#### ОТЗЫВ

#### официального оппонента

доктора технических наук, профессора,

профессора кафедры компьютерных технологий и программной инженерии ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического

приборостроения» Скобцова Юрия Александровича

на диссертацию Кротова Кирилла Викторовича на тему

# «МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ МНОГОУРОВНЕВОЙ ОПТИМИЗАЦИИ РАСПИСАНИЙ МНОГОСТАДИЙНЫХ ПРОЦЕССОВ С АДАПТАЦИЕЙ»,

представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.18— «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка сокращений и содержит 294 страницы основного текста, 3 таблицы, 59 рисунков, список литературы из 294 наименований, а также 4 приложения на 122 страницах.

### 1. Актуальность темы исследований

В настоящее время все возрастающие потребности в высоко производительном выполнении заданий обеспечиваются конвейеризацией действий с ними на приборах соответствующих систем. Конвейеризированное выполнение заданий является возможным в том случае, если процесс реализации действий с ними может быть представлен в виде последовательности этапов. При этом каждый из этапов процесса выполнения заданий реализуется на соответствующем назначенном для этого приборе конвейерной системы. Особенностями технологических процессов выполнения заданий, которые рассматриваются в предлагаемой диссертационной работе, являются одинаковое количество этапов выполнения заданий и одинаковое количество приборов, на которых эти заданий выполняются.

Выполнение заданий на приборах конвейерных систем характеризуется длительностями реализации действий с заданиями на приборах и длительностями переналадок приборов на выполнение заданий. В соответствии с указанными параметрами автор работы реализует типизацию заданий. К одному типу отнесены задания, у которых указанные параметры имеют одинаковые значения для соответствующих приборов конвейерных систем, к разным типам — задания, у которых значения указанных параметров являются различными. В этом случае рассматриваются наборы заданий, которые содержат задания одного типа с равными значениями указанных параметров, и единичные задания, у которых значения указанных параметров являются различ-



ными. В силу того, что с одной стороны длительности выполнения заданий на разных приборах и длительности переналадок приборов на выполнение заданий разных типов различны, а с другой стороны требуется обеспечить эффективный процесс реализации действий с заданиями на приборах, а также производительное использовании ресурсов конвейерных систем, тогда необходимым является построение расписаний выполнения заданий в конвейерных системах.

Для единичных заданий, находящихся в системе, реализуется построение статических расписаний многостадийных процессов их выполнения на приборах. В тоже время многостадийные процессы выполнения заданий, реализуемые в соответствии со статическим расписанием, подвержены возмущающим воздействиям различных видов, которые изменяют их ход, снижая, тем самым их эффективность. В силу сказанного требуется реализовать адаптацию многостадийных процессов к возмущающим воздействиям для того, чтобы снизить их влияние на ход указанных процессов. Выполнение заданий, входящих в их наборы, реализуется в конвейерной системе либо в составе фиксированных пакетов, в каждый из которых входят все задания, включенные в соответствующие их наборы, либо в составе пакетов, составы которых оптимизируются с учетом временных параметров выполнения заданий. Под пакетом автором в работе подразумевается совокупность зданий одного типа, выполняемых в системе без переналадки приборов на выполнение заданий другого типа. В связи с этим возникает необходимость оптимизации количества заданий, включаемых в формируемые пакеты, а также расписаний реализации действий с пакетами на приборах конвейерных систем с целью повышения эффективности процесса их выполнения.

Автором работы выполнен предваряющий исследования обширный анализ существующих методов математического моделирования и оптимизации расписаний многостадийных процессов выполнения заданий в конвейерных системах. В результате автором определены два класса задач, не достаточно проработанных к настоящему времени. К первому классу задач относятся задачи математического моделирования влияния возмущающих воздействий на ход многостадийных процессов выполнения единичных заданий в конвейерных системах и оптимизации динамических расписаний процессов выполнения единичных заданий в этих системах, построение которых призвано обеспечить снижение влияния возмущающих воздействий на ход их выполнения. Ко второму классу задач относятся задачи математического моделирования многостадийных процессов выполнения пакетов заданий в конвейерных системах и оптимизации расписаний многостадийных процессов выполнения пакетов заданий. Особенностью первого класса задач является то, что разработанные методы моделирования влияния возмущающих воздействий ориентированы на системы с параллельно функционирующими приборами, а не на системы конвейерного типа. С другой стороны математическое моделирование влияния возмущающих воз

ющих воздействий и оптимизация динамических расписаний обеспечивается только для одного типа воздействий – поступления в системы с параллельно функционирующими приборами новых заданий в моменты времени, превышающие моменты времени начала интерпретации статических расписаний. В связи с этим возникает необходимость разработки метода математического моделирования влияния возмущающих воздействий на ход многостадийных процессов выполнения заданий именно в конвейерных системах, позволяющего учитывать дополнительные их (воздействий) виды. В работе рассматриваются следующие дополнительные виды возмущающих воздействий, влияющих на ход многостадийных процессов выполнения единичных заданий в конвейерных системах: поступление в систему в моменты времени, превышающие момент времени начала интерпретации статических расписаний, новых заданий, приоритеты которых превышают приоритеты выполняющихся заданий; отказы приборов конвейерных систем и их восстановление после отказов. В силу того, что задача оптимизации статических и динамических расписаний при количестве приборов, большем двух, является NP- трудной, поэтому возникает необходимость разработки численных методов оптимизации расписаний указанных видов. Таким образом, актуальной является решаемая в работе задача разработки метода математического моделирования влияния возмущающих воздействий разных видов, в котором предусмотрена возможность учета дополнительных видов возмущений, а также актуальна задача разработки численного метода оптимизации динамических расписаний процессов выполнения заданий при учете возмущающих воздействий разных видов, позволяющего выполнять адаптацию процессов к этим воздействиям с целью снижения их влияния.

Существующие методы математического моделирования многостадийных процессов выполнения пакетов зданий в конвейерных системах и методы оптимизации расписаний выполнения пакетов заданий в конвейерных системах характеризуются ограничениями на размерность решаемых задач, модели процессов и методы оптимизации ориентированы на системы с параллельно функционирующими приборами (а не на конвейерные системы), составы пакетов определяются с учетом директивных сроков окончания выполнения заданий, включаемых в эти пакеты, составы пакетов формируются с использованием эвристических правил, учитывающих временные характеристики заданий, входящих в пакеты, и в последствии не оптимизируются. То есть методы оптимизации решений по составам пакетов заданий и расписаниям их выполнения в конвейерных системах не позволяют осуществлять решение задач большой размерности, не позволяют при значительной размерности задач осуществлять оптимизацию решений, а также не учитывают временные параметры многостадийного процесса выполнения заданий. В связи с тем, что задача оптимизации составов пакетов заданий и расписаний их выполнения на приборах конвейерных систем является NP-трудной, то актуальной является разработка методов

как математического моделирования многостадийных процессов выполнения пакетов заданий в конвейерных системах, а также разработка новых численных методов оптимизации расписаний многостадийных процессов выполнения заданий на приборах конвейерных систем.

В тоже время анализ существующих методов математического моделирования и численной оптимизации расписаний процессов выполнения пакетов заданий в конвейерных системах, выполненный автором, показал, что в них не учитываются такие особенности этих процессов, как условие формирования комплектов результатов и ограничения на ресурсы приборов конвейерных систем. В связи с этим автором рассмотрена и решена задача математического моделирования многостадийных процессов выполнения пакетов заданий и оптимизации расписаний их (процессов) в конвейерных системах с учетом введенных условий.

Автором в работе предложен оригинальный способ решения второй научной проблемы, связанной с математическим моделированием и оптимизацией расписаний многостадийных процессов выполнения пакетов заданий в конвейерных системах. В основу подхода, им предложенного, положена декомпозиция обобщенных задач математического моделирования и оптимизации решений на совокупности иерархически взаимосвязанных подзадач, полученные в результате декомпозиции этих обобщенных задач. Для математического моделирования указанных процессов предлагается представлять их модели в виде совокупности иерархически упорядоченных компонент, а обобщенные задачи оптимизации расписаний представить в виде совокупностей иерархически упорядоченных и взаимодействующих подзадач, для каждой из которых на соответствующем ей уровне иерархии определяется локально оптимальное решение. В силу того, что предложенный подход (названный многоуровневой оптимизацией) предусматривает определенный порядок формирования решений и обмен решениями между уровнями при их оптимизации, автором применен аппарат теории иерархических игр, где игры представляют собой способ совместной оптимизации решений на уровнях иерархии. Применение предложенного автором метода многоуровневой оптимизации позволило ему решить задачи математического моделирования процессов выполнения пакетов заданий в конвейерных системах и оптимизации расписаний выполнения заданий значительно большей размерности, чем существующие методы, а также решить задачи, которые до этого не были решены (в частности, моделирования и оптимизации расписаний процессов выполнения пакетов заданий в конвейерных системах при ограничениях на длительности интервалов их (систем) функционирования, моделирования и оптимизации расписаний выполнения пакетов заданий при условии формирования комплектов, моделирования и оптимизации расписаний выполнения пакетов заданий в конвейерных системах при ограничениях на длительности интервалов их (систем) функционирования и формировании комплектов результатов).

Предложенные автором методы математического моделирования влияния возмущающих воздействий на ход многостадийных процессов выполнения единичных заданий, оптимизации динамических расписаний выполнения единичных заданий в конвейерных системах с целью адаптации хода многостадийных процессов в возмущения, методы математического моделирования многостадийных процессов выполнения пакетов заданий в конвейерных системах и многоуровневой оптимизации расписаний процессов выполнения пакетов заданий на приборах конвейерных систем реализованы автором в виде комплекса соответствующих программ. Реализация всех разработанных методов в виде комплекса программ является актуальной, так как она позволяет осуществить решение задач планирования процессов выполнения единичных заданий и пакетов заданий в конвейерных системах для различных областей практической деятельности. Автором в работе показано применение разработанного комплекса программ для решения задач обработки данных дистанционного зондирования Земли и выполнения заданий на восстановление формы и размеров деталей в механообрабатывающем производстве. Это продемонстрировало практическую ценность разработанных методов математического моделирования и оптимизации расписаний процессов выполнения заданий и пакетов заданий в конвейерных системах. Демонстрация возможностей и перспектив применения разработанных методов также представляется актуальной.

На основе сформулированных выше положений может быть сделан вывод о том, что научный проблемы, рассмотренные и решенные в диссертационном исследовании Кротовым К.В., являются актуальными, рассмотренные в работе задачи позволяют обеспечить решение ряда актуальных теоретических и практических вопросов математического моделирования многостадийных процессов выполнения заданий в конвейерных системах и численной оптимизации расписаний выполнения заданий в конвейерных системах.

#### 2. Обоснованность и достоверность результатов диссертации

Обоснованность научных результатов диссертации подтверждается корректным использованием методов математического моделирования, вычислительной математики и оптимизации, численных методов решения экстремальных задач.

Достоверность результатов математического моделирования многостадийных процессов выполнения единичных заданий и оптимизации статических расписаний процессов выполнения заданий в конвейерных системах подтверждается сравнением их с результатами, полученными путем решения соответствующих задач с использованием метода Джонсона для трех приборных систем, а также с результатами, полученными с использованием известных метаэвристических алгоритмов (генетических алгоритмов и метода отжига). Достоверность результатов математи-

ческого моделирования многостадийных процессов выполнения пакетов заданий в конвейерных системах и многоуровневой оптимизации расписаний многостадийных процессов выполнения пакетов заданий в конвейерных системах подтверждается их сравнением с результатами, полученными для задач малой размерности полным перебором всего множества допустимых решений, а также с результатами, полученными для задач малой размерности с использованием метода ветвей и границ.. Точность приближения результатов, полученных с использованием метода многоуровневой оптимизации расписаний процессов выполнения пакетов заданий в конвейерных системах, к результатам, полученным путем полного перебора множества допустимых решений варьируется в интервале [0.88; 0.94].

#### 3. Новизна результатов диссертации

Научные результаты, полученные автором в диссертационной работе, без сомнения обладают новизной и состоят в следующем:

- 1. Предложена информационная модель системы построения расписаний выполнения заданий в конвейерных системах, на основе которой разработана классификация задач математического моделирования и оптимизации расписаний многостадийных процессов выполнения единичных заданий и пакетов заданий в конвейерных системах. Отличием предложенной классификации от существующих является то, что математические модели многостадийных процессов выполнения заданий в конвейерных системах представляются в виде совокупности иерархически упорядоченных компонент, задачи оптимизации расписаний многостадийных процессов выполнения заданий представляются в виде совокупности иерархически упорядоченных взаимодействующих подзадач, для каждой из которых реализуется определение локально оптимальных решений на соответствующих им уровнях иерархии.
- 2. Предложен метод математического моделирования влияния возмущающих воздействий разных видов на ход многостадийных процессов выполнения единичных заданий в конвейерных системах, предусмотренный статическим расписанием. Его применение позволило построить математические модели влияния возмущающих воздействий разных видов на ход многостадийных процессов выполнения заданий в конвейерных системах. Эти модели положены в основу предложенного автором метода построения динамических расписаний выполнения заданий в конвейерных системах, используемого для адаптации процессов к влиянию возмущающих воздействий разных видов.
- Предложен метод математического моделирования многостадийных процессов выполнения пакетов заданий в конвейерных системах, предусматривающий представление моделей процессов в виде совокупности иерархически взаимосвязанных компонент. С использованием

метода математического моделирования многостадийных процессов выполнения пакетов заданий в конвейерных системах получены различные модели этих процессов для задач, решаемых в работе. На основе полученных математических моделей многостадийных процессов выполнения пакетов заданий в конвейерных системах сформированы математические модели иерархических игр, являющиеся способами оптимизации решений на уровнях иерархии при построении расписаний выполнения пакетов заданий.

- 4. Разработан численный метод оптимизации статических расписаний выполнения единичных заданий в конвейерных системах, а также метод построения динамических расписаний, позволяющий осуществлять адаптацию многостадийных процессов к возмущающим воздействиям разных видов и уменьшить влияние возмущающих воздействий на ход процессов выполнения заданий в конвейерных системах.
- 5. Разработан метод многоуровневой оптимизации расписаний многостадийных процессов выполнения пакетов заданий в конвейерных системах, предусматривающий представление обобщенной задачи оптимизации решений в виде совокупности иерархически взаимосвязанных подзадач, для каждой из которой определяются локально оптимальные решения на соответствующих им уровнях иерархии. Применение метода многоуровневой оптимизации расписаний позволяет значительно увеличить размерность решаемых задач, учитывать при решении задач такие их особенности как формирование комплектов результатов и ограничения на длительности интервалов времени функционирования конвейерных систем.
- 6. Разработан метод оптимизации составов пакетов заданий, позволяющий формировать локально оптимальные решения на верхнем уровне в иерархических играх построения расписаний процессов их выполнения в конвейерных системах, а также разработан метод оптимизации расписаний выполнения пакетов заданий в конвейерных системах. Использование разработанного метода локальной оптимизации составов пакетов заданий позволяет до 40% повысить производительность конвейерных систем при выполнении пакетов заданий (по сравнению с фиксированными пакетами).
- 7. Разработан метод распределения результатов выполнения пакетов заданий в конвейерных системах по комплектам и метод вычисления моментов времени окончания формирования комплектов, обеспечивающие оптимизацию составов пакетов и расписаний их выполнения в конвейерных системах при формирования комплектов результатов. Применение метода распределения результатов выполнения заданий по комплектам и определения моментов времени окончания формирования комплектов совместно с методом оптимизации составов пакетов заданий позволяет до 30% снизить среднее время формирования комплектов и до 35% снизить сум-

марное запаздывание с формированием комплектов относительно заданных для них директивных сроков.

- 8. Разработан метод оптимизации составов групп пакетов заданий, выполняемых в течение ограниченных интервалов времени функционирования конвейерных систем. Его использование позволяет осуществить совместную оптимизацию составов пакетов заданий, составов групп пакетов заданий, выполняемых в течение интервалов времени ограниченной длительности, расписаний выполнения пакетов заданий из групп в конвейерных системах. Использование этого метода обеспечивает решение задач двух видов: 1) оптимизации составов групп пакетов заданий, выполняемых в течение ограниченных интервалов времени функционирования конвейерных систем; 2) оптимизации составов групп пакетов заданий, выполняемых в течение ограниченных интервалов времени функционирования конвейерных систем при формирования комплектов результатов. Использование метода позволяет на 25-30% сократить простои приборов в течение введенных интервалов времени ограниченной длительности и до 50% увеличить количество комплектов, сформированных из результатов выполнения заданий, входящих в пакеты, включенные в группы.
- 9. Развит предметно-ориентированный подход к проектированию программных систем, что позволило реализовать адаптивную процедуру управления решением задач. Применение адаптивной процедуры управления решением позволяет обеспечить структурную гибкость комплекса программ. С использованием комплекса программ получены результаты исследований, доказывающие эффективность применения математических моделей процессов выполнения заданий и пакетов заданий в конвейерных системах, математических моделей иерархических игр для оптимизации решений, методов оптимизации статических и динамических расписаний выполнения единичных заданий в конвейерных системах, многоуровневой оптимизации расписаний выполнения пакетов заданий в конвейерных системах.

## 4. Научная и практическая ценность результатов работы

Новыми результатами диссертационной работы Кротова К.В., обладающими научной и практической значимостью, являются: 1) метод математического моделирования влияния возмущающих воздействий разных видов на ход многостадийных процессов выполнения заданий в конвейерных системах, предусмотренный статическим расписанием; 2) метод математического моделирования многостадийных процессов выполнения пакетов заданий в конвейерных системах, предусматривающий представление моделей этих процессов в виде совокупности иерархически упорядоченных компонент; 3) метод построения динамических расписаний многостадийных процессов выполнения заданий в конвейерных системах, обеспечивающий адаптацию этих

процессов в возмущающим воздействиям разных видов с целью снижения их влияния; 4) метод многоуровневой оптимизации расписаний процессов выполнения пакетов заданий в конвейерных системах, предусматривающий представление обобщенной задачи в виде совокупности иерархически упорядоченных подзадач, для каждой из которых осуществляется локальная оптимизация решений на соответствующих им уровнях иерархии; 5) методы оптимизации решений по составам пакетов заданий, составам групп пакетов заданий, выполняемых в течение временных интервалов функционирования конвейерных систем ограниченной длительности, расписаниям выполнения пакетов заданий на приборах конвейерных систем (в том числе, при учете формирования комплектов из результатов выполнения заданий, входящих в пакеты).

Методы математического моделирования влияния возмущающих воздействий на ход многостадийных процессов выполнения заданий в конвейерных системах и построения динамических расписаний выполнения заданий позволяют выполнить адаптацию этих процессов к воздействиям разных видов, уменьшив при этом простои приборов и увеличив производительность систем при реализации действий с заданиями. Метод математического моделирования многостадийных процессов выполнения пакетов заданий в конвейерных системах позволяет сформировать модели иерархических игр для оптимизации решений по составам пакетов, составам групп пакетов и расписаниям выполнения пакетов на приборах систем. Полученные в работе методы многоуровневой оптимизации расписаний процессов выполнения пакетов заданий в конвейерных системах, локальной оптимизации составов пакетов заданий, составов групп пакетов заданий и расписаний выполнения пакетов заданий на приборах конвейерных систем позволяют формировать решения, обеспечивающие эффективное использование ресурсов приборов и повышение производительности систем, увеличение количества выполненных заданий в течение ограниченных интервалов времени, увеличение количества комплектов, формируемым к заданным для них директивным срокам, увеличение количества комплектов, формируемых из результатов выполнения заданий в пакетах, включенных в группы.

Методы математического моделирования многостадийных процессов выполнения заданий в конвейерных системах и методы оптимизации расписаний выполнения заданий в конвейерных системах используются для построения алгоритмов функционирования сервисов, входящих в комплекса программ моделирования и построения расписаний процессов реализации действий с заданиями на приборах этих систем. Комплекс программ использован автором для решения практических задач следующих видов: 1) математического моделирования и оптимизации расписаний выполнения заданий на обработку данных дистанционного зондирования Земли, 2) математического моделирования и оптимизации расписаний многостадийных процессов обработки передаточных партий деталей транспортного и технологического оборудования в ме-

ханообрабатывающем производстве. В тоже время полученые методы математического моделирования и оптимизации расписаний выполнения заданий в конвейерных системах могут быть использованы для оценки производительности систем при выборе оборудования, а также при определении необходимого оборудования конвейерных систем, обеспечивающих требуемую производительность обработки. Автором получены следующие свидетельства на регистрацию программ для ЭВМ: 1) «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) «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) «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.

Результаты диссертационной работы внедрены в АО «КБ Радиосвязи» (г. Севастополь) при решении задач построения расписаний установления радиосвязи; в ООО «Севастопольэнерго» (г.Севастополь) для решения задач планирования ремонта оборудования; в ФГУП «13-й судоремонтный завод Черноморского флота» МО РФ для решения задач планирования процессов в мелко серийном механообрабатывающем производстве; в ООО «Центр разработки программного обеспечения 1С:Рарус» (г.Севастополь) для решения задач оптимизации выполнения складских операций.

## 5. Соответствие диссертации и автореферата требованиям ВАК

На основе внимательного прочтения диссертации, автореферата и публикаций автора, считаю, что тема диссертационной работы Кротова К.В. и ее содержание соответствуют специальности 05.13.18—«Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». Представленная диссертационная работа соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.13.18 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»:

- Пункту 1. Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений;
- Пункту 3. Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий.
- Пункту 4. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента

Пункту 5. Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента

По результатам исследования опубликовано 38 работ, в том числе 18 статей, из них 10 из перечня ВАК ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, 6 статей в изданиях, включенных в перечень Scopus, 2 статьи в региональных изданиях из перечня РИНЦ, 17 докладов в различных сборниках трудов международных и всероссийских конференций, 3 свидетельства на государственную регистрацию программ для ЭВМ.

Результаты диссертации соответствуют заявленной в ней цели, а разработка методов математического моделирования и численной оптимизации (в том числе, многоуровневой оптимизации) расписаний многостадийных процессов выполнения заданий и пакетов заданий позволяет решить поставленные в диссертации задачи, обеспечивающие достижение цели.

Диссертация и автореферат соответствуют требованиям ВАК РФ. Автореферат и опубликованные работ достаточно полно отражают основное содержание диссертации, характеризуют результаты проведенных исследований.

# 6. Замечания по диссертационной работе

В качестве замечаний по содержанию диссертационной работы Кротова К.В. можно отметить следующее:

- 1. На стр.21,22 введенные автором в рассмотрение критерии оптимальности решений по порядкам выполнения заданий на приборах конвейерных систем являются стандартными и могут быть опущены без ущерба для качества изложения.
- 2. На стр. 50 автором вводятся в рассмотрение множества ограничений на ресурсы системы, используемые ею при выполнении заданий. При этом рассматриваются два ресурса это время функционирования приборов конвейерных систем и объемы накопителей, предназначенных для хранения заданий перед их выполнением на приборах. Однако количество ресурсов обрабатывающих систем, используемых ими при выполнении заданий, более значительно. Это может быть транспортная система для перемещения заданий между приборами, могут быть человеческие ресурсы, привлечение которых к обслуживанию приборов может быть необходимым. Таким образом, имеет смысл говорить о некотором количестве ресурсов *m*, а затем на этой основе строить рассуждения.
- 3. В работе предполагается, что в состав комплектов входят результаты выполнения заданий всех n типов (стр.51). Однако это не является обязательным, так как для задач в общем виде результаты выполнения заданий могут не входить в составы комплектов всех типов.

- 4. На стр. 57-62 достаточно подробно описаны типы задач математического моделирования и оптимизации многостадийных процессов выполнения заданий в конвейерных системах, входящих в классификацию, введенную автором. В соответствии с введенными обозначениями типизация задач и так достаточно понятна, поэтому подробное описание типов задач в классификации можно сократить.
- 5. На стр. 68 автором получен критерий оптимальности расписаний процессов выполнения единичных заданий на приборах конвейерных систем, соответствующих простоям приборов. Явно не указано, что критерий должен быть минимизирован, о характере изменений значений критерия при оптимизации решений можно только догадываться.
- 6. На стр. 70 вводятся в рассмотрение левый и правый дискретные градиенты критерия оптимальности расписаний процессов выполнения заданий в конвейерных системах. Однако способ их вычисления вводится только при формулировке алгоритма оптимизации статических расписаний на стр. 72.
- 7. На стр. 74 автором формулируются теорема о возможности получения локально оптимальных расписаний выполнения единичных заданий в конвейерных системах с использованием предложенного алгоритма Greedy Scheduler. Представляется, что эта формулировка больше соответствует утверждению, а не теореме.
- 8. На стр. 127 введена обобщенная форма двухуровневой иерархической игры, которая может быть опущена ввиду ее очевидности.
- 9. На стр. 140 автор вводит в рассмотрение дополнительные ограничения на множество  $N_I$  допустимых решений по составам пакетов заданий. Однако представляется, что это не ограничения на множество  $N_I$ , а ограничения на возможные значения количества заданий в пакетах, вытекающие из способа формирования пакетов.
- 10. На стр.156-160 в описании генетического алгоритма представлены генетические операторы, но нет значений параметров ГА, эффективных для решения рассматриваемой задачи.
- 11. На стр. 190 автором введены матрицы директивных сроков окончания формирования комплектов. При этом предусмотрено, что количество типов комплектов равно 2, а количество комплектов каждого типа равно 2 и 4. Для соответствующего количества комплектов (4 и 8) сформированы матрицы директивных сроков. Можно порекомендовать автору увеличить количество типов комплектов и количество комплектов каждого типа.

Указанные недостатки не влияют на качество результатов, полученных в диссертационном исследовании Кротовым К. В.. Уровень полученных в ней новых научных результатов достаточно высок, что подтверждает квалификацию автора. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой.

#### 7. Заключение

Новые научные результаты, полученные Кротовым К.В. в диссертационной работе, позволяют решить комплекс важных теоретических и практических проблем и могут быть использованы в различных областях практической деятельности (в промышленности, вычислительных технологиях и так далее). Внедрение автором результатов, полученных им в диссертационной работе, на предприятиях различных сфер деятельности вносит значительный вклад в развитие страны. Автор работы продемонстрировал умение ставить и решать сложные научные проблемы, имеющие важное значение, что подтверждает уровень его квалификации.

Диссертационная работа Кротова К.В. и полученные в ней научные результаты соответствуют требованиям пп. 9 - 14 Положения «О порядке присуждения ученых степеней» утвержденного Правительством Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Но основе выше изложенного автор диссертационной работы Кротов Кирилл Викторович достоин присвоения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.18 — Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Согласен на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

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

Ю.А. Скобцов

KA TYAH W. A. CROSISOSO

190000 г. Санкт-Петербург, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», ул. Б.Морская, д.67, лит. А

Телефон: +7(931) 580-50-59; e-mail: ya\_skobtsov@list.ru

C omzorban oznaco usen 25.08.221

ne / Kpomil K. S. /

# СВЕДЕНИЯ ОБ ОФИЦИАЛЬНОМ ОППОНЕНТЕ

по диссертации Кротова Кирилла Викторовича «Математические модели и методы многоуровневой оптимизации расписаний многостадийных процессов с адаптацией», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по научной специальности

05.13.18-Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Фамилия имя отчество	Скобцов Юрий Александрович
оппонента	
Шифр и наименование	05.13.13 – Вычислительные машины,
специальностей, по которым	комплексы, системы и сети
защищена диссертация	
Ученая степень и отрасль	Доктор технических наук
науки	
Ученое звание	профессор
Полное наименование	Федеральное государственное автономное
организации, являющейся	образовательное учреждение высшего
основным местом работы	образования «Санкт-Петербургский госу-
	дарственный университет аэрокосмического
	приборостроения»
Сокращенное наименование	ФГАОУ ВО ГУАП
организации, являющейся	
основным местом работы	
Ведомственная	федеральная
принадлежность организации	
Структурное подразделение	Кафедра компьютерных технологий и
	программной инженерии
Почтовый индекс, адрес	190000, г. Санкт-Петербург, ул. Б.Морская,
	д.67, лит. А,
Веб-сайт	https://new.guap.ru/
Телефон	(812) 710-65-10
Адрес электронной почты	ya skobtsov@list.ru
Список основных публикаций	1. Скобцов Ю.А. Эволюционный подход к
официального оппонента в	решению задач синтеза производственных
соответствующей сфере	расписаний. Обработка, передача и защита
исследования в рецензиру-	информации в компьютерных системах:
емых научных изданиях за	Первая Всерос. науч. конф. (СПб., 14-22
последние 5 лет (не более 15	апреля 2020 г.): сб. докл. – СПб.: ГУАП, 2020.
публикаций).	- 297 c., c. 95-102
	2. Скобцов Ю.А., Ченгарь О.В.
	Многокритериальные муравьиные алгоритмы

- и объектно-ориентированные модели // В сборнике: Имитационное моделирование. Теория и практика восьмая Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности. 2017. С. 162-166.
- 3. Скобцов Ю.А., Ченгарь О.В., Скаковская А.Н. Многокритериальная оптимизации с адаптивными весами для производственного расписания // Математические методы в технике и технологиях ММТТ. 2017. Т. 7. С. 17-24.
- 4. Родзин С. И., Скобцов Ю. А., Эль-Хатиб С. А. Биоэвристики: теория, алгоритмы и приложения. 2019.
- 5. Скобцов Ю.А. Эволюционные алгоритмы построения проверяющих тестов для перекрестных неисправностей цифровых схем // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2018. № 1. С. 16-22.
- 6. Скобцов Ю.А., Ченгарь О.В. Паретооптимизация производственного расписания на основе метода муравьиных колоний // Онтология проектирования. 2018. Т. 8. № 3 (29). С. 469-479.
- 7. Skobtsov Y., Chengar O., Skobtsov V., Pavlov A.N. Synthesis production schedules based on ant colony optimization method // Advances in Intelligent Systems and 2017. T. 573. C. 456-465.
- 8. Khmilovyi S., Skobtsov Yu., Vasyaeva T., Andrievskaya N. Feature selection for time-series prediction in case of undetermined estimation // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2016. T. 449. C. 85-97.
- 9. Skobtsov Y., Sekirin A., Zemlyanskaya S., Chengar O., Skobtsov V., Potryasaev S. Application of object-oriented simulation in evolutionary algorithms // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2016. T. 466. C. 453-462.

[	10. Скобцов Ю.А., Сперанский Д.В.
	10. Скобцов Ю.А., Сперанский Д.В. Эволюционные вычисления. – М.:
	Национальный Открытый Университет
	«ИНТУИТ» 2016.Лань 331 с.
Graces at Dr. 1050	
Являетесь ли Вы работником	Не являюсь
ФБГНУ "Институт природно-	
технических систем" или	
ФГАОУ ВО "Севастопольский	
государственный универси-	
тет" (в том числе по	
совместительству)?	
Являетесь ли Вы работником	Не являюсь
(в том числе по совмести-	
тельству) организации, где	
работает соискатель ученой	
степени или его научный	
руководитель?	
Являетесь ли Вы работником	Не являюсь
(в том числе по совмести-	
тельству) организаций, где	
ведутся научно-исследова-	
тельские работы, по которым	
соискатель ученой степени	
является руководителем или	
работником организации-	
заказчика или исполнителем	
(соисполнителем)?	
Являетесь ли Вы членом	Не являюсь
Высшей аттестационной	
комиссией при Министерстве	
науки и высшего образования	
Российской Федерации?	
Являетесь ли Вы членом	Не являюсь
экспертных советов Высшей	
аттестационной комиссией	
при Министерстве науки и	
высшего образования	
Российской Федерации?	
Являетесь ли Вы членом	Не являюсь
диссертационного совета,	
принявшего диссертацию к	
защите?	

Являетесь ли Вы соавтором	Не являюсь
соискателя степени по опубликованным работам по	
теме диссертационного исследования?	

Доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерные технологии и программная инженерия» ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

Ю.А. Скобцов