

На правах рукописи

Ватутин Эдуард Игоревич

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПРОГРАММНО-
АППАРАТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИНТЕЗА ЛОГИЧЕСКИХ
МУЛЬТИКОНТРОЛЛЕРОВ**

Специальность 05.13.05 – Элементы и устройства
вычислительной техники и систем управления

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Курск – 2022

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» на кафедре вычислительной техники.

Научный консультант: доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ
Титов Виталий Семенович

Официальные оппоненты: **Андрианов Дмитрий Евгеньевич**
доктор технических наук, доцент,
Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, заместитель директора по учебной работе (г. Муром)

Востокин Сергей Владимирович
доктор технических наук, доцент,
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, заведующий кафедрой программных систем (г. Самара)

Ивутин Алексей Николаевич
доктор технических наук, профессор,
Тульский государственный университет, заведующий кафедрой вычислительной техники (г. Тула)

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» (г. Рязань)**

Защита диссертации состоится 4 июля 2022 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д212.105.02, созданного на базе Юго-Западного государственного университета, по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Юго-Западного государственного университета и на официальном сайте <https://swsu.ru/upload/iblock/ab7/b5tjpdqzxxm8m2ec5bpvx6ef2czpau1k/Disser-Vatutin.pdf>.

Автореферат разослан « » _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д212.105.02, к.т.н.

Титенко Евгений Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Развитие средств вычислительной техники требует решения ряда задач, связанных с проектированием систем логического управления (СЛУ), и создания цифровых управляющих устройств на их основе. К ним относятся задачи, связанные с проектированием логических мультиконтроллеров (разбиение, размещение, распараллеливание и пр.), задачи на графах (прокладка путей, раскраски и пр.), задачи, связанные с различными комбинаторными объектами (например, латинскими квадратами и графами с их участием на множестве бинарного отношения ортогональности и пр.). Многие из них являются труднорешаемыми, относятся к классу NP -трудных и отыскание их точного решения возможно лишь для случаев малой размерности. С ее ростом происходит увеличение мощности пространства перебора (числа ветвей в соответствующем дереве комбинаторного перебора), что делает актуальными алгоритмическую, высоко- и низкоуровневую оптимизацию используемых программных средств в сочетании с их распараллеливанием под существующие классы аппаратного обеспечения с параллельной архитектурой (процессоры с векторными расширениями системы команд, многоядерные процессоры и многопроцессорные вычислительные узлы, видеокарты с поддержкой технологии GPGPU, вычислительные кластеры, суперкомпьютеры и грид-системы) и перенос наиболее трудоемких подзадач на аппаратный уровень путем разработки специализированных устройств-акселераторов. Снижение затрат времени на получение решений поставленных комбинаторных задач позволяет осуществить расширение сферы их практического применения путем нахождения решений для ряда размерностей, что было невозможно ранее как ввиду отсутствия аппаратного обеспечения, развитие которого как в плане увеличения числа транзисторов, так и в плане увеличения объема вычислений, выполняемого в единицу времени, следует закону Мура, так и из-за отсутствия соответствующего алгоритмического и программного обеспечения.

При дальнейшем росте размерности рассматриваемых комбинаторных задач возникает «комбинаторный взрыв» и поиск точных (оптимальных) решений становится невозможным даже с использованием современных вычислительных систем с параллельной архитектурой. При этом актуальными являются разработка и использование эвристических методов и алгоритмов, позволяющих находить близких к оптимальным (суб- или квазиоптимальных) решений с допустимыми затратами вычислительного времени, как правило определяемыми индивидуально для различных комбинаторных задач и областей их приложения. В некоторых задачах использование указанных методов позволяет получать нижние и верхние ограничения при невозможности выполнения полного перебора и определения точного значения искомой величины. Используемые при этом эвристические методы как правило являются итерационными и при их использовании не менее актуальной является задача алгоритмической, высоко- и низкоуровневой оптимизации, решение которой позволяет либо снизить затраты вычислительного времени, либо повысить качество получаемых решений при сохранении затрат вычислительного времени.

При синтезе СЛУ в базисе логических мультиконтроллеров (ЛМК), представляющих собой распространенный класс цифровых управляющих систем, возникает ряд комбинаторных NP -трудных задач, к которым относятся задачи поиска оптимальных разбиений граф-схем параллельных алгоритмов логического управления,

выяснение ряда числовых оценок для заданных граф-схем и разбиений (оценка степени параллелизма граф-схемы, оценка интенсивности межблочных взаимодействий) и пр., оптимальное решение которых для случаев практически важной размерности невозможно на современном уровне развития вычислительной техники из-за необходимости чрезмерно больших вычислительных затрат. Качество получаемых решений (разбиений) напрямую влияет на технические характеристики синтезируемой СЛУ (в первую очередь – на аппаратную сложность и, как следствие, – массогабаритные параметры и энергопотребление). Для решения комбинаторных оптимизационных задач на практике применяются эвристические итерационные методы, отличающиеся по составу используемых в процессе их работы эвристик, скорости сходимости, необходимым затратам вычислительного времени и степени минимизации целевой функции в зависимости от решаемой задачи, ее размерности, силы ограничений и ориентации на класс аппаратного обеспечения с параллельной архитектурой.

Таким образом, в настоящее время существует **проблемная ситуация** между высокой вычислительной сложностью алгоритмов решения задачи построения разбиений граф-схем параллельных алгоритмов и ограниченными возможностями существующих программных и аппаратных средств ее решения, приводящими к высокой аппаратной сложности логических мультиконтроллеров, и значительной стоимостью дальнейшего повышения производительности указанных средств.

В связи с вышеизложенным актуальной является **научно-техническая проблема**, заключающаяся в разработке теоретических основ, программных и аппаратных реализаций, ориентированных на решение задач комбинаторики при синтезе логических мультиконтроллеров с целью снижения их аппаратной сложности.

Диссертационные исследования соответствуют приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в Российской Федерации «Информационно-телекоммуникационные системы» и критической технологии в Российской Федерации «Технологии и программное обеспечение распределенных и высокопроизводительных вычислительных систем», утвержденных указом Президента Российской Федерации № 623 от 16.12.2015 г.

Степень разработанности темы исследования. Для некоторых случаев малой размерности задачи комбинаторики при синтезе логических мультиконтроллеров удастся решить точно с использованием специальных алгоритмов и их высокооптимизированных программных и/или аппаратных реализаций, ориентированных на вычислительные системы с параллельной архитектурой. Разработкой подобных универсальных комбинаторных алгоритмов и их практических реализаций в параллельных и распределенных вычислительных средах занимались Посыпкин М.А., Colborn C.J., Denes J., Dinitz J.H., Doig A.G., Glover F., Karp R., Keedwell A.D., Kochenberger G.A., Knuth D.E., Land A.H., Parker E.T., Rosen K.H., Sloanne N.J.A., Wanless I. и др.

Вопросами анализа и синтеза систем логического управления сложными техническими объектами и системами, являющихся одним из распространенных классов цифровых управляющих систем, и соответствующего специализированного программного и алгоритмического обеспечения занимались отечественные и зарубежные ученые Баранов С.И., Баркалов А.А., Варшавский В.И., Горбатов В.А., Закревский А.Д., Зотов И.В., Лазарев В.Г., Магергут В.З., Пийль Е.И., Турута Е.Н., Харченко В.С., Шалыто А.А., Юдицкий С.А., Agerwala T., Husson S., Puri R. и др.

Для решения задач комбинаторики большей размерности использование точных методов невозможно из-за чрезмерных затрат вычислительного времени и вместо них применяются эвристические методы, разработкой которых занимались Карпенко А.П., Dorigo M., Gelatt C.D., Karaboga D.D., Kirkpatrick S., Pham D.T., Vecchi M.P. и др.. Эффективность использования различных эвристических методов существенно зависит от решаемых задач, доступных затрат вычислительного времени и используемого класса аппаратного обеспечения.

В некоторых случаях возможен перенос части вычислительно сложных процедур обработки с программного уровня на аппаратный путем разработки специализированных устройств-акселераторов, жестко адаптированных к особенностям решаемой задачи. Разработкой подобных устройств занимались Баранов В.Л., Васильев В.В., Глушань В.М., Додонов А.Г., Епихин В.В., Калашников В.А., Кун С., Курейчик В.М., Чаплиц А.Н., Червяцов В.Н., Штейнберг Б.Я., Щербаков Л.И., Ян В.И. и др.

Несмотря на большое количество работ по данной тематике анализ литературы показал, что на практике не в полной мере реализован потенциал использования методов, алгоритмов и их программных реализаций для решения задач комбинаторики при синтезе логических мультиконтроллеров. На основе проведенного анализа современных исследований сформулированы основные задачи и цель диссертационной работы.

Целью диссертационной работы является разработка теоретических основ и технических решений программно-аппаратного обеспечения синтеза логических мультиконтроллеров с целью снижения их аппаратной сложности.

Решение проблемы и цели предполагает **решение следующих задач:**

1. Анализ состояния проблемы, обоснование и выбор направления исследований.
2. Математическая модель построения разбиений граф-схем параллельных алгоритмов управления при синтезе логических мультиконтроллеров.
3. Теоретические основы решения задачи поиска разбиений граф-схем параллельных алгоритмов.
4. Оценка итерационных методов в тестовых задачах комбинаторики путем проведения экспериментальных исследований.
5. Сравнительная оценка качества решений задачи поиска разбиений граф-схем параллельных алгоритмов при синтезе логических мультиконтроллеров.
6. Структурно-функциональная организация программно-аппаратных средств решения задач дискретной комбинаторной оптимизации при синтезе логических мультиконтроллеров.
7. Экспериментальная оценка структурно-функциональной организации программно-аппаратного комплекса синтеза логических мультиконтроллеров.

Объектом исследования являются задачи дискретной комбинаторной оптимизации, возникающие при синтезе логических мультиконтроллеров.

Предметом исследования являются методы, алгоритмы, программные и аппаратные средства решения задач дискретной комбинаторной оптимизации при синтезе логических мультиконтроллеров.

Научная новизна и положения, выносимые на защиту. В рамках диссертационной работы были получены следующие новые научные результаты.

1. Разработана математическая модель построения разбиений, основанная на формализованном описании граф-схем параллельных алгоритмов логического управления, отличающаяся возможностью минимизации межконтроллерного трафика передачи управления, позволяющая минимизировать группу частных показателей (число лишних блоков разбиения, степени дублирования логических сигналов микроопераций и логических условий, число микрокоманд межконтроллерной передачи управления, интенсивность межконтроллерных взаимодействий) путем решения задачи многокритериальной дискретной комбинаторной оптимизации и производить оценку аппаратной сложности синтезируемого ЛМК.

2. Разработаны теоретические основы создания новых универсальных эвристических методов решения задачи поиска разбиений граф-схем параллельных алгоритмов, применяемых при синтезе логических мультиконтроллеров, а именно:

- принцип организации ограниченного числа комбинаторных возвратов при движении по дереву комбинаторного перебора для группы методов с последовательным формированием решений с целью увеличения вероятности нахождения решений задач дискретной комбинаторной оптимизации с сильными ограничениями;
- использование двудольного графа в составе метода муравьиной колонии с целью расширения сферы применения муравьиных алгоритмов на произвольные задачи дискретной комбинаторной оптимизации, в том числе задачи построения разбиений при синтезе ЛМК;
- метод взвешенного случайного перебора для решения задач дискретной комбинаторной оптимизации, базирующийся на использовании взвешивающей эвристики при выборе направления движения в дереве комбинаторного перебора при последовательном формировании решения, позволяющий осуществить разработку слабосвязанных параллельных программных реализаций без общих структур данных, изменяющихся во время его работы, ориентированный на широкий класс современных вычислительных средств с параллельной архитектурой;
- принцип вариации порядка формирования решения комбинаторных задач на базе формального критерия минимума возможностей, повышающий темп нахождения решений и расширяющий сферу практического применения алгоритмов и программных реализаций на его основе.

3. Проведен теоретический анализ и экспериментальные исследования эвристических методов решения тестовых задач комбинаторики, на основании которого показано, что для результатов выполненных вычислительных экспериментов в пространстве параметров (размерность задачи; сила ограничений) всех рассмотренных задач дискретной комбинаторной оптимизации существует зонная зависимость качества решений различных эвристических методов от выбранной зоны пространства параметров, что позволяет осуществлять априорный выбор наиболее подходящего метода в зависимости от исходных данных решаемой задачи. В задаче поиска кратчайшего пути в графе границы между областями преимущественного использования эвристических методов аппроксимируются гиперболами, что является эмпирическим следствием выполненных вычислительных экспериментов и позволяет аналитически выби-

рать наилучший эвристический метод в зависимости от размерности задачи и силы ограничений.

4. Предложен обобщенный метод построения разбиений граф-схем параллельных алгоритмов при синтезе ЛМК, включающий в своем составе:

- метод и алгоритм выявления циклов в граф-схемах параллельных алгоритмов на базе компонент сильной связности, позволяющие производить нахождение тел циклов с последующей перенастройкой замыкающих дуг в их составе для заданной граф-схемы параллельного алгоритма с полиномиальной временной асимптотической сложностью;
- модифицированные версии метода синтеза разбиений с жадным последовательным формированием блоков разбиения и метода параллельно-последовательной декомпозиции, применяемые при построении разбиений граф-схем параллельных алгоритмов логического управления и позволяющие повысить качество получаемых разбиений;
- комбинированный метод решения задачи разбиения, позволяющий использовать один из последовательных алгоритмов построения разбиений для оценки качества текущего наилучшего решения с последующим его улучшением с использованием итерационных алгоритмов и отсечением неперспективных решений с использованием метода ветвей и границ;
- полиномиальный алгоритм оценки степени параллелизма граф-схем параллельных алгоритмов с использованием матрицы отношений вершин.

5. Проведена серия вычислительных экспериментов с использованием эвристических методов решения задачи поиска разбиений при синтезе ЛМК, на основании анализа результатов которых установлено, что границы между областями преимущественного использования методов не описываются аналитически. При наличии слабых ограничений преимуществом обладают жадные методы, в области сильных ограничений разбиения более высокого качества обеспечивают итерационные методы, что используется в составе предложенного обобщенного метода построения разбиений граф-схем параллельных алгоритмов логического управления.

6. В ходе вычислительных экспериментов получены зависимости значений частных показателей качества разбиений от силы технологических ограничений базиса ЛМК, позволившие выявить наличие зон нечувствительности, в которых ослабление значений ограничений приводит лишь к увеличению аппаратной сложности контроллеров в составе ЛМК и не приводит к улучшению качества получаемых разбиений и, как следствие, – технических характеристик СЛУ. С использованием полученных зависимостей осуществлена структурно-параметрическая оптимизация структуры ЛМК, в результате которой сделан вывод о целесообразности построения ЛМК, включающих в своем составе большое количество относительно простых контроллеров, что, в свою очередь, позволяет сократить требования к аппаратной сложности контроллеров по объему памяти микрокоманд и числу выводов для приема/выдачи сигналов логических условий/микроопераций и снизить аппаратную сложность синтезируемых ЛМК.

7. Разработан аппаратно-программный комплекс для решения задач комбинаторики, возникающих при синтезе ЛМК. Программная часть комплекса интегрирована с проектом добровольных распределенных вычислений Gerasim@Home на платформе BOINC, что позволило выполнить серию вычислительных экспериментов. Аппарат-

ная часть комплекса, включающая в своем составе аппаратные реализации устройств для выполнения наиболее трудоемких операций (обработка табличных представлений R -выражений, матричные операции), возникающих при решении задач дискретной комбинаторной оптимизации, позволяет сократить время выполнения метаоптимизации эвристических методов на 2 порядка.

Достоверность результатов, положений и выводов диссертации обеспечивается корректным и обоснованным применением методов математической логики, теории множеств и графов, комбинаторной теории, теории вероятностей и математической статистики, методов оптимизации и линейного программирования, теории параллельных процессов, теории проектирования конечных автоматов, дискретных систем и устройств ЭВМ, и подтверждается экспертизой РосПатента, результатами практического использования, а также вычислительными экспериментами на грид с применением зарегистрированных в установленном порядке программных средств.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем. Теоретическая значимость диссертационной работы определяется развитием теории применения эвристических методов при решении дискретных оптимизационных задач комбинаторики, что позволило повысить эффективность синтеза СЛУ в базисе ЛМК: повышены вероятности получения разбиений с меньшим числом лишних блоков, меньшими степенями дублирования двоичных сигналов, меньшим количеством микрокоманд и меньшим межмодульным трафиком передачи управления в условиях наличия сильных ограничений со стороны базиса ЛМК с использованием разработанных методов с 0,5–0,6 до 0,8–0,95 и, как следствие, – достигнуто снижение их аппаратной сложности от 8% до 57%.

Практическая значимость работы подтверждается применением разработанных методов, алгоритмов и приемов их алгоритмической и высокоуровневой программной оптимизации при решении ряда задач комбинаторики в составе соответствующих расчетных модулей. Разработанное ПО интегрировано для использования в составе грид-системы под управлением BOINC и может использоваться при решении задач дискретной комбинаторной оптимизации широкого спектра. Созданная визуальная среда для синтеза ЛМК отталкиваясь от заданной параллельной граф-схемы алгоритма управления позволяет находить необходимые разбиения исходной граф-схемы в соответствии с ограничениями базиса ЛМК и производить сравнение качества решений различных эвристических методов, интегрированных в ее составе. Разработанные функциональные схемы устройств обработки матриц могут найти практическое применение для решения ряда задач, включающих в своем составе матричные операции (задачи теории графов и множеств, численное решение систем дифференциальных уравнений, задачи с применением тензорных операций и т.п.).

Использование результатов диссертационной работы на практике подтверждено соответствующими актами о внедрении в ООО «КМС-Промэлектромонтаж» (г. Череповец), АО «Северсталь-Инфоком» (г. Череповец), ООО «Смарт грид» (г. Иркутск), ООО «МЦСТ» (г. Москва). Результаты диссертационного исследования используются в образовательном процессе Юго-Западного государственного университета в рамках следующих дисциплин по направлению подготовки 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника»: «Основы комбинаторной оптимизации», «Параллельное программирование», «Теоретические основы организации многопроцес-

сорных комплексов и систем». Получено 4 патента на изобретения и полезные модели и 5 свидетельств об официальной государственной регистрации программ ФГБУ «Федеральный институт промышленной собственности».

Диссертационные исследования проводились в рамках выполнения следующих НИР:

1. Федеральная целевая программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», наименование работы «Теоретические основы и методы использования распределенных и высокопроизводительных вычислительных систем для решения дискретных оптимизационных задач», шифр 14.В37.21.0598, 2012–2013 гг., тема № 1.187.12П.
2. Государственное задание для Юго-Западного государственного университета, наименование работы «Разработка и оптимизация параллельных вычислительных методов, алгоритмов и программных средств для решения задач дискретной оптимизации», НИР № 2246, 2015 г., тема № 1.20.14ф.
3. Грант Президента РФ для поддержки молодых ученых – кандидатов наук, наименование работы «Разработка эвристических методов, алгоритмов и аппаратно-программных средств с параллельной архитектурой для решения задач дискретной комбинаторной оптимизации при проектировании однородных многомодульных мультисистем», шифр МК-9445.2016.8, 2016–2017 гг., тема № 1.12.16ф.
4. Грант РФФИ, наименование работы «Разработка и реализация алгоритмов решения крупномасштабных задач, допускающих массивированный параллелизм по данным, в распределенных средах на основе проектов добровольных вычислений и вычислительных кластеров», шифр 16-07-00155-а, 2017 г.
5. Грант РФФИ, наименование работы «Разработка и анализ эффективности эвристических итерационных методов при проектировании логических мультиконтроллеров с использованием грид-систем на добровольной основе», шифр 17-07-00317-а, 2017–2019 гг., тема № 1.15.17ф.
6. Грант РФФИ, наименование работы «Исследование, разработка и реализация теоретико-игровых математических моделей и алгоритмов планирования заданий в Desktop Grid», шифр 18-37-00094-мол-а, 2018–2019 гг.
7. Программа развития ФГБОУ ВО «ЮЗГУ» в рамках проекта «Приоритет 2030», наименование работы «Разработка аппаратно-алгоритмического обеспечения для решения задач комбинаторики и дискретной комбинаторной оптимизации с использованием добровольных распределенных вычислений», шифр ПР2030/2021-35, 2021 г.

Соответствие паспорту научной специальности 05.13.05 «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления». Диссертационная работа выполнена в соответствии с пунктами «1. Разработка научных основ создания и исследования общих свойств и принципов функционирования элементов, схем и устройств вычислительной техники и систем управления», «2. Теоретический анализ и экспериментальное исследование функционирования элементов и устройств вычислительной техники и систем управления в нормальных и специальных условиях с целью улучшения технико-экономических и эксплуатационных характеристик», «3. Разработка принципиально новых методов анализа и синтеза элементов и устройств вычислительной техники и систем управления с целью улучшения их технических

характеристик» паспорта специальности 05.13.05 «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления».

Методология и методы исследования. Теоретические исследования проведены с использованием методов математической логики, теории множеств и графов, комбинаторной теории, теории вероятностей и математической статистики, методов оптимизации и линейного программирования, теории параллельных процессов, теории проектирования конечных автоматов, дискретных систем и устройств ЭВМ.

Экспериментальные исследования выполнены с использованием стохастических итерационных методов решения оптимизационных задач, технологий объектно-ориентированного и процедурно-модульного программирования.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и получили положительную оценку на следующих региональных, всероссийских и международных конференциях: Параллельные вычисления и задачи управления «РАСО» (Москва, 2004, 2008, 2010, 2012); Information and Telecommunication Technologies in Intelligent Systems (Испания, 2004, 2005, 2007, Италия, 2006); Идентификация систем и задачи управления «SICPRO» (Москва, 2006, 2008); Информационные технологии моделирования и управления (Воронеж, 2004); Интеллектуальные и информационные системы (Тула, 2004, 2005, 2009, 2011, 2015, 2017, 2019, 2021); Информационно-математические технологии в экономике, технике и образовании (Екатеринбург, 2007); Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации «Распознавание» (Курск, 2003, 2005, 2008, 2010, 2012, 2013, 2015, 2017–2019, 2021); Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации (Курск, 2006); Перспективы развития систем управления оружием (Курск, 2007); Медико-экологические информационные технологии (Курск, 2005, 2014); Информационно-измерительные, диагностические и управляющие системы (Курск, 2009, 2016); Многоядерные процессоры, параллельное программирование, ПЛИС, системы обработки сигналов (Барнаул, 2013–2017); Перспективные информационные технологии «ПИТ» (Самара, 2014, 2016, 2019, 2020); Distributed computing and grid-technologies in science and education «GRID» (Дубна, 2014, 2016, 2018); Eighth World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation (Ташкент, 2014); BOINC-based High Performance Computing: Fundamental Research and Development «BOINC:FAST» (Петрозаводск, 2013, 2015, 2017); Параллельные вычислительные технологии «ПаВТ» (Челябинск, 2016, Казань, 2017); Information-Measuring Equipment and Technologies «IME&T» (Томск, 2016); Russian Supercomputing Days «RSD» (Москва, 2016, 2018, 2020, 2021); Информационные технологии и математическое моделирование систем (Москва, 2016, 2017); Всероссийская мультikonференция по проблемам управления (Ростовна-Дону, Таганрог, 2017); Визуальная аналитика (Кемерово, 2017); Цифровые технологии в образовании, науке, обществе (Петрозаводск, 2017); Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии «ВВСТ» (Барнаул, 2018–2021); Национальный суперкомпьютерный форум (Переславль-Залесский, 2016–2021); Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments «ICCS-DE» (Иркутск, 2020); Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России (Муром, 2022); а также на научных семинарах кафедры вычислительной техники ЮЗГУ с 2003 по 2022 гг.

Публикации. По результатам диссертации опубликовано 75 основных печатных работ, среди которых 41 статья (из них 29 по перечню ВАК, 5 индексируются Scopus и WoS), 7 свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ, 3 патента на изобретение и 1 патент на полезную модель, 3 монографии, одна из которых в моноавторстве, 20 тезисов докладов и материалов конференций. Список основных публикаций приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора в получение результатов, изложенных в диссертационной работе. Все выносимые на защиту научные результаты, в том числе постановка задач, разработка методов, алгоритмов, организация вычислительных экспериментов и анализ экспериментальных данных, основные научные результаты, выводы и рекомендации получены соискателем лично. Программные средства, реализующие разработанные методы и алгоритмы, созданы автором лично. Работы [11, 32, 33, 41, 43, 62, 69] выполнены без соавторства. В работах, опубликованных в соавторстве, личный вклад автора состоит в следующем: в работах [1, 2, 6, 12, 13, 15, 18, 19, 23, 24, 26, 28, 35–38, 42, 44, 49–57, 67–68, 70, 74] разработаны теоретические основы синтеза разбиений граф-схем параллельных алгоритмов логического управления; в работах [3, 4, 7, 8, 29, 39, 45–48, 63, 66] предложены специализированные аппаратные средства для решения наиболее трудоемких подзадач проектирования ЛМК, приведены оценки их аппаратной сложности и быстродействия; в работах [5, 9, 10, 16, 20, 25, 30, 31, 34, 58–61, 64, 65, 71, 72, 73, 75] автором произведена оценка качества получаемых решений задач дискретной комбинаторной оптимизации и ее влияние на аппаратную сложность синтезируемых ЛМК; в работах [14, 17, 21, 22, 27, 40] приведена оценка эффективности программных реализаций методов, применяемых при синтезе ЛМК.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 465 источников и 1 приложения. Работа содержит 477 страниц основного текста, 214 рисунков и 77 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы проблемы, цель и вытекающие из нее задачи исследований, научная новизна, практическая ценность и результаты реализации работы.

В первой главе выполнен обзор и анализ состояния комбинаторных проблем на графах, отмечены особенности задач дискретной комбинаторной оптимизации, приведены результаты обзора эвристических методов решения задач дискретной комбинаторной оптимизации общего вида и специализированных методов, ориентированных на решение задач разбиения графов и граф-схем управляющих алгоритмов.

Большая часть задач комбинаторики относится к классу NP и характеризуется факториальной или экспоненциальной асимптотической временной сложностью, что при их решении на практике приводит к «комбинаторному взрыву» и, как следствие, невозможности точного решения задач размерностью $N > N_{\max}$, где N_{\max} – некоторое пороговое значение, специфическое для решаемой задачи и применяемых для этого методов, алгоритмов, их программных реализаций и используемого класса аппаратного обеспечения с параллельной архитектурой. Для некоторых задач комбинаторики при этом ограничиваются приблизительными оценками искомых значений целевых функций, отталкиваясь от средней арности узлов в рамках соответствующего дерева

комбинаторного перебора либо нижними/верхними оценками, получаемыми аналитически. В задачах дискретной комбинаторной оптимизации при этом производится получение ограниченного количества решений с последующим выбором лучшего из них, приводящего к получению суб- или квазиоптимального значения заданной целевой функции

$$f(X) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где X – вектор параметров (элементов решения), специфичных для решаемой задачи.

По числу получаемых решений методы и алгоритмы решения задач комбинаторной оптимизации подразделяются на последовательные и итерационные. Последовательные методы обеспечивают получение единственного решения и характеризуются низкими вычислительными затратами и относительно низким качеством получаемых решений. Итерационные методы реализуют в своем составе ограниченный перебор решений с последующим выбором наилучшего из них в соответствии с (1). Они, как правило, обеспечивают получение решений более высокого качества по сравнению с последовательными, однако характеризуются существенно большими вычислительными затратами.

По типу получаемых решений методы подразделяются на точные (оптимальные) и приближенные (эвристические). Методы первого направления обеспечивают получение оптимального решения поставленной задачи дискретной оптимизации путем полного перебора всех возможных решений (в случае решения задач класса NP) либо путем использования специализированного алгоритма с полиномиальной временной асимптотикой (для задач класса P). Решение задач класса P большой размерности также возможно с использованием эвристических методов в случаях, когда вычислительные затраты на применение специализированных алгоритмов и их программных реализаций неприемлемо высоки.

Эвристические методы в свою очередь подразделяются на ряд направлений: методы ограниченного перебора, методы последовательного формирования решений, методы на базе модификации существующих решений, методы на базе движения коллектива агентов. Приведенная классификация не является полной и включает в своем составе основные методы рассматриваемых направлений.

При решении ряда задач известны специализированные методы, учитывающие специфику задачи и позволяющие снижение вычислительной сложности их практических программных реализаций при одновременном повышении качества получаемых решений. Для решения задачи поиска разбиений известны методы С.И. Баранова, А.Д. Закревского и метод параллельно-последовательной декомпозиции (автор обобщенного описания – И.В. Зотов). Первый является жадным последовательным эвристическим методом, ориентирован на построение разбиений последовательных граф-схем алгоритмов, минимизирует только степени дублирования микроопераций и логических условий, построение разбиения осуществляется последовательно поблочно. Второй базируется на полиномиальном сведении исходной задачи к задаче поиска субоптимальной раскраски специального графа (принадлежит к классу NP , что в вычислительном плане не проще исходной задачи) и не имеет поддержки технологических ограничений базиса ЛМК, что существенно снижает сферу его практического применения, качество разбиений определяется используемыми эвристическими алгоритмами раскраски. Метод параллельно-последовательной декомпозиции является после-

довательным методом, ориентирован на построение разбиений граф-схем параллельных алгоритмов, базируется на ряде редукционных преобразований и производит параллельное построение блоков разбиения из субсечений. В некоторых случаях в составе соответствующего метода возможно построение разбиения множества решений на классы эквивалентности с последующим анализом только одного решения из каждого класса, что существенно (на несколько порядков) снижает затраты вычислительного времени при использовании переборных методов.

Таким образом, в ходе выполненного обзора выявлено, что для решения задач класса NP на практике используются универсальные и специализированные эвристические итерационные методы, ориентированные на параллельную программную реализацию в соответствии с ограничениями класса используемого аппаратного обеспечения. В различных задачах они характеризуются различным качеством получаемых решений, что делает актуальной задачу их сопоставления друг с другом с целью выявления наиболее подходящих для решения задач дискретной комбинаторной оптимизации на графах, возникающих при проектировании ЛМК.

Во второй главе разработано единое математическое описание эвристических методов решения задач дискретной комбинаторной оптимизации, в том числе возникающих при синтезе ЛМК, и приведены результаты анализа данных вычислительного эксперимента по сравнению их эффективности в тестовой задаче поиска кратчайшего пути в графе (англ. Single Shortest Path, сокр. SSP) в зависимости от размерности задачи (в данном случае – числа вершин N в графе) и силы ограничений (в данном случае – плотности графа d).

Существующие методы решения задач дискретной комбинаторной оптимизации обладают существенно различными асимптотическими временной и емкостной сложностями, трудоемкостью реализации, затратами вычислительного времени при практической программной реализации, поведением при решении задач различной размерности и наличии ограничений различной силы, а также возможностями распараллеливания под указанный класс аппаратного обеспечения с параллельной архитектурой. С целью сравнения их эффективности была использована тестовая задача поиска кратчайшего пути в ориентированном графе $G = \langle A, V \rangle$, где $A = \{a_1, a_2, \dots, a_N\}$ – множество вершин, $N = |A|$ – число вершин (размерность задачи), $V = \{v_1, v_2, \dots, v_M\} \subseteq A \times A$ – множество дуг, $M = |V|$ – число дуг, дуги взвешены значениями длины m_{ij} , $i, j = \overline{1, N}$. Данная задача в графах без отрицательных весов решается точно с использованием алгоритмов Дейкстры, Флойда-Уоршелла или A^* , обладающих полиномиальной временной асимптотикой, что делает ее удобной для сравнения качества решений эвристических методов с целью выявления наиболее эффективных среди них. Поиск решения сводится к отысканию такого пути $P = [a_{i_1}, a_{i_2}, \dots, a_{i_m}]$ между начальной $a_{i_1} = a_{нач}$ и конечной $a_{i_m} = a_{кон}$ вершинами, что его длина

$$L(P) = \sum_{j=1}^{m-1} m_{i_j, i_{j+1}} \rightarrow \min,$$

все вершины в составе пути при этом должны быть различны ($\exists j, k, j \neq k: a_{i_j} = a_{i_k}$). В качестве ограничения выступает плотность графа

$$d = \frac{M}{N(N-1)}, 0 \leq d(G) \leq 1.$$

Метод полного перебора (сокр. BF) базируются на построении множества всех возможных путей (верхняя оценка их количества – $O(N!)$) между заданными начальной $a_{нач}$ и конечной $a_{кон}$ вершинами с использованием стратегии ветвей и границ. При невозможности анализа всех путей на практике применяются методы ограниченного перебора: с ограничением на число анализируемых ветвей (сокр. LBF) и с ограничением на глубину S анализируемых поддеревьев (сокр. LDFS). В первом случае число анализируемых ветвей линейно влияет на вычислительные затраты, во втором глубина S анализируемых поддеревьев влияет на показатель в составе асимптотической временной сложности соответствующего алгоритма, составляющей величину $t \simeq O(N^{S+1})$.

В рамках методов на базе последовательного формирования решения осуществляется формирование путей P_i вершина за вершиной с использованием различных эвристик:

- $\Delta Q_g(a_j) \rightarrow \min$ для жадного метода, где $\Delta Q_g(a_j) = L(P = [a_{i_1}, a_{i_2}, \dots, a_{i_{mек}}, a_j]) - L(P = [a_{i_1}, a_{i_2}, \dots, a_{i_{mек}}]) = m_{i_{mек}, j}$ – приращение качества решения при добавлении еще не посещенной вершины a_j в формируемый путь P ;
- $\Delta Q_{rs}(a_j) \rightarrow \min$ для метода случайного перебора, где $\Delta Q_{rs}(a_j) = r_k$ – очередное k -е значение псевдослучайной величины с равномерным распределением;
- $\Delta Q_{wrs}(a_j) \rightarrow \min$ для метода взвешенного случайного перебора, где $\Delta Q_{wrs}(a_j) = \Delta Q_g(a_j) \cdot (1 + 2D(r_k - 0,5))$, D – настроечный параметр, определяющий степень разброса значения взвешивающей эвристики относительно жадного значения $\Delta Q_g(a_j)$;
- $\Delta Q_{ac}(a_j) \rightarrow \min$ для метода муравьиной колонии, где $\Delta Q_{ac}(a_j) = \eta_j^\alpha \tau_j^\beta r_k$, $\eta_j = \frac{1}{m_{i_{mек}, j}}$ в рассматриваемой задаче, τ_j – текущее количество феромона на дуге $(a_{i_{mек}}, a_j)$, изменяемое во время работы алгоритма как $\tau_j^{(t)} = \gamma \tau_j^{(t-1)} + \Delta \tau$, $\Delta \tau = \frac{Q_a}{L(P)}$, α и β – настроечные параметры, регулирующие реакцию метода на приращение качества решения и наличие феромона на дугах, γ – настроечный параметр, определяющий темп испарения феромона, Q_a – настроечный параметр, определяющий запас феромона у одного муравья в составе колонии

объемом V , t – дискретное время (номер итерации работы алгоритма), $\tau^{(0)}$ – максимально возможное начальное значение феромона на дугах графа.

Использование метода муравьиной колонии в задачах дискретной оптимизации, не связанных с прокладкой путей, напрямую невозможно, ввиду чего разработана его модифицированная версия, основанная на использовании двудольного графа, вершинам a_i одной из долей которого соответствуют элементы решения (вершины формируемого пути, вершины граф-схемы алгоритма, элементы алфавита U в латинском квадрате (ЛК), элементы расписания и т.п.), вершинам a_j другой доли – их место в формируемом решении (порядковый номер вершины в пути, номер блока разбиения граф-схемы алгоритма, ячейка ЛК, положение элемента в расписании), а связывающие их дуги помечаются феромоном τ_{ij} . Данная версия, в отличие от классической, является универсальной и может быть использована на практике для решения задач дискретной комбинаторной оптимизации широкого класса, в том числе задач построения разбиений.

При использовании методов с последовательным формированием решения в задачах с ограничениями (в рассматриваемой задаче SSP – на неплотных графах) возможно попадание в тупики – вершины дерева комбинаторного перебора, из которых дальнейшее движение невозможно ввиду нарушения ограничений. По мере усиления ограничений вероятность попадания в тупики также возрастает, что приводит к выполнению итераций эвристического метода «вхолостую», без получения корректного решения на выходе и обновления значения текущей оценки качества наилучшего решения, что снижает вероятность нахождения решения и повышает вычислительные затраты. Наиболее сложным и наименее эффективным является применение эвристических методов для решения комбинаторных задач на существование. С целью снижения влияния данного негативного эффекта на качество получаемых решений и вероятность их нахождения были разработаны модификации методов (GR, RSR, WRSR, ACR) с поддержкой комбинаторных возвратов, обеспечивающие R комбинаторных возвратов и обход тупика.

При реализации методов на базе модификации текущих решений введены следующие модифицирующие операции o_i , позволяющие получить модифицированное решение (путь) P' из текущего решения P : $P' = o_i(P)$: добавление случайной вершины $a_j \notin P$ в случайную позицию R текущего пути: $P' = [a_{i_1}, \dots, a_{i_R}, a_j, a_{i_{R+1}}, \dots, a_{i_Q}]$, $1 < R < Q$, P' – путь после модификации; удаление случайной вершины $a_j = a_{i_R} \in P$ из текущего пути: $P' = [a_{i_1}, \dots, a_{i_{R-1}}, a_{i_{R+1}}, \dots, a_{i_Q}]$, $1 < R < Q$; замена случайной вершины a_{i_R} в текущем пути на случайную еще не посещенную вершину $a_j \notin P$: $P' = [a_{i_1}, \dots, a_{i_{R-1}}, a_j, a_{i_{R+1}}, \dots, a_{i_Q}]$, $1 < R < Q$; перестановка пары выбранных случайно вершин $a_{i_{R_1}}$ и $a_{i_{R_2}}$ текущего пути: $P' = [a_{i_1}, \dots, a_{i_{R_1-1}}, a_{i_{R_2}}, a_{i_{R_1+1}}, \dots, a_{i_{R_2-1}}, a_{i_{R_1}}, a_{i_{R_2+1}}, \dots, a_{i_Q}]$, $1 < R_1 < Q$, $1 < R_2 < Q$, $R_1 \neq R_2$ (статистически значимое влияние на качество получаемых решений в данной задаче оказывают только первые две модифицирующие

операции). С их использованием ниже приведено описание эвристических методов на базе модификации текущих решений.

При использовании метода случайных блужданий из текущего решения P_i получается новое решение $P_{i+1} = o_j(P_i)$, модифицирующая операция o_j выбирается с использованием генератора псевдослучайных чисел, что повторяется заданное число итераций C_{\max} . Для всех полученных решений производится оценка их качества (длины пути) $Q_{rw} = L(P_i)$, после чего выбирается наилучшее решение ($Q_{rw} \rightarrow \min$).

В методе имитации отжига после применения выбранной модифицирующей операции к текущему решению P_i с получением решения P' производится расчет изменения качества решения $\Delta Q_{sa} = Q_{sa}(P') - Q_{sa}(P_i)$. В случае улучшения качества ($\Delta Q_{sa} < 0$) модификация решения принимается: $P_{i+1} := P'$, в противном случае производится расчет дополнительного вероятностного критерия $p = e^{-\frac{\Delta Q_{sa}}{T}}$, где T – текущая температура, и модификация принимается с вероятностью p . Температура уменьшается экспоненциально $T_i = \alpha T_{i-1}$, начиная с некоторой начальной температуры T_0 (настроечный параметр), где α – настроечный параметр, регулирующий темп охлаждения.

В методе направленной эволюции (генетическом методе) формируется популяция $X = \{X_1, X_2, \dots, X_W\}$ особей, каждая из которых отождествляется с одним из решений поставленной задачи (путем в графе). С использованием оператора выбора из популяции случайным образом выбираются две особи X_i и X_j , $i, j = \overline{1, W}$ пропорционально их функции приспособленности: $(f(X_i)r_k \rightarrow \min) \wedge (f(X_j)r_{k+1} \rightarrow \min)$. Над выбранными особями производится операция скрещивания, учитывающая алгоритмические особенности поставленной задачи. Далее над особью-потомком производится операция мутации, которая эквивалентна применению одной из модифицирующих операций o_i с настраиваемой вероятностью p_i , после чего особь-потомок попадает в новую эпоху эволюции.

Метод пчелиной колонии в дискретных оптимизационных задачах сводится к комбинации получения решений методов случайного перебора (вылет разведчика) и применению к известным решениям R модифицирующих операций (вылет рабочих пчел).

Метод роя частиц при решении задач дискретной комбинаторной оптимизации допускает 3 варианта реализации. В первом из них движение роя производится в непрерывном пространстве с последующим отображением в решения задачи дискретной оптимизации согласно формулам

$$V_i^{(t)} = \alpha V_i^{(t-1)} + \beta R_k \otimes (X_i^* - X_i) + \gamma R_{k+1} \otimes (X^{**} - X_i), \quad X_i^{(t)} = X_i^{(t-1)} + V_i^{(t-1)}, \quad \text{где}$$

$X_i = [x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, \dots]$ – текущее положение i -го агента в составе роя, $i = \overline{1, Z}$, Z – число агентов в составе роя, $V_i^{(t)} = [v_1^{(i)}, v_2^{(i)}, \dots]$ – скорость i -го агента в момент времени t , « \otimes » – обозначение прямого (покомпонентного) произведения векторов, X_i^* – наилучшее

положение i -й частицы роя за время его движения (локальный рекорд), X^{**} – наилучшее положение среди всех частиц роя (глобальный рекорд), α, β, γ – настроечные параметры, R_k – вектор псевдослучайных чисел с равномерным распределением на отрезке $[0; 1]$. Во втором варианте реализации используется округление значения координат текущей частицы. Третий вариант реализации базируется на движении в дискретном пространстве решений с использованием модифицирующих операций.

Для всех методов были разработаны программные реализации (общий объем – 12 000 строк исходного кода), с их использованием выполнена метаоптимизация, в ходе которой получены значения настроечных параметров, используемые в дальнейших экспериментах. Например, для метода взвешенного случайного перебора в ходе вычислительного эксперимента получена следующая зависимость средневыборочного качества решений (длины путей) \bar{Q} от степени разброса D (рис. 1), на основании которой выбрано оптимальное значение степени разброса $D^* = 1,0$, являющееся нетривиальным следствием выполненного вычислительного эксперимента.

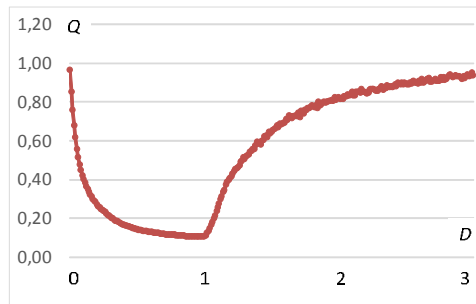


Рис. 1. Зависимость средневыборочного качества решений (длины путей) \bar{Q} от степени разброса D , полученная в результате метаоптимизации

Аналогично, например, для метода муравьиной колонии были получены следующие значения настроечных параметров: $\alpha^* = 0,28$, $Q^* = 1$, $\tau^{(0)*} = 100$, $\beta^* = 0,9$, $V^* = 1000$.

С целью сравнения качества решений рассмотренных выше методов и выбора наилучших из них в зависимости от условий их использования был организован вычислительный эксперимент, в ходе которого производилось формирование выборки $\Lambda = \{G_1, G_2, \dots, G_K\}$ из $K = 1000$ псевдослучайных графов с указанными числом вершин N и плотностью d , для них каждым из методов производилось нахождение решения, оценка его качества $Q(G_i)$ (в данной задаче – длины $L(P)$ найденного кратчайшего пути) и вычисление следующих средневыборочных значений: средней длины пути

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{i=1}^K Q(G_i) \phi(G_i)}{K},$$

где $\phi(G) = 1$ в случае отыскания решения и $\phi(G) = 0$ в противном случае; отклонения длины пути от оптимального значения

$$\Delta \bar{Q} = \frac{\sum_{i=1}^K (Q(G_i) - Q^*(G_i)) \phi(G_i)}{K};$$

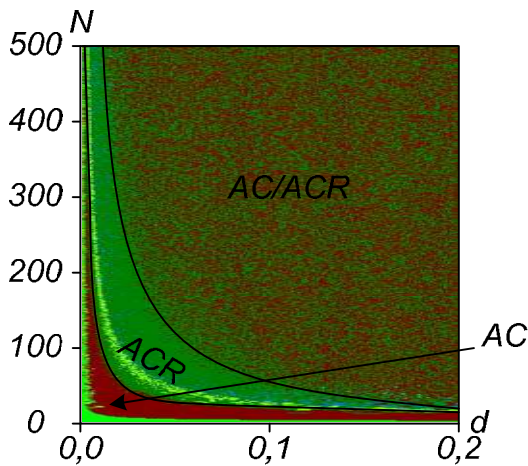
вероятности нахождения решения

$$\bar{p} = \frac{\sum_{i=1}^K \phi(G_i)}{K}$$

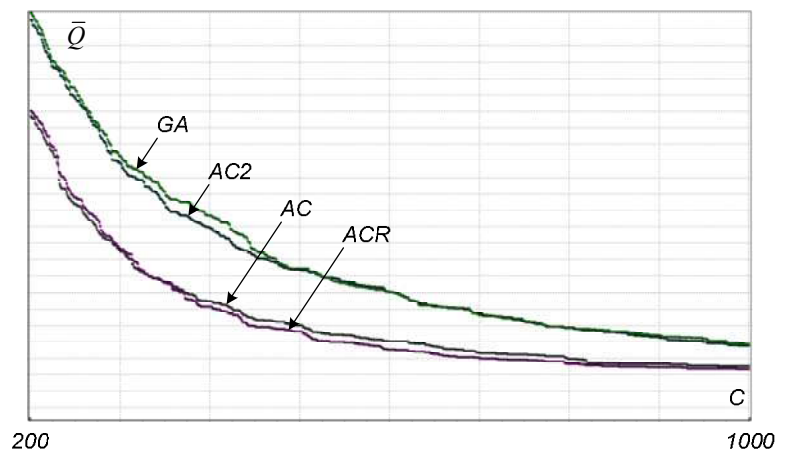
и вероятности нахождения оптимального решения

$$\bar{p}_{opt} = \frac{\sum_{i=1}^K \theta(G_i)}{K},$$

где $\theta(G_i) = \begin{cases} 0, & Q(G_i) > Q^*(G_i), \\ 1, & Q(G_i) = Q^*(G_i). \end{cases}$



а)



б)

Рис. 2. Результаты вычислительного эксперимента по определению областей преимущественного использования эвристических методов (а) и зависимости качества решений наиболее перспективных методов \bar{Q} от числа итераций C (б)

В ходе вычислительного эксперимента качество решений методов исследовалось для $2 \leq N \leq 500$ и $0 < d \leq 1$ с шагом $\Delta N = 1$ и $\Delta d = 0,001$. Для этого был использован проект добровольных распределенных вычислений Gerasim@Home на платформе BOINC и разработанный расчетный модуль, время вычислений – 1 год при реальной производительности проекта 2 TFLOP/s. В результате расчетов был получен ряд зависимостей, позволивших определить области преимущественного использования эвристических методов (рис. 2).

На основании полученных результатов сделан вывод о том, что в рассмотренной задаче получение решений с минимальным значением целевой функции обеспечивает метод муравьиной колонии (для плотных графов) и его модификация с поддержкой комбинаторных возвратов (для неплотных графов), а также методы направленной эволюции и взвешенного случайного перебора. Решениям, полученным с ис-

пользованием остальных методов в рассмотренной задаче, соответствуют значения целевой функции, более далекие от оптимума. Границы между областями преимущественного использования различных методов и их модификаций в плоскости параметров $(N; d)$ представляют собой гиперболы с уравнениями вида $N = \frac{A}{d}$, где A – не-

которая константа, определяемая по итогам выполненных вычислительных экспериментов. Так, например, для областей преимущественного использования, приведенных на рис. 1а, границе между методом муравьиной колонии и его модификаций с поддержкой комбинаторных возвратов соответствует значение $A = 4,5$, что определяет областью преимущественного использования метода муравьиной колонии плотные графы $\left(d > \frac{4,5}{N}\right)$, а его модификации с поддержкой комбинаторных возвратов – неплотные графы $\left(d \leq \frac{4,5}{N}\right)$.

Таким образом, в результате выполненных вычислительных экспериментов в качестве наиболее перспективных были выбраны методы взвешенного случайного перебора, муравьиной колонии, их модификации с поддержкой комбинаторных возвратов, и генетический метод, которые были использованы в дальнейшем для решения задач дискретной комбинаторной оптимизации при проектировании ЛМК.

В третьей главе разработаны теоретические основы, включающие в своем составе математическую модель, методы и алгоритмы построения разбиений граф-схем параллельных алгоритмов логического управления при синтезе ЛМК.

Задача поиска разбиений возникает в процессе синтеза ЛМК при настройке системы под необходимый алгоритм управления, заданный в виде параллельной граф-схемы $G^0 = \langle A^0, V^0 \rangle$, где A^0 – множество вершин, $|A^0| = N$, V^0 – множество дуг, $|V^0| = M$. При этом требуется получить ортогональное разбиение $\Gamma(A^0) = \{A_1, A_2, \dots, A_H\}$ множества вершин на подмножества (блоки) $A_i, i = \overline{1, H}$, удовлетворяющее следующим условиям:

$$\begin{aligned} \bigcup_{i=1}^H A_i &= A^0, \quad A_i \neq \emptyset, \quad A_i \cap A_j = \emptyset, \quad i, j = \overline{1, H}, \quad i \neq j, \\ \neg(a_i \omega a_j) &\forall a_i, a_j \in A_k, \quad i \neq j, \quad k = \overline{1, H}, \\ W(A_i) &\leq W_{\max}, \quad |X(A_i)| \leq X_{\max}, \quad |Y(A_i)| \leq Y_{\max}, \quad i = \overline{1, H}, \end{aligned} \quad (2)$$

где ω – обозначение бинарного отношения параллельности вершин, отражающее структурное ограничение ЛМК на необходимость отсутствия параллельных вершин в составе блоков разбиения; $W(A_i) = \sum_{a_j \in A_i} W(a_j)$ – суммарный «вес» вершин в составе i -го блока (необходимая емкость памяти микропрограмм контроллера в составе СЛУ);

$X(A_i) = \bigcup_{a_j \in A_i} X(a_j)$ – множество логических условий, входящих в вершины i -го блока (число дорожек на прием контроллером сигналов логических условий);

$Y(A_i) = \bigcup_{a_j \in A_i} Y(a_j)$ – множество микроопераций, входящих в вершины i -го блока (число дорожек на выдачу контроллером сигналов микроопераций); W_{\max} , X_{\max} и Y_{\max} – технологические ограничения ЛМК соответственно на максимальную емкость памяти микропрограмм контроллеров в составе СЛУ, максимальное число принимаемых контроллером сигналов логических условий от объекта управления и максимальное число выдаваемых контроллером сигналов микроопераций для объекта управления, такое что

$$\begin{aligned}
 Z_H &= H(\Gamma(A^0)) \rightarrow \min, \\
 Z_\alpha &= \sum_{i=1}^H \sum_{j=1, j \neq i}^H \alpha(A_i, A_j) \rightarrow \min, \\
 Z_\delta &= \delta(\Gamma(A^0)) \rightarrow \min, \\
 Z_X &= \sum_{i=1}^H |X(A_i)| - |X(A^0)| \rightarrow \min, \\
 Z_Y &= \sum_{i=1}^H |Y(A_i)| - |Y(A^0)| \rightarrow \min,
 \end{aligned} \tag{3}$$

где $Z_H, Z_X, Z_Y, Z_\alpha, Z_\delta$ – частные показатели качества разбиения: Z_H – число блоков в разбиении; Z_α – сложность сети межблочных связей, порождаемая разбиением $\Gamma(A^0)$; $\alpha(A_i, A_j)$ – коэффициент связи блоков (он равен 1, если блоки разбиения связаны по управлению в направлении от A_i к A_j , т.е. необходима команда межконтроллерной передачи управления, и 0 в противном случае); Z_δ – суммарное число (интенсивность) межблочных взаимодействий; Z_X – степень дублирования сигналов логических условий; Z_Y – степень дублирования сигналов микроопераций. Также введен интегральный числовой показатель качества разбиения, представляющий собой взвешенную сумму нормированных значений частных показателей (3):

$$\begin{aligned}
 J(\Gamma(A^0)) &= \frac{K_H}{\omega_{\max}(A^0)} H + \frac{K_X}{|X(A^0)|} \left(\sum_{i=1}^H |X(A_i)| - |X(A^0)| \right) + \\
 &+ \frac{K_Y}{|Y(A^0)|} \left(\sum_{i=1}^H |Y(A_i)| - |Y(A^0)| \right) + \frac{K_\delta}{\delta(A^0)} \delta(\text{Sep}(A^0)) + \\
 &+ \frac{K_\alpha}{\omega_{\max}(A^0)(\omega_{\max}(A^0) - 1)} \sum_{i=1}^H \sum_{j=1, i \neq j}^H \alpha(A_i, A_j),
 \end{aligned} \tag{4}$$

где $\omega_{\max}(A^0)$ – степень параллелизма граф-схемы алгоритма [23], $\delta(A^0)$ – теоретически максимальная интенсивность межблочных взаимодействий для заданной граф-схемы алгоритма управления, $K_H, K_X, K_Y, K_\alpha, K_\delta$ – весовые коэффициенты. Отличительной особенностью разработанной математической модели является минимизация межконтроллерного трафика передачи управления Z_δ и использованием интегрального показателя качества (4).

Аппаратная сложность ЛМК складывается из аппаратной сложности логических контроллеров и связывающей их коммуникационной подсистемы и определяется как

$$R = (R_H + R_X X_{\max} + R_Y Y_{\max} + R_W W_{\max})H + R_C \left(\sum_{i=1}^H |X(A_i)| + \sum_{i=1}^H |Y(A_i)| \right) + R_\alpha \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^H \alpha(A_i, A_j), \quad (5)$$

где $R_H, R_X, R_Y, R_W, R_C, R_\alpha$ – соответственно аппаратные сложности логического контроллера в составе ЛМК, портов ввода/вывода в составе логических контроллеров для приема сигналов логических условий и выдачи сигналов микроопераций, памяти микропрограмм в составе контроллера, подсистемы передачи сигналов логических условий/микроопераций и коммуникационной подсистемы для реализации команд межконтроллерной передачи управления.

Для метода с жадным последовательным формированием блоков разбиения (сокр. В) была разработана модифицированная версия (сокр. АВ), отличающаяся использованием вершин из смежной окрестности с формируемым блоком разбиения. Для этого в множестве еще не рассмотренных вершин (т.н. блок остатков) \tilde{A} выделяется подмножество $\tilde{A}^* \subseteq \tilde{A}$ смежных с текущим блоком $A_H^{(j)}$ вершин, для которых имеются дуги связи вершин в составе подмножества \tilde{A}^* и вершин в составе блока $A_H^{(j)}$:

$$\exists v_i = (a_{i_1}, a_{i_2}): \left[(a_{i_1} \in A^{(j)}) \wedge (a_{i_2} \in \tilde{A}^*) \right] \vee \left[(a_{i_1} \in \tilde{A}^*) \wedge (a_{i_2} \in A^{(j)}) \right],$$

и не происходит нарушения ограничений при добавлении вершины в блок. В ходе выполненных вычислительных экспериментов эмпирически установлено, что при ее использовании без технологических ограничений всегда обеспечивается минимальное количество блоков разбиения, совпадающее с оценкой степени параллелизма граф-схемы алгоритма управления, что позволяет вычислять данную оценку с полиномиальной (квадратичной) временной сложностью.

Метод параллельно-последовательной декомпозиции (сокр. Р) также был модифицирован по ряду направлений. Для выделения циклов в граф-схемах параллельных алгоритмов в его составе был предложен метод на базе компонент сильной связности, в рамках которого производится итеративное нахождение очередной компоненты сильной связности, далее – замыкающей дуги $v^c(\Phi_i^\lambda)$ в ее составе и выполнение $\bar{\omega}$ -преобразования, в ходе которого данная компонента сильной связности разрушается. Метод позволяет находить циклы как в параллельных, так и в последовательных граф-схемах алгоритмов за полиномиальное время в отличие от использовавшегося ранее метода на базе построения путей между начальной и конечной вершинами анализируемого фрагмента алгоритма, имеющего экспоненциальную временную асимптотику.

Операции выявления циклов и выяснения состава бинарных отношений вершин допускают полиномиальное сведение к задачам умножения бинарных матриц, которые эффективно решаются как программно с использованием современных видеокарт с поддержкой GPGPU, многоядерных процессоров и векторных расширений системы команд в их составе, так и аппаратно с использованием ПЛИС-ориентированных уст-

роЙств-акселераторов, работающих в составе разработанного программно-аппаратного комплекса. Отличительной особенностью выполняемых над бинарными матрицами операций по сравнению с целочисленными или вещественными матрицами является возможность досрочного прерывания вычислительного процесса, что наиболее эффективно реализуется в составе разработанных устройств-акселераторов и позволяет снизить их вычислительную сложность соответствующих процедур до 2 порядков.

Операции над множеством сечений $\mathfrak{R} = \{\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_{N_\Omega}\}$, составляющим основу метода параллельно-последовательной декомпозиции, реализованы с использованием R -выражений – конструктивных подмножеств вершин граф-схемы алгоритма управления G^0 (рис. 3), отличающихся от классических множеств наличием информации о бинарных отношениях между вершинами в их составе и имеющих ряд особых свойств, позволяющих использовать для их преобразования алгоритмы с полиномиальной временной асимптотикой.

Удобным с точки зрения практической реализации является представление R -выражений в виде деревьев, а их, в свою очередь, – в табличном виде. Практическая реализация алгоритмов преобразования R -выражений в таком виде позволила сократить время выполняемых операций в 30 раз при однопоточной программной реализации. ω -мощность базового сечения позволяет полиномиально оценить степень параллелизма ω_{\max} граф-схемы алгоритма управления G и является нижней оценкой числа блоков H в разбиениях при условиях отсутствия технологических ограничений со стороны ЛМК ($X_{\max} = \infty, Y_{\max} = \infty, W_{\max} = \infty$), отталкиваясь от которой возможна нижняя оценка аппаратной сложности ЛМК согласно (5). Вычисление указанной оценки без использования R -выражений требует организации перебора подмножеств вершин a_i на множестве бинарного отношения параллельности ω вершин граф-схемы G , вычислительная сложность которого ограничена сверху числом Белла и не является полиномиальной, а соответствующий алгоритм относится к классу NP .

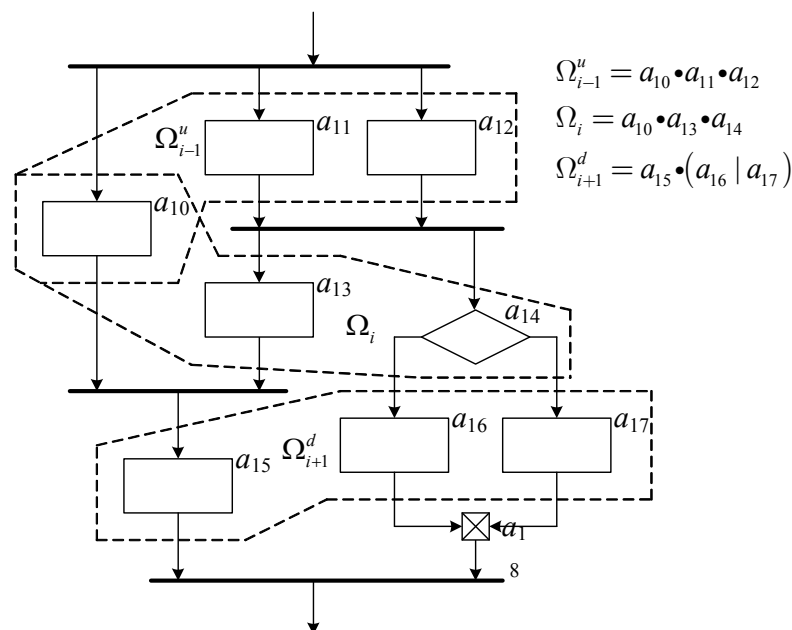


Рис. 3. Пример фрагмента граф-схемы алгоритма и ее представление с использованием множества R -выражений

Анализ таблиц включения при распределении множества субсечений $\Upsilon(\Omega_i)$ по блокам разбиения Γ производится с использованием Венгерского алгоритма путем решения соответствующей задачи о назначениях, что позволяет снизить вероятность появления лишних блоков разбиения и тем самым повысить качество формируемых разбиений по всем частным показателям (2), и, как следствие, – снизить аппаратную сложность проектируемого ЛМК.

Рассмотренные выше методы построения разбиений являются последовательными, они обеспечивают построение единственного разбиения, следуя жадной стратегии, реализованной различными способами. Простейшей реализацией итерационного принципа построения разбиений в рассматриваемой задаче является метод случайного перебора, в рамках которого производится выбор очередной еще не рассмотренной вершины $a_i \in \tilde{A}$, выбора допустимого подмножества среди блоков разбиения $\Gamma^+ \subseteq \Gamma$, случайного выбора блока разбиения из Γ^+ и включения вершины a_i в его состав либо образование нового блока разбиения в случае, если $\Gamma^+ = \emptyset$. Добавление вершины в состав существующего блока возможно с некоторой ненулевой вероятностью $0 \leq \alpha \leq 1$, при этом образование нового блока производится соответственно с вероятностью $1 - \alpha$. Проведенные вычислительные эксперименты показали, что разбиения более высокого качества получаются в случае, если $\alpha \rightarrow 1,0$, т.е. образование новых блоков выполняется только в случае, если $\Gamma^+ = \emptyset$ (рис. 4).

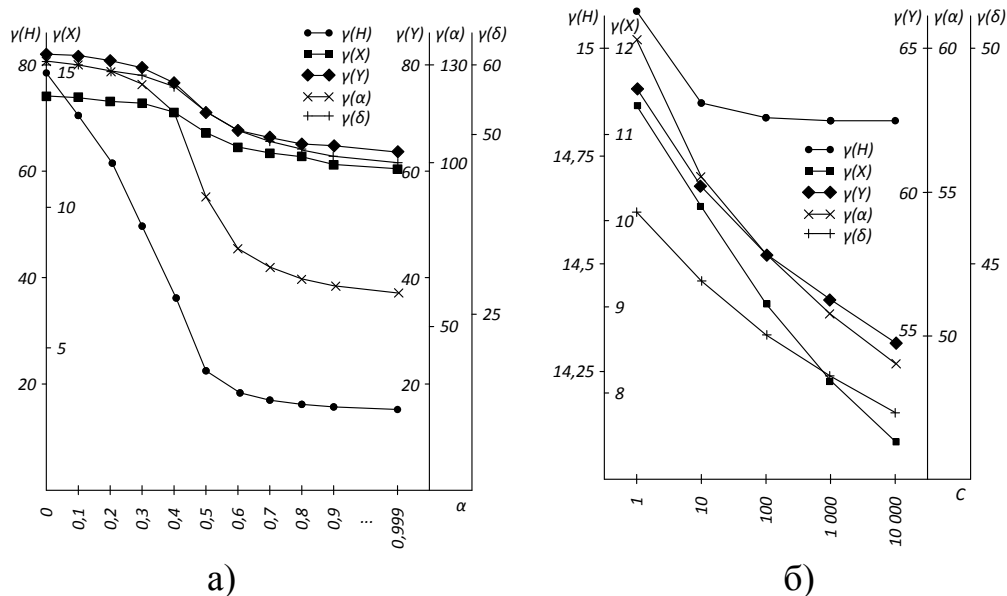


Рис. 4. Зависимости частных показателей качества от вероятности попадания вершины в существующий блок α (а) и от числа итераций C (б). $N = 100$, $K = 1000$,

$$X_{\max} = \infty, Y_{\max} = \infty, W_{\max} = \infty$$

С целью повышения скорости сходимости в составе метода взвешенного случайного перебора при распределении вершин $a_i \in \tilde{A}$ по блокам формируемого разбиения $\Gamma(A^0)$ в соответствии со стратегией взвешенного случайного перебора предложено использовать эвристику $F_i = \Delta J_i (1 + 2D(r_k - 0,5))$, где ΔJ_i – приращения качества разбиения (3) на t -м шаге работы алгоритма, причем среди допустимых вклю-

чений вершины в блок разбиения выбирается такое, что $F_i \rightarrow \min$. В ходе метаоптимизации были получены зависимости средневыборочного качества решений от степени разброса D (см. пример на рис. 5), качественно отличающиеся от аналогичной зависимости в задаче поиска кратчайшего пути в графе (рис. 1) и тестовых задачах на базе латинских квадратов.

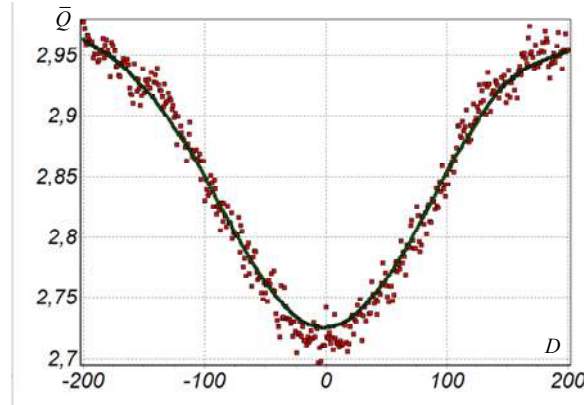


Рис. 5. Зависимость средневыборочного качества разбиений \bar{Q} от степени разброса D

Полученная зависимость позволяет сделать вывод о том, что в задаче поиска разбиений оптимальным является нулевое значение настроечного параметра разброса $D^* = 0$. Как следствие, метод взвешенного случайного перебора в совокупности с его модификациями (что, в том числе, справедливо и для метода муравьиной колонии) допускает упрощение и по качеству получаемых решений и принципу их формирования эквивалентен жадному методу с вариацией порядка рассмотрения вершин граф-схемы (элементов решения) при формировании разбиения. Решения наивысшего качества обеспечиваются при выборе порядка элементов решения по формальному критерию минимума возможностей $|S_i| \rightarrow \min$, где S_i в данном случае – множество блоков разбиения, в которые возможно включение j -й вершины граф-схемы алгоритма управления. При нулевом значении разброса D качество решений на разных итерациях определяется только вариацией порядка рассмотрения вершин граф-схемы алгоритма при построении разбиения, что, по-видимому, объясняет высокую эффективность жадных методов в рассматриваемой задаче, что не характерно для большинства задач дискретной комбинаторной оптимизации. Для методов на базе модифицирующих операций обеспечить получение решений более высокого качества не удалось из-за получения большого числа некорректных решений при попытке модификации имеющихся в условиях наличия технологических ограничений базиса ЛМК, ввиду чего применение данной группы методов в рассматриваемой задаче следует считать нецелесообразным. На рис. 6 приведены зависимости качества решений случайного и взвешенного случайного перебора от числа итераций S , которые демонстрируют более высокое качество получаемых решений и большую скорость сходимости для метода взвешенного случайного перебора.

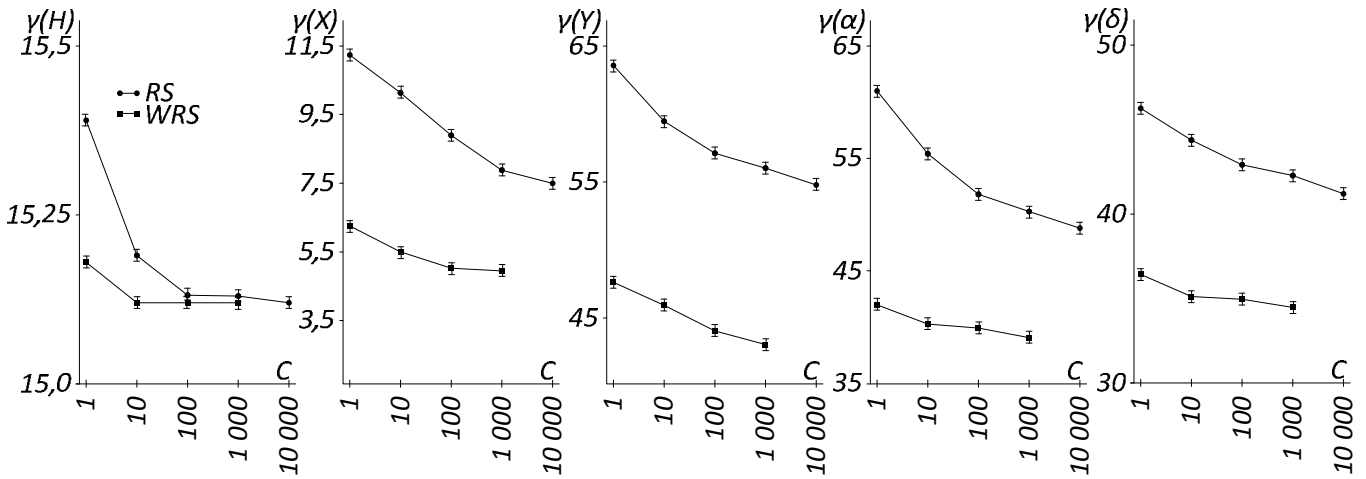


Рис. 6. Зависимости средневыборочного качества разбиений $\gamma(x)$, $x \in \{H, X, Y, \alpha, \delta\}$ от числа итераций C для методов случайного и взвешенного случайного перебора ($N = 100$, $K = 100$)

Таким образом, рассмотренные выше модифицированные методы жадного последовательного формирования решения с использованием смежной окрестности, параллельно-последовательной декомпозиции и взвешенного случайного перебора позволили осуществить получение более близких к оптимуму решения задачи поиска разбиений по всем частным показателям качества (2), что напрямую влияет на снижение аппаратной сложности проектируемых ЛМК.

В четвертой главе приведены оценки показателей качества разбиений, рекомендации по использованию разработанных методов построения разбиений в зависимости от размерности задачи и силы технологических ограничений базиса ЛМК и приведено описание обобщенного метода синтеза разбиений, в совокупности позволяющих снизить аппаратную сложность ЛМК.

Для построения разбиений граф-схем параллельных алгоритмов был разработан программно-аппаратный комплекс, в состав которого входят программные реализации методов синтеза разбиений и аппаратные реализации наиболее трудоемких частных операций в их составе. Общий объем визуальной среды – 18 000 строк исходного кода, программных реализаций методов построения разбиений – 12 000 строк исходного кода. С его использованием были выполнены вычислительные эксперименты по метаоптимизации эвристических методов и получены средневыборочные оценки качества получаемых разбиений. С использованием проекта добровольных распределенных вычислений Gerasim@Home на платформе BOINC и разработанного расчетного модуля были организованы вычислительно сложные эксперименты, направленные на подробный анализ качества разбиений в зависимости от размерности решаемой задачи (числа вершин N в составе граф-схемы алгоритма управления) и силы технологических ограничений X_{\max} и W_{\max} базиса ЛМК, время вычислений – 2 года при реальной производительности проекта 1,5–2 TFLOP/s, объем полученных экспериментальных данных – более 400 Гб. Примеры полученных экспериментальных зависимостей (области преимущественного использования методов) приведены на рис. 7.

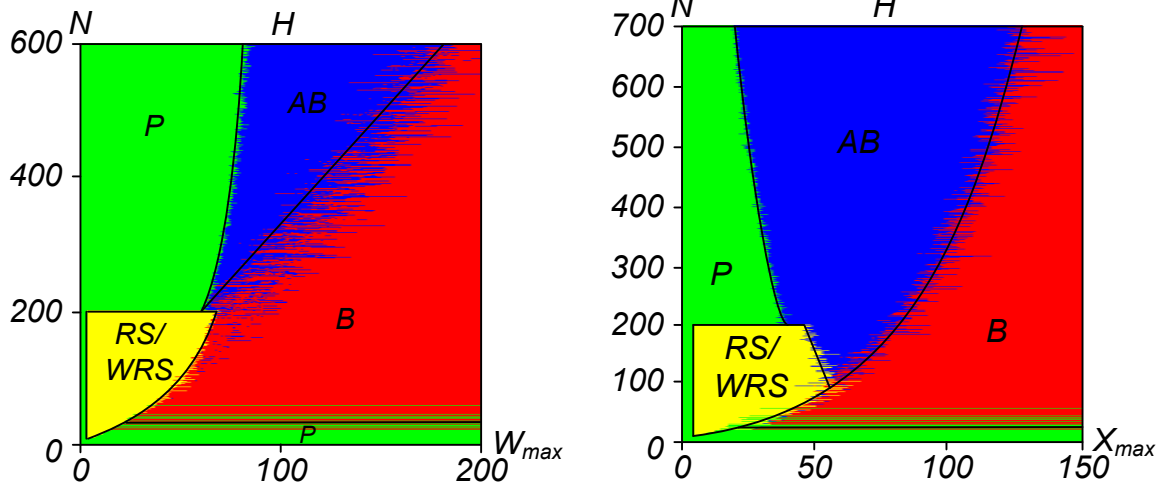


Рис. 7. Области преимущественного использования методов построения разбиений на примере минимизации числа блоков H в разбиениях

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что в рассматриваемой задаче различные эвристические методы имеют различные области преимущественного использования, в каждой из которых они обеспечивают получение решений наивысшего качества. На основании информации об областях преимущественного использования методов, полученных в ходе обработки данных вычислительных экспериментов (рис. 7), работа жадных методов может быть эффективно совмещена с итерационными методами с использованием стратегии ветвей и границ в рамках обобщенного метода синтеза разбиений, при этом один из жадных методов используется для быстрого установления начального значения качества текущего наилучшего решения, а итерационные методы – для его улучшения в совокупности с ранним отсечением неперспективных решений по стратегии ветвей и границ, что позволяет снизить совокупные затраты вычислительного времени на поиск разбиений, повысить качество получаемых решений и, как следствие, – снизить аппаратную сложность проектируемых ЛМК.

В результате вычислительных экспериментов также было установлено, что зависимости показателей качества разбиений Z от размерности задачи N и силы технологических ограничений базиса ЛМК имеют качественно схожий вид (рис. 8).

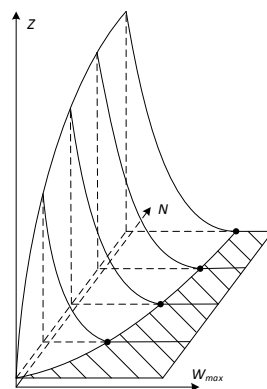


Рис. 8. Общий вид зависимостей частных показателей качества Z от размерности задачи N и силы ограничения (W_{max} в данном случае)

Штриховкой показана область нечувствительности, в которой ослабление значения технологического ограничения ведет к росту аппаратной сложности контроллеров в составе ЛМК и не влияет на значение показателей качества разбиений, влияющих на скоростные характеристики синтезируемой СЛУ и аппаратную сложность ее коммуникационной подсистемы. Указанная особенность позволяет сделать вывод о том, что среди ЛМК с приблизительно равной аппаратной сложностью предпочтительной является структура ЛМК с большим числом относительно простых контроллеров, что, в свою очередь, приводит к необходимости работы в области сильных ограничений, где разбиения наилучшего качества обеспечиваются модифицированным методом параллельно-последовательной декомпозиции, итерационными методами либо их комбинацией с использованием раннего отсечения неперспективных решений в рамках стратегии ветвей и границ в составе предложенного обобщенного метода синтеза разбиений. Полученные зависимости позволяют снизить требования к аппаратной сложности контроллеров в составе ЛМК (например, для матричного ЛМК из $7 \times 7 = 49$ контроллеров с 86 до 5 (в 17,2 раза) для X_{\max} и с 120 до 21 (в 5,7 раза) и для W_{\max} ценой усредненного ухудшения значений показателей качества разбиений и соответствующих им технических характеристик ЛМК (быстродействия или аппаратной сложности коммуникационной подсистемы) не более чем на 5%).

Зависимости интегральной аппаратной сложности ЛМК от значений технологических ограничений являются качественно схожими и приведены на рис. 9.

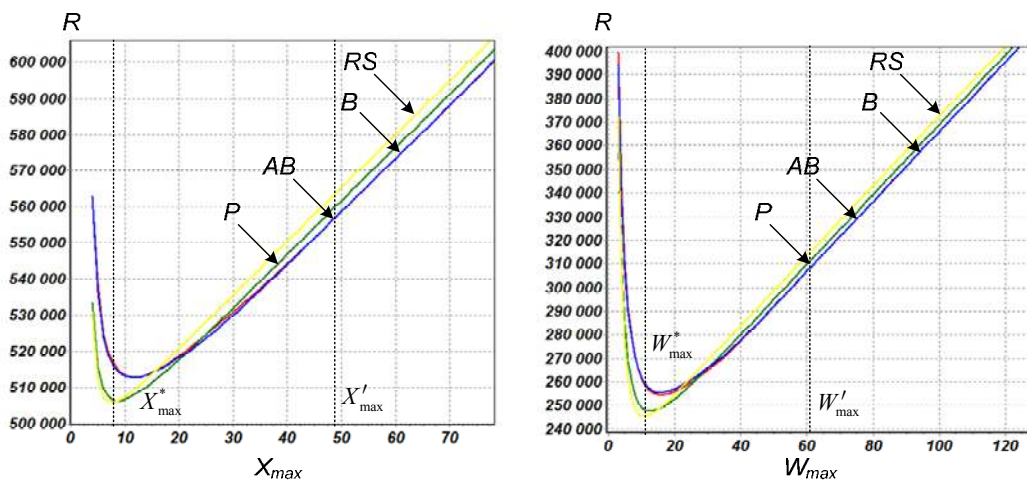


Рис. 9. Зависимости аппаратной сложности ЛМК R от значений технологических ограничений X_{\max} и W_{\max} базиса ЛМК

Их анализ позволяет сделать вывод о том, что выбор оптимальных значений X_{\max}^* и W_{\max}^* позволяет снизить аппаратную сложность проектируемого ЛМК не менее чем на 8% в зависимости от размера граф-схем алгоритмов управления. При этом вклад в данную величину выбора наиболее подходящего метода синтеза разбиений, выполняемый в рамках предложенного обобщенного метода синтеза разбиений отталкиваясь от областей преимущественного использования методов, составляет от 1,5% до 4%.

Таким образом, использование обобщенного метода построения разбиений граф-схем параллельных алгоритмов и его программной реализации позволяет снизить аппаратную сложность синтезируемых ЛМК.

В пятой главе на базе рассмотренных выше методов, моделей и алгоритмов предложена структурно-функциональная организация программно-аппаратных средств и устройств-акселераторов в их составе для решения частных подзадач в рамках рассмотренных выше задач комбинаторики, возникающих при синтезе многомодульных однородных СЛУ в базисе ЛМК и функционирующих в составе разработанного программно-аппаратного комплекса, а также оценки их аппаратной сложности и быстродействия.

Одними из наиболее трудоемких (в плане вычислительных затрат) операций, возникающих в процессе построения разбиений граф-схем параллельных алгоритмов, являются операции выделения компонент сильной связности при поиске циклов в составе параллельной граф-схемы алгоритма и определения состава бинарных отношений вершин граф-схемы (реализуются путем их сведения к умножению бинарных матриц), а также операции, связанные с преобразованием R -выражений в табличном представлении. Для снижения их вычислительной сложности был разработан ряд специализированных устройств-акселераторов, ориентированных на ПЛИС-реализацию и функционирующих в составе программно-аппаратного комплекса.

Для их работы разработано специализированное многопортовое запоминающее устройство (ЗУ), позволяющее выполнение параллельных чтений данных по нескольким портам, а также реализацию операций ассоциативного поиска и замены. Ячейки в составе ЗУ объединяются в матрицу с одно- или двухкоординатной адресацией в зависимости от решаемой задачи, их структурные схемы приведены на рис. 10.

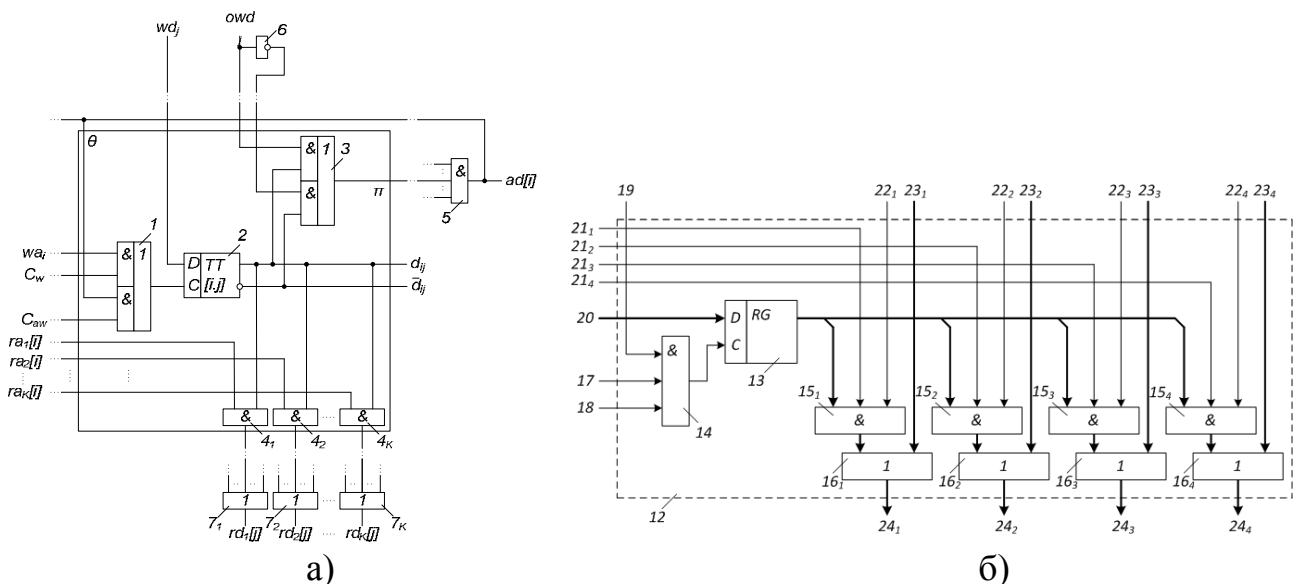


Рис. 10. Структурная схема ячеек ЗУ с одно- (а) и двухкоординатной (б) адресацией

ЗУ на базе ячеек с однокоординатной адресацией лежит в основе устройства для быстрого преобразования табличных представлений R -выражений. Пример схемы для определения ω -мощности базового сечения (нижней оценки числа блоков в разбиениях в условиях отсутствия технологических ограничений со стороны базиса

ЛМК и соответствующей нижней оценки аппаратной сложности ЛМК) с использованием данного ЗУ приведен на рис. 11.

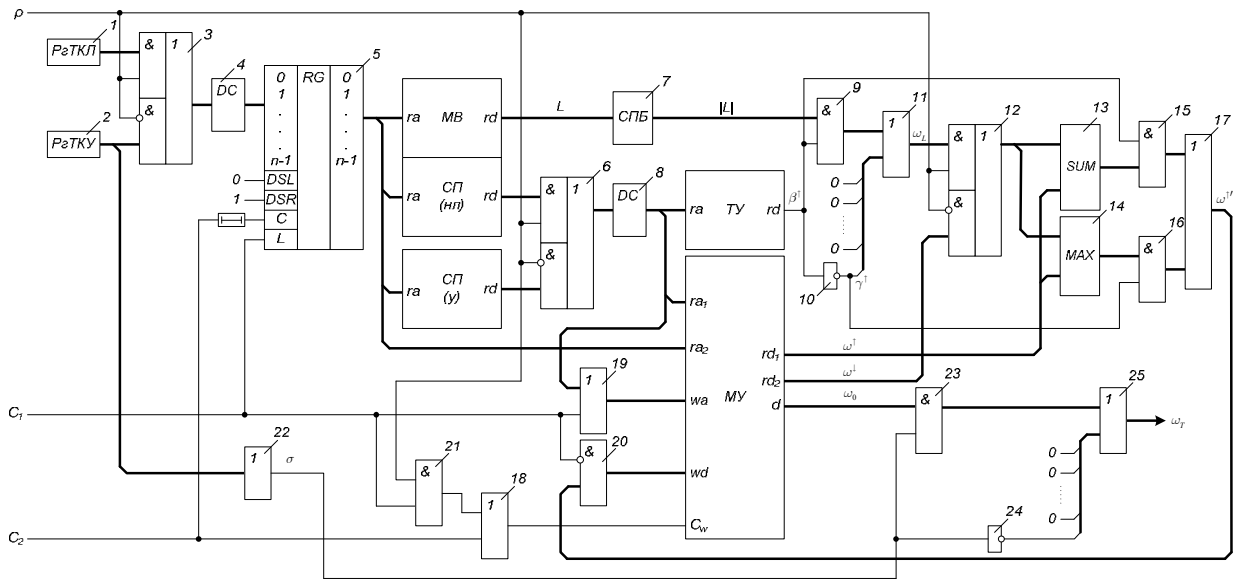


Рис. 11. Схема расчета ω -мощности дерева

Устройство для обработки табличных представлений R -выражений в целом характеризуется аппаратной сложностью

$$R_1 = 16 \lceil \log_2 L_{\max} \rceil + 56 N_{T_{\max}} L_{\max} + 64 L_{\max} - 60 + 152 \lceil \log_2 N_{T_{\max}} \rceil + \\ + 474 N_{T_{\max}} + 250 N_{T_{\max}} \lceil \log_2 N_{T_{\max}} \rceil$$

эквивалентных вентилей (ЭВ), где L_{\max} – максимальное число листьев в обрабатываемых деревьях ($L_{\max} \ll N$), $N_{T_{\max}}$ – максимальное число строк в табличном представлении R -выражения в виде дерева ($N_{T_{\max}} \ll N$); затратами времени на обработку системы R -выражений не более

$$t_1 = \left(\left(\frac{91}{2} + 7 \lceil \log_2 N_{T_{\max}} \rceil + \frac{3}{2} N_{T_{\max}} + L_{\max} + 2 \lceil \log_2 L_{\max} \rceil \right) \bar{n}_R + \right. \\ \left. + \left(38 + (11 \bar{n}_R + 18) \lceil \log_2 N_{T_{\max}} \rceil^{(2^m)} + 2 \lceil \log_2 N_{T_{\max}} \rceil + \lceil \log_2 \lceil \log_2 N_{T_{\max}} \rceil \rceil \right) \times \left(\frac{\tilde{N}_R (\tilde{N}_R - 1)}{2} + \tilde{N}_R \right) t_0, \right.$$

где \bar{n}_R – среднее число строк в табличных представлениях R -выражений, \tilde{N}_R – число выражений системы R -выражений Ξ , t_0 – время задержки прохождения сигнала через ЭВ, и позволяет получить выигрыш $\eta = 1,02 \cdot 10^3 \div 4,1 \cdot 10^5$ раз по сравнению с программной реализацией операций обработки R -выражений для граф-схем параллельных алгоритмов с числом вершин $N = 10^2 \div 10^5$. Приведенная оценка выигрыша является нижней и может быть усилена путем использования более быстрых комбинационных схем.

Как уже было отмечено выше, операции выделения циклов в граф-схемах параллельных алгоритмов и выяснения состава бинарных отношений вершин граф-схем

(транзитивного замыкания отношения следования вершин ν) допускают сведение к умножению бинарных матриц. Наиболее распространенным принципом организации умножения матриц на аппаратном уровне является систолический: умножение выполняется коллективом N^2 из ячеек операционной части устройства, соединенных между собой по принципу близкодействия (обычно ячейка соединяется с 4 соседями с использованием вертикальных и горизонтальных связей; реже – с 6 или 8 соседями с добавлением диагональных связей). При этом умножение матриц выполняется за линейное время, однако для данных устройств требуется специализированная память, которая сможет обеспечить темп поступления аргументов (коэффициентов перемножаемых матриц) по $2N$ за каждый такт, в противном случае быстродействие устройства в целом будет лимитировано памятью (темпом поступления исходных данных), а не операционной частью. Кроме того, данные устройства имеют большую аппаратную сложность, что ограничивает сферу их практического применения.

Одним из возможных решений проблемы поступления исходных данных является использование специализированного запоминающего устройства с матричной организацией на базе ячеек с двухкоординатной адресацией (рис. 10б) и N портами чтения.

При обработке бинарных матриц по сравнению с матрицами целых чисел сумматоры, блоки умножения и коммутаторы в составе ячеек операционной части могут быть заменены на дизъюнкторы, конъюнкторы и мультиплексоры 2 в 1, что позволяет существенно сократить аппаратную сложность и повысить быстродействие. Пример подобного устройства для умножения бинарных матриц приведен на рис. 12.

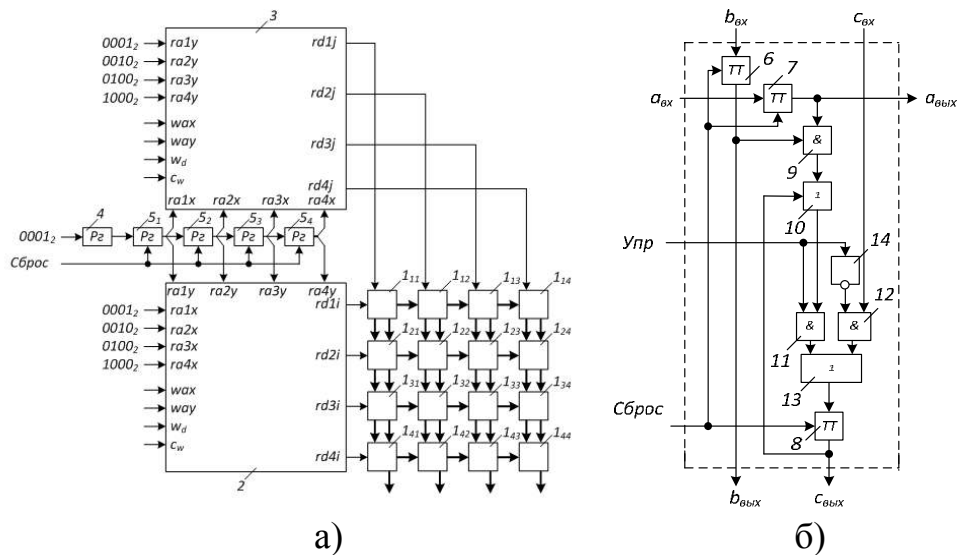


Рис. 12. Устройство для умножения бинарных матриц (а) и схема ячейки его систолической операционной части (б)

Его аппаратная сложность определяется как

$$R_2 = 6N^3 + 52N^2 + 2N,$$

а затраты на выполнение умножения матриц как

$$t_2 = (14N^2 + 2 + \lceil \log_2 N \rceil + N)t_0.$$

По сравнению с прототипом устройство имеет выигрыш в аппаратной сложности не менее чем в 50 раз (в зависимости от размера обрабатываемых матриц N).

Умножение пары бинарных матриц может быть разделено на нахождение N^2 скалярных произведений бинарных векторов, которые, в свою очередь, могут быть досрочно прерваны в случае получения единичного значения в очередном k -м частичном произведении. Данная особенность позволяет осуществить досрочное прерывание внутреннего цикла, что на практике снижает число выполняемых умножения на 2–3 порядка при умножении плотных матриц. Реализация этого приема на CPU или GPU ведет к деградации их реальной производительности ввиду наличия сбросов конвейера в составе CPU из-за нерегулярно срабатывающего условного перехода в составе внутреннего цикла и необходимости дробления WARP'a (группы потоков) при выполнении соответствующего кода на GPU. Выходом из сложившейся ситуации является разработка специализированного итеративного устройства для умножения бинарных матриц с возможностью досрочного прерывания процесса умножения при получении единичного значения, структурная схема которого приведена на рис. 13.

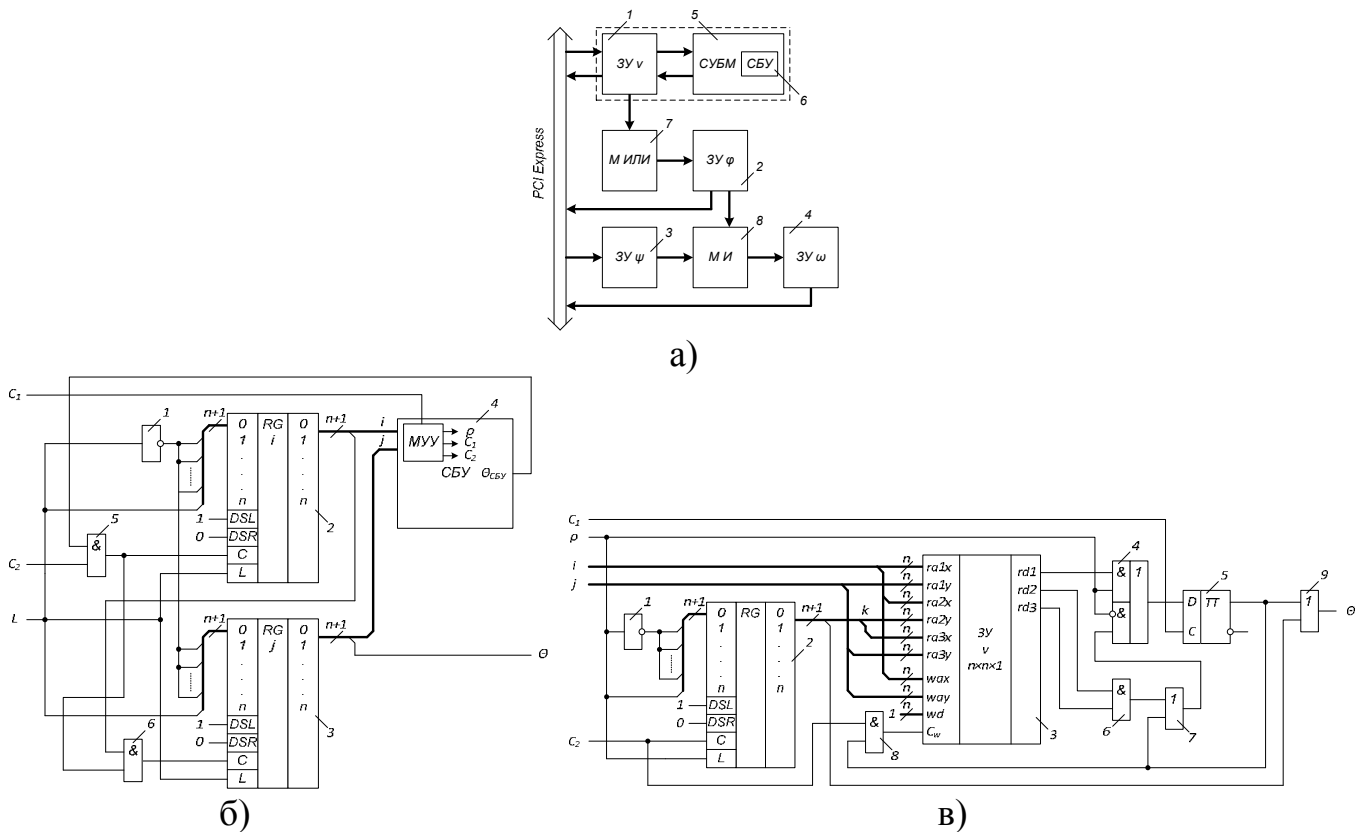


Рис. 13. Структурная схема устройства для умножения бинарных матриц с возможностью досрочного прерывания вычислительного процесса (а), функциональные схемы умножения бинарных матриц (СУБМ) (б) и битового умножения (СБУ) двоичных векторов с возможностью досрочного прерывания (в)

Его аппаратная сложность определяется как

$$R_3 = 15N^2 + 45N + 59,$$

а затраты на выполнение умножения матриц как

$$t_3 = \left(3 + \lceil 4dN \rceil + \left(3N^2 + N(12 + \lceil \log_2 N \rceil) \right) \beta N^2 + 2N^2 + 3N^3 + \lceil \log_2 N \rceil N^2 \right) t_0,$$

где d – плотность перемножаемых матриц, $0 \leq \beta \leq 1$ – безразмерный коэффициент сокращения числа умножений за счет досрочного прерывания вычислительного процесса. Устройство характеризуется существенно меньшей аппаратной сложностью по сравнению с рассмотренным выше устройством для умножения бинарных матриц на базе систолического принципа умножения и обеспечивает сопоставимое время умножения на матрицах размером $N < 256$.

Таким образом, разработанные специализированные устройства позволяют сократить время выполняемых операций при реализации аппаратно-ориентированной обработки R -выражений, а также сократить вычислительные затраты на умножение бинарных матриц при выявлении циклов на базе компонент сильной связности и транзитивном замыкании бинарных отношений в совокупности со снижением аппаратной сложности разработанных устройств по сравнению с известными аналогами. Использование разработанных аппаратно-ориентированных устройств-акселераторов приводит к снижению вычислительных затрат на построение разбиений граф-схем параллельных алгоритмов при синтезе СЛУ в базисе ЛМК. Разработанные устройства для умножения матриц являются универсальными и могут найти применение при решении широкого класса задач, связанных с умножением матриц или сводимых к ним.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе решена научно-техническая проблема снижения аппаратной сложности ЛМК путем разработки теоретических основ, включающих в своем составе методы, алгоритмы и их программные и аппаратные реализации, позволяющие осуществить нахождение решений соответствующих задачи дискретной комбинаторной оптимизации более высокого качества с меньшими затратами вычислительного времени. При этом получены следующие основные результаты:

1. Выполнен анализ состояния проблемы, возникающей при создании ЛМК, в ходе которого установлено, что в процессе синтеза ЛМК возникает ряд NP -трудных задач дискретной комбинаторной оптимизации (задача поиска разбиений граф-схем параллельных алгоритмов логического управления, задачи вычисления числовых оценок граф-схем параллельных алгоритмов логического управления и их разбиений), обладающих большой вычислительной сложностью. Качество решений данных задач напрямую влияет на технико-экономические и эксплуатационные характеристики ЛМК, к которым в первую очередь относится их аппаратная сложность. В результате определены основные направления исследований, связанные с уменьшением вычислительных затрат методов ограниченного перебора и повышением качества получаемых ими решений с целью снижения аппаратной сложности синтезируемых ЛМК.
2. Проведен теоретический анализ существующих методов решения задач дискретной комбинаторной оптимизации. По его итогам выявлено, что для решения трудно-решаемых комбинаторных оптимизационных задач применяются эвристические методы, которые подразделяются на методы ограниченного перебора, последовательного формирования решения, на базе модифицирующих операций и на базе движения в пространстве параметров. В различных задачах указанные методы характеризуются различным качеством получаемых решений и необходимыми затратами вычислительного времени.

3. Разработана математическая модель построения разбиений граф-схем параллельных алгоритмов логического управления, учитывающая структурные и технологические ограничения базиса ЛМК, отличающаяся возможностью минимизации межконтроллерного трафика передачи управления и позволяющая производить оценку аппаратной сложности синтезируемого ЛМК отталкиваясь от показателей качества разбиений.
4. Для наиболее известных методов произведена разработка их программных реализаций, с использованием которой в тестовой задаче поиска кратчайшего пути в графе для графов различной плотности с различным числом вершин установлено, что наиболее перспективными являются методы взвешенного случайного перебора, муравьиной колонии (в том числе с поддержкой комбинаторных возвратов и с использованием двудольного графа) и эволюционные (генетические) методы. В ходе вычислительных экспериментов, выполненных с использованием грид, установлено, что в различных условиях применения различные эвристические методы обеспечивают получение решений с различной степенью минимизации целевой функции, что позволяет определить зоны преимущественного использования каждого из них, границы между которыми аппроксимируются гиперболами.
5. По итогам анализа результатов вычислительных экспериментов сформулированы рекомендации об областях преимущественного использования методов построения разбиений граф-схем параллельных алгоритмов, позволяющие выбирать наиболее перспективный метод в зависимости от размерности решаемой задачи и силы технологического ограничения. На их основе возможно осуществление выбора одного из последовательных методов для оценки значения текущего наилучшего значения целевой функции с последующим его улучшением с использованием итерационных методов и отсечением неперспективных решений с использованием метода ветвей и границ в рамках предложенного обобщенного метода синтеза разбиений.
6. Разработаны теоретические основы и методы решения задачи поиска разбиений граф-схем параллельных алгоритмов. С их использованием проведены вычислительные эксперименты, в результате которых получены зависимости значений частных показателей качества разбиений от силы технологических ограничений базиса ЛМК, позволившие выявить наличие зон нечувствительности эвристических методов синтеза разбиений. С использованием полученных зависимостей сделан вывод о целесообразности построения ЛМК, включающих в своем составе большое количество относительно простых контроллеров, что позволяет сократить до 17,2 раз требования к числу выводов контроллера для приема/выдачи сигналов логических условий и микроопераций и до 5,7 раз требования к памяти микропрограмм контроллера, что в совокупности позволяет снизить аппаратную сложность ЛМК не менее чем на 8%.
7. Разработан программно-аппаратный комплекс для автоматизированного поиска решений задач дискретной оптимизации и выполнения метаоптимизации эвристических методов при синтезе ЛМК. Вычислительная сложность программной реализации модифицированного метода параллельно-последовательной декомпозиции снижена в 30 раз по сравнению с прототипом. Программная часть комплекса интегрирована с грид на платформе BOINC, что позволило осуществить серию вычислительных экспериментов, направленных на решение дискретных комбинаторных оптимизационных задач. Аппаратная часть комплекса включает в своем составе устройства на

ПЛИС, обладающие по сравнению с известными аналогами меньшей аппаратной сложностью и большим быстродействием по сравнению с программными реализациями соответствующих алгоритмов, что позволяет расширить сферу их практического применения на решение задач большей размерности.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Расширенные теоретические основы, методы, алгоритмы и устройства в перспективе могут быть рекомендованы для практического применения в как составе аппаратно-программных комплексов по разработке СЛУ в базисе ЛМК, позволяя снизить время, затрачиваемое на их синтез, и их аппаратную сложность, так и для решения различных задач дискретной комбинаторной оптимизации.

Теоретические выводы и рекомендации об областях преимущественного использования эвристических методов в перспективе могут быть расширены как на другие классы задач дискретной комбинаторной оптимизации, так и путем разработки новых и модификации существующих эвристических методов, повышающих скорость сходимости, качество решений, снижающих затраты вычислительного времени на их получение и, как следствие, – аппаратную сложность синтезируемых устройств.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях по перечню ВАК Минобрнауки РФ

1. **Ватугин Э.И.**, Зотов И.В., Титов В.С. Построение множества сечений в задаче оптимального разбиения параллельных управляющих алгоритмов // Известия ТулГУ. Вычислительная техника. Информационные технологии. Системы управления. Тула: ТулГУ, 2003. Т. 1. Вып. 2. С. 70–77.
2. Борзов Д.Б., **Ватугин Э.И.**, Зотов И.В., Титов В.С. К задаче субоптимального разбиения параллельных алгоритмов // Известия вузов. Приборостроение. Вып. 12, 2004. С. 34–39.
3. **Ватугин Э.И.**, Зотов И.В. Аппаратная модель для определения минимального числа блоков при декомпозиции параллельных алгоритмов логического управления // Известия вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 2. С. 39–43.
4. **Ватугин Э.И.**, Зотов И.В., Титов В.С. Использование схемных формирователей и преобразователей двоичных последовательностей при построении комбинаторно-логических акселераторов // Известия КурскГТУ. 2008. № 4 (25). С. 32–39.
5. **Ватугин Э.И.**, Зотов И.В. Анализ качества блочных разбиений при синтезе логических мультиконтроллеров // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2008. № 10, Т. 6. С. 32–38.
6. **Ватугин Э.И.**, Зотов И.В., Титов В.С. Выявление изоморфных вхождений R -выражений при построении множества сечений параллельных алгоритмов логического управления // Информационно-измерительные и управляющие системы. № 11, Т. 7. М.: «Радиотехника», 2009. С. 49–56.
7. **Ватугин Э.И.**, Зотов И.В., Титов В.С. Алгоритм и устройство выявления изоморфных вхождений R -выражений при построении множества сечений параллельных алгоритмов логического управления // Известия вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 2. С. 37–45.
8. **Ватугин Э.И.**, Зотов И.В., Титов В.С., Аль-Ашвал М.М. Реализация операции вставки поддерева при аппаратно-ориентированной обработке R -выражений // Известия вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 9. С. 63–71.
9. **Ватугин Э.И.**, Титов В.С. Сравнение методов синтеза разбиений граф-схем параллельных алгоритмов с использованием двумерных диаграмм // Известия Юго-Западного государственного университета. № 3 (42). 2012. С. 66–74.
10. **Ватугин Э.И.**, Титов В.С. Структурно-параметрическая оптимизация систем логического управления с использованием добровольных распределенных вычислений // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия «Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение». 2012. № 2. Ч. 1. С. 12–17.

11. **Ватугин Э.И.** Анализ эффективности и программная оптимизация методов синтеза разбиений параллельных алгоритмов логического управления в среде PAE // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия «Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение». № 2. Ч. 1. С. 191–195.
12. **Ватугин Э.И.**, Леонов М.Е. Использование смежной окрестности при жадном последовательном формировании блоков разбиения граф-схем параллельных алгоритмов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2013. Т. 56. № 6. С. 30–35.
13. **Ватугин Э.И.**, Титов В.С. Алгоритмическая оптимизация программной реализации метода параллельно-последовательной декомпозиции граф-схем параллельных алгоритмов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2013. Т. 56. № 6. С. 23–29.
14. **Ватугин Э.И.**, Мартынов И.А., Титов В.С. Оценка реальной производительности современных процессоров в задаче умножения матриц для однопоточной программной реализации // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2013. № 4. С. 11–20.
15. **Ватугин Э.И.**, Мосин С.А., Титов В.С. Использование Венгерского алгоритма при анализе таблиц включений в рамках параллельно-последовательного подхода к синтезу разбиений // Известия Юго-Западного государственного университета. 2014. № 1 (52). С. 8–13.
16. **Ватугин Э.И.**, Колясников Д.В., Титов В.С. Анализ результатов применения метода случайного перебора в задаче поиска разбиений граф-схем параллельных алгоритмов // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2014. № 12 (161). С. 102–110.
17. **Ватугин Э.И.**, Мартынов И.А., Титов В.С. Оценка реальной производительности современных видеокарт с поддержкой технологии CUDA в задаче умножения матриц // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2014. № 2. С. 8–17.
18. **Ватугин Э.И.**, Дремов Е.Н., Мартынов И.А., Титов В.С. Метод взвешенного случайного перебора для решения задач дискретной комбинаторной оптимизации // Известия ВолГТУ. Серия: Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь. № 10 (137). Вып. 9. 2014. С. 59–64.
19. **Ватугин Э.И.**, Титов В.С. Анализ результатов применения алгоритма муравьиной колонии в задаче поиска пути в графе при наличии ограничений // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2014. № 12 (161). С. 111–120.
20. **Ватугин Э.И.**, Титов В.С. Анализ областей качественного превосходства последовательных эвристических методов синтеза разбиений при проектировании логических мультиконтроллеров // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2015. Т. 58. № 2. С. 115–122. DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-2-115-122.
21. **Ватугин Э.И.**, Титов В.С. Оценка реальной производительности современных процессоров в задаче умножения матриц для однопоточной программной реализации с использованием расширения SSE (часть 1) // Известия Юго-Западного государственного университета. 2015. Т. 1. № 4 (61). С. 26–35.
22. **Ватугин Э.И.**, Титов В.С. Оценка реальной производительности современных процессоров в задаче умножения матриц для однопоточной программной реализации с использованием расширения SSE (часть 2) // Известия Юго-Западного государственного университета. 2015. Т. 1. № 5 (62). С. 8–16.
23. **Ватугин Э.И.**, Титов В.С. Параметрическая оптимизация алгоритма имитации отжига на примере решения задачи поиска кратчайшего пути в графе // Вестник Череповецкого государственного университета. № 6 (67). 2015. С. 13–16.
24. **Ватугин Э.И.**, Титов В.С. Особенности метаоптимизации алгоритма пчелиной колонии в задаче поиска кратчайшего пути в графе при наличии ограничений на плотность графа // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. № 2 (19). 2016. С. 52–65.
25. **Ватугин Э.И.**, Титов В.С. К вопросу о выборе структуры логического мультиконтроллера // Телекоммуникации. 2017. № 3. С. 2–12.
26. **Ватугин Э.И.**, Панищев В.С., Гвоздева С.Н., Титов В.С. Метод взвешенного случайного перебора для построения разбиений граф-схем параллельных алгоритмов при проектировании логиче-

- ских мультиконтроллеров // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21. № 6 (75). С. 6–21. DOI: 10.21869/2223-1560-2017-21-6-6-21.
27. Затолокин Ю.А., **Ватугин Э.И.**, Титов В.С. Алгоритмическая оптимизация программной реализации алгоритмов умножения плотных вещественных матриц на графических процессорах с поддержкой технологии OpenCL // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21. № 5 (74). С. 6–15. DOI: 10.21869/2223-1560-2017-21-5-06-15.
28. **Ватугин Э.И.**, Титов В.С. Исследование особенностей применения метода роя частиц в задачах дискретной оптимизации // Вестник компьютерных и информационных технологий. № 5 (167). 2018. С. 26–34. DOI: 0.14489/vkit.2018.05.pp.026–034.
29. Гвоздева С.Н., **Ватугин Э.И.**, Титов В.С. Оценка быстродействия устройства с систолической структурой для умножения бинарных матриц // Телекоммуникации. 2020. Т. 3. С. 2–10.

Публикации, индексируемые в базах Scopus и Web of Science

30. **Vatutin E.I.**, Valyaev S.Yu., Titov V.S. Comparison of Sequential Methods for Getting Separations of Parallel Logic Control Algorithms Using Volunteer Computing // CEUR Workshop Proceedings. Proceedings of the Second International Conference BOINC-based High Performance Computing: Fundamental Research and Development (BOINC:FAST 2015). Vol. 1502. Technical University of Aachen, Germany, 2015. pp. 37–51.
31. **Vatutin E.I.**, Titov V.S. On the selection of optimal structure organization of logic multicontrollers // MATEC Web of Conferences. Proceedings of the VII Scientific Conference with International Participation “Information-Measuring Equipment and Technologies” (IME&T 2016). Vol. 79. 2016. pp. 01084. DOI: 10.1051/mateconf/201679010.
32. **Vatutin E.I.** Comparison of Decisions Quality of Heuristic Methods with Sequential Formation of the Decision in the Graph Shortest Path Problem // CEUR Workshop Proceedings. Proceedings of the Third International Conference BOINC-based High Performance Computing: Fundamental Research and Development (BOINC:FAST 2017). Vol. 1973. Technical University of Aachen, Germany, 2017. pp. 67–76.
33. **Vatutin E.I.** Comparison of Decisions Quality of Heuristic Methods with Limited Depth-First Search Techniques in the Graph Shortest Path Problem // Open Engineering. Vol. 7. Iss. 1. 2017. pp. 428–434. DOI: 10.1515/eng-2017-0041.

Статьи

34. **Ватугин Э.И.**, Зотов И.В. Поиск базового сечения в задаче разбиения параллельных алгоритмов // Деп. в ВИНТИ 24.11.03 № 2036-B2003. 30 с.
35. **Ватугин Э.И.**, Зотов И.В. Параллельно-последовательный метод формирования субоптимальных разбиений // Информационные технологии моделирования и управления. 2004. Вып. 12. С. 64–71.
36. **Ватугин Э.И.**, Зотов И.В. Построение матрицы отношений в задаче оптимального разбиения параллельных управляющих алгоритмов // Известия Курского государственного технического университета. Курск, 2004. № 2. С. 85–89.
37. **Ватугин Э.И.**, Зотов И.В. Идентификация и разрыв последовательных циклов в задаче субоптимального разбиения параллельных управляющих алгоритмов // Известия ТулГУ. Серия: Вычислительная техника. Информационные технологии. Системы управления. Т. 1. Вып. 3. Вычислительная техника. Тула: изд-во ТулГУ, 2004. С. 51–55.
38. **Ватугин Э.И.**, Зотов И.В., Титов В.С. Использование схемных формирователей и преобразователей двоичных последовательностей при построении комбинаторно-логических акселераторов // Известия Курского государственного технического университета. 2008. № 4 (25). С. 32–39.
39. **Ватугин Э.И.**, Мартынов И.А., Титов В.С. Оценка реальной производительности современных процессоров и видеокарт с поддержкой технологии CUDA в задаче умножения матриц // CUDA альманах (май 2015). 2015. С. 9–10.
40. **Vatutin E.**, Panishchev V., Gvozdeva S., Titov V. Comparison of Decisions Quality of Heuristic Methods Based on Modifying Operations in the Graph Shortest Path Problem // Problems of Information Technology. No. 1. 2020. pp. 3–15. DOI: 10.25045/jpit.v11.i1.01.

41. **Ватугин Э.И.** О перечислении циклических латинских квадратов и расчете значения функции Эйлера с их использованием // *Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии*. 2020. Т. 4, № 2. С. 40–48.

Монографии

42. **Ватугин Э.И.**, Зотов И.В., Титов В.С. и др. Комбинаторно-логические задачи синтеза разбиений параллельных алгоритмов логического управления при проектировании логических мультиконтроллеров. Курск: изд-во КурскГТУ, 2010. 200 с.

43. **Ватугин Э.И.** Проектирование логических мультиконтроллеров. Синтез разбиений параллельных граф-схем алгоритмов. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2011 г. 292 с.

44. **Ватугин Э.И.**, Титов В.С. Теоретические основы и технические решения программно-аппаратного обеспечения синтеза логических мультиконтроллеров. Курск: изд-во ЗАО «Университетская книга», 2022. 484 с.

Патенты

45. Патент РФ № 2371766, МПК8 G06N7/00, G06F17/00. Устройство для исследования графов / **Ватугин Э.И.**, Зотов И.В. Опубл. 27.10.2009, бюл. № 30.

46. Патент РФ на полезную модель № 157948. Устройство для умножения матриц / **Ватугин Э.И.**, Мартынов И.А., Титов В.С. Заявл. 08.07.2015, опубл. 20.12.2015. Бюл. № 35.

47. Патент РФ на полезную модель № 193927. Устройство для умножения бинарных матриц / Гвоздева С.Н., **Ватугин Э.И.**, Пшеничных А.О., Титов В.С. Заявл. 26.06.2019, опубл. 21.11.2019.

48. Патент РФ № 2744239. Устройство для возведения бинарной матрицы в квадрат / Гвоздева С.Н., **Ватугин Э.И.**, Титов В.С. Заявл. 05.07.2020, опубл. 04.03.2021.

Свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ

49. **Ватугин Э.И.**, Зотов И.В. Параллельно-последовательный метод формирования субоптимальных разбиений параллельных управляющих алгоритмов // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2005613091 от 28.11.05.

50. **Ватугин Э.И.**, Зотов И.В. Визуальная среда синтеза разбиений параллельных алгоритмов логического управления // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007613222 от 30.07.07.

51. **Ватугин Э.И.** Библиотека классов обработки множеств с SIMD-оптимизацией // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007614221 от 03.08.07.

52. **Ватугин Э.И.** Библиотека функций построения разбиений методом С.И. Баранова с жадным последовательным формированием блоков // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010612902 от 28.04.10.

53. **Ватугин Э.И.**, Валяев С.Ю. Расчетный модуль для построения разбиений параллельных алгоритмов логического управления с использованием добровольных распределенных вычислений // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013618013 от 28.08.13.

54. **Ватугин Э.И.**, Валяев С.Ю., Дремов Е.Н., Мартынов И.А., Титов В.С. Расчетный модуль для тестирования комбинаторных оптимизационных алгоритмов в задаче поиска кратчайшего пути в графе с использованием добровольных распределенных вычислений // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014619797 от 22.09.14.

55. **Ватугин Э.И.**, Панищев В.С., Гвоздева С.Н. Программа для построения разбиений граф-схем параллельных алгоритмов логического управления методом взвешенного случайного перебора // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018611362. Заявл. 04.12.17, опубл. 01.02.18.

Тезисы докладов, опубликованные в трудах международных и всероссийских конференций

56. **Ватугин Э.И.**, Зотов И.В. Метод формирования субоптимальных разбиений параллельных управляющих алгоритмов // Труды II международной конференции «Параллельные вычисления и задачи управления» РАСО'04 памяти Е.Г. Сухова. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2004. С. 884–917.

57. **Ватугин Э.И.**, Зотов И.В. Программная система для построения разбиений параллельных управляющих алгоритмов // Труды V международной конференции «Идентификация систем и задачи управления (SICPRO'06)». М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2006. С. 2239–2250.
58. **Vatutin E.I.**, Abdel-Jalil J.N., Najajra M.H., Zotov I.V. Comparison of Methods for Getting Separation of Parallel Logic Control Algorithms // Information and Telecommunication Technologies in Intelligent Systems (ITT IS'06). Catania, Italy, 2006. pp. 92–94.
59. **Ватугин Э.И.**, Зотов И.В. Повышение качества разбиения алгоритмов при синтезе логических мультиконтроллеров с использованием метода параллельно-последовательной декомпозиции // Перспективы развития систем управления оружием. М.: Изд-во «Бедретдинов и Ко», 2007. С. 84–92.
60. **Ватугин Э.И.**, Волобуев С.В., Зотов И.В. Комплексная сравнительная оценка методов выбора разбиений при проектировании логических мультиконтроллеров // Труды VII международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO'08. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2008. С. 1917–1940.
61. **Ватугин Э.И.**, Волобуев С.В., Зотов И.В. Комплексный сравнительный анализ качества разбиений при синтезе логических мультиконтроллеров в условиях присутствия технологических ограничений // Труды четвертой международной конференции «Параллельные вычисления и задачи управления» PACO'08. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2008. С. 643–685.
62. **Ватугин Э.И.** Определение степени параллелизма параллельной граф-схемы алгоритма // Интеллектуальные и информационные системы (Интеллект – 2009). Тула: изд-во ТулГУ, 2009. С. 24–26.
63. **Ватугин Э.И.**, Зотов И.В., Титов В.С. Акселератор для быстрого преобразования конструктивных подмножеств вершин параллельных алгоритмов // Труды пятой международной конференции «Параллельные вычисления и задачи управления» (PACO'10). М.: ИПУ РАН, 2010. С. 1301–1366.
64. **Ватугин Э.И.**, Титов В.С. Использование добровольных распределенных вычислений на платформе BOINC для анализа качества разбиений граф-схем параллельных алгоритмов // Параллельные вычисления и задачи управления (PACO'12). М.: ИПУ РАН, 2012. С. 37–54.
65. **Vatutin E.I.**, Titov V.S. Voluntary distributed computing for solving discrete combinatorial optimization problems using Gerasim@home project // Distributed computing and grid-technologies in science and education. Dubna: JINR, 2014. pp. 60–61.
66. Martynov I.A., **Vatutin E.I.**, Titov V.S. Hardware oriented classification of binary relations of graph-schemes of parallel algorithms // Eighth World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation (WCIS – 2014). Tashkent, 2014. pp. 70–73.
67. **Ватугин Э.И.**, Мартынов И.А., Титов В.С. Способ обхода тупиков при решении задач дискретной оптимизации с ограничениями // Перспективные информационные технологии (ПИТ-2014). Самара: изд-во Самарского научного центра РАН. С. 313–317.
68. **Ватугин Э.И.**, Колясников Д.В., Мартынов И.А., Титов В.С. Метод случайного перебора в задаче построения разбиений граф-схем параллельных алгоритмов // Многоядерные процессоры, параллельное программирование, ПЛИС, системы обработки сигналов (МППОС 2014). Барнаул: Барнаул, 2014. С. 115–125.
69. **Ватугин Э.И.** Выявление тел циклов при обработке граф-схем параллельных алгоритмов с использованием компонент сильной связности // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации (Расознавание – 2015). Курск, 2015. С. 83–85.
70. **Ватугин Э.И.**, Титов В.С. Об одном подходе к использованию алгоритма муравьиной колонии при решении задач дискретной комбинаторной оптимизации // Интеллектуальные и информационные системы (Интеллект 2015). Тула, 2015. С. 8–13.
71. **Ватугин Э.И.**, Валяев С.Ю., Титов В.С. Анализ результатов применения метода случайного перебора при построении разбиений граф-схем параллельных алгоритмов в зависимости от размерности задачи и силы ограничений // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2016). Самара: изд-во Самарского научного центра РАН, 2016. С. 481–486.

72. **Ватутин Э.И.**, Титов В.С. Анализ скорости сходимости качества решений эвристических методов в задаче поиска кратчайшего пути в графе // Информационно-измерительные диагностирующие и управляющие системы (Диагностика – 2016). Курск: изд-во Юго-Западного государственного университета, 2016. С. 19–25.

73. **Vatutin E.I.**, Valyaev S.Yu., Titov V.S. Quality analysis of block separations of graph-schemes of parallel control algorithms during logic control systems design using grid systems on volunteer basis // Distributed computing and grid-technologies in science and education (GRID'16). Dubna: JINR, 2016. pp. 116–117.

74. **Ватутин Э.И.**, Заикин О.С., Журавлев А.Д., Манзюк М.О., Кочемазов С.Е., Титов В.С. О влиянии порядка заполнения ячеек на темп генерации диагональных латинских квадратов // Информационно-измерительные диагностирующие и управляющие системы (Диагностика – 2016). Курск: изд-во ЮЗГУ, 2016. С. 33–39.

75. **Ватутин Э.И.**, Титов В.С. Оценка аппаратной сложности логических мультиконтроллеров в зависимости от значений технологических ограничений и методов синтеза разбиений граф-схем параллельных алгоритмов // Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России. Муром, 2022. С. 17–19.

Соискатель

Э.И. Ватутин

Подписано в печать _____ . Формат 60×84 1/16 .

Печатных листов 2,0. Тираж 100 экз. Заказ _____ .

Юго-Западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.