборов в течение ограниченных временных интервалов в среднем на 25-30% по сравнению с неоптимизированными решениями по составам групп.

В Главе 6 также синтезирован метод решения задачи построения расписаний выполнения ПЗ в КС при ограничении на интервалы времени функционирования и формировании комплектов результатов, являющейся развитием рассмотренной выше задачи. При построении модели иерархической игры оптимизации решений использованы параметры, введенные в Главах 5 и 6, а также дополнительные параметры: n_g – количество комплектов *g*-го типа, которые будут сформированы из

результатов выполнения ПЗ всех n типов в группах N^z ($z=\overline{1,Z}$), N_g – вектор количества сформированных из результатов выполнения ПЗ комплектов; a_i^z – общее количество заданий i-го типа ($l=\overline{1,L}$), которые выполнены в составе пакетов, включенных в группы N^z ($z=\overline{1,Z}$). На первом уровне иерархической игры решение имеет вид $[M,A]\in N_1$; вектор N_g включен в решение на втором уровне вида: $[\{N^z\,|\,(z=\overline{1,Z})\},Q,N_g]\in N_2([M,A])$, решение на третьем уровне имеет вид: $\{[P^z,R^z,\{(T^{0l})^z\,|\,l=\overline{1,L}\}]\,|\,z=\overline{1,Z}\}$. Обмен решениями между игроками в игре и стратегии поведения игроков аналогичны рассмотренной выше задаче.

Введенный в рассмотрение параметр a_i^z ($i=\overline{1,n}$) соответствует количеству заданий i-х типов, входящих в пакеты, включенные в группы N^z ($z=\overline{1,Z}$). Значения a_i^z вычисляются для каждого i-го типа заданий, пакеты которых включены в группы N^z ($z=\overline{1,Z}$). Значения n_g ($g=\overline{1,g^{ком}}$) определяются при распределении результатов выполнения заданий i-х типов по комплектам на основе значений a_i^z и формируют вектор N_g. С использованием выражения $\sum\limits_{g=1}^{g^{ком}} n_g$ определяется количество комплектов, сформированных из результатов выполнения заданий.

Ресурс времени функционирования КС является ограниченным, тогда необходимо минимизировать количество заданий, выполняемых в группах N^z ($z=\overline{1,Z}$), результаты которых не будут включены в формируемые комплекты. Выражение $\sum\limits_{z=1}^{Z}\sum\limits_{k=1}^{k_z}\sum\limits_{h=1}^{[m_i^z]_k}[(a_h)_i^z]_k$ определяет количество заданий разных типов, выполненных в составе групп N^z ($z=\overline{1,Z}$) (где $[(a_h)_i^z]_k$ – h-й элемент вектора $(A)_i^z$, являющегося элементов k-го кортежа $[i,m_i^z,(A)_i^z]_k\in N^z$, $[m_i^z]_k$ – количество ПЗ i-го типа в группе N^z), выражение $\sum\limits_{g=1}^{g^{ком}}\sum\limits_{i=1}^{n} n_g\cdot w_{ig}$ определяет количество заданий, результаты выполнения которых использованы при формировании комплектов. Количество заданий, которые включены в пакеты, выполняемые в группах N^z в соответствии с решением $[\{N^z\,|\,(z=\overline{1,Z})\},Q,N_g]$, но результаты которых не будут использованы при формировании комплектов, определяется выражением: $\sum\limits_{z=1}^{Z}\sum\limits_{k=1}^{k_z}\sum\limits_{h=1}^{[m_i^z]_k}[(a_h)_i^z]_k-\sum\limits_{g=1}^{g^{ком}}\sum\limits_{i=1}^{n} n_g\cdot w_{ig}$. В качестве критерия оптимальности расписаний выполнения ПЗ, включенных в группы N^z ($z=\overline{1,Z}$) используется выражение (11), аналогичное предыдущей задаче. Математическая

модель иерархической игры оптимизации решений по составам ПЗ, групп ПЗ, расписаний выполнения ПЗ из групп в КС, имеет вид:

– первый уровень иерархии (оптимизация составов ПЗ):

$$max\, f_1, \text{ где } \quad f_1 = \sum_{g=1}^{g^{ком}} n_g \; ; \tag{15}$$

– второй уровень иерархии (оптимизация составов групп N^z): $min\, f_2$, где

$$f_2 = \sum_{z=1}^{Z} \sum_{k=1}^{k_z} \sum_{h=1}^{m_i^z} [(a_h)_i^z]_k - \sum_{g=1}^{g^{ком}} \sum_{i=1}^{n} n_g \cdot w_{ig} \tag{16}$$

– третий уровень иерархии (оптимизация расписаний выполнения ПЗ из группы N^z в КС): $min\, f_3^z$ ($z = \overline{1,Z}$), где

$$f_3^z = \sum_{l=1}^{L} (t_{11}^{0l})^z + \sum_{l=1}^{L} \sum_{j=2}^{n_p^z} \left[(t_{j1}^{0l})^z - \left[(t_{j-1,n_{j-1}}^{0l})^z + \sum_{h=1}^{k_z} (t_{lh})^z \cdot p_{h,j-1}^z \right] \right] + \tag{17}$$

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

– ограничение на длительность реализации расписаний выполнения ПЗ групп N^z ($z = \overline{1,Z}$) в КС:

$$\max_{l} \left[(t_{n_p^z, n_{n_p^z}}^{0l})^z + \sum_{h=1}^{k_z} (t_{lh})^z \cdot p_{h,n_p^z}^z \right] \le t^z \;\; (z = \overline{1,Z}). \tag{18}$$

В дополнение к выражениям (15)-(18) в модель игры введены ограничения на множества N_1, N_2, N_3, аналогичные рассмотренной выше задаче.

Разработан алгоритм формирования начальных решений по составам групп N^z ($z = \overline{1,Z}$), предусматривающий последовательное добавление по одному ПЗ каждого *i*-го типа ($1 = \overline{1,n}$) в эти группы (при выполнении ограничения (18)), либо в множество *Q* в том случае, если расписания, сформированные для решений по составам каждой из групп, не удовлетворяют условию (18).

Для оценки оптимальности решений по составам ПЗ, составам групп ПЗ разработан алгоритм распределения результатов выполнения заданий, входящих в пакеты, включенные в группы, по комплектам. Алгоритм реализует определение значений n_g ($g = \overline{1, g^{ком}}$), используя при этом значения a_i^z ($i = \overline{1,n}$), вычисленные следующим образом: $a_i^z = \sum_{z=1}^{Z} \sum_{h=1}^{m_i^z} (a_h)_i^z$. После реализации алгоритма получены значения $a_i^z \ge 0$ (при $a_i^z > 0$ не все результаты выполнения заданий *i*-х типов использованы при формировании комплектов)

Оптимизация составов групп N^z ($z = \overline{1,Z}$) предполагает определение для

каждого h-го 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 $a_i^z>0$, полученного после распределения результатов по комплектам. Среди всех ПЗ рассматриваемого i-го типа в группе N^z выбирается тот, отклонение количества заданий $(a_h)_i^z$ в котором от значения a_i^z будет минимальным (при $(a_h)_i^z \geq a_i^z$). Минимальное отклонение количества заданий $(a_h)_i^z$ ($h=\overline{1,m_i^z}$) в пакетах i-го типа от значения $a_i^z>0$ обозначено как mh_i^z. Пакет заданий i-го типа с индексом h_i^z, характеризуемый значением mh_i^z, исключается из рассматриваемой группы N^z, в которую добавляются ПЗ из множества Q. Указанные действия выполняются для каждого i-го типа заданий и для каждой группы N^z ($z=\overline{1,Z}$).

С использованием комплекса программ проведены исследования эффективности применения метода построения локально оптимальных решений. В качестве результатов определены зависимости значений отношения $f_{эмосгп}=(f_1^{мосгп}-f_1^{фикс})/f_1^{фикс}$ от параметров задачи. Исследования выполнялись при значениях параметра $n_g^{ком}$, равных 4 и 8, количестве типов комплектов $g^{ком}$ равном 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. При исследованиях формировались следующие решения: фиксированные группы ПЗ (начальные решения по составам групп ПЗ без оптимизации); оптимизированные составы групп ПЗ. Зависимости значений $f_{эмосгп}$ от входных параметров задачи в сравнении с применением ГА представлены на рисунках 15,16 (МО СГП– метод оптимизации составов групп пакетов).

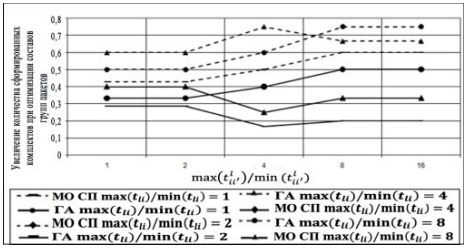

Рисунок 15– Увеличение количества сформированных комплектов при оптимизации составов групп ($t^z=100$, $n_g^{ком}=4$, $max(w_{ig})/min(w_{ig'})=4$)

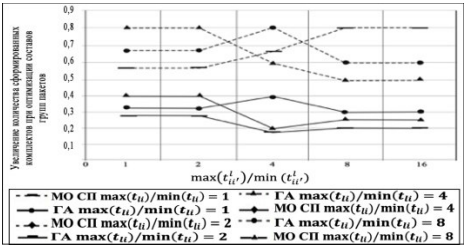

Рисунок 16–Увеличение количества сформированных комплектов при оптимизации составов групп ($t^z=200$, $n_g^{ком}=8$, $max(w_{ig})/min(w_{ig'})=4$)

Анализ результатов показал, что использование метода оптимизации групп позволяет увеличить количество сформированных комплектов в среднем на 50% при оптимизации решений по сравнению с неоптимизированными решениями.

В главе 6 рассмотрены особенности метода математического моделирования процессов выполнения ПЗ в КС, предусматривающего синтез иерархически упорядоченных взаимосвязанных компонент моделей этих процессов, которые соответствуют определенным подзадачам, сформированным в результате декомпозиции обобщенных задач построения расписаний. Также рассмотрены особенности метода построения расписаний выполнения ПЗ в КС, предусматривающего представление обобщенных задач в виде совокупности иерархически взаимосвязанных подзадач, для каждой из которых формируется локально оптимальное решение на соответствующем ей уровне иерархии.

В главе 6 развит предметно-ориентированного подход к проектированию программных систем для разработки программного комплекса моделирования процессов выполнения ЕЗ и ПЗ в КС и построения их расписаний. Выполнено разделение предметных областей задач построения расписаний выполнения ЕЗ и ПЗ в КС на подобласти, для каждой из которых сформированы шаблоны «ограниченного контекста» и «естественного языка». Определены пересечения «ограниченных контекстов» предметных подобластей разных задач построения расписаний многостадийных процессов выполнения ЕЗ и ПЗ в КС, что позволило реализовать адаптивную процедуру управления процессом оптимизации решений. Совместное использование предметно-ориентированного проектирования (ПОП) и многоуровневой архитектуры программных систем позволило распределить объекты предметной области по уровням модели и более рационально (по сравнению с объектно-ориентированным проектированием) структурировать модель данных (объектную модель, сформированную на основе разработанной модели предметной области (ПО). Решение задач построения расписаний обеспечивается структурной гибкостью программного обеспечения, функционирование которого организуется в соответствии с разными сценариями. Разработанная с использованием ПОП объектная модель данных является основой программного комплекса, при разработке которого задействована сервис- ориентированная архитектура программных систем. Каждый метод формирования локально оптимальных решений совместно с моделями, обеспечивающими оптимизацию решений, реализован в виде отдельного сервиса. Это обеспечивает гибкость реализации процедур управления процессом оптимизации решений (адаптивное управление процессом решения задач).

В Приложениях представлено:1) доказательство теоремы о получении локально оптимальных расписаний выполнения ЕЗ в КС с использованием алгоритма Greedy Scheduler; 2) обоснование применения разработанных математических моделей процессов выполнения ЕЗ и ПЗ в КС, методов построения расписаний для решения задач обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в составе конвейера в Web-ориентированного сервисе мониторинга окружающей среды (ОС); 3) примеры построения расписаний выполнения ЕЗ и ПЗ на обработку данных ДЗЗ в КС с целью идентификации наличия негативных природных явлений (НПЯ) и техногенных воздействий (ТВ) на ОС на земной поверхности, определения их характеристик и условий распространения, а также построения расписаний многостадийных процессов обработки передаточных партий деталей транспортного и технологического оборудования с целью их восстановления на специализированных предприятиях; 4) акты внедрения результатов исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнено решение важных научно-практических задач математического моделирования и построения расписаний многостадийных процессов выполнения единичных заданий и пакетов заданий в конвейерных системах. Разработаны математические модели процессов выполнения ЕЗ в КС, метод математического моделирования влияния возмущающих воздействий на ход многостадийных процессов выполнения заданий, 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 и предложена классификация задач построения расписаний многостадийных процессов выполнения заданий, позволяющая рассматривать их в виде совокупности взаимодействующих подзадач оптимизации решений на уровнях иерархии; введенная классификация позволяет идентифицировать новые виды задач построения расписаний многостадийных процессов выполнения заданий в КС и способы их решения;

2) существующие методы построения статических расписаний процессов выполнения ЕЗ в КС не позволяют формировать решения при произвольном количестве приборов КС, отсутствии дополнительных условий; в связи с этим разработан метод построения статических расписаний выполнения ЕЗ в КС, основывающийся на «жадном» подходе при оптимизации, позволяющий исключить указанные ограничения и 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 моделей и методов, позволяющих формировать динамические расписания, учитывающие влияние возмущающих воздействий различных видов на ход процессов выполнения заданий в КС с целью их адаптации к этим воздействиям; предложен метод математического моделирования влияния возмущающих воздействий на ход процесса выполнения ЕЗ в КС, предусмотренный статическим расписанием; 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 воздействий; использование предложенных: метода математического моделирования влияния возмущаю-

щих 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 задач, невозможностью гарантированного улучшения решений при различных значениях 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 их моделей в виде совокупности иерархически 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; численных методов локальной оптимизации составов ПЗ и расписаний их выполнения в КС; использование предложенных методов и моделей позволяет в на 20-40% сократить время выполнения ПЗ в КС по сравнению с фиксированными пакетами, включающими все задания из их наборов;

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; 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 оптимизацию составов ПЗ) и суммарное время запаздывания с формированием комплектов относительно 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 предложен новый подход к решению указанных задач, 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, математи-

ческая 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 их составами;

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 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 адаптацию структуры программного комплекса в соответствии с видом решаемых задач).

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. Рассмотрено применение разработанного комплекса программ математического моделирования процессов выполнения ЕЗ и ПЗ в КС и построения расписаний выполнения

ЕЗ и ПЗ в КС при решении следующих задач:

– построения расписаний многостадийных процессов обработки единичных данных ДЗЗ, по результатам которой выполняется идентификация наличия на земной поверхности негативных природных явлений (НПЯ) и техногенных воздействий (ТВ) на окружающую среду (ОС) (первый режим обработки данных дистанционного зондирования Земли в Web-ориентированном сервисе мониторинга ОС, связанный с идентификацией наличия НПЯ и ТВ на ОС);

– построения 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);

– построения 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) и при задании ограничений на интервалы времени функционирования системы при обработке данных.

Также рассмотрено применение разработанного комплекса программ математического моделирования процессов выполнения ЕЗ и ПЗ в КС и построения расписаний выполнения ЕЗ и ПЗ в КС при решении задач:

– построения расписаний обработки передаточных партий деталей узлов и агрегатов транспортного и технологического оборудования при восстановлении их поверхностей,

– построения 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

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня, рекомендованного ВАК

1. Кротов К.В. Градиентный метод составления статических расписаний для конвейерных систем, основывающийся на жадных стратегиях // Вестник Новосибирского ГУ. Серия: Информационные технологии, 2015, т.13, № 1.– С.55-73.

2. Кротов К.В., Кротова Т.Ю. Градиентный метод составления динамических расписаний для конвейерных систем, учитывающий отказы сегментов // Вестник Воронежского Государственного Университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии, 2015, №3. –С.84-99.

3. Кротов К.В. Градиентный метод формирования динамических расписаний обработки данных в конвейерной системе при различных моментах времени их поступления // Вестник Новосибирского ГУ. Серия: Информационные технологии, 2016, т.14, №1. – С.39-60.

4. Кротов К.В., Кротова Т.Ю. Градиентный метод формирования динамических расписаний обработки данных в конвейерной системе при различных моментах времени их поступления и разных приоритетах // Журнал «Вычислитель-

ные технологии», Новосибирск, Из-во Института вычислительных технологий СО РАН, 2016, Том 21, №5.– С. 77-94.

5. Кротов К.В. Обоснование модели многоуровневого программирования для построения расписаний групповой обработки партий данных в конвейерной системе при наличии ограничений // Вестник Иркутского национального исследовательского технического университета, 2016, №1 (108). – С.35-47.

6. Кротов К.В. Комплексный метод определения эффективных решений по составам партий данных и расписаниям их обработки в конвейерных системах // Журнал «Вычислительные технологии», Новосибирск, Изд-во Института вычислительных технологий СО, 2018, № 3.– С.58-76.

7. Кротов К.В. Обоснование методов построения комплексных расписаний обработки партий данных при условии оперативного формировании комплектов из результатов // Вестник Воронежского Государственного Университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии,2018, №4. – С.58-72.

8. Кротов К.В. Использование генетических алгоритмов для построения эффективных комплексных расписаний обработки пакетов данных в конвейерной системе при задании ограничений на длительность интервалов времени ее функционирования // Вестник Воронежского Государственного Университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии,2020, №1. – С.88-105.

9. Кротов К.В. Построение комплексных расписаний обработки пакетов данных в конвейерной системе при задании ограничений на длительность интервалов времени ее функционирования // Труды учебных заведений связи, 2020, т.6, №3. – с.75-90.

10. Кротов К.В., Скатков А.В. Организация web-ориентированного сервиса мониторинга окружающей среды с использованием данных дистанционного зондирования Земли и конвейеризации обработки данных //Труды учебных заведений связи, 2021, т.7, №1. – С.105-121.

Статьи, включенные в библиографические базы Web of Science и Scopus

1.Кротов К.В. Информационная модель многоуровневой системы выполнения конвейеризированных программ // Международный научно-технический журнал «Проблемы управления и информатики», 2014, № 3. – С.89-101.

2.Кротов К.В. Обоснование классификации задач построения расписаний, решаемых в многоуровневой системе выполнения конвейеризированных программ // Международный научно-технический журнал «Проблемы управления и информатики», 2014, № 4. – С. 135-150.

3. Кротов К.В. Многоуровневая модель построения расписаний обработки партий данных в конвейерных системах при формировании комплектов и наличии ограничений// Труды СПИИРАН, 2016,№ 4.– С. 65-91.

4.Кротов К. В., Скатков А.В. Построение комплексных расписаний выполнения пакетов заданий при формировании комплектов в заданные директивные сроки // Информатика и автоматизация (Труды СПИИРАН), 2021, т.20, №.3. – С. 654-689.

5. Кротов К. В., Скатков А.В. Оптимизация планирования выполнения пакетов заданий в многостадийных системах при ограничениях и формировании комплектов // Компьютерные исследования и моделирование, 2021, №5.– С. 917-946.

6. Кротов К. В. Математическая модель и алгоритм метода ветвей и границ для оптимизации решений по составам пакетов в многостадийных системах // Информатика и автоматизация (Труды СПИИРАН), 2022, т.21, № 1. – С.5-37.

Статьи в региональных изданиях из перечня РИНЦ

1. Кротов К.В. Двухуровневая модель построения комплексных расписаний обработки партий данных в конвейерных системах при задании директивных сроков формирования комплектов // Автоматизированные технологии и производства. Международный научно-технический журнал, №4, 2016.– С.33-44.

2. Кротов К.В. Использование аппарата генетических алгоритмов при формировании решений по составам партий данных в двухуровневой задаче построения комплексных расписаний их обработки //Автоматизированные технологии и производства. Международный научно-технический журнал, №2, 2017.– С.23-34.

Прочие публикации по теме диссертации

1. Кротов К.В., Кротова Т.Ю. Метод построения динамических расписаний обработки данных в конвейерных системах при учете отказов сегментов // Материалы 23-й международной научно-технической конференции «Прикладные задачи математики».– Севастополь: СевГУ, 2015. – С. 128-135.

2. Кротов К.В., Кротова Т.Ю. Двухуровневая модель и методы определения эффективных составов партий данных и порядка их обработки в конвейерной системе // Материалы международной научно-практической конференции «Информационные технологии и информационная безопасность в науке, технике и образовании "Инфотех – 2015». – Севастополь: Изд-во СевГУ, 2015. – С.9-10.

3. Кротов К.В., Дрозин А.Ю. Иерархические модели построения расписаний обработки данных в конвейерных системах при наличии ограничений и формировании комплектов // 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. 82.

4. Кротов К.В. Обоснование двухуровневой модели определения эффективных расписаний обработки партий данных в конвейерной системах // 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.

5. Кротов К.В. Обоснование методов для определения эффективных расписаний обработки партий данных в конвейерных системах // 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.

6. Кротов К.В., Кротова Т.Ю. Обоснование методов определения эффективных составов партий данных, составов групп партий и порядка их обработки при наличии ограничений на время функционирования системы и формировании комплектов // Материалы 24-й международной научно-технической конференции «Прикладные задачи математики». Севастополь, 12-16 сентября 2016.– Севастополь: СевГУ. – С. 179-181.

7.Кротов К.В. Управление обработкой партий данных в конвейерных системах при формировании комплектов и заданных для них директивных сроках // Материалы международной научно-практической конференции «Информационные технологии и информационная безопасность в науке, технике и образовании "Инфотех – 2017». – Севастополь: Изд-во СевГУ, 2017.– С.16-19.

8. Кротов К.В. Построение расписаний выполнения заданий в многостадийных обрабатывающих системах при объединении их в партии // Материалы I Междисциплинарной Всероссийской научно-практической конференции, «Развитие методологии современной экономической науки и менеджмента», г. Севастополь, 4-5 мая 2017 г. – Севастополь: СевГУ, 2017 г.– С.629-632.

9. Кротов К.В., Сухоруких К.В. Обоснование возможности конвейеризации обработки спутниковых снимков в Web-ориентированной системе мониторинга ОС с использование данных ДЗЗ // Материалы международной научно-практической конференции «Интеллектуальные информационные системы – 2018». Ч.2.– Воронеж: Воронежский ГТУ, 2018.– С.176-180.

10. Кротов К.В., Мжачев И.А. Web-ориентированный сервис мониторинга с использованием данных ДЗЗ природных явлений и техногенных воздействий, их характеристик и условий распространения // Материалы IV межрегиональной научно-практической конференции «Перспективные направления развития отечественных информационных технологий».– Севастополь: СевГУ, 2018. – С. 292-295.

11.Кротов К.В., Шарипов Е.А. Алгоритм функционирования Web-ориентированной системы мониторинга ОС с использованием данных ДЗЗ с целью идентификации природных явлений и техногенных воздействий, их характеристик и условий распространения // Материалы IV межрегиональной научно-практической конференции «Перспективные направления развития отечественных информационных технологий».– Севастополь: СевГУ, 2018. – С. 289-292.

12. Кротов К.В. Обоснование модели комплексного планирования обработки пакетов данных в конвейерной системе при наличии ограничений на длительности интервалов ее функционирования // Материалы V межрегиональной научно-практической конференции «Перспективные направления развития отечественных информационных технологий».– Севастополь: СевГУ, 2019. – С. 127-132.

13. Кротов К.В. Обоснование метода построения комплексных расписаний обработки пакетов данных в конвейерной системе при наличии ограничений на длительности интервалов ее функционирования // Материалы V межрегиональной научно-практической конференции «Перспективные направления развития отечественных информационных технологий».–Севастополь: СевГУ, 2019.– С.132-136.

14. Кротов К.В. Обоснование модели иерархической игры для оптимизации составов пакетов данных при их обработке в конвейерной системе и условии

формирования комплектов в заданные для них директивные сроки // Материалы V межрегиональной научно-практической конференции «Перспективные направления развития отечественных информационных технологий».– Севастополь: СевГУ, 2019. – С. 136-141.

15. Кротов К.В. Обоснование метода формирования комплектов из результатов в задаче оптимизации составов пакетов данных при их обработке в конвейерной системе и условии формирования комплектов в заданные для них директивные сроки // Материалы V межрегиональной научно-практической конференции «Перспективные направления развития отечественных информационных технологий».– Севастополь: СевГУ, 2019. – С. 141-145.

16. Кротов К.В. Математическое моделирование и методы планирования выполнения пакетов заданий в многостадийных системах при условии формирования комплектов // Материалы международной конференции «Математическое моделирование». Москва. МАИ. 17 ноября 2020. – Москва: Из-во Московского авиационного института, 2020.– С.566-567.

17. Krotov K.V., Drozin A.Yu., Zaikina E.N. Schedule planning proceeding of transfer batches in Flexible Automated Lines while set sare forming and limits are recognized // Международная научно-техническая конференция «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении 2021» (ICMTMTE 2021), Севастополь, 10 сентября 2021 г. – Севастополь, 2021, #03094.– 8 p.

Свидетельства на государственную регистрацию программ для ЭВМ

1. Кротов К.В., Дрозин А.Ю., Ростовская В.К. Информационная система построения комплексных расписаний выполнения пакетов заданий в многостадийных (конвейерных) системах. Свидетельство на государственную регистрацию программы для ЭВМ, №2021619004, дата регистрации 03.06.21.

2. Кротов К.В., Дрозин А.Ю., Ростовская В.К. Информационная система построения статических и динамических расписаний выполнения заданий в многостадийных (конвейерных) системах. Свидетельство на государственную регистрацию программы для ЭВМ, №2021619098, дата регистрации 04.06.21.

3. Кротов К.В., Дрозин А.Ю., Ростовская В.К. Информационная система определения эффективных решений по составам партий данных и расписаниям их обработки в конвейерных системах. Свидетельство на государственную регистрацию программы для ЭВМ, №2021667167, дата регистрации 26.10.21.