

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Гайнанова Дамира Насибулловича на тему «Математическое и программное обеспечение вычислительных комплексов для решения задач анализа несовместных систем с массивно параллельной обработкой данных», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.11 – «Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей» и по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Актуальность темы исследования.

В диссертационной работе Гайнанова Д. Н. на основе свойств несовместных систем разрабатывается математическое и программное обеспечение вычислительных комплексов для решения двух классов прикладных задач: управление технологическими маршрутами на металлургическом производстве и управление процессами планирования и организации грузовых железнодорожных перевозок.

С практической точки зрения наиболее существенными свойствами несовместных систем являются структурные и комбинаторные особенности семейств их максимальных совместных и минимальных несовместных подсистем. Однако специфика задач анализа несовместных систем такова, что важную роль в них играет содержательный смысл ограничений. В этой связи **актуальными** являются разработка адекватных методов математического моделирования с последующей разработкой эффективных численных методов решения задач анализа несовместных систем, связанных с конкретными (частными) классами прикладных задач. В диссертационной работе таким практически значимым классом выступают несовместные системы линейных неравенств.

Задача управления технологическими маршрутами на дискретном металлургическом производстве впервые формализуется в работе как многоклассовая задача распознавания образов в геометрической постановке. Важной особенностью при этом является непрерывный сбор данных об исполненных технологических маршрутах и, следовательно, постоянное расширение обучающей выборки. Такой подход является новым и позволяет существенно повысить эффективность решения за счет регулярного уточнения решающих правил в системе распознавания. Основные трудности на этом этапе связаны с большими объемами данных, подлежащих обработке. В этой связи **актуальной** является разработка моделей и методов параллельной обработки данных такого типа, а также разработка эффективных методов и алгоритмов построения решающих правил.

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ

Вх. №

10 09 2018

Задача управления транспортными процессами в условиях противоречивости рассматривается в работе в своей частной и практически очень важной постановке на примере задачи организации грузовых железнодорожных перевозок. Впервые эта задача сведена к задаче анализа несовместных систем в рамках взаимосвязи последней с задачей расшифровки монотонной булевой функции. Ввиду большой размерности множества ресурсов железнодорожной инфраструктуры, эта прикладная задача характеризуется высокой комбинаторной сложностью. Таким образом, **актуальной** является разработка эффективных методов снижения размерности исходной задачи. Для этих целей в работе формализуются задачи обработки данных на графах и разрабатываются методы и алгоритмы обработки данных такого типа.

Содержание работы.

Работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы.

В **первой главе** приводится общее определение несовместных систем условий, а также устанавливается взаимосвязь задач анализа несовместных систем с задачей распознавания образов в геометрической постановке и с задачей расшифровки априорно неизвестной монотонной булевой функции. Вводится в рассмотрение абстрактная математическая конструкция – симплициальный комплекс – и исследуются всесторонне их структурные и комбинаторные свойства в контексте взаимосвязи с аналогичными свойствами несовместных систем.

Во **второй главе** разрабатываются теоретико-графовые методы математического моделирования несовместных систем условий. Вводится в рассмотрение специальная графовая конструкция – граф системы независимости. Для ряда классов систем независимости установлена связность соответствующих графов систем независимости, вытекающая непосредственно из связности топологического пространства. Как частный класс графов систем независимости исследуются графы максимальных совместных подсистем несовместных систем линейных неравенств. Установлена связность таких графов, а также более сильные типы связности для систем линейных неравенств с некоторой специальной структурой семейства их максимальных совместных подсистем (МСП). В этой главе также установлено существование цикла нечетной длины в графе МСП несовместных систем линейных неравенств и получены оценки для степеней его вершин.

В **третьей главе** разрабатываются комбинаторно-геометрические методы математического моделирования несовместных систем линейных неравенств. Здесь же исследуются структурные особенности положительных базисов как геометрических моделей семейства минимальных по включению

несовместных подсистем (МНП) несовместных систем линейных неравенств. В рассмотрение вводится новое для комбинаторной геометрии понятие G -диагонали выпуклого многогранника. Установлено, что классификация многогранников по G -диагональному типу совпадает с классической классификацией по изоморфной структуре решеток граней. В рамках разработанных комбинаторно-геометрических методов впервые установлено соответствие между несовместными системами линейных неравенств и выпуклыми многогранниками. С помощью преобразования Гейла множество задающих векторов исходной системы отображается в конечный набор точек пространства. При этом семейство G -диагоналей этого многогранника соответствует семейству дополнений МСП исходной системы, а семейство граней – семейству дополнений МНП соответственно. На основе полученных результатов были установлены точные оценки для числа диагоналей циклических многогранников и, как следствие, нижние оценки для максимального числа МСП несовместных систем линейных неравенств.

В **четвертой главе** разрабатываются численные методы решения задач анализа несовместных систем линейных неравенств. В первом разделе главы на основе результатов, полученных в области разработки теоретико-графовых методов математического моделирования, разрабатываются алгоритмы подсчета и выделения МСП и МНП несовместных систем линейных неравенств. Важную роль при этом играют полученные ранее свойства связности, наличия цикла нечетной длины и оценки для степеней вершин графа МСП. Здесь также вводится в рассмотрение новое понятие альтернативных покрытий и разрабатывается критерий классификации комитетов равной мощности, а также приближенный алгоритм синтеза минимальных комитетов, основанный на этом критерии. В основе этого алгоритма лежит теорема о соответствии семейства решений, взятых по одному для каждой вершины цикла нечетной длины в графе МСП, комитету исходной несовместной системы. Далее в первом разделе четвертой главы исследуются вопросы эффективного разделения обучающей выборки на этапе предварительной обработки данных для решения задачи распознавания образов в геометрической постановке. Разработаны приближенные полиномиальные алгоритмы дихотомии множества точек пространства с линейными разделяющими функциями и показана их эффективность для серии вычислительных экспериментов на случайных исходных данных.

Во втором разделе четвертой главы разрабатываются алгоритмы расшифровки монотонных булевых функций (МБФ), связанных с несовместными системами условий. В рассмотрение вводится новый критерий оптимальности алгоритма расшифровки МБФ, нормированный по числу обращений к оракулу. Здесь под оракулом понимается некоторый оператор, который по запросу для каждого двоичного набора возвращает значение МБФ на этом наборе. Таким образом, разработанный критерий

учитывает объективную сложность задачи и его значение не превышает единицы для любого алгоритма расшифровки. В продолжение полученных результатов во втором разделе четвертой главы установлено существование и разработан алгоритм расшифровки МБФ, оптимальный по введенному нормированному критерию. Здесь также рассматривается класс МБФ, связанных с неориентированными графами. В частности, показано, что задача расшифровки МБФ эквивалентна классической задаче комбинаторной оптимизации о максимальном независимом множестве вершин неориентированного графа (Maximum Independent Set – MIS Problem). Разработан эвристический алгоритм решения задачи MIS с абсолютной оценкой отклонения приближенного решения и приводятся результаты вычислительных экспериментов на тестовых графах открытой библиотеки DIMACS.

Третий раздел четвертой главы посвящен разработке методов параллельной обработки данных на графах. Приводится формальная математическая постановка задачи о декомпозиции множества путей ориентированного графа на множестве сильно связных (пересекающихся по ребрам) подграфов, а также разработан эвристический алгоритм декомпозиции. Важной особенностью такого подхода является существенное снижение размерности исходной задачи при незначительном снижении качества приближенного решения.

В **пятой главе** исследуются прикладные задачи, для решения которых предназначен разрабатываемый вычислительный комплекс. В первом разделе исследуется задача управления транспортными процессами в условиях противоречивости на примере задачи организации грузовых железнодорожных перевозок. Показано, что эта задача может быть решена в с использованием анализа несовместных систем. При этом на этапе решения задачи планирования грузовых железнодорожных перевозок исследование сводится к решению задачи расшифровки МБФ, порожденной неориентированным графом. Таким образом, для ее решения могут быть использованы разработанные алгоритм расшифровки МБФ и эвристический алгоритм решения задачи MIS. Следующий этап организации грузовых железнодорожных перевозок состоит в назначении заданного множества локомотивов для исполнения фиксированного плана перевозок. Этот этап, как известно из практики эксплуатации железнодорожной инфраструктуры, характеризуется высокой комбинаторной сложностью. В диссертации показано, что для преодоления этой сложности, могут быть эффективно использованы разработанные автором метод параллельной обработки данных на графах и алгоритм декомпозиции множества путей ориентированного графа. В подтверждение эффективности такого подхода в первом разделе пятой главы приводятся результаты вычислительных экспериментов на графе реальной сети.

Во втором разделе исследуется задача управления технологическими маршрутами на дискретном производстве на примере задачи прогнозирования качества продукции металлургического производства. Показано, что эта задача также связана с задачами анализа несовместных систем условий. В частности, эта прикладная задача формализована как задача распознавания образов в геометрической постановке. Для ее решения в работе предлагается специальный способ организации обучающей выборки и новый метод параллельной обработки данных в системе распознавания. В основе этого подхода лежит идея предварительной классификации векторов обучающей выборки и независимой обработки полученных классов по мере накопления новых данных. Таким образом, для решения исследуемой прикладной задачи могут быть эффективно использованы разработанные алгоритмы дихотомии с последующей реализацией алгоритмов синтеза минимальных комитетов на этапе классификации входного вектора.

В **шестой главе** приводится детальное описание разработанного автором вычислительного комплекса для решения задач анализа несовместных систем с массивно параллельной обработкой данных. Первый раздел главы посвящен приложению вычислительного комплекса для решения задачи управления технологическими маршрутами на дискретном производстве. Здесь разработаны принципы функционирования управляющей программы для реализации методов параллельной обработки данных на сети задач распознавания образов в геометрической постановке. Одной из компонент прикладного программного обеспечения вычислительного комплекса является пакет прикладных программ (ППП) «Управление технологическими маршрутами». Пакет состоит из двух программ, реализующих разработанные в диссертации (в пятой главе) принципы организации обучающей выборки и алгоритмы построения решающих правил в рассматриваемых задачах распознавания. Во втором разделе рассматривается приложение вычислительного комплекса в области управления транспортными процессами в условиях противоречивости. Здесь также разработаны принципы функционирования управляющей программы для реализации методов параллельной обработки данных на графах на этапах решения задач планирования и организации грузовых железнодорожных перевозок. ППП «Управление транспортными процессами в условиях противоречивости» является другой компонентой вычислительного комплекса и также состоит из двух программ, реализующих сбор данных и алгоритмы организации железнодорожных перевозок. В рамках описания вычислительного комплекса в шестой главе подробно обсуждаются принципы взаимодействия всех компонент, входящих в его математическое и программное обеспечение, между собой и с внешними системами.

Основные научные результаты. В работе получены важные новые результаты в области разработки методов параллельной обработки данных в вычислительных комплексах, а также в области разработки методов математического моделирования несовместных систем.

1. Разработан новый метод параллельной обработки данных на сети задач распознавания образов в геометрической постановке. В основе этого метода лежат принципы независимой обработки классов обучающей выборки и систематическое уточнение решающих правил для эффективной классификации входных векторов.

2. Разработаны новые полиномиальные алгоритмы дихотомии множества векторов обучающей выборки, на основе которых в вычислительном комплексе реализован этап эффективного дообучения системы по мере накопления данных.

3. Разработан новый метод математического моделирования несовместных систем, основанный на понятии графа системы независимости. Для графов, порождаемых системами линейных неравенств (графы максимальных по включению совместных подсистем несовместных систем линейных неравенств – графы МСП), установлены такие свойства как связность и наличие цикла нечетной длины.

4. Разработан новый приближенный алгоритм построения комитетов несовместной системы линейных неравенств, основанный на свойствах графа МСП исходной системы. Введено новое понятие альтернативного покрытия, на основе которого разработан критерий классификации комитетов равной мощности.

5. Разработана управляющая программа для реализации в вычислительном комплексе метода параллельной обработки данных на сети задач распознавания образов, а также программа для формирования решающих правил для классов обучающей выборки, в основе которой лежат разработанные алгоритм построения комитетов и критерий классификации комитетов равной мощности.

6. Разработан комплекс проблемно-ориентированных программ для решения задачи управления технологическими маршрутами на дискретном производстве. Этот комплекс представляет собой одну из компонент прикладного программного обеспечения и взаимодействует в вычислительном комплексе с управляющей программой для организации массивно параллельной обработки данных на сети задач распознавания образов.

7. Разработан комбинаторно-геометрический метод математического моделирования несовместных систем, основанный на введенном понятии G -диагонали выпуклого многогранника. Установлено, что классификация многогранников по G -диагональному типу в точности совпадает с классической классификацией по типу изоморфных решеток

граней. Установлена двойственная связь между экстремальными подсистемами несовместных систем линейных неравенств с одной стороны и семействами диагоналей и гиперграней выпуклых многогранников с другой стороны.

8. Разработан новый метод параллельной обработки данных на графах, в основе которого лежит эвристический алгоритм декомпозиции путей ориентированного графа на множестве сильно связанных подграфов. Особую значимость этому методу придает существенное снижение размерности данных, подлежащих последующей обработке в вычислительном комплексе.

9. Разработан новый метод математического моделирования несовместных систем, основанный на взаимосвязи семейств их максимальных совместных и минимальных несовместных подсистем с семействами верхних нулей и нижних единиц соответствующей монотонной булевой функции (МБФ).

10. Разработан новый критерий оптимальности алгоритма расшифровки МБФ, нормированный на общее число верхних нулей и нижних единиц и учитывающий тем самым объективную сложность задачи, а также разработан алгоритм расшифровки МБФ, оптимальный по этому критерию.

11. Разработана управляющая программа для реализации в вычислительном комплексе параллельной обработки данных на графах. С помощью этой программы реализованы алгоритм декомпозиции множества путей ориентированного графа, а также принципы параллельных итераций алгоритма поиска максимального независимого множества для набора непересекающихся подмножеств вершин исходного графа.

12. Разработан комплекс проблемно-ориентированных программ для решения задачи управления транспортными процессами на этапах планирования и организации грузовых железнодорожных перевозок. Этот комплекс представляет собой одну из компонент прикладного программного обеспечения и взаимодействует в вычислительном комплексе с управляющей программой для реализации параллельной обработки данных на графах.

Теоретическое значение. В работе всесторонне исследованы структурные и комбинаторные свойства несовместных систем условий и, в частности, несовместных систем линейных неравенств. Получены важные теоретические результаты, совокупность которых можно квалифицировать как крупное научное достижение.

Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе, обеспечивается использованием адекватных математических моделей, строгими доказательствами теорем, тестированием разработанных алгоритмов и сравнением с результатами, полученными другими авторами.

Работа прошла обширную апробацию в рамках специализированных научных семинаров, многочисленных международных и всероссийских конференций. Достоверность полученных результатов подтверждается также многочисленными публикациями автора в ведущих научных изданиях.

Практическая ценность результатов состоит в том, что внедрение разработанного вычислительного комплекса позволит существенно повысить качество управления процессами в таких важных прикладных областях как металлургическое производство и организация грузовых железнодорожных перевозок. Кроме того, практическая значимость полученных результатов подтверждается присуждением автору премии Правительства России в области науки и техники 2004 года.

Апробация работы и публикации. По результатам диссертации опубликованы 56 работа, включая 2 монографии, 25 статей в рецензируемых научных изданиях (из которых 13 журналов входят в перечень ВАК и 23 журнала индексируются международными базами Scopus и Web of Science), 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и 4 патента на изобретения.

По работе имеются следующие **замечания**.

1. В диссертации особое внимание уделяется исследованию структурных и комбинаторных свойств несовместных систем однородных строгих линейных неравенств, что связано с их практическим значением при моделировании противоречивых ограничений. При этом рассмотрение именно однородных и строгих систем обосновано не в полной мере. Какие трудности (или, наоборот, ослабление) влечет рассмотрение систем неоднородных и нестрогих линейных неравенств?

2. В диссертации подробно изучены свойства графов МСП несовместных систем линейных неравенств, характеризующие их локальные свойства, тип связности, оценку диаметра. Хотелось бы иметь более детальное описание того, как используются оценки степени вершин и диаметра графа МСП при построении алгоритмов выделения МСП в главе 4.

3. В разделе 4.1 главы 4 разработаны вычислительные алгоритмы для решения задач анализа несовместных систем на этапе подсчета и выделения всех максимальных совместных (МСП) и минимальных несовместных подсистем. При этом из описания алгоритма ГРАФ-КОМБ не вполне очевидным образом следует приоритет подсистемы, выбираемой в решение на первом шаге. Другими словами, не вполне ясно, с какой подсистемы начинать строить семейство МСП и имеет ли это какое-либо значение.

Заключение по работе. Указанные замечания не влияют на общий высокий уровень диссертационной работы. Актуальность проведенного исследования не вызывает сомнений. Диссертационная работа Гайнанова Дамира Насибулловича на тему «Математическое и программное обеспечение вычислительных комплексов для решения задач анализа несовместных систем с массивно параллельной обработкой данных» является законченной научно-исследовательской работой, в которой решена крупная научная проблема, имеющая важное теоретическое и практическое значение в области разработки математического и программного обеспечения вычислительных комплексов прикладного назначения и анализа несовместных систем. **Автореферат** в полной мере отражает содержание диссертации. Работа соответствует паспортам заявленных специальностей и удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям. Таким образом, считаю, что Гайнанов Дамир Насибуллович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.11 «Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей» и по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор, заведующая кафедрой «Естественнонаучные дисциплины» ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения»

Тимофеева Галина Адольфовна

Адрес: 620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

Телефон: 8 (343) 221-24-04; e-mail: GTimofeeva@usurt.ru.

Подпись Тимофеевой Г. А. заверяю:

Подпись Тимофеевой заверено
Специалист по кадрам