

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт управления бизнес-процессами и экономики
Кафедра экономики и информационных технологий менеджмента

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ А.А. Ступина

подпись

« ____ » _____ 2019 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Реинжиниринг бизнес-процессов с использованием
методов интеллектуального анализа данных на примере процесса
формирования специальных партий электрорадиоизделий

09.04.03 Прикладная информатика
09.04.03.02 «Реинжиниринг бизнес-процессов»

Научный руководитель _____ профессор, д-р техн. наук А.А.Ступина
подпись, дата

Студент ПЭ 17-09М 431726149 _____ О.Б.Казаковцева
подпись, дата

Рецензент _____ старший программист АО «СИНЕТИК»,
подпись, дата канд.техн.наук Д.В.Сташков

Красноярск 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1 Теоретическая часть.....	9
1.1 Характеристика объекта и анализ процесса формирования специальных партий электрорадиоизделий.....	9
1.2 Выявление процесса реинжиниринга и возможных методов.....	11
1.3 Подходы к реинжинирингу бизнес-процессов.....	15
2 Обеспечение надежности эксплуатации электрорадиоизделий.....	19
2.1 Специфические внешние воздействующие факторы при эксплуатации в особых условиях.....	19
2.2 Технологии обеспечения эксплуатационной надежности в особых условиях эксплуатации.....	21
2.3 Представление задачи повышения вероятности безотказной работы бортовой аппаратуры в виде задачи k-средних.....	25
3. Бизнес-процесс с применением методов интеллектуального анализа данных.....	28
3.1 Анализ различных примеров ранее проведенного реинжиниринга в данной организации.....	28
3.2 Эволюционные алгоритмы.....	30
3.3 Новый бизнес-процесс с применением интеллектуального анализа данных.....	35
4. Расширенное применение метода жадных эвристик для повышения качества управления процессами.....	37
4.1 Обеспечение эффективности производственного процесса.....	37
4.2. Алгоритм метода жадных эвристик для задачи на сети.....	45
4.3 Пример эффективного реинжиниринга с применением метода жадных эвристик.....	55
Заключение.....	61
Список использованных источников.....	62

ВВЕДЕНИЕ

Потребность в совершенствовании бизнес-процессов и процессов управления возникает в большинстве современных организаций, что бывает связано с новыми целями, изменением внешней среды, глобализацией и диверсификацией бизнеса. Разработка моделей процессов играет одну из решающих ролей в анализе и выявлении недостатков процессов любого вида, а их последующее совершенствование позволяет повысить конкурентоспособность организации и эффективность ее работы в целом.

Российская космическая отрасль отличается тем, что в ней сосредоточены самые сложные высокотехнологичные решения. С другой стороны, организация процессов в отрасли отличается консервативным подходом. Это связано и с особенностями работы режимных предприятий, и с тем, что продукция предприятий часто является уникальной, и, таким образом, в организации работ приоритет отдается не процессному управлению, предполагающему наличие устойчивых повторяющихся процессов, а подходам к управлению уникальными проектами. При этом реорганизация процессов, связанных с обработкой однородной продукции, такой, как, например, электронная компонентная база космического применения, с внедрением систем интеллектуальной обработки данных и использованием ранее накопленной информации о продукции, хотя и не позволяет в условиях космической отрасли радикально сократить затраты, но позволяет выйти на принципиально новый уровень качества получаемой продукции, недостижимый без использования таких систем.

Актуальность выбранной темы обусловлена возрастающими требованиями к электронной компонентной базе, связанными с увеличением сроков активного существования проектируемых космических аппаратов, а также ограниченной доступностью импортной электронной компонентной базы высоких классов качества, с учетом того, что до сих пор большая часть

электрорадиоизделий, которыми комплектуется электронная компонентная база российских косметических аппаратов – зарубежного производства.

Предметной областью данной магистерской диссертации является процесс формирования специальных партий электрорадиоизделий космического применения с применением интеллектуальной обработки данных неразрушающего тестирования электронной компонентной базы отечественного производства. Целью данной работы является улучшение качества электронной компонентной базы за счет совершенствования процесса формирования специальных партий.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать объект исследования;
- проанализировать процессы неразрушающего и разрушающего тестирования электрорадиоизделий;
- выбрать или разработать необходимые методы интеллектуальной обработки данных и разработать рекомендации по совершенствованию процессов предприятия с применением этих методов.

Теоретико-методологическую основу исследования составляют общенаучные методы, которые включают: анализ, синтез, обобщение, моделирование и прогнозирование, а также специальные методы интеллектуальной обработки данных, в частности – метод жадных эвристик для систем автоматической группировки объектов. Методы исследования выбраны, исходя из постановки, решаемых задач, с учетом особенностей исследуемого объекта.

Для снижения затрат на изготовление и вывод на орбиту космических систем основной упор российская космонавтика, как и мировая, делает на повышение сроков активного существования (САС) космических аппаратов (КА) [1, 2]. При этом возрастает готовность космических систем (КС), а также уменьшается требуемое количество КА, задействованных для обеспечения необходимого уровня работоспособности и пропускной

способности КС (для КС связи). Кроме того, система управления орбитальной группировкой становится менее громоздкой.

Уровень качества электронной компонентной базы (ЭКБ), из которой изготовлены электронные узлы КА, в значительной степени определяет эксплуатационные характеристики всего КА, в том числе его САС в особых, весьма специфичных условиях космического пространства[3].

Современный КА собирается из 100000-200000 единиц ЭКБ: микросхемы, транзисторы, диоды, реле, конденсаторы, резисторы и т. д. Качество именно этих деталей определяет длительную эксплуатацию бортовых систем. Обеспечение отказоустойчивости этих деталей в условиях космического полета на протяжении всего САС является важнейшей практической проблемой, требующей научного подхода.

Конечной целью настоящей работы мы ставим повышение отказоустойчивости и САС КА путем выстраивания бизнес-процессов тестирования ЭКБ с задействованием методов прогнозирования работоспособности ЭКБ в КА длительного функционирования.

Важнейшим условием прогнозируемости качества и, следовательно, заявленных эксплуатационных характеристик ЭКБ является стабильность производственных процессов. В рамках единой производственной партии все детали должны иметь схожие характеристики. Кроме того, они обязательно должны быть изготовлены из единой партии сырья, поскольку дефекты в деталях, приводящие к снижению потенциального и реального сроков эксплуатации детали могут быть вызваны примесями и иными дефектами кремниевого сырья, а также отклонениями (флуктуациями) технологического процесса. Дефекты сырья могут быть выявлены в ходе разрушающего физического анализа (например, на наличие пыли и влаги в подкорпусном пространстве). Отклонения в технологическом процессе в условиях автоматизированного производства с высокой вероятностью отразятся на всей изготовленной партии.

В этой связи однородных партий электрорадиоизделий (ЭРИ) для комплектования узлов КА с длительным САС является первейшей задачей для повышения качества всего КА и его САС.

Улучшение качества обеспечивается как за счет более согласованной работы ЭРИ со схожими характеристиками, так и благодаря повышению достоверности результатов выборочного разрушающего физического анализа (РФА), для которого появляется возможность гарантированно отбирать элементы из каждой производственной партии. В настоящей магистерской диссертации задача разделения однородных производственных партий ЭРИ по данным неразрушающих тестовых испытаний решена в виде задачи разделения смеси вероятностных распределений с применением особых алгоритмов метода жадных эвристик, обеспечивающих стабильный результат работы рандомизированного алгоритма при многократных его запусках.

Именно на производстве закладываются основные параметры надежности (отказоустойчивости) ЭКБ. В процессе комплектации КА приходится закупать ЭКБ самого высокого доступного уровня качества. Для радиоэлементов отечественного производства это уровни качества ВП и ОС (военная приемка), а затем организовывать работы по выявлению отбраковке потенциально ненадежных компонентов либо целых партий. Как показывает многолетний опыт комплектования аппаратуры КА, что серийная продукция заводов – изготовителей (даже уровней качества ВП и ОС) не удовлетворяет требованиям условий эксплуатации КА, вследствие чего требуется взаимодействие с предприятиями-изготовителями по выпуску специальных партий ЭКБ для космической отрасли (так называемых «спецпартий»). Спецпартия является прообразом компонентов космического уровня качества (уровень Space), существующего в американских, европейских и японских стандартах. Характеристики каждого ЭРИ, входящего в спецпартию, должны отличаться от изделий обычной партии ЭКБ своей стабильностью (малым разбросом). Формулирование списка дополнительных требований к специальным партиям ЭКБ потребовало сравнительного

анализа технологической цепочки испытаний, проводимых по американским стандартам [4] для микросхем (интегральных схем, ИС) и полупроводниковых приборов (ППП) [5] категории качества «Space» и «Military» (для военного применения) с требованиями, предъявляемыми отечественными ГОСТ. Такой анализ процессов тестирования показал, что ЭКБ уровней «Space» и «Military» имеют несколько различий. Во-первых, уровень качества Space предусматривает обязательную оценку дрейфа параметров в ходе тестовой эксплуатации, которая заменяется на практике электротермотренировкой. Во-вторых, осуществляется выборочный разрушающий физико-химический анализ материала: контроль наличия посторонних частиц (пыли) в подкорпусном пространстве (PIND). Третьим обязательным требованием, отличающим уровень качества Space, является то, что вся производственная партия должна быть изготовлена из единой партии кремниевого сырья (пластин).

Эти требования определяют, в свою очередь, требования к организации процесса тестирования ЭРИ космического применения. Так, состав дополнительных испытаний обязательно включает в себя оценку дрейфа параметров ЭРИ в ходе электротермотренировки. Также обязательно присутствует выборочный разрушающий физический анализ, включающий проверку на наличие влаги и посторонних частиц в подкорпусном пространстве. Испытания такого рода проводятся в испытательном техническом центре АО «ИТЦ-НПО ПМ» и некоторых других специализированных испытательно-тестовых центрах, поскольку в России отсутствуют предприятия электронной промышленности, имеющие налаженный технологический процесс, который бы удовлетворял повышенным требованиям космической отрасли. Таким образом, спецпартии являются совместным продуктом предприятия-изготовителя ЭРИ и АО «ИТЦ-НПО ПМ».

Выбор данной организации обусловлен тем, что системно данной работой в России занимается только ОАО «ИТЦ-НПО ПМ». Опыт других

организаций в попытках использовать идею спецпартий следует признать неудачным, поскольку существенную часть работы, проводимую в АО «ИТЦ-НПО ПМ», не проводил никто. На сегодня оформлено 30 решений о порядке изготовления и поставки спецпартий с различными заводами - изготовителями.

Особые требования космической отрасли требуют не только изменения состава испытаний и ужесточения требований к отдельным параметрам каждого ЭРИ. Как показывает опыт, дальнейшее ужесточение требований никак не коррелирует с повышением качества, приводя лишь к увеличению процента отбраковываемых деталей. Более важной является задача обеспечения стабильности производства путем контроля внутренней однородности поставляемых партий ЭРИ как с точки зрения отсутствия значительных флуктуаций в технологическом процессе, так и с точки зрения обеспечения однородности партий сырья, из которых ЭРИ изготовлены. Наличие таких требований требуют изменения существующего в специализированном тестовом центре бизнес-процесса тестирования партий. Требования контроля PIND и проведения комплекса электротермотренировочных испытаний для оценки дрейфа параметров электрорадиоизделий уже сейчас учтены в налаженном процессе тестирования ЭРИ в АО «ИТЦ НПО-ПМ». Требования обязательного контроля внутренней строгой однородности партий по условиям производства и исходному сырью являются новыми, и их невозможно реализовать без перестройки существующей схемы процессов тестирования с применением технологий интеллектуального анализа данных, чему и посвящена настоящая работа.

1 Теоретическая часть

1.1 Характеристика объекта и анализ процесса формирования специальных партий электрорадиоизделий

АО «ИПМ НПО-ПМ» (полное наименование: Акционерное общество «Испытательный технический центр НПО-ПМ») является дочерней структурой ОАО «Информационные спутниковые системы им.М.Ф.Решетнева», расположено в г.Железногорске Красноярского края. Это предприятие, специализирующее на комплектовании КА и других сложных систем с длительным САС и повышенными требованиями отказоустойчивости электронной компонентной базой.

Повышенные требования к отказоустойчивости применяемых в таких системах ЭРИ требуют выполнения дополнительных мероприятий по исключению допуска к монтажу в этой аппаратуре ненадежных, в том числе радиационно-нестойких ЭРИ. В ИТЦ-НПО ПМ была разработана и успешно применяется программно-аппаратурная система испытаний ЭКБ. Данная система позволяет выделять ЭРИ, отличающиеся повышенным дрейфом отдельных параметров в ходе электротермотренировки (что коррелирует с пониженной радиационной стойкостью), до установки их в узлы КА и других систем. Процент отбраковки в партиях ЭКБ при проведении испытаний для систем различных классов составляет около 10%. При этом надо отметить, что практически 100% поступающих ЭКБ, то есть все они полностью соответствуют как действующему ГОСТ, так и ТУ заводов-изготовителей.

Важную роль в обеспечении качества поставляемых ЭРИ играет организационная работа. Безусловно, важным является тщательный отбор потенциальных поставщиков с тем, чтобы исключить возможность попадания в критически важные узлы фальсифицированной продукции. Уже решенными задачами на этом пути являются также организация проведения входного контроля (ВК), дополнительных отбраковочных испытаний (ДОИ) и разрушающего физического анализа (РФА) ЭКБ [6].

Как уже было отмечено, на практике поставляемые партии ЭКБ могут быть неоднородными, собранными из нескольких производственных партий кремниевых пластин (т.е. могут фактически являться сборными партиями). Действующий ГОСТ никак не регламентирует данную ситуацию. Поэтому результаты проводимого РФА (как и других испытаний, если они проводятся выборочно) на всю поставленную предположительно сборную партию компонентов нельзя, если нет твердой уверенности в том, что вся партия изготовлена из одной партии кремниевых пластин или что разброс параметров различных кристалльных настолько мал, что позволяет сделать заключение об идентичности их химического состава и, как следствие, идентичности характеристик. Относительно небольшие флуктуации в производственном процессе могут заметно изменять характеристики чувствительности к радиационному воздействию и другие важные эксплуатационные характеристики ЭРИ

Анализ поставляемых партий ЭРИ на внутреннюю однородность особенно актуален для ЭКБ с высоким уровнем интеграции, где флуктуации технологического процесса могут привести к ошибкам в оценке качества. Поскольку поставщик, даже строго выполняя требования ГОСТ, не гарантирует однородности поставляемых партий продукции, эффективность проводимых выборочных испытаний, к которым неизбежно относится РФА, невелика. При существующей практике от каждой партии выбираются случайным образом 2-3 экземпляра ЭРИ, направляемые для прохождения РФА. Если поставляемая партия неоднородна, т.е. фактически состоит из нескольких партий, высока вероятность того, что некоторые из составляющих ее партий вообще не будут подвергнуты РФА, благодаря чему не исключено попадание в бортовую аппаратуру элементов с химическим составом сырья, не соответствующим требованиям условий эксплуатации.

Тем не менее, высочайшая эффективность уже существующей системы испытаний, применяемо в АО «ИТЦ – НПО ПМ» подтверждается тем, что, в отличие от КА, эксплуатируемых до 2000 года, когда данная система

испытаний еще не сложилась и многие КА, изготовленные в АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева» в первые же месяцы эксплуатации имели множественные замечания по качеству функционирования, многие более современные КА, комплектуемые с применением существующей системы испытаний, начиная с «Sesat», не обнаруживают существенных замечаний к ЭРИ в течение более 15 лет эксплуатации [1]. Тем не менее, данный процесс еще имеет весьма существенный резерв в плане повышения его эффективности.

1.2 Выявление процесса реинжиниринга и возможных методов

Процесс контроля поступающих партий ЭРИ, предназначенных для комплектации бортовых систем КА, приведен на рисунке 1.2.1.

Применяемые методы контроля основаны на контроле значений отдельных параметров каждого экземпляра ЭРИ. Процесс контроля основан на предположении, что возникающие в ходе эксплуатации отказы ЭРИ возникают из-за происходящих в них физико-химических процессов деградации, влияющих на измеряемые параметры.

Кроме того, применение системы отбраковочных испытаний обусловлено следующими моментами:

- применяемая при проведении испытаний форсированная нагрузка не должна сама по себе являться причиной возникновения в ЭРИ новых механизмов отказов (автомодельность);

- каждый из видов проводимых испытаний выявляет только определенные, характерные для этого вида испытаний виды отказов, форсировано запуская соответствующие типы деградационных явлений.

Как правило, подход к построению программы испытаний основывается на физической природе деградационных процессов и состоит в подборе ускоряющих факторов для этих процессов. Для этого требуется знание закономерностей возникновения и развития деградационных процессов, приводящих к отказам, и оценка влияния факторов на скорость

развития деградационного процесса. Виды и значения факторов, ускоряющих деградацию, определяются с учетом условий эксплуатации ЭРИ.

АО «ИТЦ – НПОПМ» в обязательном порядке включает в программу дополнительных отбраковочных испытаний следующие виды тестов:

- измерение электрических параметров оперделением пригодности к эксплуатации по ужесточенным нормам;
- электротермотренировку дальнейшим расчетом и анализом дрейфа параметров;
- определение наличия посторонних частиц в подкорпусном объеме (РФА);
- диагностические виды тестов, такие как контроль побитовых токов, токов потребления по шине питания в момент переключения, m , n – характеристик;
- иные виды выборочного разрушающего физического анализа.

Включение в программу испытаний выборочного РФА у потребителя ЭРИ позволяет существенно ограничить объем отбраковочных испытаний, направленных на выявление отказов, связанных с дефектами кремниевого сырья.

В заводских условиях (это в полной мере относится только к российским и белорусским производителям) в обязательном порядке выполняется сплошная (т.е. для 100% изделий) проверка герметичности и тест на воздействие изменения температуры среды. Контроль герметичности в процессе изготовления проводят после герметизации полупроводникового изделия до нанесения на корпус защитных покрытий [2], без применения растворяющих веществ, подобны хуайт-спириту, во избежание повреждения маркировки и защитных покрытий. Тест на герметичность с использованием масс-спектрометра также нельзя считать универсальным эффективным подходом: атомы гелия, растворенные в защитных покрытиях корпуса, что приводит к ложному обнаружению негерметичности. Дефекты изготовления

корпуса обнаруживаются тестом на воздействие температуры [3]. Такой вид испытаний считается разрушающим [4], поскольку, кроме выявления дефектов, такой тест способен сам по себе являться причиной новых дефектов.

Обратная связь со сферой эксплуатации ЭРИ практически отсутствует, вследствие чего оперативная информация о фактической надежности ЭРИ, прошедших отбраковочные испытания, недоступна. В связи с этим крайне сложно судить о достаточности или избыточности программ тестирования. Это влечет необходимость применения специальных методов прогнозирования надежности ЭКБ. Дополнительные испытания в специализированном тестовом центре, и в первую очередь – электротермотренировка с расчетом и анализом дрейфа, [5], повышают качество ЭРИ, идущих на комплектацию бортовой аппаратуры, за счет исключения ЭРИ со скрытыми дефектами и позволяют применять понижающий коэффициент $K_{итц}$, к базовой интенсивности отказов λ'_6 , [6, 7].

Выявление однородных партий электрорадиоизделий требует внедрения не просто информационных технологий, которые в ОАО «ИТЦ – НПОПМ» весьма активно применяются практически на всех участках работы, но и методов интеллектуального анализа данных. Применение этих методов позволит приблизиться к уровню качества, аналогичному уровню “Space” за счет гарантированной однородности тестируемых партий. Формирование выборок должно производиться из ЭКБ, прошедших ДОИ и РФА, так как после этих процедур отсеиваются экземпляры, не удовлетворяющие требованиям к аппаратуре, и результаты оценки не искажаются изделиями с дефектами.

Кластеризация – выявление однородных групп – ЭКБ важна с точки зрения обеспечения надежности и, еще большей степени, радиационной стойкости. Ионизирующие излучения как физический фактор космической среды во многом определяют срок активного существования космических аппаратов [6]. При оценке радиационной стойкости кластеров

ЭКБ однотипной продукции необходимо ориентироваться на требования ГОСТ РВ 20.39.414.2.

Современные методы кластерного анализа предлагают широкий выбор средств выявления разнородных по совокупности параметров групп. Наиболее распространенным из подобных методов является метод k-средних (k-means) [8]. Алгоритмы, реализующие данный метод, являются алгоритмами глобальной оптимизации и зависят от выбора начальных значений (усредненных параметров центров групп – кластеров). В то же время, метод выявления различных по параметрам групп изделий должен давать воспроизводимые результаты. Существенно повысить точность методов классификации позволяют алгоритмы, предложенные в [9, 10, 11], которые могут стать основой автоматизированной системы по выявлению различных по параметрам групп изделий.

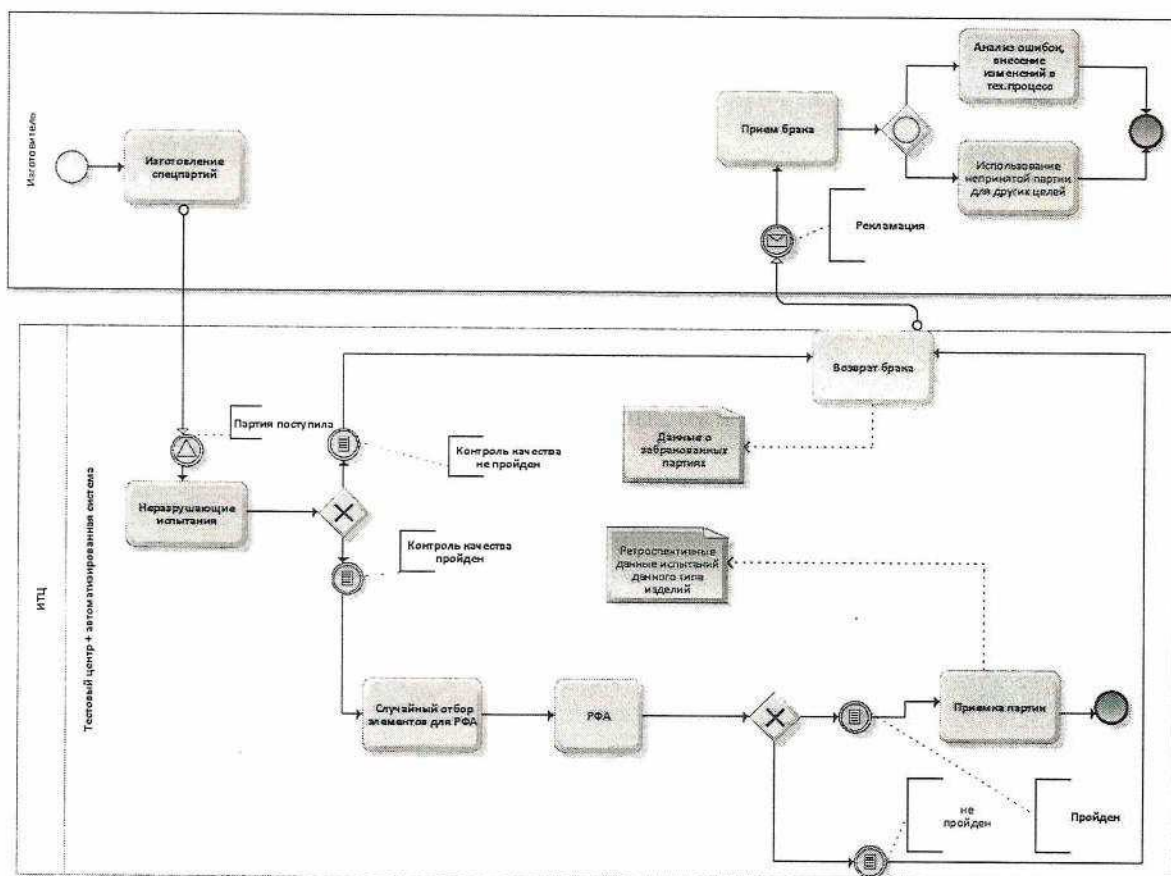


Рисунок 1.2.1 – Схема бизнес-процесса контроля партий ЭКБ космического применения

1.3 Подходы к реинжинирингу бизнес-процессов

Как правило, под реинжинирингом бизнес процессов понимают комплекс инженерно-консультационных услуг, направленных на перестройку деятельности организации с широким использованием инноваций. Согласно М. Хамлеру[12]: «Реинжиниринг — это фундаментальное переосмысление и радикальное перепроектирование деловых процессов для достижения резких, скачкообразных улучшений современных показателей деятельности компаний, таких как стоимость, качество, сервис и темпы».

Ключевыми характеристиками реинжиниринга в этом определении являются его фундаментальность, радикальность и скачкообразность. Сложность реинжиниринга для руководства большинства предприятий состоит в том, что топ-менеджеры, как и руководители среднего звена, как правило, ориентированы скорее на проекты, задачи, оргструктуры, но не на процессы.

К особенностям реинжиниринга в космической отрасли можно отнести то, что сами по себе космические предприятия являются инновационными. Кроме того, они, как правило, ориентированы на проекты (проект космического аппарата или, реже, серии аппаратов). В то же время вспомогательные (обеспечивающие) процессы в космической отрасли являются достаточно стабильными. К таким процессам можно отнести и комплектование космических аппаратов электронной компонентной базой. Отметим, что для космической отрасли данный процесс является обеспечивающим, в то время как для специализированного тестового центра данный процесс является основным.

Одной из ключевых характеристик реинжиниринга является его фундаментальность. М.Хамлер предполагает, что на начальной стадии необходимо определиться с ответами на следующие вопросы:

- почему предприятие занимается именно этой деятельностью?

- почему деятельность производится именно таким способом?

-какой компания видит себя в будущем?

Проработка этих вопросов требует переосмысления действующих правил и положений, в том числе принятые и утвержденные в виде действующих локальных актов, а также не являющиеся таковыми и действующими де-факто. В условиях космической отрасли, где любая операция строго регламентирована, а цена ошибки чрезвычайно высока, переосмысление даже отдельных частей бизнес-процессов требует осторожности.

Ответим на эти вопросы применительно к процессу формирования специальных партий на ОАО«ИТЦ – НПО ПМ».

Компания проводит контроль партий ЭКБ согласно схеме на рис.1.2.1, минуя решение задачи обеспечения однородности партий ЭКБ, поскольку, несмотря на высокий уровень автоматизации всех процессов и информатизации, не имеет инструментальных средств контроля однородности партий. Таким образом, все, что компания может сделать для повышения качества ЭКБ - выполнять контроль отдельных экземпляров ЭКБ по ужесточенным требованиям. Целью же компании является организация процесса формирования партий ЭКБ, близких по своим характеристикам к уровню качества Space, что невозможно без внедрения инструментов контроля однородности.

Радикальность предполагает изменение существующей системы с предложением совершенно новых способов выполнения работы. В качестве такого нового способа в настоящей диссертации предлагается применение методов интеллектуального анализа данных при обработке результатов неразрушающих тестовых испытаний электрорадиоизделий космического применения.

Скачкообразность реинжиниринга предполагает достижение принципиально новых результатов путем замены старых методов управления новыми. [12]. В нашем случае дальнейшее увеличение

количество выполняемых тестов над ЭКБ и ужесточение и без того чрезмерных требований к ним лишь повысит процент отбраковки, не влияя радикально на качество продукции. Таким образом, требуется внедрение принципиально нового процесса.

Главной целью при этом является гибкое и оперативное приспособление к изменениям запросов потребителей путем изменения стратегии, технологий и организации производства и управления с применением компьютерных технологий. Отметим, что уровень компьютеризации в космической отрасли весьма высок, и для достижения принципиально новых результатов требуются принципиально новые компьютерные технологии.

По степени воздействия на организационную структуру различают эволюционный и революционный реинжиниринг бизнес-процессов.

При революционном реинжиниринге перепроектируются все бизнес-процессы и происходит переориентация организации на новый вид бизнеса.

При эволюционном реинжиниринге оптимизируется внутренняя интеграция различных бизнес-процессов, но не вносятся существенные изменения в функционирование организации.

При реинжиниринге осуществляется либо перепроектирование, либо совершенствование бизнес-процессов. [13].

Задачи реинжиниринга аналогичны задачам инновации: освоение новшеств для обеспечения конкурентоспособности продукции и в конечном счете — выживаемости предприятия. Являясь дочерним обществом ОАО «ИСС» и выполняя основную часть заказов именно для своего головного предприятия, АО «ИТЦ – НПОПМ» ориентируется на потребности ОАО «ИСС», и одной из важнейших жизненно важных задач является обеспечение надежной ЭКБ. Без решения данной задачи неконкурентоспособной становится продукция головного предприятия, что ставит под вопрос существование дочернего предприятия.

Назначение каждого бизнес-процесса состоит в том, чтобы предложить потребителю продукцию (услугу), удовлетворяющую его по стоимости, сервису и качеству [14]. Одна из основных проблем космической отрасли, являющейся потребителем продукции специализированного тестового центра – несоответствие электронной компонентной базы запросу на длительное автономное безотказное функционирование в агрессивной среде космического пространства.

Проект реинжиниринга бизнеса обычно включает четыре этапа:

1. Разработка образа-видения (vision) будущей компании. На этом этапе компания строит картину того, как следует развивать бизнес, чтобы достичь стратегических целей;

2. Анализ существующего бизнеса — проводится исследование компании и составляются схемы ее работы в настоящий момент;

3. Разработка нового бизнеса — создаются новые и (или) изменяются прежние процессы и поддерживающая их информационная система, тестируются новые процессы;

4. Внедрение проекта нового бизнеса.

Первые два этапа проведены. Далее рассмотрим ключевой – третий этап.

2 Обеспечение надежности эксплуатации электрорадиоизделий

2.1 Специфические внешние воздействующие факторы при эксплуатации в особых условиях

Внешние факторы, воздействующие на электронную аппаратуру, определяются условиями среды, в которой ей приходится работать. Уровень и диапазон воздействия зависит от условий эксплуатации и конструктивного исполнения.

Для космических аппаратов (КА) вакуум, невесомость, механические нагрузки при выведении на орбиту, ионизирующие излучения являются условиями среды [15]:

Основными источниками ионизирующего воздействия на КА являются следующие [12, 13]:

1. Радиационные пояса Земли

1.1. Внутренний слой (3,5 тыс. км), основной фактор воздействия – протоны высоких энергий;

1.2. Внешний слой (15-25 тыс. км), основной фактор воздействия – электроны высоких энергий;

2. Космические лучи – высокоэнергетические потоки элементарных частиц и ядер атомов;

3. Ультрафиолетовое и рентгеновское излучения Солнца;

4. Корпускулярное излучение Солнца.

Продолжительное воздействие радиации оказывает негативное воздействие на материалы, используемые в конструкции КА. Превышение допустимой дозы облучения влечет за собой потерю материалами механических, электрических и оптических свойств. В частности, полупроводниковые приборы показывают существенное изменение электрофизических параметров.

Под действием ионизирующего облучения в структуре полупроводниковых приборов происходят процессы накопления заряда в

диэлектрике, образования ловушек на границе раздела «диэлектрик-полупроводник» и образования термостабильных радиационных центров (точечные дефекты, разупорядоченные области). Все это без сомнения влечет за собой изменение основных электрофизических параметров полупроводниковых приборов [14], таких как время жизни неосновных носителей заряда, подвижность, концентрация и скорость поверхностной рекомбинации носителей заряда.

Под воздействием нейтронов и протонов в полупроводниковых материалах происходит образование радиационных центров, которые являются эффективными центрами рассеивания и рекомбинации, что приводит к изменению времени жизни носителей заряда. Кроме того, при облучении удельное сопротивление кремния растет и стремится к значению, свойственному не легированному кремнию [14, 16]. Также нужно отметить, что образование под воздействием облучения заряженных радиационных центров в объеме полупроводникового материала и на границе раздела «диэлектрик – полупроводник» влечет за собой изменение подвижности и скорости поверхностной рекомбинации носителей заряда. К этому же эффекту приводит образование разупорядоченных областей кристаллической структуры под воздействием протонного и нейтронного излучения.

Облучение полупроводниковых приборов отдельными ионизирующими частицами вызывает эффекты двухразных видов:

Эффекты, оказываемые облучением на полупроводниковые приборы можно условно разделить дозовые и перемежаемые, то есть вызванные воздействием отдельных ионизирующих частиц [17]. Дозовые эффекты заключаются в медленном сдвиге параметров полупроводниковых приборов за пределы установленных норм из-за медленного накопления ионизационной дозы. Деградация полупроводников из-за накопления дозы облучения носит характер постепенного старения и относительно предсказуема в долговременной перспективе. Перемежаемые эффекты в

свою очередь вызываются случайным попаданием отдельных высокоэнергетических частиц в чувствительные микрообъемы полупроводниковых приборов, что влечет за собой, к примеру, переключение логического состояния ячейки памяти (обратимый эффект) или пробой окислов транзисторов одиночной частицей (необратимый разрушающий эффект).

Основными видами отказов интегральных микросхем при воздействии ионизирующих излучений являются [18]:

- отсутствие переключательных свойств (значение выходного напряжения остается постоянным во всем диапазоне изменения входного напряжения)
- уменьшение быстродействия (рост времени задержки распространения сигнала)
- увеличение токов утечки (и потребляемой мощности)
- снижение помехоустойчивости из-за уменьшения порога переключения.

2.2 Технологии обеспечения эксплуатационной надежности в особых условиях эксплуатации

На текущий момент космический аппарат может иметь срок активного существования (САС) от 10 до 15 лет, то есть может безотказно служить такой промежуток времени. Это позволяет существенно снизить количество необходимых для поддержания функциональности орбитальных группировок запусков космических аппаратов.

Безотказность функционирования является важным показателем надежности космического аппарата, поэтому об обеспечении надежности нельзя забывать ни на одном из этапов цикла существования аппарата – проектирование, разработка рабочей документации, наземная отработка опытных образцов, летные испытания и эксплуатация [19].

Этапом, на котором закладывается основа надежности космического аппарата является этап проектирования и разработки. Уже на этом этапе необходимо учитывать параметр вероятности безотказной работы (ВБР) бортовых систем космического аппарата в течение срока эксплуатации. ВБР должен соответствовать нормативному бюджету надежности. В таблице 2.2.1 отражены требования к показателю надежности различных систем космического аппарата со сроком активного существования 15 лет.

Таблица 2.2.1. Вероятность безотказной работы различных систем космического аппарата[19]

Элементы бортовой системы	ВБР*, не менее
Полезная нагрузка	0,91
Бортовой комплекс управления	0,958
Система ориентации и стабилизации	0,951
Система электропитания	0,962
Система коррекции	0,930
Система терморегулирования	0,992
Механические устройства солнечной батареи	0,9998
Механические устройства антенн	0,9999
Платформа в целом	0,8
КА в целом	0,72

*на конец САС 15,25 года.

Любой единичный отказ элемента или соединительной цепи, так же как несанкционированная выдача команд любой последовательности, не должны приводить к отказу аппаратуры. Одним из способов обеспечения этого требования является резервирование бортовых систем. Однако, данный метод имеет свои ограничения в плане развития и совершенствования. К примеру, увеличение кратности резерва при резервировании замещением позволяет повысить ВБР, но также ведет к

увеличению массы космического аппарата. Использование же функциональной избыточности вместо структурной (резервирование последовательной цепи приборов одним универсальным и т.д.) редко реализуемо технически.

Еще один метод повышения ВБР бортовой аппаратуры позволяет повысить отказоустойчивость аппаратуры путем отбраковки изделий со скрытыми дефектами, что достигается путем предварительного отбора электрорадиоизделий (ЭРИ) в испытательных технических центрах [20]. Кроме того, для прошедших отбор высоконадежных ЭРИ возможно использование сниженных коэффициентов для базовых интенсивностей отказов, что позволит уточнить методику резервирования (уменьшить кратность резервирования или подобрать его оптимальный вид).

Массив данных испытаний ЭРИ в испытательном центре может быть использован для формирования спецпартий электронных компонентов с повышенными требованиями к однородности характеристик в рамках партии. Такие спецпартии, используемые для комплектования бортовой аппаратуры, позволяют обезопасить комплектуемые системы от несогласованности работы узлов комплектуемых систем и отказов различного рода в системе.

На территории Российской Федерации отсутствуют специализированные производства электронной компонентной базы (ЭКБ), то есть ЭРИ для космической отрасли, а импорт компонентов необходимого качества из стран Западной Европы и США не представляется возможным. Более того, ЭКБ иностранного производства так же подвергается тестированию уровня качества и условий применения, так как на данный момент не существует каких-либо документов о гармонизации систем отечественной и импортной ЭКБ. Поэтому ЭРИ общего военного применения [21, 22] категорий качества «ВП» и «ОС» («ОСМ») должны подвергаться демонстрации возможности использования в аппаратуре космически хаппаратов (КА). Поэтому среди испытаний, которые проходят

ЭРИ, есть в том числе и симуляции воздействия факторов космического пространства.

В последние годы внедряется новый принцип формирования ЭКБ с помощью специализированных испытательных технических центров (ИТЦ) для того, чтобы исключить возможность попадания потенциально ненадежных ЭРИ в бортовую аппаратуру КА. В функции ИТЦ входят:

- операции сплошного входного контроля ЭРИ
- дополнительные отбраковочные испытания (ДОИ)
- диагностический неразрушающий контроль (ДНК)
- выборочный разрушающий физический анализ (РФА)

Задачей ДОИ и РНК является индивидуальная отбраковка элементов со скрытыми дефектами, в то время как РФА необходим для установления степени соответствия ЭРИ заданным требованиям.

Таким образом, все проводимые над ЭРИ испытания можно разделить на две группы:

- 1) сплошные испытания для всей партии элементов – ДОИ, ДНК.
- 2) выборочные испытания для нескольких элементов из партии – РФА.

Во многих из эксплуатируемых до 2000 года КА, которые были изготовлены АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева», имели некоторые недочеты в функционировании, которые выявлялись в первые месяцы эксплуатации в связи с отказом ЭРИ. Однако, на КА «Sesat», который эксплуатировался с 2000 года, не было выявлено серьезных недочетов в работе ЭРИ в течение более 15 лет непрерывного функционирования. Причиной тому является полное прохождение всеми электрорадиоизделиями аппарата процедур ДОИ, ДНК и РФА [23]. Другие системы, ЭРИ которых так же прошли комплексный набор испытаний (ДОИ+ДНК+РФА) [24, 25], так же показывают существенное снижение сбоев в работе, что позволяет сделать вывод об эффективности такого подхода к повышению отказоустойчивости

КА. Крайне важной так же является разработка методов исследования отказоустойчивости ЭРИ в условиях тепловой и радиационной нагрузки, а так же других внешних воздействий [26, 27, 28].

Вопросы обеспечения радиационной стойкости (РС) БА изложены в обширной литературе, например, в [29, 30, 31, 32], но она, в основном, посвящена применению ЭРИ в предположении, что стойкость любого ЭРИ из производственной партии известна и одинакова. На самом деле РС ЭРИ внутри производственной партии различна и зависит от содержащихся в каждом ЭРИ внутренних дефектов (дислокации, неконтролируемых примесей, других точечных дефектов) [33].

2.3 Представление задачи повышения вероятности безотказной работы бортовой аппаратуры в виде задачи k-средних

Именно РФА позволяет выявить наиболее существенные дефекты в отдельных партиях изделий, однако нельзя распространять результаты РФА на всю поступившую партию изделий без предварительного анализа, позволяющего подтвердить принадлежность ЭРИ к одной и той же партии и тот факт, что изделия были созданы из единой партии сырья. Все вышеперечисленное указывает на то, что выявление однородных производственных партий ЭРИ из тех, которые могли быть сборными, является приоритетной задачей при проведении испытаний, предшествующих РФА.

После проведения всех необходимых диагностических испытаний у каждого поступившего с завода-изготовителя экземпляра появляется набор соответственных числовых параметров, которые чаще всего являются показателями напряжения или силы тока в некоторой цепи при определенных условиях. Проанализировав полученные таким образом характеристики можно сделать вывод о том, в одинаковых или различных условиях эти изделия были произведены. Даже незначительные, лежащие в пределах нормы [22, 34], колебания сразу нескольких характеристик

позволяют сделать вывод о том, что исследуемые ЭРИ принадлежат разным производственным партиям.

Задача разбиения множества объектов на непересекающиеся подмножества производственных партий является задачей кластерного анализа, поэтому к ней был применен классический метод кластерного анализа [35] – метод k -средних. Краткое описание данного метода можно изложить следующим образом: на каждой итерации вычисляется центр для каждого кластера, полученного на предыдущем шаге, затем все объекты вновь разбиваются на группы в соответствии с тем, какой из новых центров оказался ближе.

Классический вариант метода k -средних часто не дает приемлемой точности, так как достигаемое значение целевой функции сильно зависит от начального выбора центров кластеров, поэтому были также применены проверенно эффективные поисковые методы оптимизации для того, чтобы выбрать центры кластеров оптимальным образом.

Задача сводится к нахождению k точек (центров, центроидов, главных точек) в d -мерном пространстве характеристик (здесь d – число измерений характеристик), таких, чтобы сумма расстояний от каждого из векторов данных до ближайшего к нему из k центров достигала минимума:

$$F(X_1, \dots, X_k) = \sum_{i=1}^n \min_{x \in \{x_1, \dots, x_k\}} \|A_i - X\|_2^2.$$

Задачу можно представить дискретной, если учесть, что норма отклонения той или иной характеристики не на много превышает доступную точность снятия показания. То есть допустимые значения характеристик отличаются на число, кратное точности измерительного прибора.

При решении практических задач автоматической группировки в пространстве характеристик в качестве меры расстояния чаще всего используется квадрат евклидовой метрики, поскольку в данном случае

нахождение центра каждого из кластеров является элементарной задачей, выполняемой за один шаг. Таким образом, вычислительная сложность алгоритма падает по сравнению с алгоритмом с евклидовой метрикой, при которой вычисление центра (медианы) [36] – итеративный процесс [37, 38]. Векторами данных при этом являются наборы характеристик, в нашем случае – данные результатов испытаний каждого из изделий, выраженные в виде набора числовых характеристик различной (в общем случае) размерности. Задача является задачей глобального поиска.

Задача средних может быть представлена как частный случай медианной задачи. В общем случае непрерывная медианная задача может быть сформулирована следующим образом:

$$\operatorname{arg\,min}_{X_1, \dots, X_p \in \mathbb{R}^d} \sum_{i=1}^N w_i \min_{j \in \{1, p\}} L(X_j, A_i).$$

Здесь $\{A_1, \dots, A_N\}$ – множество известных точек в d -мерном пространстве, $w_1 \dots w_N$ – их весовые коэффициенты (чаще всего равны 1), $X_1 \dots X_N$ – искомые точки, $L(\cdot)$ – некоторая функция расстояния. Задача является NP-трудной.

Помимо вышеописанных подходов применимы и другие методы решения подобных задач: в работах [39, 40, 41, 42] используется метод изменяющихся вероятностей, применимый только в качестве вспомогательного метода, в работе [43] предложен алгоритм муравьиных колоний и симуляции обжига, показывающий лишь ограниченную эффективность.

Рассматриваемые методы кластерного анализа требуют не только достаточно большой для космической отрасли точности, но и весьма высокой скорости работы, так как используются на производстве.

3. Бизнес-процесс с применением методов интеллектуального анализа данных

3.1 Анализ различных примеров ранее проведенного реинжиниринга в данной организации

Задача выявления однородных партий ЭРИ по своей сути является задачей кластеризации – обучения без учителя [11]. При этом исходными данными для этой задачи могут являться данные неразрушающего тестирования (ДОИ и электротермотренировки).

В задачах кластеризации (т.е. объединении объектов в однородные группы) элементы выборки используются на протяжении всей вычислительной процедуры. Описание постановок задач кластеризации дано в [44]. Сравнение некоторых методов дается в [45].

Для определения оптимальности разделения объектов на группы любым методом группировки объектов необходимо введение критерия. Часто в качестве такого критерия используют условие минимума или максимума какой-либо функции взаимной близости между элементами смеси. Выделяют три основных способа количественного выражения сходства элементов – коэффициентами правдоподобия для иерархической классификации, коэффициентами корреляции для задач факторного анализа и различными метрическими показателями расстояния. Обсуждение мер близости и вопросы выбора критериев качества приведены в [44].

Одной из простых и эффективных процедур локального поиска является ALA-процедура (ALA-алгоритм, стандартная процедура k-средних). Основная идея ALA-процедуры – изменяющееся размещение центров (пересчет центров групп вершин сети или векторов данных - кластеров) и распределение вершин векторов данных между центрами (отнесение к группе - кластеру, центр которого является ближайшим).

Алгоритм 3.1 ALA-процедура (чередующееся размещение-распределение) [11].

Дано: Множество $V = \{A_1, \dots, A_N\}$ с N векторами данных в d -мерном пространстве, $A_1 = \{a_{1,1}, \dots, a_{1,d}\}, \dots, A_N = \{a_{N,1}, \dots, a_{N,d}\}$, исходные данные: множество центров кластеров $X_1 = \{x_{1,1}, \dots, x_{1,d}\}, \dots, X_p = \{x_{p,1}, \dots, x_{p,d}\}$.

1: Для каждого вектора найти ближайший центр:

$$C_i = \underset{j=1, \dots, p}{\operatorname{arg\,min}} L(A_i, X_j) \forall i = \overline{1, N}.$$

2: Для каждого кластера $C_j^{clust} = \{i \in \overline{1, N} \vee C_i = j\}$, пересчитать его центр X_j . В случае использования евклидовой (l_2) метрики может быть применена процедура Вайсфелда либо его модификация. В случае квадратичной Евклидовой (l_2^2) метрики, решение (3.2) используется для получения очередного местоположения центра (в данном случае называемого центроидом).

3: Повторять с шага 1, если состав хотя бы одногочластера изменился.

4: В противном случае ОСТАНОВ. X_1, \dots, X_p являются локальными минимумами.

За исключением особых случаев, задачи k -средних и p -медианная, как и задача разделения смеси распределений, являются NP-трудными, требующими глобального поиска. Результат ALA-процедуры зависит от выбора начальных центров кластеров и это является проблемой с точки зрения обеспечения воспроизводимости результатов вычислений.

В случае квадратичных евклидовых расстояний и векторов данных с равными весовыми коэффициентами поиск нового центра кластера $X_j = (x_{j,1}, \dots, x_{j,d})$ на Шаге 1 ALA-процедуры представляет собой простейшую задачу и осуществляется неитеративно:

$$x_{j,k} = \sum_{i \in C_j^{clust}} a_{i,k} / |C_j^{clust}| \forall k = \overline{1, d}.$$

Связанные с этим низкие вычислительные затраты во многом обуславливают популярность модели k -средних. В случае евклидовой метрики новый центр является решением «классической» задачи Вебера [46], которая может быть решена градиентным спуском – процедурой Вайсфелда или более совершенными ее модификациями [46].

Для снижения вычислительных затрат на Шаге 2 ALA-процедуры алгоритм не пересчитывает центры кластеров, состав которых не был изменен на Шаге 1. Для евклидовой метрики l_2 это позволяет избежать применения процедуры Вайсфелда или аналогичной процедуры градиентного спуска в каждом кластере при каждой итерации. В случае задачи k -средних в пространстве небольшой размерности данное замечание можно не учитывать.

ALA-процедура – это процедура локального поиска, соответственно, результаты ее зависят от начальных данных. В простейшем случае векторы данных p могут быть случайным образом выбраны в качестве начальных центров.

Отметим, что такая процедура является крайне неустойчивой к выбору начального решения. Гораздо более стабильные результаты достигаются с применением эволюционных алгоритмов [11].

3.2 Эволюционные алгоритмы

Во многих работах [47, 48], посвященных автоматической группировки в непрерывном пространстве, для улучшения результатов локального поиска предлагается использование генетических алгоритмов (ГА).

В 2003 году в работе [49] для решения p -медианной задачи на сети был предложен алгоритм с особым способом рекомбинации, названным агломеративной эвристикой. Адаптация этого алгоритма для непрерывных задач была разработана в 2011 году [48], для создания начальных решений для ALA-процедуры использовалась жадная агломеративная эвристика и

другие рекомбинативные эвристики. Нужно отметить, что из-за многократной генерации начальных решений на каждой итерации, при больших p алгоритм работает очень медленно. В работах [50] и [51] были предложены более быстрые, но менее точные генетические алгоритмы с использованием рекомбинации подмножеств центров фиксированной мощности.

Жадная агломеративная эвристика из трёх вложенных циклов была предложена в работе [52]. В эвристику входят (см. Рисунок 3.2.1) итерации стратегии глобального поиска, собственно жадная эвристическая процедура и анализ результатов. Выбранные два «родительских» решения объединяются, образуя новое промежуточное решение. Элементы решения исключаются по одному (исключается элемент, дающий наименьший прирост целевой функции) из промежуточного решения, пока оно не станет допустимым, т.е. пока число элементов решения не снизится до p . В случае непрерывной задачи алгоритм производит начальное решение для ALA-процедуры, выполняемой на каждом этапе, чтобы оценить результат устранения из промежуточного решения каждого элемента.

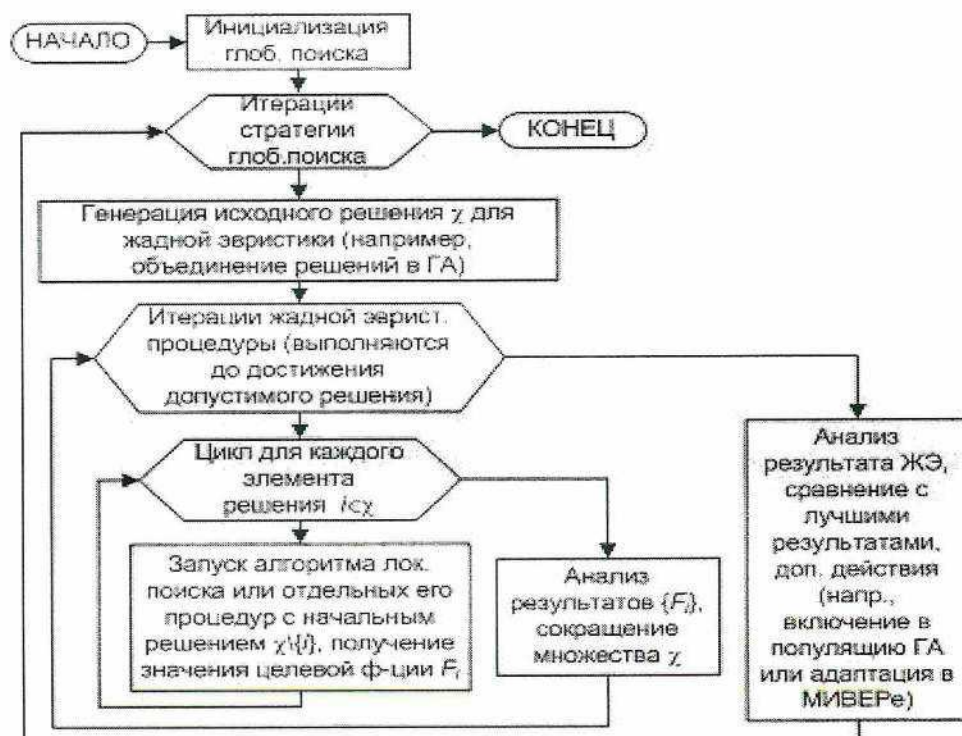


Рисунок 3.2.1 Общая схема алгоритма метода жадных эвристик [52]

Оригинальный алгоритм Альпа [49] использует в «хромосомах» (промежуточных решениях) генетического алгоритма целочисленный алфавит (числа – номера вершин сети). В ГА, предложенном в [52], используется кодирование элементов решения с помощью вещественных чисел. Элементами «хромосом» являются координаты центров или центроидов промежуточных решений. Мутации в алгоритме не используются.

Для решения серии задач жадная эвристика была модифицирована в [53]: при исключении элементов из промежуточного решения после достижения p элементов процесс продолжается, и для каждого числа кластеров вплоть до 2 фиксируются наилучшие значения целевой функции. Таким образом, можно получить решения серии задач с $p = \overline{2, p_{max}}$. При этом максимальное предполагаемое значение числа кластеров p_{max} все же должно быть известно.

В случае непрерывных p -медианных задач с большим числом кластеров были получены хорошие результаты для задач. Однако при уменьшении числа кластеров результаты метода ухудшаются по сравнению с другими методами. Поэтому, авторы предлагают останавливать процесс исключения элементов не при $p=2$, а раньше, примерно на значении $p=p_{max}/3$. Для получения остальных решений предлагается перезапуск алгоритма с меньшим значением p_{max} .

Эволюционные алгоритмы, включая генетические, показывают высокую эффективность при решении задач автоматической группировки на основе модели k -средних и аналогичных. Сложности кодирования решений, традиционно представляемых в классических генетических алгоритмах L -битными строками, в алгоритмах метода жадных эвристик решены применением так называемого генетического алгоритма с вещественным алфавитом, в котором «особи» - промежуточные решения – представлены непосредственно множествами точек в пространстве R^d . Аналогичный подход с кодированием промежуточных решений в виде множеств векторов

вещественных чисел применялся и при построении генетического алгоритма для решения задач разделения смесей распределений. В нашем алгоритме промежуточные решения представлены парами множеств $D_l = \{N(\mu_{l,i}, \sigma_{l,i}^2 I_n), l = \overline{1, k}\}, l = \overline{1, N_{POP}}$ и $W_l = \{\alpha_{l,i} = 1/k, i = \overline{1, k}\}$, где N_{POP} – размер популяции алгоритма, т.е. количество «особей» - промежуточных решений, которым он оперирует.

Алгоритм 3.2 Генетический алгоритм с жадной эвристикой (дано общее описание трех вариантов, названных GA-FULL, GA-ONE, GA-RAND).
Дано: Начальный размер популяции N_{POP} .

1. Сгенерировать случайным образом N_{POP} начальных решений, представленных множествами распределений $D_l = \{N(\mu_{l,i}, \sigma_{l,i}^2 I_n), l = \overline{1, k}\}, l = \overline{1, N_{POP}}$ и соответствующими множествами весовых коэффициентов $W_l = \{\alpha_{l,i} = 1/k, i = \overline{1, k}\}$. Начальные значения среднеквадратичных отклонений устанавливаются равными для всех кластеров и вычисляются для всей выборки: $\sigma_i^2 = \frac{1}{d} \sum_{x \in S} \|x - \bar{x}\|^2$. Значения $\mu_{l,i}$ устанавливаются равными координатам случайно выбранного вектора данных.

Для каждого из начальных решений запускается Алгоритм 1.1, полученные значения целевой функции сохраняются в переменных $f_1, \dots, f_{N_{POP}}$. Присвоить $N_{iter} = 0$;

2. Проверка условий останова (например, максимальное время работы). Если условия достигнуты, возвращается решение, которому соответствует наилучшее (наибольшее) значение целевой функции $f_1, \dots, f_{N_{POP}}$.

3. Присвоить $N_{iter} = N_{iter} + 1$; $N_{POP} = \max\{N_{POP}, \lceil \sqrt{1 + N_{iter}} \rceil + 2\}$; если N_{POP} изменилось, то инициализировать новое решение (см. Шаг 1).

4. Выбрать случайным образом два индекса $k_1, k_2 \in \{\overline{1, N}\}, k_1 \neq k_2$. Для пары решений, представленных множествами D_{k_1}, D_{k_2} и W_{k_1}, W_{k_2} , выполнить

Алгоритм2.4 (в варианте алгоритма GA-FULL – генетический алгоритм с жадной эвристикой с полным объединением), Алгоритм2.3 (в варианте алгоритма GA-ONE – генетический алгоритм с жадной эвристикой с частичным объединением), либо выбрать один из двух этих алгоритмов случайным образом (вариант алгоритма GA-RAND).

5. Выбрать индекс $k_3 \in \overline{\{1, N_{POP}\}}$. Используем простое турнирное замещение: случайным образом выбираем $k_4, k_5 \in \overline{\{1, N_{POP}\}}$, если $f_{k_4} < f_{k_5}$ то $k_3 = k_4$, иначе $k_3 = k_5$.

6. Заменяем множества D_{k_3}, W_{k_3} и соответствующее значение целевой функции f_{k_3} новыми значениями, полученными на Шаге 4. Перейти к Шагу 2.

Разбиение эталонной сборной партии ЭКБ, состоящей из двух эталонных, с применением данных методов дает весьма точные результаты (Таблица 3.2.1).

Таблица 3.2.1. Результаты разбиения экзаменационных выборок ИС

Показатель	ИС	ИС
	140УД25АС1ВК	140УД17АВК
Партия №1	30	26
Партия №2	26	24
Всего	56	50
По результатам работы алгоритма классификации		
Партия №1	27	26
Партия №2	26	24
Неклассифицированные	3 (8,9%)	0 (0%)
Ошибочные	0	0

Таким образом, методы, предложенные в [11], являются достаточными для решения нашей задачи выявления однородных партий ЭРИ, которая, в

свою очередь, является необходимым этапом процесса формирования специальных партий ЭКБ. Рассмотрим далее весь процесс формирования специальной партии.

3.3 Новый бизнес-процесс с применением интеллектуального анализа данных

На рисунке 3.3.1 приведена обновленная BPMN-схема принятия решения о приемке спецпартии. Схема обновлена в части этапа выделения однородных партий методом разделения смеси распределений.

Основным отличием от схемы на рис.3.3.1 является построение модели однородной партии ЭРИ на основе данных проведенных неразрушающих тестов, реализация этой модели и выявление однородных партий с дальнейшим анализом результатов. Как видно из схемы, на РФА по отдельности отправляются выбранные экземпляры из каждой однородной партии-кластера, что обеспечивает полный PBND-контроль и другие виды разрушающего физического анализа образцов из всех фактических производственных партий и приближает партии на выходе процесса к уровню качества Spase.

Кроме того, такой подход позволяет обеспечить лицо, принимающее решения о приемке партий и о направлении их экземпляров на разрушающий физический анализ, дополнительной информацией.

Отметим, что схема на рисунке 3.3.1 не требует внедрения никаких дополнительных видов контроля каждого из экземпляров ЭРИ: данные неразрушающего тестирования являются не только достаточными, но и избыточными для выявления однородных партий методами интеллектуального анализа данных. При этом существенно меняется порядок выполнения задач по контролю ЭРИ. В новой схеме меняется порядок отбора элементов для проведения РФА. Предусмотрен случай, когда для принятия решений об однородности/неоднородности партии недостаточно данных – в этом случае вся информация предоставляется

заказчику, который принимает решение, принимать ли такую партию, которая в этом случае заведомо не соответствует уровню качества Spase. При этом качество продукции на выходе остается прежним – как было до перестройки рассматриваемого процесса, но такое положение вещей теперь является исключительной ситуацией, а ненормальным течением процесса.

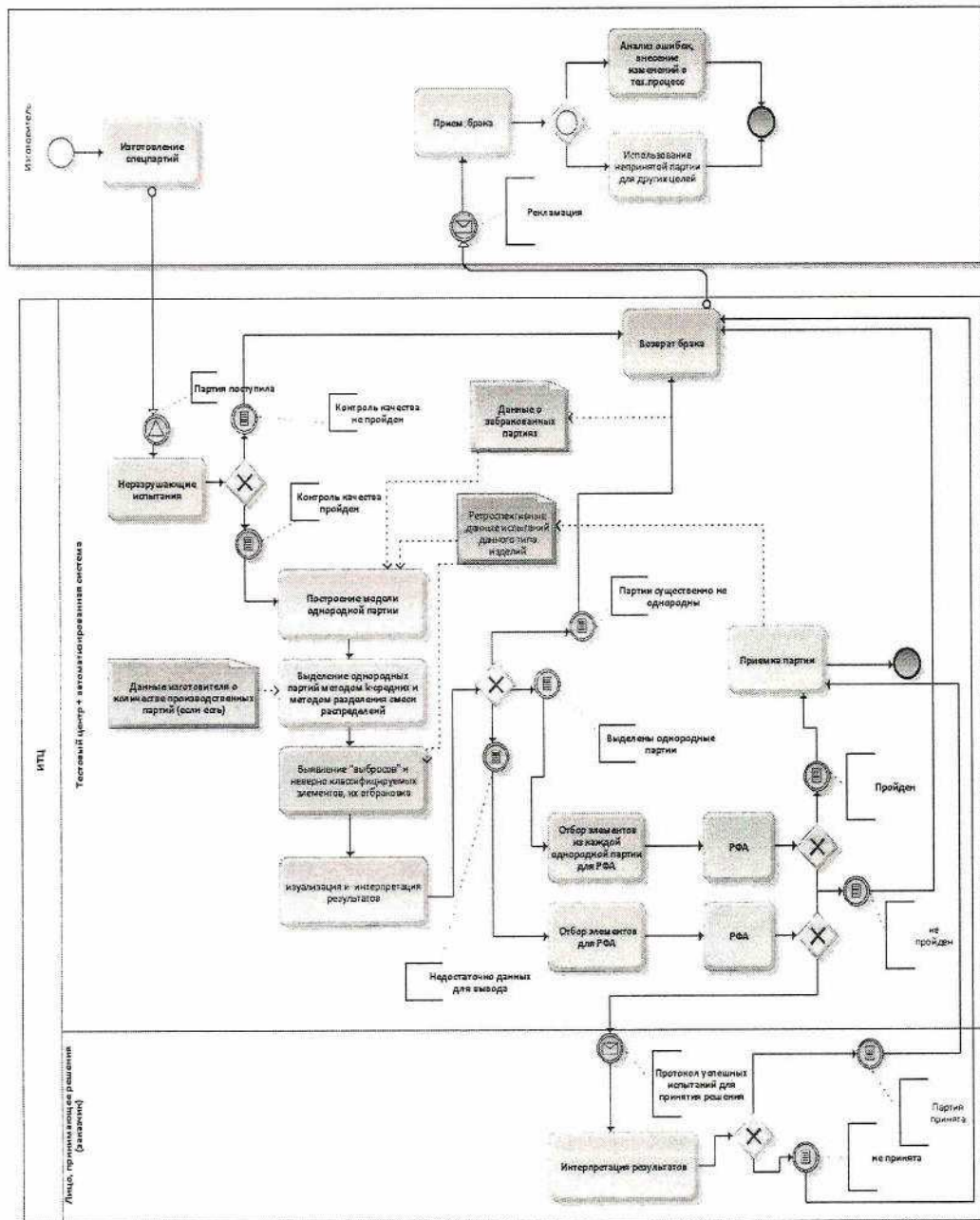


Рисунок 3.3.1 – Обновленная BPMN-схема процесса формирования спецпартии электронной компонентной космического применения (ЭКБ)

4. Расширенное применение метода жадных эвристик для повышения качества управления процессами

4.1 Обеспечение эффективности производственного процесса

В производственном цикле современного промышленного предприятия наряду с заказами массового или крупносерийного производства имеют место и заказы мелкосерийного и даже единичного характера, носящие нерегулярный характер. Поэтому задача оптимизации загрузки ресурсов предприятия является весьма актуальной.

Основой обеспечения эффективности производственного предприятия является процедура календарного планирования производства, включающая в себя расчет производственного расписания [54]. При оперативно-календарном планировании [55] литейных и других аналогичных производств с ограниченной номенклатурой выпускаемой продукции и непрерывным характером производственного цикла сложно определить ритм (такт) выпуска продукции, каждая производственная линия может выпускать одновременно только один вид продукции, а перенастройки с выпуска одного вида продукции на другой требуют значительных затрат. В этой связи одной из основных целей оперативного планирования становится составление производственного графика согласно заданным объемам и срокам выпуска каждой номенклатурной позиции с минимальным числом перенастроек оборудования.

Нерегулярность заказов и временные затраты перенастройки оборудования под конкретный заказ вызывают необходимость непрерывного процесса составления плана загрузки оборудования предприятия. Это можно рассмотреть на примере литейного производства.

Каждое литейное отделение (производственная линия) имеет специализацию по видам продукции. Существует план по выполнению определенного количества заказов к заданному сроку. Каждый заказ характеризуется видом продукции, объемом и сроком выполнения. Работа предприятия осуществляется в три смены. Перенастройка оборудования на

другой вид продукции занимает одну смену, в течение перенастройки продукция не выпускается.

Необходимо сформировать график загрузки производственных мощностей так, чтобы выполнить все заказы при минимальном числе перенастроек оборудования. При этом должна быть обеспечена минимальная общая загрузка производственного комплекса в течение каждых суток составляемого производственного графика. Также необходимо учитывать жесткие требования для затрат временных и вычислительных ресурсов на расчет.

Подобную задачу можно решать, как задачу размещения на сети, а именно как p -медианную задачу.

Задачи размещения – класс задач оптимизации, в которых основными параметрами выступают местоположения точек в некотором пространстве (непрерывном или дискретном) и расстояния между ними [54]. Задачи находят непосредственное применение при размещении производств, сетей и т.п., а также при решении задач кластерного анализа, распознавания образов.

В p -медианной задаче требуется найти p узлов сети таким образом, чтобы сумма взвешенных расстояний от каждого из узлов сети до ближайшего из выбранных узлов была минимальной (каждому из ребер сети поставлено в соответствие число – его длина). Данная задача является одной из основных классических задач дискретной теории размещения.

В общем случае задача не может быть решена за полиномиальное время, исключение составляет задача на деревьях (сетях без циклов) [55]. Использование релаксации Лагранжа [56] позволяет получать приближенные решения для сетей с числом узлов до 3795. Эвристический алгоритм, предложенный в [57] позволяет решать задачи с числом узлов сети до 10000.

В [57] предложена модификация генетического алгоритма с жадной эвристикой, изначально разработанного в [58]. В этой работе задача

планирования производства поставлена как задача размещения на сети. Для ее решения предложен [59] генетический алгоритм с жадной эвристикой для p -медианной задачи. В [60, 61] рассматриваемая задача решается как задача псевдо-булевой оптимизации (задача с булевыми переменными). Применена следующая модель. Пусть имеется K производственных линий для выпуска L видов продукции. Производительность всех производственных линий одинакова, для заданного l -го вида продукции линия может произвести V_l единиц продукции за смену при трехсменах в сутки.

Для некоторых производственных линий доступен лишь ограниченный ассортимент продукции. Вводится матрица Z булевых констант z_{kl} , $k=1\dots K$, $l=1\dots L$, равных 1, если k -я линия может производить l -й вид продукции и 0 — в противном случае. Для каждого вида продукции установлен производственный план в объеме W_l единиц ($l=1\dots L$), который должен быть выполнен за T_l суток. Кроме того, установлена минимальная суммарная загруженность производственного комплекса в сутки в объеме W_{min} единиц продукции.

Виды продукции объединены в C классов M_c , $c = 1\dots C$. Смена класса продукции на производственной линии требует технологических операций по перенастройке продолжительностью в одну смену, в ходе которых выпуск продукции невозможен. Возможность безостановочной смены продукции с вида l на вид r описывается симметричной булевой матрицей $C_{l,r}$ размерности $L \times L$: значение $C_{l,r} = 1$ означает необходимость останова производственной линии при сменепродукции с вида l на вид r .

Вводятся булевы переменные $y_{i,k,l}$, которые принимают значение 1, если график предусматривает выпуск l -го вида продукции k -й производственной линией на i -е сутки.

График на I суток требуется составить так, чтобы при условии выполнения плана выпуска по видам продукции и срокам, с учетом требования минимальной загруженности, требовалось минимальное число

изменений видов продукции. Таким образом, в булевых переменных задача формулируется следующим образом:

$$\min \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L y_{i,k,l} (1 - y_{(i-1),k,l}); \quad (4.1)$$

$$V_l \sum_{i=1}^{T_l} \sum_{k=1}^K (3 \cdot y_{i,k,l} - y_{i,k,l} \cdot (1 - y_{(i-1),k,l})) \cdot \sum_{r=1}^L y_{(i-1),k,r} C_{r,l} \geq W_l \quad \forall l = \overline{1, L}; \quad (4.2)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L V_l (3 \cdot y_{i,k,l} - y_{i,k,l} \cdot (1 - y_{(i-1),k,l})) \cdot \sum_{r=1}^L y_{(i-1),k,r} C_{r,l} \geq W_{\min} \quad \forall i = \overline{1, I}; \quad (4.3)$$

$$\sum_{l=1}^L y_{i,k,l} \leq 1 \quad \forall i = \overline{1, I}, k = \overline{1, K}; \quad (4.4)$$

$$y_{i,k,l} \leq z_{k,l} \quad \forall i = \overline{1, I}, k = \overline{1, K}, l = \overline{1, L}; \quad (4.5)$$

$$y_{i,k,l} \in \{0, 1\} \quad \forall i = \overline{1, I}, k = \overline{1, K}, l = \overline{1, L}. \quad (4.6)$$

Приведенная выше модель описывает ситуацию, когда все виды продукции относятся к разным классам, и для любой замены продукции требуется одна смена. Для учета возможности замены выпускаемой продукции без остановки производства в выражения (4.2) и (4.3) требуется добавить дополнительный множитель $L y_{(i-1),k,r} C_{r,l}$.

Модель также предполагает, что в начальный момент производство на всех линиях остановлено ($y_{0,k,l} = 0 \quad \forall k = \overline{1, K}, l = \overline{1, L}$). В реальных задачах в условиях регулярного планирования непрерывного производства такая ситуация невозможна. Любая производственная линия в любой момент времени настроена на выпуск какой-либо продукции, за исключением случаев аварий, ремонтов и прочих ситуаций, когда данная линия исключается из производственного графика. Следовательно, константы $y_{0,k,l}$ не равны нулю.

В дополнение к переменным $y_{i,k,l}$ авторами [60] введены дополнительные переменные $x_{i,k,l}$:

$$x_{i,k,l} = y_{i,k,l}(1 - y_{(i-1),k,l}) \forall i = \overline{1, I}, k = \overline{1, K}, l = \overline{1, L}.$$

Значения переменных $y_{i,k,l}$ могут быть определены из значений $x_{i,k,l}$ с помощью специального алгоритма:

$$y_{i,k,l} = \begin{cases} x_{i,k,l}, & \sum_{r=1}^L x_{i,k,r} = 0, \\ y_{(i-1),k,l}, & \sum_{r=1}^L x_{i,k,r} > 0, \end{cases} \forall i = \overline{1, I}, k = \overline{1, K}, l = \overline{1, L}.$$

Математически p -медианная задача [62] представляет собой следующее. Есть некоторая сеть (связный граф) $G = (V, E)$, где V множество узлов (вершин), E множество ребер $E_{i,j}$, $i, j \in V$ соединяющих их попарно. Для каждого ребра определены: его номер, длина $L_{i,j}$, мера расстояния $D(i, j)$ между любой парой узлов i and j определена как минимальный путь между этими узлами (под длиной пути между двумя узлами сети будем понимать сумму длин ребер этого пути). Цель задачи – выбрать множество узлов сети (вершин графа) S с мощностью p :

$$\arg \min_{S \subset V, |S|=p} f_G(S) = \arg \min_{S \subset V, |S|=p} \sum_{i \in V} \min_{j \in S} D(i, j). \quad (4.7)$$

Представим производственный график как трехмерную решетку в дискретных координатах с осями i, k, l . отложим дни по оси i , производственные линии по оси k , виды продукции по оси l .

Каждый узел такой сети описывается тремя координатами (i, k, l) . Матрица булевых координат $[x_{i,k,l}, i = \overline{1, I}, k = \overline{1, K}, l = \overline{1, L}]$ связана с множеством узлов сети-решетки, которая описывает график:

$$x_{i,k,l} = \begin{cases} 1, & (i, k, l) \in \chi, \\ 0, & (i, k, l) \notin \chi. \end{cases}$$

Задача состоит в выборе множества χ узлов сети (вершин графа) с минимальной мощностью и удовлетворяющего условиям (4.4) – (4.6). Выбранному узлу соответствует значение булевой переменной $x_{i,k,l} = 1$. Таким образом, задача состоит в выборе минимально мощного множества точек переключения в графике производственного планирования.

На практике в настоящее время процесс планирования загрузки производственных мощностей сводится к оценке возможности включения поступающих заявок на выпуск и отгрузку продукции в имеющийся производственный план. Если невозможно выполнить заявку в оговоренный в ней срок, заявка либо направляется на дополнительное согласование, по результатам которого либо отодвигается срок выполнения заявки, либо заявка отклоняется. При этом не гарантируется ни максимальная полезная загрузка производственных мощностей, ни минимальное количество сьематратных операций переключения классов выпускаемой продукции. Схематично процесс планирования представлен на рисунке 4.1.1. Фактически оптимальность выражения (4.1) не достигается, число переключений классов выпускаемой продукции не контролируется.

Достижение оптимальных значений выражения (4.1) с учетом ограничений (4.2)-(4.6) – NP-трудная задача дискретной оптимизации. Достижение оптимальных значений практически невозможно в силу высокой размерности задачи и экспоненциальной зависимости вычислительной сложности от этой размерности. Достижение же приемлемых субоптимальных значений – задача, которую можно успешно решать, например, с применением малых алгоритмов метода жадных эвристик [63]. Рассмотрим процесс адаптации задачи для решения алгоритмами данного семейства.

Для экономии оперативной памяти, снижения времени доступа и упрощения вычислений имеет смысл перейти к целочисленным переменным, учитывая условие (4.4).

Введем переменные $y'_{i,k}$ принимающие значения от 0 до L . Значение $y'_{i,k} = l$ означает производство l -го типа продукции на k -ой производственной линии в i -ый день ($y'_{i,k} = 0$ означает остановку

производства). Далее, $y'_{0,k}, k = \overline{1, K}$ целочисленные константы в диапазоне от 0 до L , показывающие тип выпускаемой продукции, на который настроена каждая из K производственных линий в начальный момент времени. Таким же образом введем дополнительные переменные $x'_{i,k}$:

$$x'_{i,k} = \begin{cases} y'_{i,k}, & y'_{i,k} \neq y'_{(i-1),k}, \\ 0, & y'_{i,k} = y'_{(i-1),k}, \end{cases} \quad \forall i = \overline{1, I}, k = \overline{1, K}.$$

Значения $y'_{i,k}$ могут быть получены из $x'_{i,k}$:

$$y'_{i,k} = \begin{cases} y'_{(i-1),k}, & x'_{i,k} = 0, \\ x'_{i,k}, & x'_{i,k} \neq 0 \end{cases} \quad \forall i = \overline{1, I}, k = \overline{1, K}. \quad (4.8)$$

Значения исходных булевых переменных могут быть получены:

$$x_{i,k,l} = \begin{cases} 1, & x'_{i,k} = l, \\ 0, & x'_{i,k} \neq l, \end{cases} \quad \forall i = \overline{1, I}, k = \overline{1, K}, l = \overline{1, L}, \quad (4.9)$$

$$y_{i,k,l} = \begin{cases} 1, & y'_{i,k} = l, \\ 0, & y'_{i,k} \neq l, \end{cases} \quad \forall i = \overline{1, I}, k = \overline{1, K}, l = \overline{1, L}. \quad (4.10)$$

При этом условие (4.4) становится ненужным, а условия (4.2)–(4.3) могут быть записаны в более удобной форме:

$$V_l \sum_{i=1}^{T_l} \sum_{k=1}^K y_{i,k,l} (3 - C'_{y'_{(i-1),k}, y'_{i,k}}) \geq W_l \quad \forall l = \overline{1, L}, \quad (4.11)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L V'_l (3 - C'_{y'_{(i-1),k}, y'_{i,k}}) \geq W_{min} \quad \forall i = \overline{1, I}. \quad (4.12)$$

Здесь $C'_{l,r}$ это матрица с булевыми значениями $C_{l,r}$, дополненная строкой и столбцом с нулевыми индексами ($l, r \in \{\overline{0, L}\}$):

$$C'_{l,r} = \begin{cases} C_{l,r}, & l > 0, r > 0, \\ 0, & r = 0, \\ 1, & l = 0, r > 0, \end{cases}$$

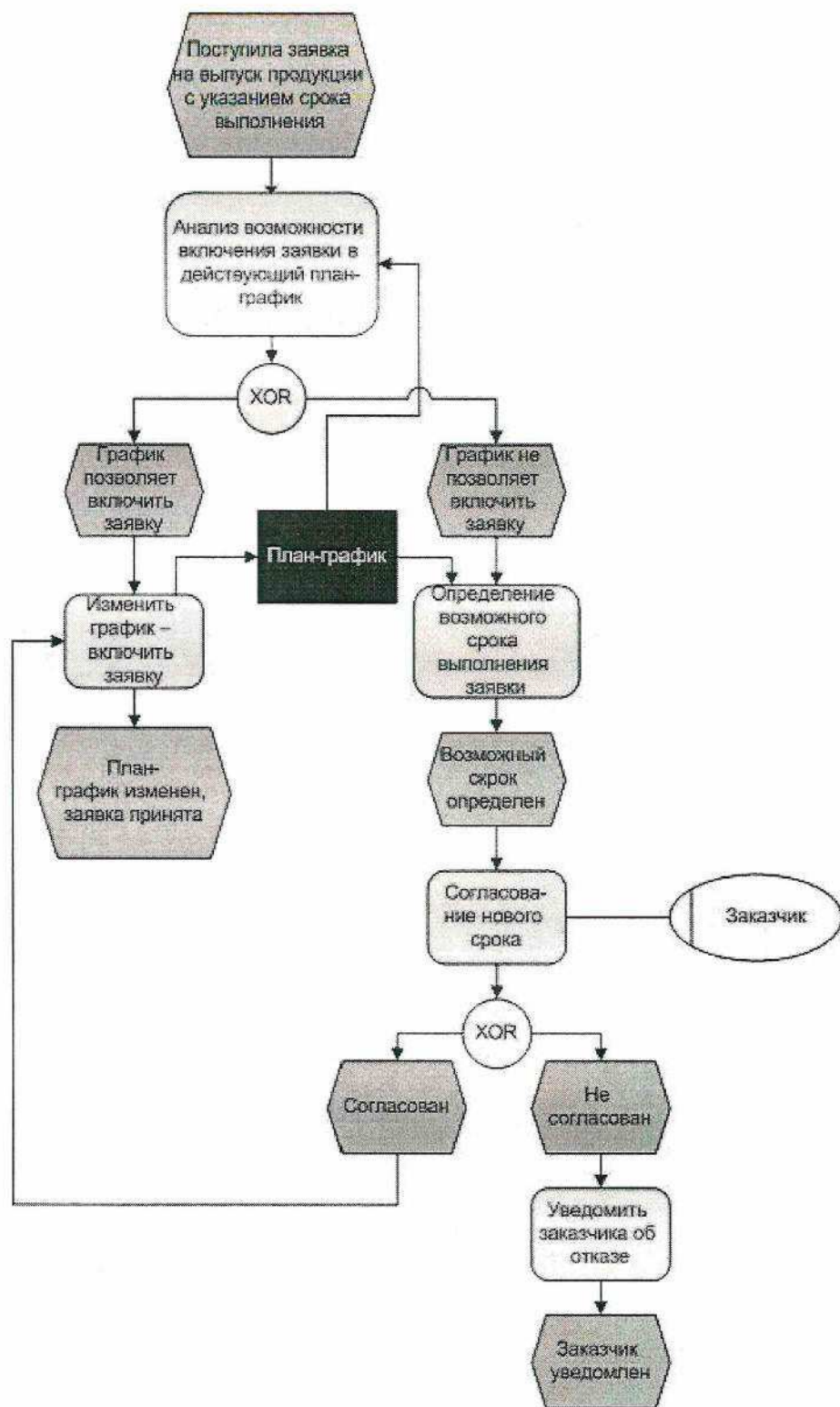


Рисунок 4.1.1 – EPC-модель действующего процесса рассмотрения заявки от делопланирования

V' вектор норм производства за смену V с дополнительным нулевым элементом:

$$V'_l = \begin{cases} V_l, & l > 0 \\ 0, & l = 0. \end{cases}$$

Предложенный генетический алгоритм не сохраняет значения булевых переменных $x_{i,k,l}$ и $y_{i,k,l}$.

При необходимости они определяются "на лету", согласно (4.9) и (4.10).

Согласно нотации принятой для r -медианных задач, промежуточные решения представлены как множества выбранных узлов (медиан) сети.

Эти множества также удобно представлять как матрицы целочисленных переменных.

Таким образом, включение узла (i, k, l) в множество сводится к присвоению элементу матрицы $x'_{i,k}$ значения l , а исключение к присвоению нулевого значения.

4.2. Алгоритм метода жадных эвристик для задачи на сети

Идея генетического алгоритма с жадной эвристикой для r -медианной задачи на сети [Д4Д] состоит в следующем. Есть некоторый массив ("популяция") решений задачи, каждое из которых представляет собой множество из r выбранных узлов сети. Необходимо случайным образом выбрать два решения (родительские особи). Множество узлов, в которое объединяются родительские множества, рассматривается как промежуточное решение. Затем, мы по одному исключаем узлы, так чтобы прирост целевой функции (4.7) был минимален, до тех пор, пока не останется r узлов.

Алгоритм 4.1 Генетический алгоритм с жадной эвристикой для r -медианной задачи.

Дано: количество узлов r , множество всех узлов сети V , целевая функция (метрика расстояния) $f_G(\cdot)$

Шаг 1. Сгенерировать начальный массив множеств узлов $A = \{\chi_j\} = \{V_{m_1}, \dots, V_{m_p}\}$, $j = \overline{1, N}$, p вершин в каждом множестве. Здесь N количество особей (размер популяции) в алгоритме.

Шаг 2.

Случайным образом выбрать два индекса элементов массива A (родительские особи) $j_1, j_2 = \overline{1, N}$, $j_1 \neq j_2$. Случайным образом выбрать $j_3 \in w$. Здесь w некоторое множество индексов особей (элементов массива A), которые оценены как "плохие". В [Д4Д] всегда выбирается особь с худшим (максимальным) значением целевой функции: $\chi_w = \{\operatorname{argmin}_{S \in A} f_G(S)\}$.

Шаг 3. Присвоить $\chi_{j_3} = \chi_{j_1} \cup \chi_{j_2}$;

Шаг 4. Пока $|\chi_{j_3}| > p$ выполнить:

Шаг 4.1. Присвоить $f_{\text{best}} = +\infty$, $\text{FOUND} = 0$.

Шаг 4.2. Для каждого узла $V \in \chi_{j_3}$ выполнить:

Шаг 4.2.1. $\xi = \chi_{j_3} \setminus \{V\}$.

Шаг 4.2.2. Если $f_G(\xi) < f_{\text{best}}$, то присвоить $f_{\text{best}} = f_G(\xi)$, $\chi_{\text{best}} = \xi$, $\text{FOUND} = 1$.

Шаг 4.2.3. Следующая итерация цикла 4.2.

Шаг 4.3. Присвоить $\chi_{j_3} = \chi_{\text{best}}$. Следующая итерация цикла 4.

Шаг 5. Проверить условие останова, если не выполнено, то перейти к Шагу 2.

Несмотря на определенное сходство с p -медианной задачей на сети, наша задача имеет несколько существенных отличий, таких как:

Свойство 1. Целевая функция p -медианной задачи монотонно убывает, функция (1) в нашей задаче монотонно возрастает (относительно переменных $x_{i,k}$ и $y_{i,k,l}$).

Свойство 2. Решая p -медианную задачу [Д4Д], мы имеем дело с безусловной оптимизацией. Здесь мы рассматриваем условную оптимизацию. Левые части ограничений (2) и (3) —

монотонно возрастающие функции переменных $x_{i,k,l}$, а относительно $x_{i,k,l}$ в общем случае они не монотонны: $x_{i,k,l}$ могут меняться от 1 до 0 (что соответствует исключению узла) так, что значения левых частей некоторых неравенств (2) и (3) могут уменьшаться, а других – возрастать.

Свойство 3. Число вершин r в r -медианной задаче известно, а наша цель – минимизировать число вершин.

Благодаря Свойству 1, исключение любой вершины из множества вершин (Шаг 4.2.1 Алгоритма 1) влечет за собой гарантированное уменьшение значения целевой функции и проверка в Шаге 4.2.2 становится ненужной. В тоже время, благодаря Свойству 2, проверка промежуточного решения на соответствие ограничениям остается актуальной. Благодаря Свойству 3 условия цикла 4 Алгоритма 1 так же становится ненужным. Исключение вершин из промежуточного решения следует повторять до тех пор, пока эта операция дает некоторые улучшения относительно соответствия промежуточного решения ограничениям.

Ограничения (4.4) и (4.5) могут быть учтены на этапе генерации начальных и промежуточных решений. Ограничения (4.2) и (4.3) должны быть преобразованы в штрафную функцию.

В рассматриваемом здесь алгоритме предлагается замена ограничения (2), которому для целочисленных переменных соответствует ограничение (1.1) на следующее ограничение:

$$f_2(\chi) = -\sum_{l=1}^L \max\{0, W_l - V_l \sum_{i=1}^{T_l} \sum_{k=1}^K y_{i,k,l} (3 - C'_{y_{(i-1),k}, y_{i,k}})\} = 0, \quad (4.14)$$

а ограничение (3), которому соответствует ограничение (4.12), на ограничение:

$$f_3(\chi) = -\sum_{l=1}^L \max\{0, W_{min} - \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^L V'_i (3 - C'_{y_{(i-1),k}, y_{i,k}})\} = 0. \quad (4.15)$$

Функции $f_2(\cdot)$ и $f_3(\cdot)$ определены как функции множества χ . Значения целочисленных переменных $y'_{i,l}$ и булевых переменных $y_{i,k,l}$ определяются по формулам (13), (8), (10).

Также необходимо определить целевую функцию

$$f(\chi) = |\chi| = \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L x_{i,k,l},$$

значения булевых переменных $x_{i,k,l}$ определяются по формулам (4.13), (4.8), (4.9).

Экономический смысл функции $f_2(\chi)$ – общее количество продукции, выпускаемой с отставанием от плана, функции $f_3(\chi)$ – суммарное недовыполнение суточного минимума выпускаемой продукции.

Функции $f_2(\chi)$ и $f_3(\chi)$ имеют схожий экономический смысл, одинаковую размерность (число единиц продукции), поэтому можно применить единую штрафную функцию (аддитивной свертку этих функций) и соответствующего объединенного ограничения:

$$f_4(\chi) = f_2(\chi) + f_3\chi = 0. \quad (4.16)$$

Задачу поиска решения, удовлетворяющего ограничению (4.16) и, соответственно, ограничениям (4.2) и (4.3) исходной задачи, можно рассматривать как задачу минимизации функции $f_4(\chi)$.

Генетический алгоритм не требует единственного критерия для оценки решений. Решения могут оцениваться по двум критериям – значению целевой функции $f(\chi)$ и значению штрафной функции $f_4(\chi)$. Забегая вперед, отметим, что использование свертки (16) не дает заметных преимуществ перед использованием трех отдельных критериев $f(\cdot)$, $f_2(\cdot)$ и $f_3(\cdot)$, недостатка такого подхода также не выявлены. В то же время трехкритериальный подход к оценке и сравнению решений в популяции генетического алгоритма может быть применен к случаям, когда задача имеет штрафные функции $f_2(\cdot)$ и $f_3(\cdot)$ с различной размерностью.

основе алгоритма соответствует минимизации целевой функции $f(\cdot)$. Таким образом, нет нужды оценивать и сравнивать значения целевой функции в Шагах 4–4.3 при выполнении Алгоритма 1.

Общую схему алгоритма для задач (4.1)–(4.6) можно описать так.

Алгоритм 4.2 Генетический алгоритм

жадной эвристикой для планирования непрерывного производства

Шаг 1. Сгенерировать начальный массив множеств узлов сети, представленных тройками индексов $(i, k, l); A = \{\chi_j\} = \{(i_1, k_1, l_1), \dots, (i_{p_j}, k_{p_j}, l_{p_j})\}, j = \overline{1, N}$.

Здесь N — число "особей" популяции генетического алгоритма. Количество узлов p_j может быть различным в каждом элементе массива A .

Шаг 2. Случайным образом выбрать два индекса родительских "особей" $j_1, j_2 \in \overline{1, N}$, $j_1 \neq j_2$. Случайным образом выбрать $j_3 \in w$. Здесь w — некоторое множество индексов особей (элементов массива A), которые оценены как "плохие". Методика оценки приведена ниже.

Шаг 3. Присвоить $\chi_{j_3} = \chi_{j_1} \cup \chi_{j_2}$.

Шаг 5. Для каждого узла $V = (i_1, k_1, l_1) \in \chi_{j_3}$ выполнить:

Шаг 5.1. Если $\exists V_2 = (i_2, k_2, l_2) \in \chi_{j_3} : l_2 \neq l_1, i_2 = i_1, k_2 = k_1$ то случайным образом с равной вероятностью выбрать индекс $l \in \{l_1, l_2\}$, присвоить $\chi_{j_3} = \chi_{j_3} \setminus \{(i_1, k_1, l)\}$.

Шаг 5.2. Следующая итерация цикла 5.

Шаг 6. Вычислить матрицы булевых и целочисленных переменных $[x_{i,k,l}]$, $[y_{i,k,l}]$, $[x'_{i,k}]$ и $[y'_{i,k}]$, которые соответствуют множеству χ_{j_3} , используя формулы (13), (8)–(10). Отметим, что этот шаг и аналогичные шаги ниже сводятся к вычислению $[y'_{i,k}]$ согласно выражению (8), потому что множества χ_j представлены матрицами целочисленных переменных.

Шаг 7. Присвоить $FOUND=0$.

Шаг 8. Случайным образом разместить узлы множества χ_{j_3} , для каждого узла $V = (i', k', l') \in \chi_{j_3}$ выполнить:

Шаг 8.1. Присвоить $\xi = \chi_{j_3} \setminus \{V\}$. Вычислить матрицы булевых и целочисленных переменных $[x_{i,k,l}^\xi]$, $[y_{i,k,l}^\xi]$, $[x'_{i,k}^\xi]$ и $[y'_{i,k}^\xi]$, которые соответствуют множеству ξ . Если $f_4(\xi) < f_4(\chi_{j_3})$ то присвоить $\chi_{j_3} = \xi$, $FOUND = 1$, пересчитать соответствующие матрицы булевых и целочисленных переменных $[x_{i,k,l}]$, $[y_{i,k,l}]$, $[x'_{i,k}]$ и $[y'_{i,k}]$. Перейти к следующей итерации цикла 8. Отметим, что исключение вершины $V = (i', k', l')$ из множества и перерасчет соответствующих целочисленных переменных сводится к обнулению $x'_{i',k}$ и перерасчету $y'_{i'',k}$ для $i'' = \overline{i', T_1}$.

Шаг 8.2. выполнить процедуры локального поиска в окрестности узла V . Эти ниже описанные опциональные процедуры значительно повышают эффективность алгоритма.

Шаг 8.3. Следующая итерация цикла 7.

Шаг 9. Если $FOUND=1$ то вернуться к Шагу 7 (начать цикл заново).

Шаг 10. Проверить условия останова, если они не выполняются, то перейти к Шагу 2.

Также как в Алгоритме 1, этот алгоритм последовательно исключает по одной вершине из множества χ_{j_3} (Шаг 4.2.1 Алгоритма 1 и Шаг 8.1 Алгоритма 2). В случае Алгоритма 1 мы заранее знаем конечное число вершин n (Шаг 4), а в Алгоритме 2 мы исключаем вершины, пока это улучшает значение штрафной функции $f_4(\cdot)$ (см. Шаг 7, 8.1, 9). Шаги 5–5.2 гарантируют выполнение условия 4. Представляя множества χ_{j_1} , χ_{j_2} , χ_{j_3} как матрицы целочисленных переменных $[x'_{i,k}{}^{j_1}]$, $[x'_{i,k}{}^{j_2}]$, $[x'_{i,k}{}^{j_3}]$ мы сводим эти шаги к копированию:

$$x'_{i,k} = \begin{cases} \max\{x'^{j_1}_{i,k}, x'^{j_2}_{i,k}\}, & \min\{x'^{j_1}_{i,k}, x'^{j_1}_{i,k}\} = 0, \\ x'^{j_r}_{i,k}, & \min\{x'^{j_1}_{i,k}, x'^{j_1}_{i,k}\} > 0. \end{cases}$$

Здесь $r \in \{1, 2\}$ случайным образом выбирается для каждой пары $(i, k) : \min\{x'^{j_1}_{i,k}, x'^{j_1}_{i,k}\} > 0$.

Для обеспечения соответствия каждого решения ограничениям (4)–(6) используется следующий алгоритм генерации начальной популяции:

Алгоритм 4.3 Создание особей для начальной популяции генетического алгоритма.

Дано: число узлов сети r .

Шаг 1. Присвоить $x'_{i,k} = 0 \forall i = \overline{1, I}, k = \overline{1, K}$.

Шаг 2. Для $j = \overline{1, r}$ выполнить:

Шаг 2.1. Случайным образом выбрать $k \in \overline{1, K}$ (здесь и ниже случайный выбор целого числа из определенного множества предполагает равное математическое ожидание выбора каждого числа).

Вычислить $LZ_{k,l}$, количество видов продукции, доступное для производства на k -ой производственной линии. Случайным образом выбрать $t \in \overline{1, Z_k}$. Найти индекс t -го ненулевого элемента k -го столбца матрицы $Z = [z_{k,l}]$, сохранить его в переменной l . Случайным образом выбрать $i \in \overline{1, T_l}$. Если $x'_{i,k} = 0$ то присвоить $x'_{i,k} = 1$. Иначе повторить Шаг 2.1.

Шаг 2.2. Следующая итерация цикла 2.

Шаг 3. Вернуть матрицу целочисленных переменных $[x_{i,k}]$, которая представляет множество узлов сети χ .

В качестве параметра этого алгоритма выступает количество узлов сети r . На практике видно, что если в различных вариантах исходной популяции варьируется в широких пределах (в диапазоне $\{L, K \cdot I/2\}$), то достигаются наилучшие результаты. Есть

возможность либо случайного выбора p из определенного множества для каждого генерируемого экземпляра начальной популяции, либо определения p по формуле $L + j$. Результаты статистически равнозначны.

Здесь j — номер индекса генерируемого экземпляра, $[\cdot]$ — целая часть числа.

Размер массива (количество "особей") популяции генетического алгоритма — важный параметр. Недостаточно количество снижает качество решений. Мы эмпирически установили достаточность значения $N = I + K + L$, дальнейшее увеличение не улучшает результаты и приводит лишь к увеличению времени вычисления.

Мы использовали процедуры локального поиска в окрестности узла V , в качестве вспомогательных процедур (Шаг 8.2 Алгоритма 2) для ускорения поиска допустимых решений. Под окрестностью в данном контексте мы понимаем множество узлов, отличающихся от V значением координаты l (соответствует переключению вида продукции) или отличающихся значением координаты i не более чем на 1 (перенос начала производства на день раньше или позже). Мы использовали три процедуры:

Процедура 1. (Шаг 8.2 of Алгоритма 2). Проводится для вершины $V = (i, k, l)$ при условии $V_i \sum_{j=1}^{T_i} \sum_{k=1}^K y_{i,k,j} (3 - C'_{y_{(i-1),k}, y'_{i,k}}) > W_l$ (перевыполнение плана по l -му виду продукции).

Шаг 1. Составить множество индексов видов продукции, удовлетворяющий условию $V_i \sum_{j=1}^{T_i} \sum_{k=1}^K y_{i,k,j} (3 - C'_{y_{(i-1),k}, y'_{i,k}}) < W_l$ (перевыполнение плана).

Шаг 2. Случайным образом выбрать индекс l_2 из этого множества.

Шаг 3. Вычислить $\xi = (\chi_{j_3} \setminus \{V\}) \cup \{(i, k, l_2)\}$. Если $f_4(\xi) < f_4(\chi_{j_3})$ то присвоить $\chi_{j_3} = \xi$, $FOUND = 1$.

Процедура 2. (Шаг 8.2 Алгоритма 2). Проводится для вершины $V = (i, k, l)$ при условии $i > 1$ и $(i-1, k, l) \notin \chi_{j_3}$.

Вычислить $\xi = (\chi_{j_3} \setminus \{V\}) \cup \{(i-1, k, l)\}$. Если $f_4(\xi) < f_4(\chi_{j_3})$ то присвоить $\chi_{j_3} = \xi$, $FOUND = 1$.

Процедура 3. (Шаг 8.2 Алгоритма 2). Проводится для вершины $V = (i, k, l)$ при условии $i < T_l$ и $(i+1, k, l) \notin \chi_{j_3}$.

Вычислить $\xi = (\chi_{j_3} \setminus \{V\}) \cup \{(i+1, k, l)\}$. Если $f_4(\xi) < f_4(\chi_{j_3})$ то присвоить $\chi_{j_3} = \xi$, $FOUND = 1$.

Необходимо заметить, что включение этих процедур в алгоритм заметно снижает время поиска допустимых решений. Эти процедуры проводят локальный поиск в окрестности каждого узла сети и заменяют узел V на узел из окрестности, если замена позволит улучшить значение штрафной функции $f_4(\cdot)$. Процедура 1 для узла $V = (i, k, l)$ выполняет поиск в множестве узлов $\{(i, k, l') \vee l' = \overline{1, L}\}$, а Процедуры 2 и 3 в множестве узлов $\{(i', k, l) \vee i' = i \pm 1, 1 \leq i' \leq T_l\}$.

Применение локального поиска снижает разнообразие популяции. Это может быть частично компенсировано введением процедуры мутации, которая отсутствует в Алгоритме 1.

Процедура 4 (Шаг 4 Алгоритма 2). Мутация множества χ_{j_3} . Выполняется с некоторой вероятностью p_m .

Сгенерировать множество ξ с помощью Алгоритма 3 при $r = \chi_{j_3} \vee$. Присвоить $\chi_{j_3} = \chi_{j_3} \cup \xi$.

Экспериментами выявлены оптимальные значения: $p_m \in [0,005, 0,03]$ если в Алгоритм 2 включены только Процедуры 2 и 3 и $p_m \in [0,01, 0,05]$ при наличии в Алгоритме 2 всех процедур локального поиска (Процедуры 1, 2, 3).

Алгоритм 2 создает новые "особи" (промежуточные решения – множества узлов) χ_{j_3} , заменяющие собой существующие "особи" с индексом j_3 , которые случайным образом выбираются из множества "плохих" решений w . При определении этого множества нужно учитывать значения целевой функции $f(\cdot)$ и штрафной функции $f_4(\cdot)$, вычисленные согласно (14)–(16). Используется следующая процедура.

Процедура 5. Определение множества w .

Шаг 1. Присвоить $S_n = 0 \forall n = \overline{1, N}$.

Шаг 2. Присвоить $F_n = |\chi_n|$.

Шаг 3. Отсортировать массив F в порядке возрастания.

Шаг 4. Найти медиану $f' = F_{\lfloor N/2 \rfloor}$.

Шаг 5. Для $n \in \overline{1, N}$: $|\chi_n| \leq f'$ присвоить $S_n = S_n + 1$.

Шаг 6. Присвоить $F_n = f_4(\chi_n) \forall n = \overline{1, N}$.

Шаг 7. Отсортировать массив F в порядке возрастания.

Шаг 8. Найти медиану $f'_4 = F_{\lfloor N/2 \rfloor}$.

Шаг 9. Для $n \in \overline{1, N}$: $f_4(\chi_n) \leq f'_4$ присвоить $S_n = S_n + 2$.

Шаг 10. Для $n \in \overline{1, N}$: $f_2(\chi_n) = 0$ присвоить $S_n = S_n + 1$.

Шаг 11. Для $n \in \overline{1, N}$: $f_3(\chi_n) = 0$ присвоить $S_n = S_n + 1$.

Шаг 12. Найти наименьший индекс $n \in \overline{1, N}$: $f_4(\chi_n) = 0$ и $|\chi_n| = \min_{q \in \overline{1, N}} |\chi_q|$. Если индекс, удовлетворяющий условиям существует, то присвоить $S_n = S_n + 10$.

Шаг 13. Скопировать массив S в массив S' . Отсортировать массив S' порядке возрастания.

Шаг 14. Найти медиану $s' = S'_{[N/2]}$.

Шаг 15. Вернуть результат – множество индексов $w = \{n \in \{1, N\} \mid S_n \geq s'\}$.

Процедура осуществляет принцип подсчета очков: при назначении целевой функции лучше медианы, решение получает 1 очко; при назначении штрафной функции $f_4(\cdot)$ лучше медианы – 2 очка; за нулевые значения штрафных функций $f_2(\cdot)$ и $f_3(\cdot)$ решение получает 1 очко; лучшее решение, удовлетворяющее ограничениям получает дополнительные 10 очков. Решения с числом очков не больше медианного значения считаются "плохими".

Процедура требует многовычислительных ресурсов, даже если значения целевой функции $f(\cdot)$ и штрафной функции $f_4(\cdot)$ хранить в массивах, а не вычислять каждый раз для каждой "особи". Поэтому, в предложенном алгоритме процедура выполняется на Шаге 2 после генерации начальной популяции и каждые $N/4$ шагов (определяет кандидатов на выбывание по слесменным четверти популяции). Когда в популяцию включается новая особь, мы полагаем, что $j_3 \notin w$ (новопоявившиеся особи не являются кандидатами на выбывание).

4.3 Пример эффективного реинжиниринга с применением метода жадных эвристик

На рисунках 4.3.1–4.3.4 показаны результаты для задачи с параметрами схожими с описанными в [И4И] ($L=34$, $K=28$, $I=31$) и с более строгими ограничениями (4.2) и (4.3): $T_l \in \{10, 31\}$, $W_{\min}=1925$, $V_l \in [40, 50]$, $W_l \in [20, 25000]$.

На рисунке 4.3.1 и рисунке 4.3.2 показаны сравнительные результаты Алгоритма 2 с различными параметрами. Процедуры локального поиска и мутации улучшают результат.

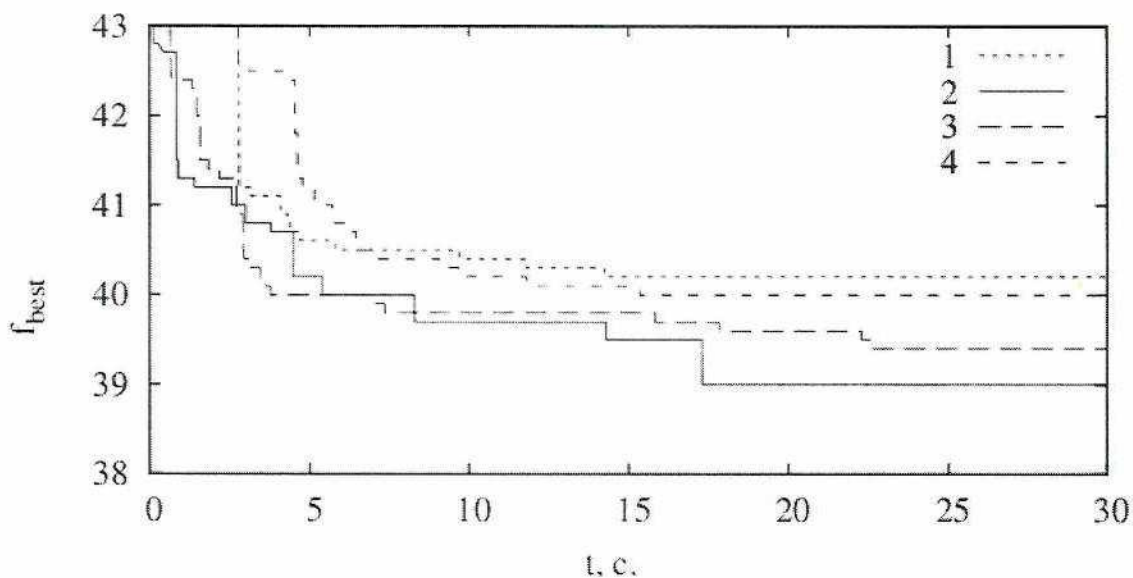


Рисунок 4.3.1 – Влияние локального поиска на результат

1 – Алгоритм 2 без процедур 1 – 3,

2 – с процедурами 1 – 3,

3 – с процедурой 1,

4 – с процедурами 2 – 3.

Параметры задачи: $L=34$, $K=28$, $I=31$, $W_{min}=1925$.

Параметры алгоритма: $N=89$, вероятность мутации $p_m=0,01$

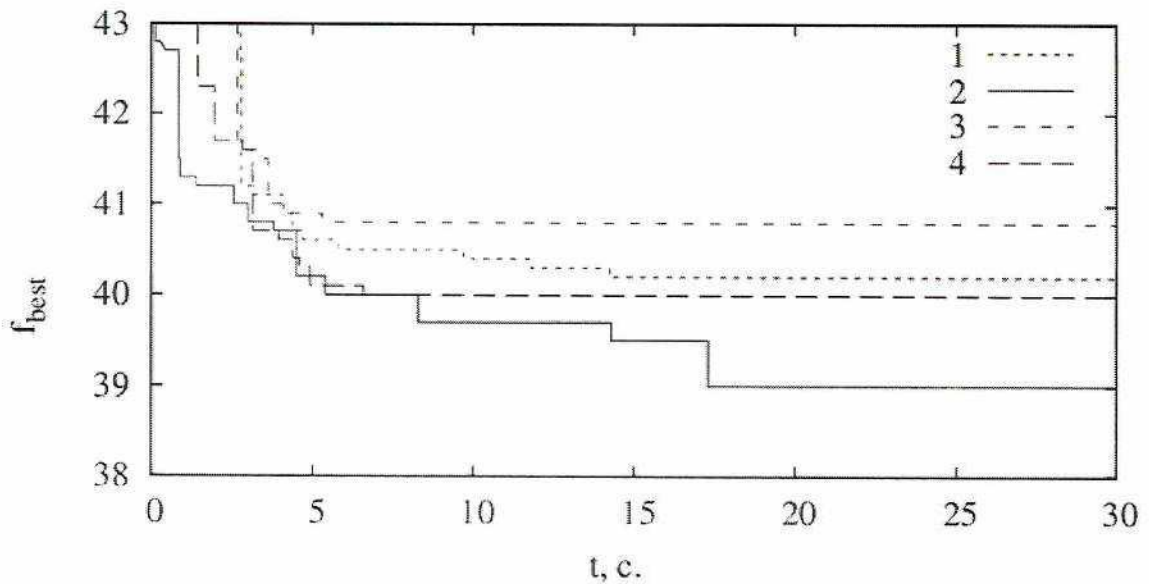


Рисунок 4.3.2 – Влияние мутации на результат

1 – Алгоритм 2 без процедур 1 – 4, вероятность мутации $p_m=0,01$

2 – с процедурами 1 – 3, $p_m=0,01$,

3 – без процедур 1 – 3, $p_m=0$,

4 – с процедурами 1 – 3, $p_m=0$.

Параметры задачи: $L=34, K=28, I=31, W_{min}=1925$.

Параметры алгоритма: $N=89$

На Рисунке 4.3.3 показано, как достигаемые результаты зависят от размера популяции генетического алгоритма. Оптимальная величина $N = I + K + L$ для большинства случаев получена экспериментально. Также на рисунке показаны результаты алгоритма локального поиска в сочетании с Процедурами 1–3.

Наконец, на Рисунке 4.3.4 представлены результаты Алгоритма 2 для задачи с параметрами как в [18] ($L=36, K=28, I=31, T_l=31 \forall l = \overline{1, I}, \alpha=0,5, L W_l/I=484, V_l \in [40, 50], W_l \in [20, 25000], y_{0,k,l}=0 \forall k, l$).

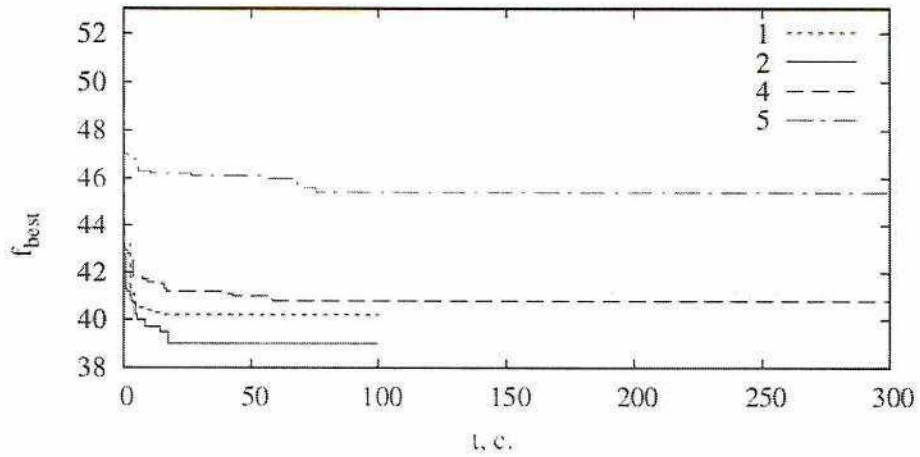
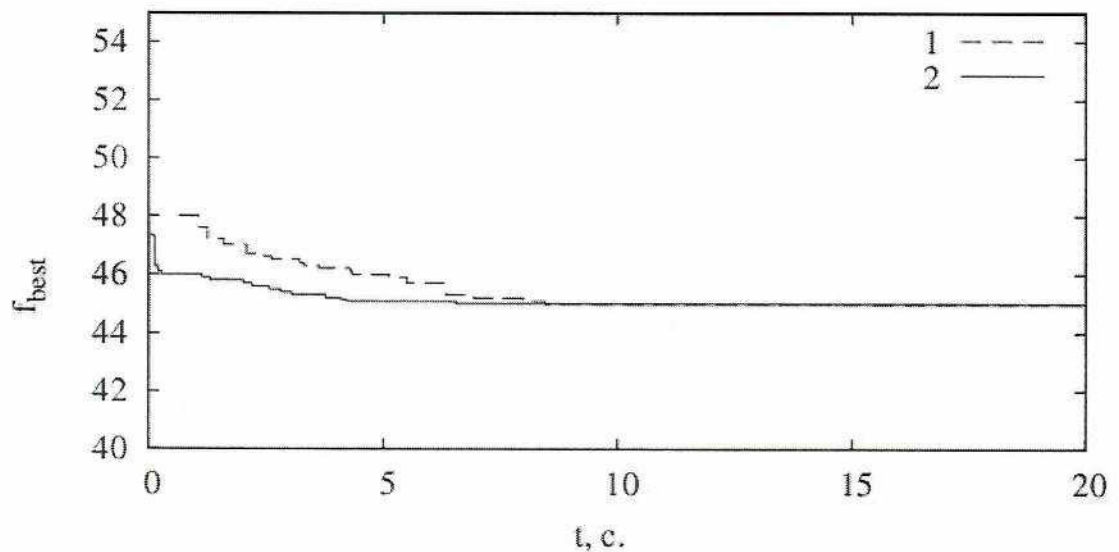


Рисунок 4.3.3. – Влияние размера популяции на результат

- 1 – Алгоритм 2 без процедур 1 – 3, $N=89$,
- 2 – с процедурами 1 – 3, $N=89$,
- 3 – без процедур 1 – 3, $N=500$,
- 4 – с процедурами 1 – 3, $N=500$,
- 5 – мультистарт локального поиска в сочетании с процедурами 1 – 3.

Параметры задачи: $L=34$, $K=28$, $I=31$, $W_{min}=1925$

Параметры алгоритма: $N=89$, вероятность мутации $p_m=0,01$



- 1 – Алгоритм 2 без процедур 1 – 3,
- 2 – Алгоритм 2 с процедурами 1 – 3

Рисунок 4.3.4 – Результаты для задачи с параметрами как в [18].

На рисунке 4.3.5 показана схема модифицированного процесса рассмотрения заявок отделом планирования. Внешне схема практически повторяет рисунок 1. При этом достигается принципиально новый результат, невозможный без применения современных оптимизационных алгоритмов, а именно – минимизация количества переключений с одного класса продукции на другой, требующих остановки производства и весьма затратных вследствие этого.

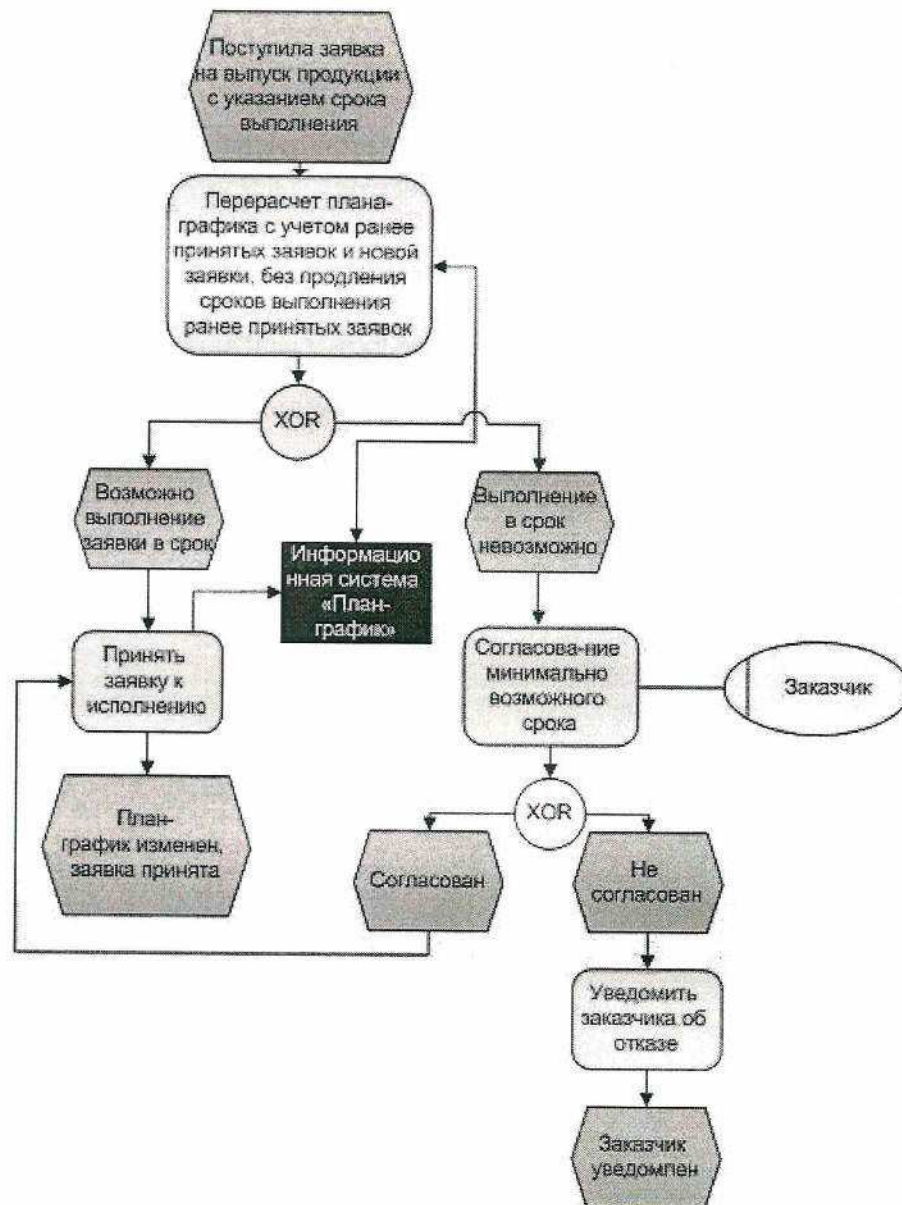


Рисунок 4.3.5. – EPC-модель процесса рассмотрения заявок отделом планирования после реинжиниринга

Внедрение новой схемы процесса требует создания информационной системы, включающей базу данных плана-графика и разработанный оптимизационный алгоритм.

Таким образом, применение высокоточных алгоритмов оптимизации, таких, как алгоритмы метода жадных эвристик, позволяет повышать эффективность производственных процессов, выводя их на принципиально новый уровень.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены основные аспекты обеспечения качества ЭКБ специального назначения. Показано, что анализ партий ЭКБ на однородность становится актуальной задачей, особенно для ЭКБ с высоким уровнем интеграции, где флуктуации технологического процесса могут привести к существенным ошибкам в оценке качества и физических характеристик ЭКБ. Также приведено обоснование что создание спецпартий – это путь к достижению параметров партий ЭКБ, близких по своим характеристикам к уровню качества Space.

Анализ бизнес-процессов специализированного тестового центра, в частности – процессов неразрушающего и разрушающего тестирования электрорадиоизделий космического применения показал, что более тесная интеграция данных процессов с применением методов интеллектуальной обработки данных (а именно – кластерного анализа с применением специальных алгоритмов метода жадных эвристик) позволяет повысить качество отбора электрорадиоизделий для разрушающего физического анализа, обеспечивая обязательное прохождение разрушающего физического анализа хотя бы одним элементом из каждой партии. Такой подход обеспечивает однородность тестируемых производственных партий, приближая конечный продукт – ЭКБ космического применения – к зарубежным аналогам уровня качества Space.

На примере процесса производственного планирования литейно-прокатного производства показано, что применение процедур интеллектуальной обработки данных с применением алгоритмов метода жадных эвристик позволяет совершенствовать бизнес-процессы в других отраслях.

Таким образом, основным результатом работы является новый процесс формирования специальных партий ЭКБ специального назначения из продукции отечественного производства, обеспечивающий качество продукции, близкое к уровню качества Space.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лукьяненко М.В., Чурляева Н.П., Федосов В.В. Надежность изделий электронной техники в аппаратуре космических аппаратов: учебное пособие / М.В.Лукьяненко, Н.П.Чурляева, В.В. Федосов; Сибирский государственный аэрокосмический университет. - Красноярск, 2016. - 188 с.
2. ОСТ В 11 0219. Приборы полупроводниковые. Методы технологических (отбраковочных) испытаний. 1985.-79 с.
3. Горлов М.И., Королев С.Ю. Физические основы надежности интегральных микросхем: Учебное пособие / М.И.Горлов, С.Ю.Королев; Воронеж: Издательство Воронежского университета, 1995. – 200 с.
4. ОСТ В 11 0998-99. Микросхемы интегральные. Общие технические условия. -139 с.
5. Анализ технического состояния и оценка уровня фактической надежности и готовности к целевому использованию космических аппаратов народнохозяйственного назначения по результатам изготовления и эксплуатации в 2005 году. Анализ динамики изменения показателей надежности за период с 1994 по 2005 год., НПО ПМ, Железногорск, 2005 – 176с.
6. Методические рекомендации по разработке справочника «Надежность электрорадиоизделий» МО России, 1988 - . 25 с.
7. Справочники «Надежность ЭКБ».–М.:Изд.22 ЦНИИ МО,1992, 2000, 2002, 2006.
8. Arthur D., Vassilvitskii S. k-Means++: TheAdvantagesofCarefulSeeding//Proc. oftheEighteenthAnnual ACM-SIAM Symp. onDiscretealgorithms, ser. SODA '07. -2007, p.1027-1035.
9. Казаковцев Л.А., Сташков Д.В., Рожнов И.П., Казаковцева О.Б. Дальнейшее развитие метода жадных эвристик для задач автоматической группировки объектов/ Системы управления и информационные технологии, №4(70), 2017. – С. 34-40.

10. Казаковцев Л.А., Масич И.С., Орлов В.И., Федосов В.В. Быстрый детерминированный алгоритм для классификации электронной компонентной базы по критерию равнонадежности. Системы управления и информационные технологии. 2015. – Вып.4(62). - С. 39- 44

11. Эволюционные алгоритмы с гетерогенной популяцией для задач кластеризации и размещения / Л.А.Казаковцев, М.Н.Гудыма, Д.В.Сташков, А.А.Ступина, Н.Н.Джиоева; СФУ.- Москва: НИЦ «Актуальность.рф». – 196 с.

12. Гуцин В.Н., Панкратов Б.М., Родионов А.Д. Основы устройства и конструирования космических аппаратов: Учеб. пособие для ВУЗов. М.: Машиностроение 1992. – 256 с.

13. Н.И. Паничкин, Ю.В. Слепушкин, В.П. Шишкин и др. Конструкция и проектирование космических летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1986 – 344 с

14. Безродных И.П., Тютнев А.П. Семенов В.Т. Радиационные эффекты в космосе. Часть 3. Влияние ионизирующего излучения на изделия электронной техники / М.: ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2017, - 63 с.

15. Модель околоземного космического пространства: В 3-х т. / Под ред. академика Вернова С.Н. Издание седьмое. - М.: МГУ, 1983 г.

16. Таперо К.И., Улимов В.Н., Членов А.М. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения. — М.:Бином, — 310 с. — ISBN 9785457534711.

17. Зебрев Г.И. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах высокой степени интеграции. – М.: НИЯУ МИФИ. – 2010. – 149 с.

18. Белоус А.И., Солодуха В.А., Шведов С.В. Космическая электроника. В 2-х кн. Книга 1. – М.:Техносфера. – 697с.

19. Патраев В.Е., Максимов Ю.В. Методы обеспечения надежности бортовой аппаратуры космических аппаратов длительного функционирования // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – Т. 51. – № 8. – 2008. – С. 5–12

20. Урличич Ю.М., Данилин Н.С. Управление качеством космической радиоэлектронной аппаратуры в условиях глобальной открытой экономики. – М.: Макс ПРЕСС, 2003. – 204 с.

21. Федосов В.В., Орлов В.И. Минимально необходимый объем испытаний изделий микроэлектроники на этапе входного контроля // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2011. т.54, № 4. стр. 58-62.

22. Харченко В.С., Юрченко Ю.Б. Анализ структур отказоустойчивых бортовых комплексов при использовании электронных компонентов Industry // Технология и конструирование в электронной аппаратуре, 2003. №2. С. 3–10.

23. Космический аппарат "Sesat" со сроком активного существования 10 лет. Принципы, методы и результаты комплектации аппаратуры электрорадиоизделиями: Технический отчет / Козлов А.Г., Исляев Ш.Н., Федосов В.В., Коновалов В.И., Белов С.А., Куклин В.И., Орлов В.И., НПО прикладной механики, Красноярск 26, 1999.-408с.

24. Перечень ЦК-1/96. Изделия электронной техники, допускаемые для применения в аппаратуре космического аппарата «Ямал» с 10-летним сроком активного существования // АО ИТЦ «Циклон», 1997, 90 с.

25. Решение № SST-TP-97006 о квалификации электрорадиоизделий на соответствие требованиям космического аппарата с 10-летним сроком активного существования (Редакция 1-97) // АО ИТЦ «Циклон», 1997, 108 с.

26. Модель околоземного космического пространства: В 3-х т. Под ред. академика Вернова С.Н. Издание седьмое // М.: МГУ, 1983 г.

27. Стойкость изделий электронной техники к воздействию факторов космического пространства и электрических импульсных перегрузок: Справочник. Т. XII. 4-е изд. Книга 2. Термовакuumные и электрические воздействия // ВНИИ «Электронстандарт», 1990, 162 с.

28. Пиз Р.Л., Джонстон А.Х., Азаревич Дж.Л. Радиационные испытания полупроводниковых приборов для космической электроники // ТИИЭР, 1988, Т.76, № 11, стр. 126-145.

29. Радиационная стойкость бортовой аппаратуры и элементов космических аппаратов // I Всесоюзная научно-техническая конференция. Материалы конференции. Томск, 1991, 257с.

30. Радиационная стойкость материалов радиотехнических конструкций: Справочник. Под ред. Н.А Сидорова, В.К. Князева // М.: Советское радио, 1976, 567 с.

31. Малышев М.М., Малинин В.Г., Куликов И.В., Торгашов Ю.Н, Ужегов М.В. Методология оценки радиационной надежности ИЭТ в условиях низкоинтенсивных ионизирующих излучений. / В сб. Радиационно-надежностные характеристики изделий электронной техники в экстремальных условиях эксплуатации. Под редакцией Ю.Н. Торгашова // СПб.: Издательство РНИИ «Электронстандарт», 1994, 96с.

32. Мырова Л.О., Чепиженко А.З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. 2-е изд., перераб. и доп. // М.: Радио и связь, 1988, 296 с.

33. Кононов В.К., Малинин В.Г., Оспищев Д.А., Попов В.Д. Отбраковка потенциально-ненадежных интегральных микросхем с использованием радиационно-стимулирующего метода / В сб. Радиационно-надежностные характеристики изделий электронной техники в экстремальных условиях эксплуатации. Под редакцией Ю.Н. Торгашова // СПб.: Издательство РНИИ «Электронстандарт», 1994, 96с.

34. Субботин, В., Стешенко В. Проблемы обеспечения бортовой космической аппаратуры космических аппаратов электронной компонентной базой // Компоненты и технологии. – 2011. – вып.11. – с.10-12.

35. MacQueen J.,
Some methods for classification and analysis of multivariate observations. Proc. 5th

Berkeley Sympos. Math. Statist, and Probabil, 1965—1966. Vol- 1- Berkeley—Los Angeles, 1967, 281—297 (РЖМат, 1970, 3В168)

36. Weber, A. Ueber den Standort der Industrien, Erster Teil: Reine Theorie des Standortes / A. Weber, [Verlag von] J. C. B. Mohr.-Tuebingen: Mohr.- 1922.- 209 P.

37. Weiszfeld, E. Sur les points sur lesquels la somme des distances de n points donne son minimum / E. Weiszfeld // Tohoku Mathematical Journal.-1937.- Vol. 43, No.1.- P.335–386.

38. Drezner, Z. The fortified Weiszfeld algorithm for solving the Weber problem / Z. Drezner // IMA Journal of Management Mathematics.-2013.- Vol.26.- P.1-9. DOI: 10.1093/imaman/dpt019.

39. Антамошкин, А.Н. Алгоритм случайного поиска для обобщенной задачи Вебера в дискретных координатах / А.Н. Антамошкин, Л.А. Казаковцев // Информатика и системы управления.- 2013.- № 1(35).- С. 87-98.

40. Antamoshkin, A.N. Random Search Algorithm for the p -Median Problem / A.N. Antamoshkin, L.A. Kazakovtsev // Informatica.-2013.- Vol. 37, issue 3.- P.267–278.

41. Казаковцев, Л.А. Алгоритм случайного поиска для обобщенной задачи Вебера в дискретных координатах / А.Н. Антамошкин, Л.А. Казаковцев // Информатика и системы управления. – 2013. – Вып. 1. – С. 87-98.

42. Казаковцев, Л.А. Параллельный алгоритм для p -медианной задачи / Л.А. Казаковцев, А.Н. Антамошкин, М.Н. Гудыма // Системы управления и информационные технологии.- 2013.- № 52 (2.1).- 2013.- P.124–128.

43. Levanova, T.V. Algorithms of Ant System and simulated annealing for the p -median problem / T.V. Levanova, M.A. Loresh // Automation and remote control. - 2004. - Vol.65, issue 30. - P. 431-438.

44. Айвазян С. А., Б е ж а е в а З. И., С т а р о в е р о в О. В., Классификация многомерных наблюдений. М., Статистика, 1974. 240 с. (РЖМат, 1974, 7В424К)

45. Rand W. M., Objective criteria for the evaluation of fuzzy clustering methods. J. Amer. Statist. Assoc, 1971, 66, N» 336, 846—850 (РЖМат., 1972, 8В183)
46. Weber, A. Ueber den Standort der Industrien, Erster Teil: Reine Theorie des Standortes/ A. Weber, [Verlag von] J. C. B. Mohr.-Tuebingen: Mohr.- 1922.- 209 P.
47. Maulik, U. Genetic Algorithm-Based Clustering Technique / U. Maulik, S. Bandyopadhyay // Pattern Recognition.- 2000.- Vol. 33.- P. 1455-1465.
48. Neema, M.N. New Genetic Algorithms Based Approach to Continuous p-Median Problem / M.N. Neema, K.M. Maniruzzaman, A. Ohgai // Netw. Spat. Econ.- 2011.- Vol.11.- P.83–99, DOI:10.1007/s11067-008-9084-5
49. Alp, O. An Efficient Genetic Algorithm for the p-Median Problem / O. Alp, E. Erkut, Z. Drezner // Annals of Operations Research.- 122 (1-4).- 2003.- P. 21–42, doi 10.1023/A:1026130003508
50. Lim, A. A fixed-length subset genetic algorithm for the p-median problem / A. Lim, Z. Xu // Lecture notes in computer science.- 2003.- Vol. 2724.- P. 1596-1597
51. Sheng, W. A genetic k-medoids clustering algorithm / W. Sheng, X. Liu // Journal of Heuristics.- 2006.- Vol.12, No.6.- P. 447-466.
52. Казаковцев Л. А. Метод жадных эвристик для систем автоматической группировки объектов: диссертация ... доктора Технические науки: 05.13.01 / Казаковцев Лев Александрович; [Место защиты: Сибирский федеральный университет].- Красноярск, 2016
53. Гудыма М.Н., Казаковцев Л.А., Антамошкин А.Н. Решение серий задач автоматической группировки промышленной продукции // Экономика и менеджмент систем управления. 2016. Т. 22. № 4. С. 80-87.
54. Drezner Z., Wesolowsky G. O. A Trajectory Method for the Optimization of the Multifacility Location Problem with l_p Distances // Management Science. 1978. V.24, P.1507–1514.
55. Kariv O., Hakimi S.L. An Algorithmic Approach to Network Location Problems. II. The p-Medians // SIAM Journal on Applied Mathematics. 1979. Issue 37(3), P.539–560.

56. Avella P., Sassano A., Vasil'ev I. Computational Study of Large-Scale p-Median Problems // Mathematical Programming. 2007. Issue 109(1), P.89–114.

57. Antamoshkin A. N., Kazakovtsev L.A. Random Search Algorithm for the p-Median Problem // Informatica. 2013. V.37(3), P.267–278.

58. Alp O., Erkut E., Drezner Z. An Efficient Genetic Algorithm for the p-Median Problem // Annals of Operations Research. 2003. V.122(1–4), P.21–42.

59. Kazakovtsev L.A., Gudyma M.N., Antamoshkin A.N. Genetic Algorithm with Greedy Heuristic for Capacity Planning // 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT) – S.-Petersburg, 2014, 6-8 October .–2014.– P. 607-613.

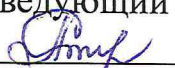
60. Antamoshkin A.N., Masich I.S. “Pseudo-Boolean Optimization in Case of an Unconnected Feasible Set”, in “Models and Algorithms for Global Optimization” // Optimization and Its Applications, Vol.4, 2007, P.111-122.

61. Масич И.С., Шарыпова К.В. Оптимизация загрузки производственных мощностей литейного производства // Системы управления и информационные технологии, 2007, 3(29), С.76-80.

62. Hakimi, S. L. Optimum Locations of Switching Centers and the Absolute Centers and Medians of a Graph // Operations Research. 1964. Issue 12(3), P.450-459.

63. Казаковцев Л.А., Антамошкин А.Н. Метод жадных эвристик для задач размещения // Вестник СибГАУ. 2015. Т. 16. № 2. С. 317-325.

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт управления бизнес-процессами и экономики
Кафедра «Экономика и информационные технологии менеджмента»

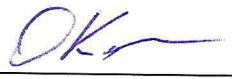
УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой ЭИТМ
 А.А.Ступина
« 11 » 07 20 15 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ
«Реинжиниринг бизнес-процессов с использованием
методов интеллектуального анализа данных на примере процесса
формирования специальных партий электрорадиоизделий»

Руководитель 
подпись дата

профессор, д-р техн. наук А. А. Ступина

Студент ПЭ 17-09М 431726149


подпись дата

О. Б. Казаковцева

Рецензент 
подпись, дата

старший программист АО «СИНЕТИК»,
канд.техн.наук Д.В.Сташков

Красноярск 2019