

На правах рукописи



Пипия Георгий Тенгизович

**Управление качеством продукции приборостроения
на основе математических методов двухуровневой
оптимизации и принятия решений**

Специальность 2.5.22 – Управление качеством продукции. Стандартизация.
Организация производства

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, старший научный сотрудник
Черненькая Людмила Васильевна

Оглавление

Введение	4
Глава 1. Постановка проблемы оценки и улучшения качества продукции и пути ее решения	13
1.1. Описание проблемной области	13
1.2. Актуальные проблемы оценки и улучшения качества продукции в приборостроении	18
1.3. Анализ современного состояния методов оценки и улучшения качества продукции	21
Результаты и выводы по главе 1	30
Глава 2. Комплексная модель решения задачи оценки и улучшения качества продукции на предприятиях приборостроения	32
2.1. Комплексная модель оценки и улучшения качества продукции приборостроения	32
2.2. Описание модели многогранника качества продукции	33
2.3. Описание модели поиска оценки и улучшения качества продукции приборостроения в рамках многогранника качества	36
2.4. Сравнительный анализ математических моделей для реализации многогранника качества продукции приборостроения	37
2.5. Формулировка задачи визуализации допустимой области принятия решений при управлении качеством продукции	48
Результаты и выводы по главе 2	49
Глава 3. Разработка методики оценки и улучшения качества продукции. 52	52
3.1. Анализ источников информации, характеризующих качество продукции на этапе производства	53
3.2. Разработка методики формализации элементов модели двухуровневой оптимизации	58
3.3. Разработка методики формализации разнородных компонентов векторов ЧПК с целевыми функциями	71
3.4. Разработка ранговой шкалы оценки показателей целевых функций	79
3.5. Разработка методики визуализации многогранника качества области Парето	84

Результаты и выводы по главе 3	93
Глава 4. Применение методики оценки и улучшения качества в условиях приборостроительного предприятия	94
4.1. Описание объекта экспериментальных исследований.....	94
4.2. Разработка методики проверки достоверности построенной модели поиска качества продукции.....	99
4.3. Расчет переменных области определения целевых функций.....	101
4.4. Расчет констант системы ограничений для поиска значений целевых функций.....	105
4.5. Определение относительных коэффициентов важности для частных показателей целевой функции	111
4.6. Определение ранговых шкал для оценки целевых функций.....	123
4.7. Реализация методики поиска оценки качества продукции приборостроения на основе двухуровневой линейной оптимизации	127
4.8. Автоматизированная система поиска оценки качества приборостроительной продукции	131
Результаты и выводы по главе 4.....	139
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	140
Список литературы.....	143
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Код программы решения задачи оценки качества продукции на основе двухуровневой линейной оптимизации.....	158
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Код программы поиска области Парето.	165
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Код программы визуализации области Парето для решения задачи обеспечения и улучшения качества продукции приборостроения.	166
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Акт внедрения ПАО «Техприбор».....	167
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Акт внедрения АО «Микротехника».....	169
ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Акт внедрения АО «Радиоавионика».....	171

Введение

Актуальность работы. Приборостроение является одной из основных наукоёмких и высокотехнологических отраслей экономики страны, для устойчивого, успешного развития которой необходимо уделять приоритетное внимание вопросам оценки и улучшения качества изделий приборостроения. Стратегия развития приборостроительной промышленности призвана повысить технологический уровень и увеличить объем отечественной продукции приборостроения. Развитие приборостроения способствует выполнению государственной программы Российской Федерации «Развитие авиационной промышленности», введенной в действие с 1 декабря 2022 года, а также способствует развитию отечественной промышленности в соответствии с государственной программой «Развитие промышленности и повышение её конкурентоспособности», утвержденной постановлением Правительства от 15 апреля 2014 года. Ужесточение требований к уровню развития приборостроения послужит катализатором развития элементной базы, что, в свою очередь, будет способствовать выполнению государственной программы «Развитие электронной и радиоэлектронной промышленности» (подпрограмма "Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники на период до 2025 года").

Для успешного развития приборостроения необходимо уделять приоритетное внимание вопросам оценки и улучшения качества изделий. В условиях существования четвертого технологического уклада возможно внедрение информационных технологий управления производством приборостроения и технологий автоматизации рутинного труда. При внедрении технологий информатизации и автоматизации предприятия приборостроения создают информационную среду, позволяющую строить расписание или график производства, определять необходимые ресурсы и оборудование и конструировать образцы с оптимальными параметрами, после чего происходит наладка станков с учетом заданных параметров и запуск производства. После запуска производства, за счет внедрения технологий обмена информацией, все структурные подразделения, получающие информацию, при необходимости

вносят корректировки в текущее производство. Таким образом, управление производством осуществляется путем получения большого объема информации в процессе выполнения производственных процессов, что позволяет обеспечивать необходимый уровень эффективности и результативности работы производства приборостроения. На практике информация, собираемая в процессе работы производства приборостроения, перераспределяется между структурными подразделениями, отвечающими за выполнение определенных процессов производства, так что информация по затратам направляется в финансово-экономический отдел, информация по качеству – в службу качества, информация по работе технологических процессов, соответственно, к технологам. При этом комплекс целевых показателей и методов их расчета у всех структурных подразделений отличается, что приводит к несогласованности действий при принятии решений в отношении качества продукции. Кроме того, методы и средства управления качеством продукции, выполняющие задачи не только контроля качества выпускаемой продукции, но и управления производством, позволяют решать только локальные проблемы, без учета общей картины состояния производства. Локальность решения проблем при применении инструментов управления качеством подтверждается их теоретическим развитием и практическими внедрениями. Например, существуют методы управления качеством при планировании производства и отдельно существуют методы управления качеством, направленные на управление технологическими операциями.

Недостаточная разработанность методов и инструментов оценки качества приводит к низкой результативности процессов обеспечения и улучшения качества изделий приборостроения. Существующие противоречия, выражающиеся в неспособности существующих методов комплексно обрабатывать, анализировать и предлагать перечень решений по обеспечению или улучшению качества продукции привели к таким проблемам как увеличение расходов, времени на изготовление продукции приборостроения и увеличению времени принимаемых решений по обеспечению и улучшению качества.

Актуальность диссертационного исследования выражена в необходимости улучшения результативности процесса поддержки принимаемых решений при обеспечении и улучшении качества продукции приборостроения.

Актуальность диссертационного исследования соответствует таким критическим технологиям Российской Федерации, как «Технологии информационных, управляющих, навигационных систем», «Технологии создания ракетно-космической и транспортной техники нового поколения» и «Технологии создания электронной компонентной базы и энергоэффективных световых устройств» Перечня критических технологий РФ, утвержденного Указом Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899. Таким образом, научное направление, нацеленное на решение задач управления качеством продукции, является актуальным.

Степень разработанности темы исследования. Современные исследования, направленные на принятия решений при управлении качеством продукции, базируются на использовании теории двухуровневой линейной оптимизации, децентрализованном управлении качеством продукции в нечеткой среде, многокритериальном принятии решения в нечеткой среде, алгоритмах определения области Парето при решении задач двухуровневой оптимизации, методах визуальной интерпретации области Парето в случае множества критериев.

Методологической базой исследования послужили результаты научных исследований таких ученых как Архипов А.В., Федюкин В.К., Джон Макгил, Стефан Дёпье, Калашников В.В., Г.Зангу, Ю. Гао, Борис Модрухович, Варжапетян А.Г., Коршунов Г.И., Фролова Е.А., Черненькая Л.В., Монгомери Д.С., Джонатан Бард, Вуддол В.Х., Хаманова Д.Н., Миладин Стефанович, Васильев Ф.П., Кибзун А.И., Ногин В.Д., Подиновский В.В., Ларичев О.И., Рабинович Я.И., Филип Монгин, Басков О.В., Лотов А.В., Джером Брэкен, Черноруцкий И.Г., Захаров А.О., Марии Жоао Алвес, Джон Флиге, Висент Л.Н., Янош Фулоп, Рабинович Я.И., Каменев Г.К., Поспелова И.И. и В. Штойер.

Анализ трудов отечественных и зарубежных ученых показал, что в настоящее время не в полной мере исследованы вопросы оценки и улучшения качества продукции приборостроения с точки зрения децентрализованной модели управления на основе двухуровневой модели оптимизации с учетом разнородной информации.

Цель работы. Улучшение результативности принятия решений при управлении качеством продукции приборостроения.

Задачи исследования. Для достижения указанной цели в ходе диссертационного исследования поставлены и должны быть решены следующие задачи:

1. Определить многогранник качества продукции приборостроения на основе показателей, характеризующих качество продукции приборостроения через перечень целевых функций.

2. Разработать методику идентификации показателей качества и их оценки для описания целевых функций и допустимых областей существования целевых функций.

3. Разработать аналитическую модель поиска оценки качества продукции и методику решения задачи поиска оптимальных численных значений целевых функций, характеризующих качество продукции.

4. Разработать методику поддержки принимаемых решений для обеспечения и улучшения качества продукции приборостроения на основе визуализации области Парето.

Объект исследования – процесс производства изделий приборостроения.

Предмет исследования – методы, критерии и модели, обеспечивающие принятие решений при управлении качеством приборостроительной продукции для обеспечения и улучшения качества выпускаемой продукции.

Методы исследования. В ходе исследования использованы методы теории двухуровневой оптимизации, методы управления качеством продукции при нечеткой среде, методы теории принятия решений, методы визуальной

интерпретации области Парето и алгоритмы преобразования задач двухуровневой оптимизации в задачи многокритериальной оптимизации.

Тематика работы соответствует областям исследования паспорта научной специальности 2.5.22. «Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства» по следующим пунктам, указанным в паспорте специальности: 1. Методы анализа, синтеза и оптимизации, математические и информационные модели состояния и динамики процессов управления качеством и организации производства; 5. Методы оценки качества объектов, стандартизации и процессов управления качеством; 9. Разработка и совершенствование научных инструментов оценки, мониторинга и прогнозирования качества продукции и процессов; 16. Моделирование и оптимизация организационных структур и производственных процессов, вспомогательных и обслуживающих производств. Экспертные системы в организации производственных процессов.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Модель многогранника качества продукции приборостроения на основе показателей, характеризующих качество продукции приборостроения через перечень целевых функций.

2. Методика идентификации показателей качества и их оценки для описания целевых функций и допустимых областей существования целевых функций.

3. Аналитическая модель поиска оценки качества продукции и методика решения задачи поиска оптимальных численных значений целевых функций, характеризующих качество продукции.

4. Методика поддержки принимаемых решений для обеспечения и улучшения качества продукции на основе визуализации области Парето.

Научная новизна. Научной новизной обладают следующие элементы диссертационной работы:

1. Модель многогранника качества продукции приборостроения, которая в отличие от классической иерархии показателей качества описывает состояния

процессов управления качеством и организации через перечень целевых функций.

2. Методика идентификации показателей качества и их оценки, которая в отличие от существующих квалиметрических методов оценки обеспечивает возможность численного описания процессов управления качеством путем применения методов и моделей теории информации, теории нечетких множеств и нечеткой кластеризации.

3. Аналитическая модель поиска оценки качества продукции и методика решения задачи поиска оптимальных численных значений целевых функций, которые в отличие от известных методов (аналитических, статистических, экспертных методов) основаны на применении модели двухуровневой оптимизации для реализации принципов децентрализованного управления качеством и аналитическом задании зависимости между целевыми функциями для делегирования на функцию качества опций координации и контроля над функциями нижнего уровня.

4. Методика поддержки принимаемых решений для обеспечения и улучшения качества продукции на основе визуализации области Парето, которая, в отличие от известных методов принятия решений при управлении качеством продукции, заключается в проекции возникающих затрат или потерь, характеризующих найденное численное значение качества продукции приборостроения, на область Парето, что позволяет оптимизировать работу организационной структуры и обслуживающих процессов в рамках существующей системы менеджмента качества.

Обоснованность и достоверность. Обоснованность научных результатов основана на корректном применении математического аппарата теории двухуровневой оптимизации, теории принятия решений, теории нечеткой кластеризации, теории нечетких множеств и квалиметрического оценивания, а также подтверждается результатами практического внедрения. Достоверность результатов проведенных исследований обеспечивается использованием современных методов обработки информации на основе нечетких множеств и

математической статистики и подтверждена совпадением результатов исследования с экспериментальными данными, практической реализацией разработанной автоматизированной системы оценки и улучшения качества продукции на предприятиях.

Теоретические результаты диссертационного исследования:

1. Определен многогранник качества продукции приборостроения на основе показателей, характеризующих качество продукции приборостроения через перечень целевых функций.

2. Разработана методика идентификации показателей качества и их оценки для описания целевых функций и допустимых областей существования целевых функций.

3. Разработана аналитическая модель поиска оценки качества продукции и методика решения задачи поиска оптимальных численных значений целевых функций, характеризующих качество продукции.

4. Разработана методика поддержки принимаемых решений для обеспечения и улучшения качества продукции на основе визуализации области Парето.

Практическая значимость полученных научных результатов состоит в следующем:

1. Результаты использования основных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечивают снижение доли дефектной продукции на операционном контроле в среднем на 13,4% и повышение выхода годной продукции на 7% за счет централизованного поступления информации из различных источников, последующего вывода оценки уровня качества и разработки рекомендуемых мероприятий по совершенствованию. Сэкономленное время позволит разгрузить начальников отделов и персонал среднего звена для решения других проблем и снизить затраты на обеспечение качества в среднем на 23,1%.

2. Предложенная методика поиска оценки качества продукции на основе модели двухуровневой линейной оптимизации позволяет учитывать большой

объем информации по сравнению с классическими квалиметрическими моделями оценки качества продукции приборостроения.

3. Учет разнородной информации при формализации целевых функций и критериев качества на базе нечетких моделей позволяет расширить существующий перечень учитываемых показателей качества продукции.

4. Предложенная методика анализа нечеткой информации позволяет численно формализовать синтез взаимосвязи качественной и количественной информации для получения частных показателей и их учета при принятии решений.

5. Предложенная методика поддержки принятия решения при управлении качеством продукции на основе визуализации области Парето позволяет повысить результативность мероприятия по обеспечению качества в среднем на 13,2%.

6. Разработанная автоматизированная система поиска оценки качества продукции позволяет сократить трудоемкость сбора, обработки и анализа информации о качестве продукции за счет устранения промежуточных форм предоставления информации в отношении качества продукции.

7. Предложенная методика поддержки принятия решений на основе визуализации области Парето позволяет интенсифицировать производство продукции приборостроения за счет уменьшения трудоемкости выполнения технологических операций в среднем на 5%.

Личный вклад автора состоит в непосредственной разработке а) модели многогранника качества; б) методики численной идентификации показателей качества и их оценки для описания целевых функций и допустимых областей существования целевых функций; в) аналитической модели поиска оценки качества продукции и методики решения задачи поиска оптимальных численных значений целевых функций, характеризующих качество продукции; г) методики поддержки принимаемых решений для обеспечения и улучшения качества продукции на основе визуализации области Парето.

Внедрение результатов диссертационного исследования.

Результаты основных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационном исследовании, использованы в ОАО «Радиоавионика», АО «Микротехника», ПАО «Техприбор». Фундаментальные и теоретические исследования в диссертационной работе выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90012 «Разработка автоматизированной системы оценки качества продукции приборостроения».

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 10 международных и 3 всероссийских научных конференциях

Публикации. По теме диссертации опубликовано 27 работ, из них: 6 – без соавторов, в том числе 12 статей в ведущих рецензируемых научных журналах, 7 статей в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования, 8 статей в других изданиях, одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложений. Содержание работы изложено на 172 страницах машинописного текста.

Глава 1. Постановка проблемы оценки и улучшения качества продукции и пути ее решения

1.1. Описание проблемной области

На современном этапе развития производства и промышленного сектора экономики стали доступны технологии и методики автоматического управления производством на основе искусственного интеллекта и аналитики больших данных, что позволяет достичь значительной производительности и производственной мощности. Среди популярных технологий принятия решений и аналитики больших данных можно выделить инструменты Business intelligence (BI).

BI-системы включают методы обработки и группировки данных, методы анализа и аналитики данных, методы визуализации и предоставления отчетности. Механизм работы системы мониторинга, оценки и принятия решений (СМОПР) на основе BI-систем представлен на рисунке 1.

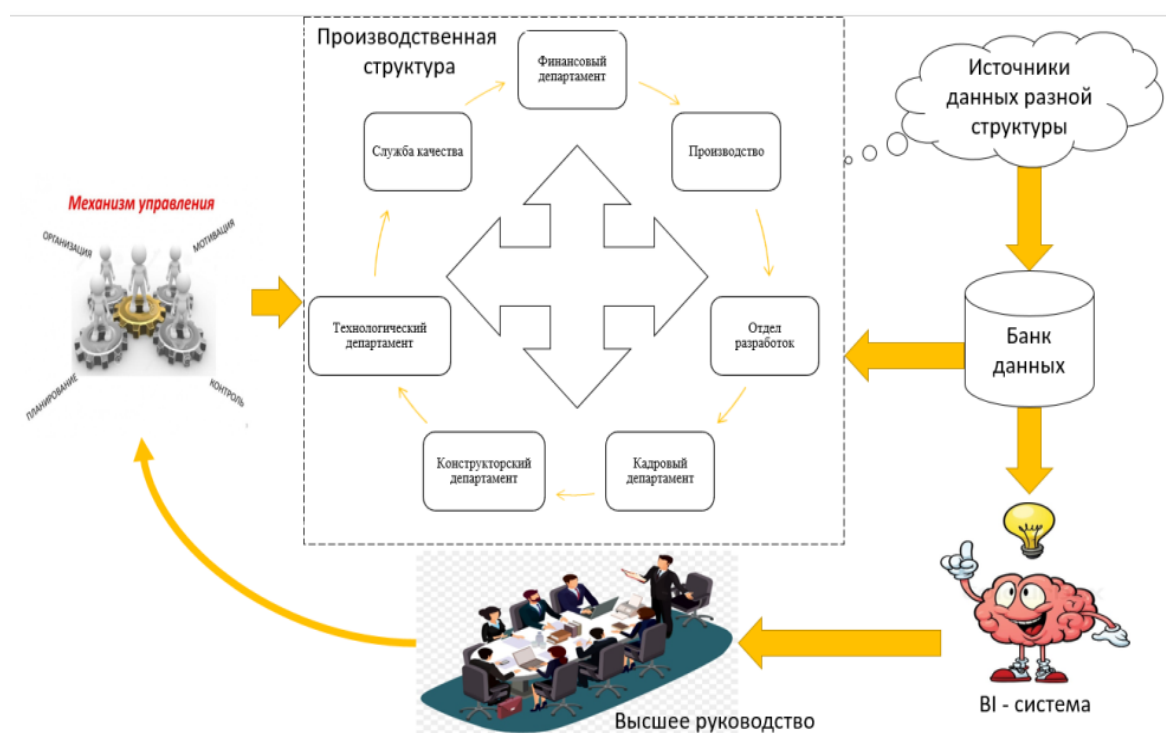


Рисунок 1 – Механизм работы СМОПР

В настоящее время технологии автоматического производства и технологии аналитики данных интегрированы в систему менеджмента качества только на основе существующих документированных процедур или инструкций. Как

правило, в таких процедурах описаны методы работы с данными, основные функции отделов, отвечающих за выполнение процессов менеджмента качества, и правила принятия решений, на основе собранных данных. Базой системы менеджмента качества, на которой основаны перечисленные выше процедуры и инструкции, являются хорошо известные методы управления качеством (начиная от диаграммы Исикавы и заканчивая многомерными контрольными картами). Благодаря комплексу встроенных в систему менеджмента качества методов управления качеством, можно обрабатывать, анализировать информацию и принимать решения в отношении качества продукции на всех этапах жизненного цикла.

При анализе и интерпретации полученного численного значения оценки качества продукции, как правило, для обеспечения, и при необходимости улучшения качества, опираются на так называемый треугольник качества, где углами служат такие критерии как «Время», «Качество» и «Деньги». По мере развития методов принятия решений в отношении качества продукции, перечисленные критерии стали дробиться (уточняться) на подкритерии с целью повышения точности принятия решений. В настоящее время принятие решений осуществляется не в треугольнике качества, а на многоугольнике или многограннике качества, что привело к росту числа граней и, соответственно, к появлению проблемы интерпретации большого массива данных, сложности построения дерева решений и к сложности поиска компромисса между углами качества.

Для определения размерности области принятия решений необходимо обратиться к основным векторам принятия решений при реализации проектов или выпуске продукции. На рисунке 2 представлен треугольник качества, который раскрывается через две страты, где первая страта – это производственная структура, а вторая страта – взаимосвязанные производственные процессы, такие как управленческие процессы (УП), вспомогательные процессы (ВП), обслуживающие процессы (ОбП) и основные процессы (ОП).

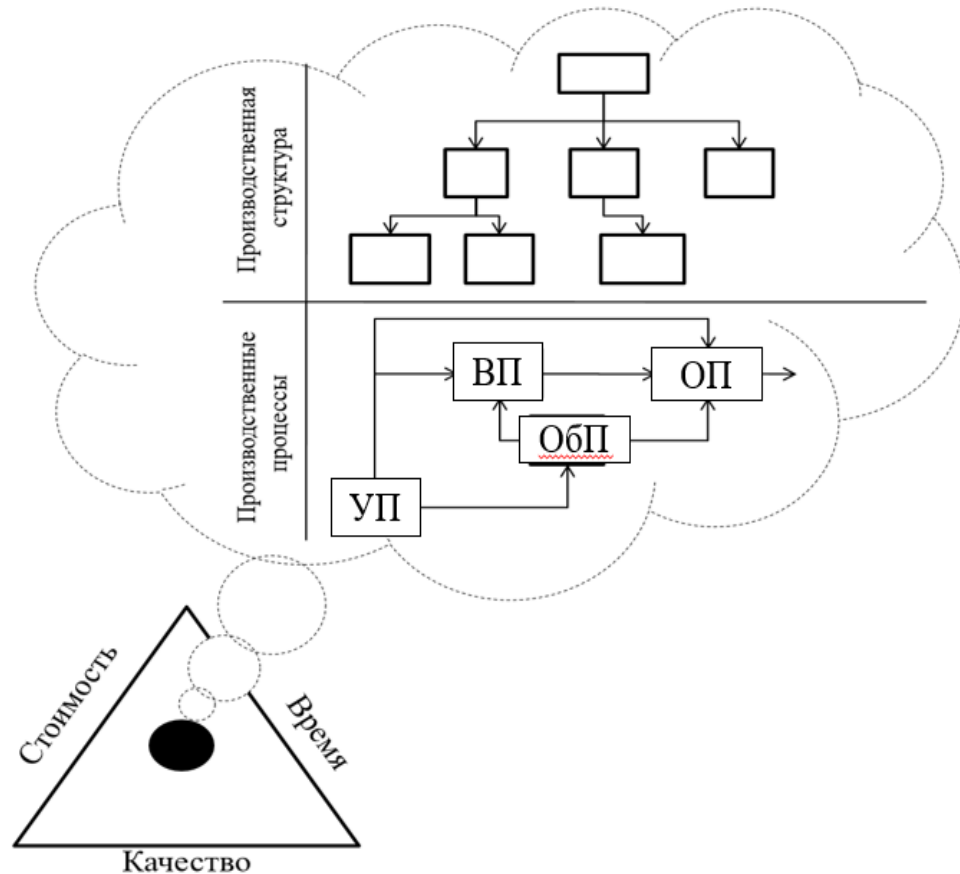


Рисунок 2 – Треугольник качества

Как видно из рисунка 2, оптимальная точка на треугольнике качества должна быть связана со всеми процессами внутри предприятия так, чтобы регулируя протекание процессов или улучшая их, можно было управлять всеми структурными подразделениями организации.

Существующее развитие подходов и методов управления качеством продукции позволяет планировать, управлять, прогнозировать и обеспечивать качество продукции в рамках треугольника качества и в существующих условиях развития производства («Индустрия 4.0») [10], [11], [12], [15]. Следует отметить, что управление качеством продукции в рамках многогранника качества в настоящее время осуществляется с применением большого перечня существующих подходов и методов управления качеством продукции, что позволяет анализировать все грани многогранника качества продукции в отдельности, а не комплексно. Применение большого перечня методов и средств

управления качеством продукции в рамках одного предприятия приводит к следующим проблемам:

1. Увеличение времени взаимодействия между отделами для принятия решений в области управления качеством продукции.
2. Методы управления качеством применяются, как правило, по отдельности разными структурными подразделениями, в результате чего утрачивается целостный взгляд на качество продукции.
3. В существующих инструментах и методах управления качеством продукции нет интеграции с системой бизнес аналитики (BI-системы), что влияет на оперативность принятия решений и объем учитываемой информации при управлении качеством продукции.
4. Отсутствует необходимая визуализация и интерпретация многогранника качества, отражающая функциональные взаимосвязи между процессами с точки зрения концепции «Качество 4.0».

Сложность обеспечения качества продукции и улучшения качества в рамках заданных внутренних требований связана со сложностью поиска рациональных решений по управлению гранями или факторами, влияющими на качество продукции, что также усложняется в виду слабой структуры информации большого объема.

В обзорной работе [50] на примере оптимизации таких составных частей производства, как планирование, качество и производственное обеспечение, показано, что задача оптимизации и интерпретации полученных результатов является актуальной при управлении процессами обеспечения требуемых показателей качества продукции. Отмечена сложность решения задачи путем описания основных практик оптимизации каждого из трех направлений (планирование, качество, производственное обеспечение) в отдельности. Так, для решения задачи планирования качества учитывается статистическая информация по выборочному входному контролю и операционному статистическому контролю, при этом требования к продукции определяются, исходя из проводимых статистических экспериментов и планируемых затрат на

качество. Для решения задачи производственного обеспечения учитывается информация о работе оборудования и нагрузка на оборудование. А при планировании производства учитываются выбранные стратегии контроля качества, производственного обеспечения и затрат на качество.

Теория оптимизации используется при решении задач управления качеством продукции. Например, в соответствии с проведенным исследованием [51], [52], [71], можно заключить, что начиная с 2011 года опубликовано более 84 работ в таких журналах, как “Computers & Industrial Engineering”, “Reliability Engineering & System Safety”, “International Journal of Production Research” и “The International Journal of Advanced Manufacturing Technology”. В опубликованных работах для управления качеством используется концепция треугольника качества. Для решения перечисленных выше проблем необходимо перейти к концепции многогранника качества, на основе собранной разнородной информации. Это позволит решить следующие задачи:

1. Найти оценку качества продукции с учетом собранной информации от всех структурных отделов производства.
2. Уменьшить степень участия человека в процессе принятия решений в отношении качества продукции.
3. Уменьшить трудоемкость и увеличить оперативность принятия решений в отношении качества продукции путем уменьшения числа применяемых классических методов управления качеством продукции на промежуточных этапах.
4. Увеличить согласованность принятия единого решения в отношении качества продукции путем применения математической двухуровневой линейной оптимизации вместо комплекса стандартных методов управления качеством продукции.

Научная новизна предложенных методов оценки и улучшения качества продукции приборостроения выражается в реализации концепции многогранника качества и принципы концепции «Качество 4.0» [17], [45], [68], что позволит не только развить теорию управления качеством и связанную с ней

теорию оптимизации и принятия решений, но и получить практический эффект для российской промышленности.

1.2. Актуальные проблемы оценки и улучшения качества продукции в приборостроении

Для выделения актуальных проблем оценки и улучшения качества продукции необходимо описать приборостроительную отрасль. К приборостроительной продукции относятся средства измерений, обработки и предоставления информации, автоматических и автоматизированных систем управления.

Для успешного развития приборостроения необходимо уделять приоритетное внимание вопросам обеспечения и улучшения качества изделий приборостроения. Задача обеспечения качества направлена на достижение заданных показателей или характеристик в рамках заложенных требований на базе внутренних и государственных стандартов. Задача улучшения качества продукции приборостроения направлена на улучшение результативности процессов организации для достижения запланированных целей по обеспечению качества продукции.

Проблема обеспечения и улучшения качества изделий приборостроения послужила катализатором исследований в области оценки качества продукции, направленных на решение проблем риска возникновения отказов на этапе эксплуатации и оптимизации производственного цикла за счет рационального распределения производственных ресурсов в процессе производства приборостроительной продукции.

Говоря о качестве приборостроительной продукции, нужно уделить внимание содержанию понятия «Качество». В работе [92] предложено отказаться от целостного определения качества как интегрального показателя: «Качество объекта – с точки зрения применения — это набор свойств, как положительных, так и отрицательных, ощущаемых потребителем при применении продукции в соответствии с назначением; расходы или эффективность следует учитывать при разработке и применении программы для

контроля качества объекта, а не в концепции качества или интегрального качества». В работе [18] расширена философия качества за счет включения концепций всеобщей эффективности и ответственности. В работе [19] в характеристику цели качества введены производственные условия, при этом подразумевается, что качество определяется материалами, проектированием, технологиями, персоналом и т.д.

Исходя из вышесказанного можно сделать вывод, что качество в отношении продукции – это функция многих факторов (персонал, технологии, материалы, затраты и инфраструктура) [46-48]; качество для каждого лица, принимающего решение, – это свой набор параметров (свойств). Отсюда следует, что необходимо построение корректной модели описания качества продукции с учетом многих критериев, что требуется для решения следующих задач:

- управление экономическими потерями;
- оценка надежности поставщиков;
- корректирование технологических операций, при необходимости;
- поиск перспективных технологий изготовления продукции;
- управление оснасткой и технологическим оборудованием;
- управление персоналом и производственной средой;
- управление разработками и своевременное внесение доработок в конструкцию изделия;
- регулировка мероприятий или стратегий в области качества и др.

Для решения перечисленных задач в отношении качества приборостроительной продукции необходимо идентифицировать перечень показателей качества продукции, которые должны удовлетворять не только внешним требованиям государственных и международных стандартов, но и внутренним стандартам организаций приборостроения. При этом разработанная модель оценки и мониторинга качества продукции приборостроения должна обеспечивать ответы на следующие вопросы:

- Что нужно улучшить, чтобы повысить качество продукции?
- Какие будут потери при улучшении того или иного показателя качества?

- Какие мероприятия в области качества необходимо скорректировать, чтобы повысить качество продукции?

Современный этап развития промышленности в целом все чаще характеризуют термином «Индустрия 4.0», отражающим следующие функции:

1. Аналитика больших данных и наука о данных.
2. Прогнозирование состояния продукции на всех этапах ее развития и существования.
3. Взаимодействие промышленности как с внутренней средой, так и с внешней в рамках концепции «Интернет вещей».
4. Переход от автоматизированного производства к автоматическому, т.е. переход к умному производству.
5. Применение искусственного интеллекта при производстве продукции.

Возникновение «Индустрии 4.0» привело к формированию концепции «Качество 4.0», в рамках которой в настоящее время разрабатываются новые методы и модели управления качеством продукции, основанные на пяти перечисленных выше функциях. Применение современных методов и моделей для решения задач оценки качества в рамках концепции «Качество 4.0» призвано устранить зазор между потребностями потребителя и характеристиками выпускаемой продукции [53]. Промышленность, внедряющая современные методы и модели в рамках концепции «Качество 4.0», способна конкурировать на международном рынке [64], что подтверждается способностью работать в соответствии с моделями национальных премий качества Джурана, Малкольма Болдриджа, премии Деминга и Европейской премии качества [78].

Помимо возможностей применения технологий индустрии 4.0 и качества 4.0, следует учесть проблемы, связанные со сложностью обработки больших массивов информации [94]. Однако, благодаря применению современных технологий контроля качества продукции [110], можно решить эту проблему.

Для решения задач обеспечения и улучшения качества приборостроительной продукции необходимо внедрить современные методы управления качеством в соответствии с концепцией «Качество 4.0», что позволит

улучшить качество продукции и способность удовлетворять всем требованиям заинтересованных сторон. Существует классификация уровней развития моделей мониторинга и оценки качества продукции [121].

Показатели качества продукции приборостроения в рамках концепции «Качество 4.0» и математической модели двухуровневой оптимизации должны учитывать следующую информацию:

1. Информацию, учитывающую эффективность и результативность внедренных мероприятий в области качества.
2. Информацию, отражающую процесс производства.
3. Информацию, отражающую управление поставщиками.
4. Информацию, отражающую внесенные изменения в конструктив и функционал продукции на этапе производства.
5. Информацию, учитывающую затраты на качество.

На основе сказанного, актуальность разработки методики оценки и улучшения качества продукции выражается в расширении существующего перечня методов оценки и принятия решений при управлении качеством продукции. Для решения данной задачи необходимо проанализировать существующие методы и модели оценки и улучшения качества продукции. Данный анализ приведен в разделе 1.3.

1.3. Анализ современного состояния методов оценки и улучшения качества продукции

В данном разделе дано краткое описание развития теории управления качеством продукции с переходом к современным методам оценки и улучшения качества продукции.

1.3.1. История развития методов оценки и улучшения качества продукции

Краткая хронологическая цепочка развития методов оценки и улучшения качества продукции представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Хронология развития методов оценки и улучшения качества

Описание этапа промышленной революции	Время	Наименование подходов, принципов или моделей	Авторы
Формирование промышленности (машиностроение, легкая промышленность)	Начало второй пром. рев.	Методы балльной оценки, органолептической оценки. Методы сравнения с образцом. Возникновение классификаторов товаров (сортность).	-
Развитие автомобильной и легкой промышленности. Расширение потребительского рынка	1903 г.	Возникновение школы научного менеджмента.	Форд, Тейлор, Файоль.
Развитие массового производства	1931 г.	Появление карт Шухарта.	Шухарт
Начало второй мировой войны	1939 г.	Развитие методов статистического контроля качества (в частности, в оборонной промышленности).	Харольд Ф. Додж, Харри Ж. Роминг, Абрахам Уолд
Конец второй мировой войны	1946-1968 гг.	Зарождение теории всеобщего управления качеством. Переход к системному подходу при управлении качеством продукции. Развитие статистических методов управления качеством. Разработка семи новых инструментов управления качеством.	Г. Тагути, К. Исикава, Э. Деминг
Возникновение стандартов в области качества.	1979-1987 гг.	Стандарты серии ISO 9000. Квалиметрия.	Международная ассоциация по сертификации.

Представленная история развития методов оценки и улучшения качества продукции показывает, что в разные времена, в зависимости от научно-технического развития, применялись разные подходы и методы оценки качества продукции.

1.3.2. Анализ состояния современных методов оценки и улучшения качества продукции

Возникновение нового производственного уклада «Индустрия 4.0» и концепции «Качество 4.0», основанных на применении киберфизических систем управления производством, применении аналитики больших данных, технологии интернет-вещей и т.д., способствовали развитию новых подходов и

методов мониторинга и оценки качества продукции, которые могут быть классифицированы по следующим признакам [44]:

- по математическим моделям;
- в соответствии с типом полученной информации;
- в соответствии с учтенными факторами.

Инструменты для оценки и улучшения качества можно разделить на статистические, аналитические, экспертно-аналитические и экспертные статистические. Классификация методов оценки и улучшения качества продукции представлена на рисунке 3.

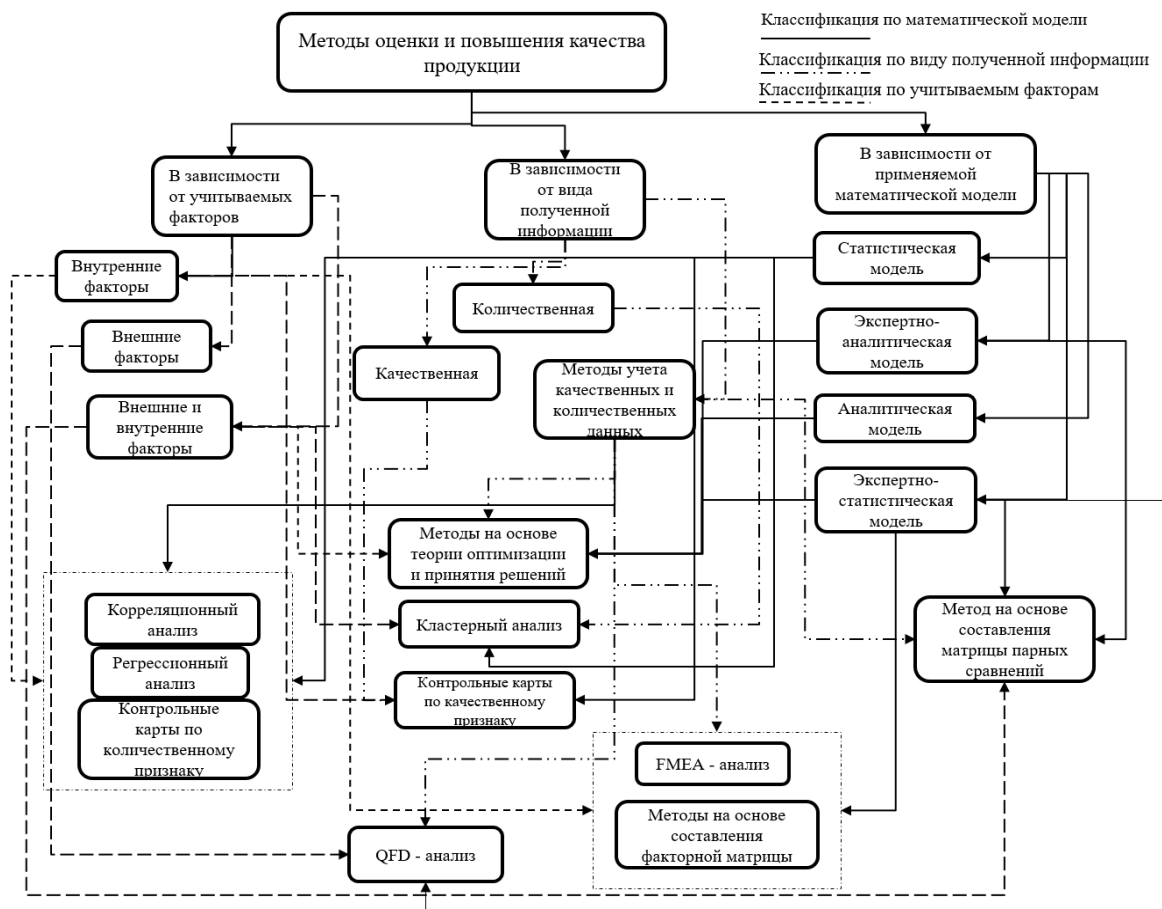


Рисунок 3 – Классификация методов обеспечения и улучшения качества продукции

Классификация составлена на основе изучения следующих работ по методам оценки и улучшения качества продукции; [49], [65], [66], [81], [83], [89], [101], [109], [113], [115], [116] и [117].

В настоящей работе методы оценки и улучшения качества технической продукции будем классифицировать с учетом следующих составляющих:

1. **Объект управления.** Под объектом управления подразумеваем процессы системы менеджмента качества: управляющие процессы, основные процессы и вспомогательные процессы.

2. **Управляющий орган.** Лицо или структурное подразделение, осуществляющее деятельность по оценке и управлению качеством.

3. **Входная информация.** Способность методов оценки качества продукции учитывать и работать с неуправляемыми факторами, управляемыми факторами, а также с количественной или качественной информацией.

4. **Выходные значения.** Интерпретация состояния объекта управления через качественную и (или) количественную информацию.

Методы оценки и улучшения качества продукции в настоящей работе будем рассматривать в рамках экспертных моделей, статистических моделей, аналитических моделей (основанных на теории оптимизации) и нечетких моделей.

Принадлежность перечисленных моделей в соответствии с предложенной классификацией методов оценки качества продукции представлена в таблице 2.

Таблица 2 – Классификация методов оценки качества продукции

Модель оценки качества продукции	Объект управления	Орган управления	Входная информация	Выходная информация
Экспертные модели	Управляющие процессы. Основные процессы Вспомогательные процессы	Высшее руководство	Качественная и количественная	Качественная
Статистические модели		Отделы качества, конструкторские отделы, технологические отделы и т.д	Количественная	Количественная
Аналитические модели			Количественная	Качественная и количественная
Нечеткие модели		Высшее руководство	Качественная и количественная	Качественная и количественная
	Отделы качества, конструкторские отделы,			

		технологические отделы и т.д		
--	--	---------------------------------	--	--

В настоящее время существуют следующие методы оценки и улучшения качества продукции на основе теории оптимизации и принятия решений [2– 5]:

1. Модели и методы управления качеством продукции, основанные на поиске рациональных путей обслуживания оборудования путем анализа затрат на качество и загрузки оборудования. В данном направлении основное внимание уделяется детализации понятия качества и производственного обеспечения с применением контрольных карт, теории затрат на качество и методов многокритериальной оптимизации. Существенный вклад в развитие данного направления внесли ученые в работах [71], [90] и [114]. Основной идеей данного направления является поиск оптимальных стратегий обслуживания технологического оборудования и разработка планов контроля качества с учетом затрат на обслуживание оборудования, времени простоя оборудования и затрат на контроль качества [71]. Разработчики данного направления ставят задачу оптимизации качества продукции и состояния производства через решение задачи экономико-статистической оптимизации параметров процессов производства [54]. Входной информацией являются полученные контрольные карты, характеризующие стабильность технологического процесса, затраты на контроль качества [90], время простоя оборудования и затраты на обслуживание технологического оборудования. Задача решается с применением многоцелевого программирования [114]. Решением задачи является оптимальный план выборочного контроля, объем выборки, необходимое количество выборок и план обслуживания технологического оборудования [55]. Система управления качеством продукции и производства, предложенная в данном направлении, решает следующие задачи:

1) определение объема выборки для контроля качества параметров производимой продукции с учетом затрат на качество;

2) определение необходимого объема ресурсов для обеспечения процесса производства с учетом изменчивости технологических процессов и денежных затрат;

3) определение плана-графика обслуживания технологического оборудования с учетом допустимых ресурсов и изменчивости технологических процессов.

2. Модели и методы управления качеством продукции, основанные на поиске рациональных путей минимизации изменчивости технологического процесса путем анализа износа оборудования и определения оптимального количества инструментов и материала для ремонта и восстановления работоспособности оборудования. Среди наиболее популярных работ по данному направлению, можно выделить [63], [91] и [59]. Основной идеей данного направления, как и в случае с первым направлением, является определение таких решений задачи оптимизации, которые позволят минимизировать изменчивость технологического процесса. Основным отличием является наличие дополнительных ограничений и целевых функций, а также наличие дополнительных задач. В качестве ограничения выступают критический износ технологического оборудования и объем запасов на ремонт и восстановление оборудования, а также ограниченный размер выборки. В качестве целевой функции добавлены производственно-инвентарные запасы, которые необходимо минимизировать, так как они приводят к увеличению затрат на изготовление продукции.

Для решения задачи управления качеством необходимо минимизировать затраты на качество (затраты на устранение дефектов, затраты на анализ дефектов и затраты на контроль качества), затраты на техническое обслуживание процесса производства и затраты на инвентаризацию. Переменные решения включают размер буферного запаса, размер выборки, интервал выборки, наблюдение и контрольные пределы контрольных карт. Разработанная математическая модель и численная процедура позволяют одновременно определять оптимальные значения параметров контрольной карты и размер

буферного запаса, который должен быть создан производственной системой для обеспечения удовлетворения спроса при обслуживании технологического процесса изготовления продукции. Система управления качеством продукции и производства, предложенная в данном направлении, решает следующие задачи:

1) определение объема выборки для контроля качества параметров производимой продукции с учетом затрат на качество;

2) определение необходимого объема ресурсов для обеспечения процесса производства с учетом изменчивости технологических процессов и денежных затрат;

3) определение плана-графика обслуживания технологического оборудования с учетом допустимых ресурсов и изменчивости технологических процессов;

4) определение допустимой нагрузки технологического оборудования для максимально продолжительной работы с учетом объема производимой продукции и затрат на обслуживание технологического оборудования;

5) определение необходимого объема производственно-инвентарного запаса с учетом плана-графика обслуживания оборудования и допустимых денежных издержек.

3. Модели и методы управления качеством продукции, основанные на поиске рациональных путей планирования и обеспечения качества продукции путем анализа текущего состояния технологического процесса и финансовых возможностей. В развитие данного направления существенный вклад внесли ученые таких работ как [58], [73]. Основной идеей данного направления является поиск оптимальных значений целевых функций, характеризующих не только планирование производства, обеспечение производства и качество продукции, но и техническое обслуживание процесса производства. В предыдущих направлениях техническое обслуживание рассматривается лишь косвенно, а в данном направлении оно рассматривается как целевая функция. Система управления качеством продукции и производства, предложенная в данном направлении, решает следующие задачи:

- 1) определение объема выборки для контроля качества параметров производимой продукции с учетом затрат на качество;
- 2) определение необходимого объема ресурсов для обеспечения процесса производства с учетом изменчивости технологических процессов и денежных затрат;
- 3) определение плана-графика обслуживания технологического оборудования с учетом допустимых ресурсов и изменчивости технологических процессов;
- 4) определение допустимой нагрузки технологического оборудования для максимально продолжительной работы с учетом объема производимой продукции и затрат на обслуживание технологического оборудования;
- 5) определение оптимальных настроек технологического оборудования с учетом производственной нагрузки;
- 6) определение допустимой вариации технологического процесса с учетом производственных и экономических ограничений;
- 7) определение необходимого объема производственно-инвентарного запаса с учетом плана-графика обслуживания оборудования и допустимых денежных ресурсов.

4. Модели и методы управления качеством продукции и состоянием производства, на основе децентрализованного управления качеством продукции. Среди наиболее значимых можно выделить работы [84], [85], [3] и [23]. Основной особенностью данного направления является охват всего производства, а не фокусировка на технологических процессах, как в предыдущих направлениях. Под децентрализованной моделью управления качеством продукции понимается иерархическая модель структурных подразделений [29], где на верхнем уровне расположена служба качества, а на нижних – остальные подразделения, входящие под управление службы качества, но при этом принимающие самостоятельные решения [31]. Таким образом, целевые функции в данной модели определяются для описания функционирования каждого структурного подразделения и (или) цеха, чтобы можно было управлять состоянием

производства в целом. Математическая формализация осуществляется на базе моделей многокритериальной оптимизации и двухуровневой оптимизации.

В работе [29] автор предлагает модель двухуровневой оптимизации на основе функции качества, функции управления поставщиками и функции затрат на качество. Данная модель позволяет управлять качеством продукции путем регулировки затрат на качество, применения стратегии работы с поставщиками, управления результативностью и эффективностью системы менеджмента качества. Система управления качеством продукции и производства, предложенная в данном направлении, решает следующие задачи:

- 1) выявление проблемных поставщиков комплектующих изделий и их замена;
- 2) определение оптимальных затрат на мероприятия по обеспечению целевых показателей качества на стадиях производственного процесса;
- 3) корректировка процедур осуществления менеджмента качества;
- 4) оценка эффективности и результативности действующих мероприятий менеджмента качества и их корректировка, при необходимости;
- 5) определение критических составных частей производимой продукции и внесение изменений в продукцию.

Первые три направления сосредоточены на статистическом изучении технологического процесса и работы технологического оборудования с целью определения путей оптимизации процесса изготовления продукции с учетом экономических и производственных ограничений. Четвертое направление, напротив, детально не изучает технологические процессы, а сосредотачивает внимание на работе структурных подразделений с целью разработки необходимых мероприятий по улучшению качества продукции и состояния производства в целом. Проще говоря, в первом случае решается задача оптимизации технологических процессов производства для управления качеством продукции, а во втором случае оптимизируется работа структурных подразделений для управления качеством продукции.

Для улучшения существующих методов оптимизации качества продукции и состояния производства необходимо развить четверное направление, которое содержит общую модель двухуровневой оптимизации качества продукции и состояния продукции.

С целью развития четвертого направления в данной работе проводятся исследования, направленные на изучение возможностей обработки и анализа разнородной информации для формирования целевых функций по управлению качеством продукции, технологическими процессами, конструкциями, поставщиками, затратами на обеспечение качества и работу производства.

Результаты проведенных исследований используются для разработки комплексной модели двухуровневой оптимизации и принятия решений при управлении качеством и состоянием производства. Предложенная комплексная модель двухуровневой оптимизации и принятия решений для управления качеством продукции и состоянием производства в данной работе является новой.

Результаты и выводы по главе 1

В главе 1 диссертационного исследования проведен анализ современного состояния методов оценки качества продукции для решения задач оценки и улучшения качества продукции приборостроения. Проведен анализ современного состояния моделей оценки и улучшения качества продукции, на основе которого сформулирован подход к решению проблемы обеспечения в ходе производства заданных показателей качества изделий приборостроения путем применения методов теории оптимизации и принятия решений. Предложена классификация направлений развития управления качеством продукции, определены возможности решения задач диссертационного исследования с использованием рассмотренных методов и моделей.

По результатам анализа существующих методов оценки качества продукции выявляется необходимость расширения существующих методов оценки и улучшения качества продукции за счет адаптации методов оптимизации и принятия решений.

Необходимость адаптации методов оптимизации и принятия решений обуславливается новыми требованиями, сформированными в концепции «Качество 4.0», где даются расширенные требования в части мониторинга и принятия решений при управлении качеством продукции.

Глава 2. Комплексная модель решения задачи оценки и улучшения качества продукции на предприятиях приборостроения

В соответствии с ГОСТ Р ИСО 9000 – 2015 «Система менеджмента качества. Основные положения и словарь», задачи обеспечения и улучшения качества связаны с двумя частями менеджмента качества [8]. Первая часть направлена на создание уверенности, что требования к качеству будут выполнены, а вторая часть направлена на повышение способности выполнять требования к качеству. Известно, что требования к показателям качества определяются на интервалах от минимального допустимого значения до максимального значения показателя. При этом, чем ближе показатель к максимальному значению, тем лучше. Отсюда, обеспечение направлено на получение показателей качества в рамках установленных пороговых значений, а улучшение качества направлено на улучшение результатов работы процессов организации с целью приближения качества к своему максимальному значению в рамках установленных требований. Оценка качества продукции должна решить проблему обеспечения и улучшения качества продукции приборостроения путем обнаружения проблемных областей с наихудшими оценками.

2.1. Комплексная модель оценки и улучшения качества продукции приборостроения

Комплексная модель решения задачи оценки и улучшения качества продукции должна решать следующие задачи:

1. Обеспечение заданных требований к качеству продукции приборостроения.
2. Поиск путей улучшения результатов процессов предприятия и его подразделений, обеспечивающих выпуск приборостроительной продукции в соответствии с установленными требованиями.

Комплексная модель представляет собой совокупность моделей для решения таких задач, как сбор информации, обработка информации, оценка

разнородной информации, в том числе нечеткой, поиск оценки качества продукции с учетом состояния производства, визуализация допустимых решений для разработки мероприятий по управлению качеством продукции.

В модель входят следующие взаимосвязанные модули:

1. *Модуль обработки информации.* Модуль на входе получает разнородную информацию о качестве продукции из различных источников, а на выходе формирует целевые функции по каждой группе показателей качества, так что каждая целевая функция определяется набором своих частных показателей, выступающих в роли аргументов. Для поиска оценок относительной важности частных показателей модель формирует систему ограничений по результатам анализа воздействующих факторов. Для оценки полученных целевых функций и описания с их помощью качества продукции модель формирует ранговую шкалу.

2. *Модуль оценки качества продукции.* На вход данного модуля поступает выходная информация с модуля обработки информации, а на выходе формируется оценка качества продукции путем решения задачи оптимизации целевых функций (подробнее описано в главе 3).

3. *Модуль принятия решений.* На вход данного модуля поступает информация по полученным оптимальным значениями целевых функций, а на выходе устанавливается допустимая область улучшения значений целевых функций с привязкой к мероприятиям для улучшения процессов обеспечения качества продукции.

Как было сказано в 1.1 модель оценки и улучшения качества продукции должна принимать решения на основе анализа области многогранника качества, грани которого описывают группу факторов или показателей, влияющих на качество продукции. Допустимая область многогранника качества тем самым будет визуализировать допустимое качество продукции или оценку качества продукции, найденную с учетом воздействующих факторов.

2.2. Описание модели многогранника качества продукции

Для определения граней многогранника качества необходимо определить основные требования к современному управлению качеством на производстве.

Можно выделить следующие элементы развития и внедрения концепции «Качество 4.0» в современных организациях [112]:

1. Работа с большими данными.
2. Использование алгоритмов прогнозной аналитики для показателей качества.
3. Эффективная вертикальная, горизонтальная и сквозная интеграция через концепцию «Качество 4.0».
4. Использование концепции «Качество 4.0» для получения стратегического преимущества.
5. Лидерство в области концепции «Качество 4.0».
6. Обучение по концепции «Качество 4.0».
7. Производственная и организационная культура в соответствии с концепцией «Качество 4.0».
8. Поддержка высшего руководства.

Представленные элементы необходимы для реализации цепочки добавленной стоимости согласно модели Портера [62], [74]. Для ориентации деятельности организации с целью удовлетворения не только собственных потребностей, но и потребностей потребителей, и других заинтересованных лиц для всех процессов организации, на которых строится модель Портера, необходимо определить индикаторы или метрики. Метрики (индикаторы) необходимы для мониторинга целей организации в краткосрочной, среднесрочной и долгосрочной перспективе. На данных метриках строим систему поддержки принятия решения и систему мониторинга процессов деятельности организации.

Таким образом, концепцию многогранника качества формируем на метриках (индикаторах) деятельности организации согласно концепции «Качество 4.0» и концепции «Индустрия 4.0». Грани многогранника должны определять взаимосвязь качества продукции с такими факторами, как технологии, поставщики, затраты и материалы или комплектующие. При этом воздействие на качество продукции осуществляется путем улучшения

деятельности процессов, обеспечивающих необходимыми технологиями и ресурсами процесс производства приборостроительной продукции. Алгоритм оценки и улучшения качества продукции приборостроения состоит из следующих укрупненных шагов:

1. Обработка и анализ информации о факторах, влияющих на качество продукции.
2. Оценка качества продукции с учетом влияющих факторов.
3. Определение параметров, характеризующих процессы, обеспечивающие выпуск продукции приборостроения.
4. Предложение перечня решений по обеспечению или улучшению качества продукции приборостроения в ходе производства на приборостроительном предприятии.

На рисунке 4, описана модель многогранника качества продукции, предложенная автором в работе [107]. Многогранник качества состоит из перечисленных выше факторов в 1.1, отображенных в модели в виде граней.

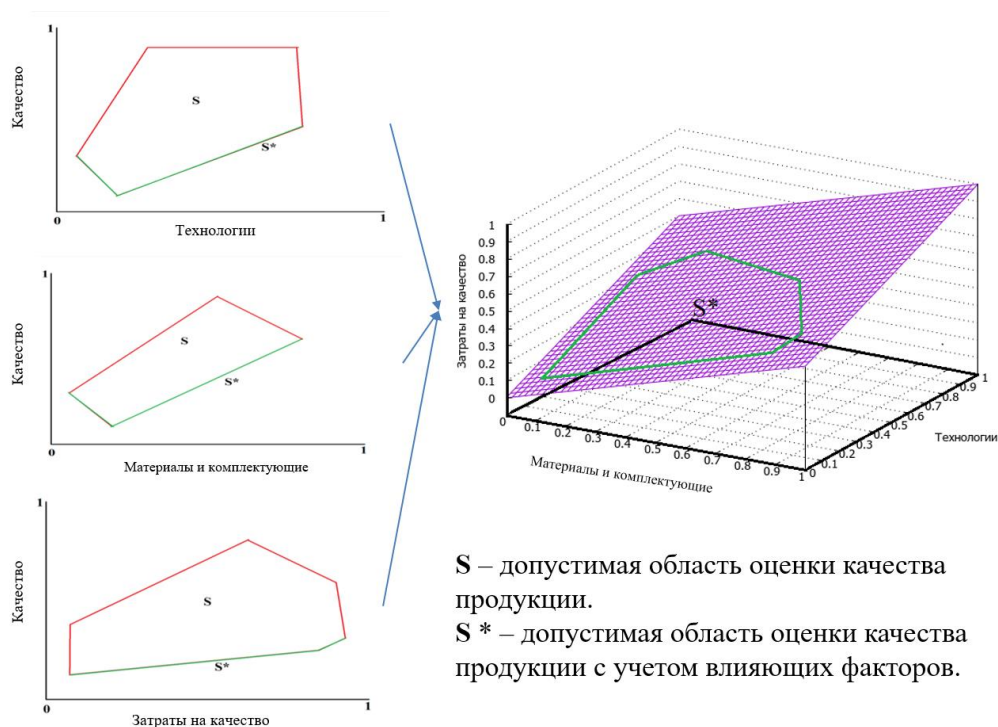


Рисунок 4 – Модель многогранника качества продукции

На рисунке 4 выделенная нижняя линия на графиках слева – допустимое качество продукции с учетом воздействующих факторов со стороны технологий,

материалов и затрат на качество, а на графике справа отображена область допустимого качества на многограннике качества с учетом воздействующих факторов. Таким образом, чем меньше область S^* , тем ниже качество продукции приборостроения. Объединение граней многогранника осуществляется путем нормировки показателей, перевода их к безразмерным единицам и определения функциональной взаимосвязи между факторами и качеством продукции.

Одним из преимуществ визуализации многогранника качества является наглядная интерпретация степени воздействия той или иной грани (фактора) на качество продукции приборостроения [23].

2.3. Описание модели поиска оценки и улучшения качества продукции приборостроения в рамках многогранника качества

Для реализации многогранника качества продукции приборостроения необходимо разработать модель оценки и улучшения качества, состоящую из трех модулей (описание модулей приводится в 2.1). Описание модели оценки и улучшения качества продукции приборостроения приводится на рисунке 5.

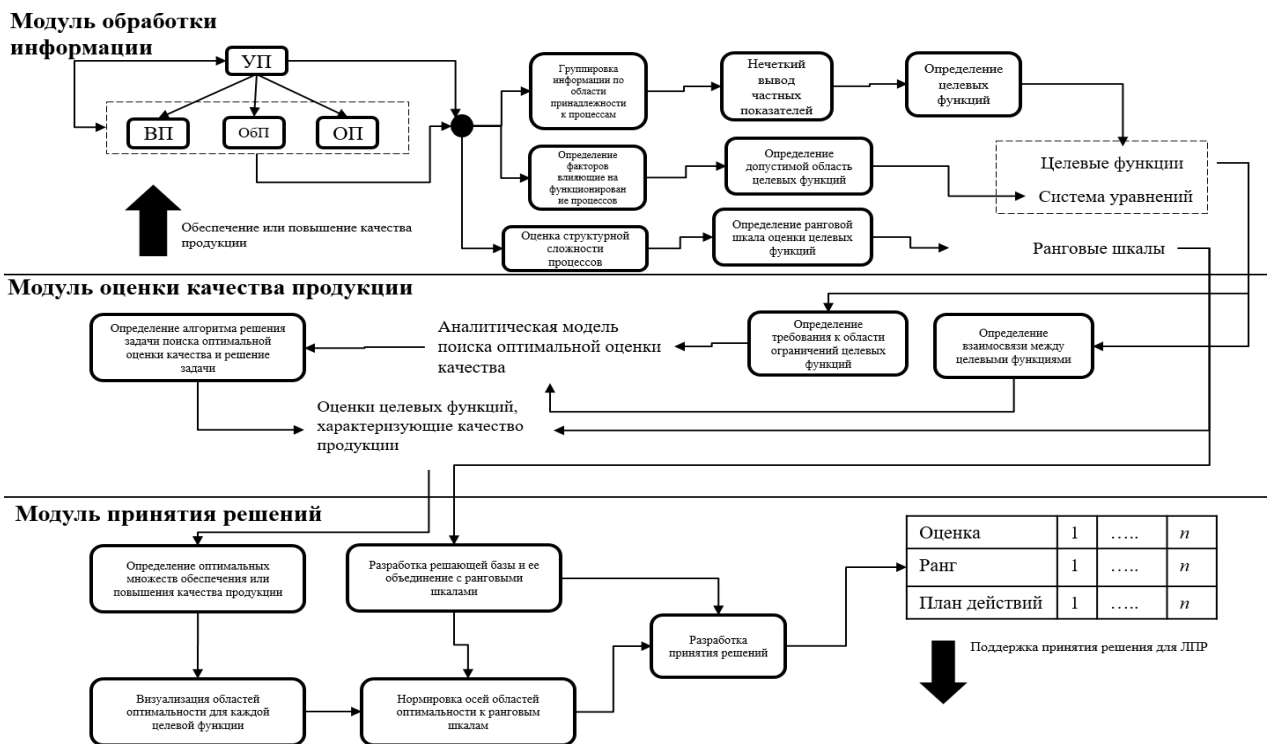


Рисунок 5 – Модель обеспечения и улучшения качества продукции

На рисунке 5 представлена модель, состоящая из трех страт. На первой страте представлено описание модуля обработки информации, за счет которого осуществляется сбор первичной информации из процессов управления (УП), вспомогательных процессов (ВП), обеспечивающих процессов (ОбП) и основных процессов (ОП). Собранные информация группируется по показателям качества, а. После группировки осуществляется выявление и анализ факторов, а также оценка сложности выполнения процессов организации. Для реализации данного модуля применяется аппарат нечеткого вывода.

На второй страте представлен модуль оценки качества продукции. Данный модуль формирует аналитическую модель решения задачи оптимизации для нахождения коэффициентов важности частных показателей целевых функций с учетом требования к показателям качества продукции приборостроения. Найденные численные значения целевых функций в совокупности описывают качество продукции.

На третьей страте представлен модуль принятия решений. Модуль на основе найденных численных значений целевых функций описывает область допустимых улучшений и оценивает допустимые улучшения с применением ранговой шкалы. Ранговая шкала состоит из рангов, интервальных оценок и описания состояния качества продукции.

2.4. Сравнительный анализ математических моделей для реализации многогранника качества продукции приборостроения

Для реализации подходящей для рассматриваемых задач модели оценки и улучшения качества продукции приборостроения, необходимо проанализировать основные теории, применяемые при решении задач управления, оптимизации и принятия решений (рис. 6). На рисунке 6 представлена взаимосвязь основных теорий, необходимых для разработки комплексной модели оценки и улучшения качества продукции и входящих в нее модулей.

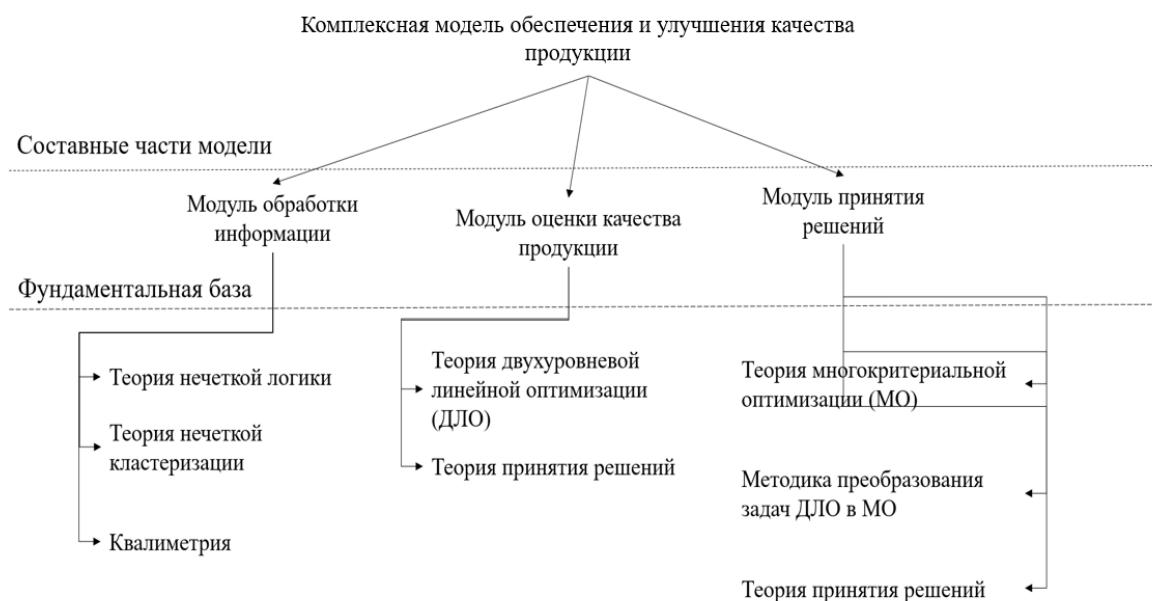


Рисунок 6 – Составные части модели оценки и улучшения качества продукции приборостроения

Целесообразность применения нечеткой логики обуславливается необходимостью определения численных значений частных показателей для каждой целевой функции. Область определения численных значений частных показателей целевых функций может быть представлена пересечением нечетких множеств, где каждое множество характеризует ту или иную информацию. Например, уровень выхода годной продукции определяется на нечетком множестве, так как невозможно четко идентифицировать низкое или высокое значение уровня выхода годной продукции, в связи с тем, что необходимо учитывать не только фактический брак, но и количество исправимого дефекта и количество разрешений на отклонения. Помимо формирования целевых функций, модуль обработки информации описывает в виде систем уравнений область существования целевых функций, которые характеризуют факторы, влияющие на частные показатели целевых функций.

Необходимость применения теории оптимизации при реализации модуля поиска оценки качества продукции связана с необходимостью поиска коэффициентов важности целевых функций, которые описывают качество

продукции приборостроения в совокупности. Найденные оптимальные значения коэффициентов важности позволяют численно выражать целевые функции.

Целесообразность применения теории принятия решений для реализации модуля принятия решений обуславливается необходимостью находить перечень рациональных решений по улучшению численных значений целевых функций, которые характеризуют качество продукции приборостроения.

Далее в 2.4.1 представлен сравнительный анализ методов нечеткой логики, в 2.4.2 представлен сравнительный анализ методов теории оптимизации, а в 2.4.3 сравнительный анализ методов принятия решений.

2.4.1. Сравнительный анализ алгоритмов нечеткого вывода для разработки модуля обработки информации

Применительно к решению задачи обработки информации и получения численных значений частных показателей качества (ЧПК) проанализированы следующие алгоритмы нечеткого вывода, представленные в работах [56], [56], [82], [86], [120]:

- Алгоритм Мамдани;
- Алгоритм Цукамото;
- Алгоритм Ларсена;
- Алгоритм Такаги-Сугено.

Детальный анализ представленных алгоритмов и его результаты отражены в работе автора [104]. Перечисленные алгоритмы анализировались на соответствие следующим требованиям [104]:

П. № 1 - показатели качества должны удовлетворять требованиям нормированности, сопоставимости, репрезентативности, чувствительности при пороговых значениях, кроме того, должно быть обеспечено отсутствие дублирования показателей качества на каждом уровне.

П. № 2 - база правил нечеткого вывода частных показателей не должна приводить к проблеме размерности, т.е. ориентация на минимальное количество

допустимых правил для описания функции принадлежности на всей области определения частного показателя.

П. № 3 - иерархия показателей качества должна включать как качественные, так и количественные показатели. Под этим требованием понимаем, что необходимо формировать частные показатели качества на основе обработки разнородной информации.

На основе проведенного автором сравнительного анализа [104], предпочтительным алгоритмом нечеткого вывода является алгоритм Такаги-Сугено. Результаты сравнительного анализа алгоритмов нечеткого вывода представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты сравнительного анализа алгоритмов нечеткого вывода

Пункт требований	Наименование алгоритма нечеткого вывода			
	Мамдани	Цукамото	Ларсена	Такаги-Сугено
1	+	-	+	+
2	-	-	-	+
3	+	+	+	+

Применение алгоритма Такаги-Сугено позволит исключить учет количества градаций для входных значений системы нечеткого вывода, так как линейный вид функции алгоритма Такаги-Сугено позволяет определять выходное значение путем нахождения суммы произведений переменной и коэффициента значимости, где сумма коэффициентов значимости равна 1. Применение остальных алгоритмов нечеткого вывода требовало бы определения градаций для каждой переменной, что является причиной применения нечеткой логики пересечения и (или) объединения и увеличения трудоемкости определения и построения базы нечетких правил.

2.4.1.1. Описание алгоритма Такаги-Сугено

Алгоритм нечеткого вывода Такаги-Сугено задается следующим образом [120]:

$$R_j : u_1(x_1) = a_{1j} \text{AND}, \dots, \text{AND} u_i(x_i) = a_{ij} \rightarrow y_j = b_j, \quad (1)$$

где R_j – единичная правило вывода $j = 1, 2, \dots, n$ (n – общее количество правил вывода), $u_i(x_i)$ – функция принадлежности нечеткой переменной x_i , $i = 1, 2, \dots, m$ (где m – количество антецедентов в j -ом правиле), a_{ij} – нечёткий терм, оценивающий функцию принадлежности $u_i(x_i)$, y_j – нечеткая переменная вывода, b – нечеткий терм, оценивающий нечеткую переменную y_j , $y_j = b$ – консеквент j -ого правила.

В общем случае лингвистическая переменная, выводимая алгоритмом нечеткого вывода Такаги-Сугено, выражается следующим образом:

$$\langle x_i, T(x_i), U, G, M \rangle$$

где x_i – название переменной, $T(x_i)$ – терм-множество переменной x_i , U – универсальное множество, G – синтаксическое правило, M – сематическое правило.

Алгоритм нечеткого вывода Такаги-Сугено используется для расчета численных оценок частных показателей целевых функций, необходимых для определения качества продукции приборостроения.

Далее рассмотрим модели оптимизации.

2.4.2. Сравнительный анализ моделей оптимизации для решения задачи поиска оценки качества продукции

Модель многокритериальной оптимизации и модель двухуровневой оптимизации в большей степени удовлетворяют требованиям к комплексной модели оценки и улучшения качества продукции (см. 1.2). Основное отличие многокритериальной оптимизации от двухуровневой оптимизации заключается в наличии у последней иерархии целевых функций [35 - 41]. При решении задач многокритериальной оптимизации необходимо найти оптимальные значения одновременно с применением правил уступок или компромисса, в задаче двухуровневой оптимизации необходимо определить форму взаимосвязи между целевыми функциями в иерархической структуре.

Для сравнения двух моделей (подходов) оптимизации проведен анализ моделей поиска оценки качества продукции на основе многокритериальной линейной оптимизации и двухуровневой линейной оптимизации. В первую модель входят две целевые функции, во вторую – три целевые функции. Для решения задачи в рамках многокритериальной оптимизации используем методы многоцелевой оптимизации, метод главного критерия и метод линейной свертки. Детальный сравнительный анализ моделей оптимизации представлен в работах автора [23], [104].

Для решения задачи двухуровневой линейной оптимизации используем алгоритм Куна-Таккера и алгоритм симплекс-метода. Таким образом, рассмотрим следующие модели оптимизации [13], [14], [16], [42], [70], [72], [87]:

1. Многоцелевая оптимизация (на примере метода идеальной точки).
2. Многокритериальная оптимизация по принципу главного критерия.
3. Многокритериальная оптимизация с применением линейной свертки (переход к однокритериальной оптимизации).
4. Двухуровневая оптимизация.

Достоинства и недостатки представленных моделей, применительно к решению задач оценки и улучшения качества продукции приборостроения, будут описаны ниже.

На основе проведенного сравнительного анализа автором [23], рассмотренные выше модели оптимизации позволяют определять численную оценку качества продукции. А найденные коэффициенты значимости (величины коэффициентов значимости находим путем решения задачи линейного программирования) позволяют определять проблемные места при производстве продукции и находить пути их улучшения. Таким образом, рассмотренные модели оптимизации позволяют принимать решения, основываясь на полученных коэффициентах значимости и итоговой оценке качества продукции. Ориентация на найденные коэффициенты значимости и для частных показателей качества продукции позволяет определить степень влияния (чувствительность) того или иного фактора на качества продукции, так как при построении системы

уравнений учитываются взаимосвязи между факторами и частичными показателями качества [23].

Следует отметить, что приведенные выше модели предназначены, главным образом, для применения сотрудниками таких подразделений, как службы качества предприятий. Это обусловлено ограниченностью предоставляемой информации, поскольку информация поступает из таких источников, как: журналы входного контроля, журналы операционного контроля и журналы испытания готовой продукции. Применение многокритериальной оптимизации позволяет найти компромиссное решение сразу по всем целевым функциям.

Для расширения области применения методов оптимизации необходимо использовать модель оптимизации на основе децентрализованного подхода, которая будет реализована с применением модели двухуровневой линейной оптимизации.

На основе результатов применения модели двухуровневой оптимизации применительно к задачам управления качеством продукции [23], возможно учитывать в процессе принятия решения бизнес-процессы, связанные не только с управлением качеством, но и со всеми основными и вспомогательными процессами производства изделий. При этом модель позволяет существенно сократить время на согласование между отделами, что, в свою очередь, приводит к сокращению непроизводственных расходов.

Сравнительный анализ моделей многокритериальной линейной оптимизации и двухуровневой линейной оптимизации для решения задач оценки и улучшения качества продукции показал, что методы поиска оценки качества продукции, основанные на многокритериальной оптимизации эффективны при наличии нескольких, не связанных параметрически целевых функций [32-34]. Методики многокритериальной линейной оптимизации в основном применяются при решении локальных задач оценки и управления качеством продукции. Методы, основанные на двухуровневой линейной оптимизации, не

получили широкого практического применения в задачах оценки и управления качеством продукции, однако они обладают такими преимуществами, как возможность управлять производством путем применения подходов децентрализованного управления и возможность работать с большим массивом информации [34].

2.4.2.1. Описание математической модели двухуровневой оптимизации

Суть модели двухуровневой оптимизации. На олигополистическом рынке существуют два игрока (производители), при этом один игрок является лидером – F , а другой – последователем, f . Цель: максимизировать прибыль (F, f), которая зависит от выпуска (x, y). Лидер ходит первым и выбирает уровень выпуска продукции x . Последователь, зная ход лидера, реагирует путем определения уровня выпуска своей продукции $y(x)$. После хода последователя лидер, зная стратегию последователя $f(x, y)$, корректирует свою стратегию для максимизации прибыли $F(x, y)$. Описанный теоретико-игровой подход дал толчок в развитии и становлении раздела теории оптимизации, а именно теории многоуровневой оптимизации. В настоящее время все современные исследования в области двухуровневой оптимизации базируются на работах таких ученых как Уилфред Кэндл, Роберт Нортон, Мария Жоао Алвес, Стефан Дёпье, Янош Фулоп, Джон Флиге, Джонатан Бард[76], Джером Брэкен[76], Джон Макгил, Джи Лу, Гуаньюань Чжани и Юью Гао.

Классическая математическая задача оптимизации при наличии двух векторов $x = \{x_i\}$ и $y = \{y_i\}$, $i = \overline{1, n}$, где n – количество переменных в векторе (в нашем случае – показателей качества) таких, что $x \in X \subset R^n$, $y \in Y \subset R^m$, $F : X \times Y \rightarrow R^1$ и $f : X \times Y \rightarrow R^1$, может быть поставлена следующим образом [119]:

$$\begin{aligned} \min_{x \in X} F(x, y) &= c_1 x + d_1 y \\ A_1 x + B_1 y &\leq b_1 \\ \min_{y \in Y} f(x, y) &= c_2 x + d_2 y \\ A_2 x + B_2 y &\leq b_2 \end{aligned}$$

где $c_1, c_2 \in R^n$, $d_1, d_2 \in R^m$, $b_1 \in R^p$, $b_2 \in R^q$, $A_1 \in R^{p \times n}$, $B_1 \in R^{p \times m}$, $A_2 \in R^{q \times n}$, $B_2 \in R^{q \times m}$, p – количество ограничений для лидера, а q – количество ограничений для последователя.

Решение задачи оптимизации зависит от таких моментов, как наличие формы кооперации между лидером и последователем, порядок игры (кто ходит первым, лидер или последователь) и форма задачи оптимизации (пессимистическая или оптимистическая оптимизация, где пессимистическая оптимизация — это поиск минимаксного значения целевой функции лидера с учетом возможных его уступок, а оптимистическая оптимизация – это поиск максимального значения целевой функции лидера).

Наглядно порядок кооперации описал и продемонстрировал Стефан Делье в работе [67]. Стефан Делье отметил, что оптимальное решение задачи двухуровневого программирования не является ни оптимальным для ведущего (если целевая функция ведомого отброшена), ни лучшим выбором как для ведущего, так и для ведомого (если порядок игры удален). Но если игра иерархическая, то нельзя предполагать, что оба лица, принимающих решения, могут действовать одновременно. Это означает, что лидер должен предвидеть, что ведомый имеет право и возможность выбрать оптимальное решение в условиях, поставленных выбором лидера.

Оптимальные по Парето решения, как правило, не являются оптимальными для минимизации любой из целевых функций двухуровневых задач оптимизации. В связи с этим необходимо отметить, что решение сильно зависит от формы кооперации между лидером и последователем. Это показано на рисунке 7, где прямой линией выделен ход лидера, а штрихпунктирной линией – ход последователя. Соответственно решение x^1, y^1 – оптимально, если лидер ходит первым, а решение x^2 и y^2 если ходит первым последователь.

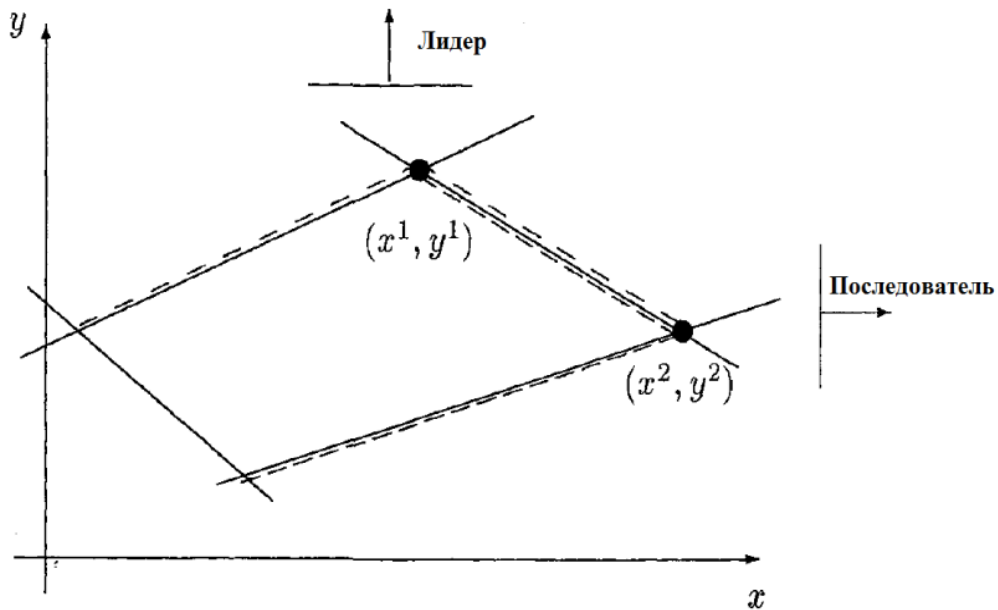


Рисунок 7 – Схема поведения лидера и последователя

Далее будет проведен сравнительный анализ методов принятия решения для решения задачи управления качеством продукции после получения результатов поиска оценки качества продукции.

2.4.3. Сравнительный анализ существующих методов принятия решений в отношении качества продукции

В настоящее время существуют различные методы поддержки принятия решений при управлении качеством продукции, начиная от самых простых методов, таких как мозговой штурм, и заканчивая такими методами, как многокритериальная оптимизация. В методах принятия решений при управлении качеством (МПРУК) можно выделить такие категории, как этап принятия решений, используемая информация при принятии решений и орган, принимающий решение. МПРУК охватывают такие этапы жизненного цикла продукции (ЖЦП), как планирование, разработка, производство и эксплуатация. В качестве используемой информации может служить статистическая отчетность, классификаторы и справочники, результаты использования методов управления качеством продукции. Роль органа, принимающего решение, может выполнять как отдельное лицо, принимающее решения (ЛПР), так и коллектив или группа по принятию решений.

Для выявления особенностей методов принятия решений при управлении качеством продукции проведем анализ относительно таких критериев, как «Степень охвата понятия качества», «Степень формализации проблемы принятия решений», «Объем используемой информации», «Оперативность принятия решений» и «Степень трудоемкости процесса принятия решений». Перечисленные выше критерии предложены в работе авторов [24] для проведения сравнительного анализа методов принятия решений.

Критерий №1 – «Степень охвата понятия качества» описывает количество аспектов, охватываемых при оценке качества продукции, при этом различные аспекты качества не должны входить в интегральный показатель качества продукции, т.е. формула расчета оценки качества не должна содержать показатели качества технологии производства и эргономические показатели качества. Критерий №2 – «Степень формализации проблемы принятия решений» описывает структурную взаимосвязь (как правило, выражение в виде системы уравнений или функций) между целевой функцией, критериями качества и ограничениями. Существуют структурированные методы принятия решений, слабо структурированные методы принятия решений и неструктурированные методы принятия решений. Критерий №3 – «Объем используемой информации» описывает объем используемой разнородной информации при принятии решений. Критерий №4 – «Оперативность принятия решений» описывает время принятия решений. Критерий №5 – «Степень трудоемкости процесса принятия решений» характеризует затраты на выполнение процесса принятия решений.

Краткий анализ и обзор наиболее популярных МПРУК среди исследователей и специалистов представлен в работе авторов [24]. В данной работе оценка пяти критериев выполнена по балльной шкале, с тремя оценками: «Не соответствует» – 1, «Частично соответствует» – 2 и «Соответствует» – 3. Оценка рассмотренных методов в приведенной работе [24] выполнена на основе выборочного анализа литературы из базы данных «Elibrary», «Scopus» и «WoS».

По результатам проведенного сравнительного анализа автором [24] в качестве метода принятия решений была выбрана методика достижимых целей на основе визуализации области Парето, детально рассмотренные в работах [61], [93].

2.5. Формулировка задачи визуализации допустимой области принятия решений при управлении качеством продукции

Применение многокритериальной оптимизации при использовании различных методов поиска компромиссов показало, что применение более семи целевых функций затрудняет поиск компромисса. Кроме того, отсутствуют четко описанные правила расчета коэффициентов важности; ЛПР при ранжировании целевых функций по важности не знает, как сделанный им выбор повлияет на поиск оптимального решения; при найденном рациональном решении ЛПР (при несогласии с ним) может повторить поиск, поменяв вектор ограничений и коэффициенты важности.

Приведенные особенности могут повлиять на точность принятия решений, оперативность принятия решений и трудоемкость принятия решений. Для устранения данных препятствий применения методов многокритериальной оптимизации необходимо решить не задачу поиска оптимальной точки, а задачу поиска допустимой области принятия решений, где ЛПР сможет выбрать решение, которое его больше удовлетворяет.

Метод принятия решений, который будет использован в данной работе, в теории многокритериальной оптимизации носит название «интерактивные (итеративные) методы принятия решений».

Многокритериальная задача линейной оптимизации имеет вид:

$$\max\{fx = z \mid x \in X\},$$

где f – матрица размера $m \times n$, строки которой являются целевыми функциями f_i , $i = \overline{1, m}$ (индексы обозначают номер целевого критерия, а m – количество целевых функций), $z = z_1, z_2, \dots, z_m$ – вектор значений целевых функций (индексы

обозначают номер целевой функции, n – количество значений целевых функций), а Y – множество допустимых значений целевых функций.

В приведенной формулировке задачи многокритериальной оптимизации точки x , входящие в область X , должны быть Парето-эффективными или эффективными по Парето (ОПЭ) точками и соответствовать определению.

Определение [95]. Точка $x' \in X$ называется оптимальной по Парето, если для любой точки $x \in X$ выполнено соотношение $f(x') \geq f(x)$.

Для построения области Парето путем решения задачи многокритериальной оптимизации необходимо определить метод аппроксимации оболочки Эджворта – Парето (ОЭП) на трех мерной плоскости при случае $f > 3$. Для решения данной задачи применим метод достижимых целей, предложенный А.В. Лотовым в работе [61].

Метод достижимых целей заключается в построении ОЭП вида [93] $Z_p = \{z \in R^m : z \geq z', z' \in Z\}$, где $z = f$. ОПЭ визуализируется как совокупность двухмерных сечений. Двухмерные сечения определяются как $z = (x_1, x_2, x_3)$, где x_1 и x_2 значения в плоскости (x_1, x_2) , а x_3 – совокупность значений остальных $(m-2)$ -х координат. Тогда $\hat{z} = (\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_3)$, и двухмерные сечения множества Z_p плоскостью, проходящей через точку $\hat{z} = (\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_3)$, есть множество:

$$G_{x_1, x_2}(Z_p, \hat{x}_3) = \{(x_1, x_2) \mid (x_1, x_2, \hat{x}_3) \in Z_p\}$$

Таким образом, визуализация ОЭП осуществляется путем нанесения на диаграмму нескольких слоев кривых допустимых целевых значений по координатам \hat{x}_1, \hat{x}_2 и зафиксированном значении \hat{x}_3 , а кривые получаются путем изменения значений \hat{x}_3 .

Результаты и выводы по главе 2

В главе 2 диссертационного исследования проведен сравнительный анализ методов и моделей, применяемых для решения задач обеспечения и улучшения

управления качеством продукции приборостроения. На основе проведенного анализа выбраны следующие методы и модели:

- модель многогранника качества продукции приборостроения;
- модель двухуровневой оптимизации;
- методика нечеткого вывода по алгоритму Такаги-Сугено;
- методика визуализации области Парето для поддержки принятия решений при управлении качеством продукции.

Модель многогранника качества продукции позволяет делегировать основные функции управления в отношении таких аспектов, как технологии, экономика, производство, разработка и поставщики. Путем делегирования на нижние уровни управления данными аспектами занимаются руководство и отделы, генерирующие данную информацию. Этот факт позволяет более глубоко анализировать информацию (с точки зрения специалистов) и передавать высшему руководству только те данные, которые наглядно описывают определенный аспект управления.

Выбранная модель поиска оценки качества продукции на основе двухуровневой линейной оптимизации позволяет численно реализовать многогранник качества продукции приборостроения.

Реализация многогранника качества продукции осуществляется путем формализации целевых функций в модели двухуровневой линейной оптимизации. Однако, для поиска оптимальных значений целевых функций необходимо определить область их существования в виде системы линейных неравенств.

Алгоритм Такаги-Сугено совместно с методикой количественной оценки компромиссов позволяет численно описать показатели, входящие в систему неравенств для формирования области существования целевых функций.

Для принятия решений в отношении качества продукции на основе полученных численных оценок целевых функций выбрана методика визуализации области Парето.

Выбранный комплект методов и моделей формирует базу для разработки методики оценки и улучшения качества продукции, которая позволит автоматизировать деятельность по принятию решений в отношении качества продукции, сократить трудозатраты на сбор, обработку и анализ информации, а также повысить уровень объективности принимаемых решений.

В следующей главе будет представлена разработанная методика оценки и улучшения качества продукции на основе алгоритма Такаги-Сугено, модели двухуровневой оптимизации и методике визуальной интерпретации области Парето.

Глава 3. Разработка методики оценки и улучшения качества продукции

Глава посвящена разработке составных частей комплексной модели оценки и улучшения качества продукции на основе математических моделей, предложенных в 2 главе, совместно решающих задачи, поставленные сформулированные в 1.1 и 1.2.

Для объединения всех составных частей разрабатываемой методики, необходимо определить их логические взаимосвязи в рамках децентрализованного управления и двухуровневой линейной оптимизации. Для решения этой задачи в 3.1 будет определена модель многогранника качества продукции, описывающая взаимосвязь целевых функций.

Алгоритм разработки методики оценки и улучшения качества продукции представлен на рисунке 8.

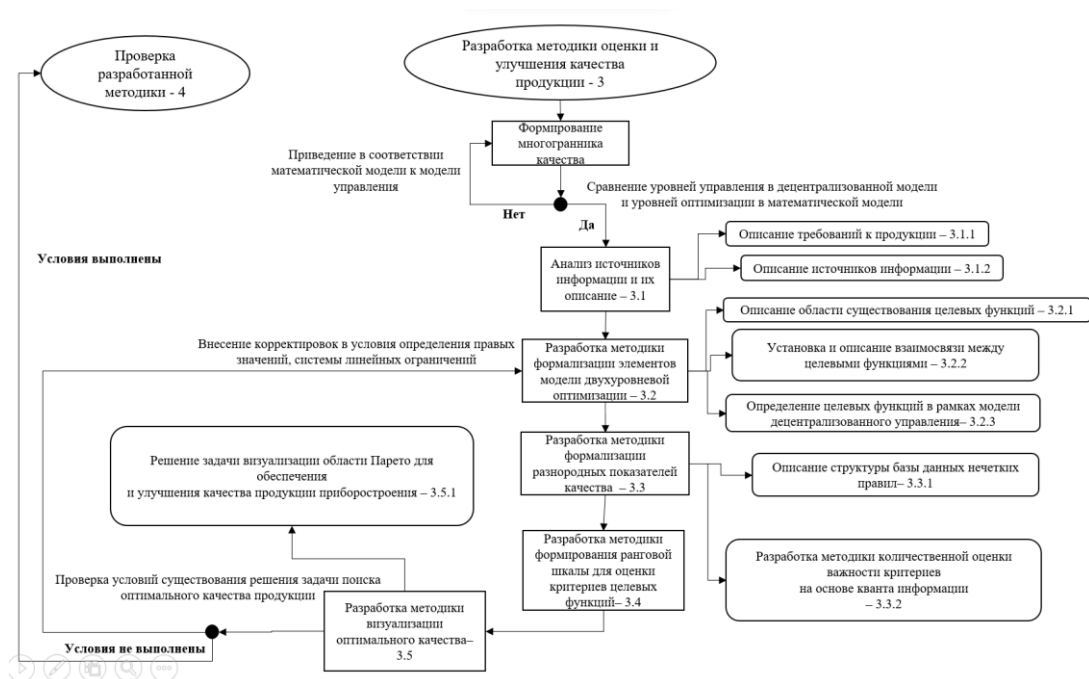


Рисунок 8 – Алгоритм разработки методики оценки и улучшения качества продукции

Алгоритм иллюстрирует последовательность действий при решении проблемы оценки и улучшения качества продукции, цифры показывают, в каких разделах главы 3 представлено подробное описание каждого шага.

3.1. Анализ источников информации, характеризующих качество продукции на этапе производства

Показатели качества и их характеристики определяются государственными стандартами и требованиями конструкторов или разработчиков на этапах планирования конструкции продукции [4-7], [9]. Исходя из этого целесообразно классифицировать (разделить) источники информации на внешнюю и внутреннюю. Внешняя информация — это требования, определяемые государственными или международными стандартами, а внутренние источники — это требования конструкторской или технологической документации. Анализ требований представлен в 3.1.1 и 3.1.2.

3.1.1. Внешние и внутренние требования к качеству продукции

К внешним требованиям относятся требования потенциальных потребителей к продукции и требования государственных, отраслевых и (или) международных стандартов. После анализа данных требований производитель выпускает опытные образцы продукции, далее на основе проведенной работы разрабатывает комплект конструкторских и технологических документов для постановки на производство.

В документах определяются требования к конструкции и к технологии изготовления. Согласно серии стандартов ИСО 9000 и ИСО 9001 организации должны принимать решения на основе факторов [8]. Под факторами подразумеваются не только технологические или технические показатели, но и такие группы показателей, как экономические, эстетические, показатели надежности и т.д.

Необходимость учитывать весь объем факторов в соответствии со стандартами требует от производителей идентифицировать все источники информации и делить их на группы показателей качества, перечисленные ниже.

В 3.1.2 рассмотрены источники и способы получения информации по группам показателей качества:

1. Технологические показатели.
2. Показатели назначения.

3. Показатели надежности.
4. Конструкционные показатели.
5. Экономические показатели.

3.1.2. Источники информации, необходимые для управления качеством продукции в соответствии с внешними и внутренними требованиями к качеству

Для применения модели двухуровневой линейной оптимизации совместно с другими математическими методами необходимо определить целевые функции для верхнего и нижнего уровня, поэтому целью выявления источников информации является идентификация целевых функций и области ограничений для них.

Алгоритм идентификации целевых функций и их частных критериев нацелен на решение следующих задач:

1. Распределение источников информации по группам.
2. Определение целевых функций согласно группам показателей качества.
3. Формализация частных критериев целевых функций и допустимой области для каждой целевой функции.

Эффективное и результативное управление качеством продукции осуществляется через управление производством, затратами, технологическими процессами и поставщиками. Для воздействия на все четыре элемента нужно задать четыре целевые функции. При этом, в соответствии с децентрализованной моделью управления качеством продукции, представленной на рисунке 16, необходимо целевую функцию, отвечающую за управление качеством продукции задать для верхнего уровня, а остальные три – для нижнего уровня.

Оценка качества продукции на многограннике качества продукции находится путем задания обобщенной функции качества с применением модели двухуровневой линейной оптимизации. Для раскрытия обобщенной функции качества и применения модели двухуровневой линейной оптимизации определяются факторы (технологии, затраты на качество, материалы и комплектующие), на основе исследования аспектов, влияющие на качество

продукции, отраженные в 2.2. На основе сказанного, в модели двухуровневой линейной оптимизации на верхнем уровне определяется одна функция качества, а на втором уровне три целевые функции, описывающие группы факторов которые влияют на функцию качества.

Для применения двухуровневой оптимизации в задачах поиска оценки качества продукции определим следующие целевые функции [23]: $Q(x, F_1(x, y_1), \dots, F_n(x, y_n))$ – функция качества, $F_1(x, y_1)$ – функция «Затраты на качество», $F_2(x, y_2)$ – функция «Управление поставщиками», $F_3(x, y_3)$ – функция технологичности, где переменные x такие, что $x \in X \subset R^n$. Функция качества такая, что $Q: X \times Y_1 \times Y_2 \times Y_3 \rightarrow R$, где y – переменные, такие, что $y_i \in Y_i \subset R^{m_i}$, при этом $F_i: X \times Y_i \rightarrow R$. Аргумент x накладывает ограничения на допустимую область функций $F_1(x, y_1)$, $F_2(x, y_2)$ и $F_3(x, y_3)$, тем самым, главная функция контролирует поведение подфункций. Вектора переменных x и y – это коэффициенты важности (КВ) частных слагаемых (показателей качества) целевых функций или системы уравнений. К переменным задачи накладываются следующие ограничения:

1. Существует вектор x такой, что $x_j: \sum_j^n x_j \leq n$, где $0 \leq x_j \leq 1$ и элементы матрицы $A = (a_{ij})$, такие, что $a_{ij}: 0 \leq a_{ij} \leq 1$.
2. Матрица констант целевых функций $C = (c_{ij})$, где $c_{ij}: 0 \leq c_{ij} \leq 1$.
3. При наличии нескольких зависимых переменных в функции верхнего требования $x_j, y_j: \sum_j^{n_1} x_j + \sum_j^{n_2} y_j \leq n_1 + n_2$, соответственно $0 \leq x_j \leq 1, 0 \leq y_j \leq 1$.

Переменные матрицы a_{ij} , c_{ij} или переменные системы неравенств, описывающие допустимую область целевых функций, – это численные оценки частных значений (слагаемых) системы уравнений. Далее оценки для частных значений a_{ij} будут характеризовать или количественно описывать тот или иной

частный показатель качества (ЧПК) в рамках определенной системы уравнений или целевой функции.

Описание целевых функций, перечисленных выше:

1. Функция качества. В качестве аргументов данная функция учитывает не только изменчивость технологической операции или количество дефектов, но и эффективность и результативность внедренных мероприятий по управлению качеством продукции.

2. Функция «Затраты на качество». В качестве аргументов данная функция будет учитывать затраты, связанные с предупреждением несоответствий и затраты, связанные с устранением несоответствий, как по причине производителя, так и по причине поставщика комплектующих и материалов.

3. Функция «Управление поставщиками». Данная функция будет учитывать в качестве аргументов время доставки комплектующих, время отклика поставщика на запрос, время устранения несоответствий и денежные потери, связанные с задержкой поставки комплектующих.

4. Функция технологичности. Данная функция учитывает в качестве аргументов установленные на этапе планирования расходы сырья и комплектующих, а также их текущие значения, полученные в процессе производства продукции.

Для получения численных значений перечисленных выше функций будет использоваться приведенная в таблице 4 информация. Информация собирается из таких структурных подразделений как служба качества, конструкторский отдел, технологический отдел, служба управления закупками, финансово – экономическая служба.

Таблица 4 – Описание первичной информации для составления целевых функций

№	Описание источника информации
1.	Количество обнаруженных отклонений или дефектов в единице продукции и количество проверенной продукции (штук).
2.	Затраты на контроль качества и устранение дефектов.

3.	Количество внедренных корректирующих и предупреждающих мероприятий, направленных на устранение и предупреждение дефектов по вине поставщиков согласно плану по поддержанию системы менеджмента качества.
4.	Затраты по вине поставщиков, произведенные до внедрения корректирующих мероприятий.
5.	Время выполнения технологических операций (мин.).
6.	Количество (объем) затрачиваемого материала на выполнение технологического процесса.
7.	Производственные затраты на изготовление продукции.
8.	Затраты на устранение дефектов, возникших по вине производителя (в денежном эквиваленте).
9.	Стоимость поставки изделия для потребителя.
10.	Затраты на оценку качества, направленные на обеспечение выхода годной продукции.
11.	Затраты на предупреждение дефектов в изделии (в денежном эквиваленте).
12.	Время устранения несоответствия при возникновении дефектов по вине поставщиков.
13.	Количество обращений к поставщикам.
14.	Время устранения несоответствия в соответствии с контрактом.
15.	Сумма закрытых вопросов и общая сумма вопросов по поставщикам.
16.	Время поставки комплектующих и материалов.
17.	Масса или объем используемого материала для изготовления продукции.
18.	Количество комплектующих изделий в готовом изделии и количество используемых комплектующих для выполнения технологической операции.
19.	Время обслуживания рабочего места.
20.	Профилактическое время обслуживания технологического оборудования.

Для централизованной обработки в системе мониторинга и оценки качества продукции необходимо со всех источников хранения информации получить данные, требующиеся для поиска численных значений целевых функций.

Группировка по показателям качества перечисленной информации представлена в таблице 5.

Таблица 5 – Описание частных значений показателей качества (ЧПК) целевых функций и их коэффициентов важности (КВ)

Наименование целевой функции	Обозначение целевой функции	Описание ЧПК	Обозначение КВ для ЧПК
Функция качества	$Q(x, y, z, t)$	Уровень выхода годной продукции	x
		Степень результативности и внедренных мероприятий по снижению затрат на качество	y
		Степень результативности и эффективности внедренных мероприятий по работе с поставщиками	z
		Степень результативности и эффективности внедренных	t

		мероприятий по управлению производством	
Функция управления затратами на качество	$F_1(x_1, y_2)$	Относительный уровень затрат на устранение дефектов	x_1
		Относительный уровень затрат на контроль качества и предупреждение дефектов	y_2
Функция управления поставщиками	$F_2(x_1, z_2, z_3)$	Своевременность устранения замечаний к качеству изделий	x_1
		Своевременность доставки комплектующих и материалов	z_2
		Результативность обращений к поставщику по возникающим вопросам	z_3
Функция технологичности	$F_3(x_1, t_2, t_3)$	Относительный уровень расхода материалов и сырья в процессе производства	x_1
		Относительная трудоемкость выполнения технологических операций	t_2
		Относительная себестоимость выполнения технологических операций	t_3

Детальное описание целевых функций и их областей ограничений в соответствии с теорией двухуровневой оптимизации и принципов децентрализованного управления, представлено в 3.2.

3.2. Разработка методики формализации элементов модели двухуровневой оптимизации

Общая формулировка аналитической задачи двухуровневой линейной оптимизации для поиска оценки качества продукции предложенная автором в работах автора [23], [17], следующая:

$$\begin{aligned}
 & \min_{x \in X} \{Q(x, y_1 = y, y_2 = z, y_3 = t) = x^1 + y^1 + z^1 + t^1\} \\
 & A_1^1 x^1 + B_1^1 y^1 + B_2^1 z^1 + B_3^1 t^1 \leq b \\
 & \min_{y_i \in Y} \{F_1(x, y) = x^2 + y^2\} \\
 & A_2^2 x^2 + B_1^2 y^2 \leq b' \\
 & \min_{z_i \in Z} \{F_2(x, z) = x^2 + z^2\} \\
 & A_3^2 x^2 + B_2^2 z^2 \leq b'' \\
 & \min_{t_i \in T} \{F_3(x, t) = x^2 + t^2\} \\
 & A_4^2 x^2 + B_3^2 t^2 \leq b''' .
 \end{aligned} \tag{2}$$

В (2) x^1, y^1, z^1, t^1 – вектора переменных для функции лидера (функция качества), принимающие значения от 0 до n , где n – это количество переменных в целевой функции (сумма численных значений всех переменных в целевой функции не должна быть больше n , при этом численное значение каждой переменной не должно быть больше 1) и характеризующие решение задачи оценки и управления качеством продукции; x^2, y^2, z^2, t^2 – вектора переменных для функций последователей, чья область допустимых значений (решений) зависит от ограничений лидера. $A_1^1, B_1^1, B_2^1, B_3^1$ – матрицы, состоящие из ЧПК, характеризующих качество продукции с точки зрения лидера, а $A_{1,\dots,4}^2, B_1^2, B_2^2, B_3^2$ – это матрицы, состоящие из ЧПК, характеризующих качество продукции с точки зрения последователей. Верхние индексы переменных и матриц обозначают уровень расположения и принадлежность. Так индексы с номером 1 обозначают принадлежность к лидеру, а индексы с номером 2 – к последователям. Детальное описание содержания матриц будет приведено в 4.1.

В аналитической модели (2) переменные вектора x_j на нижних уровнях для трех функций устанавливают взаимосвязь и форму кооперации между ними и функцией лидера путем наложения дополнительных ограничений лидером на функции последователей. Логическая связь между переменными целевых функций устанавливается на основе децентрализованной модели управления, входной и выходной информации структурных подразделений, расположенных на каждом уровне данной децентрализованной модели.

Условия существования оптимального решения задачи двухуровневой оптимизации при одном лидере и множестве последователей (ДЛМП) [119]:

1. Область ограничений задачи ДЛМП:

$$S = \{(x, y_1, \dots, y_k) \in X \times Y_1 \times \dots \times Y_k \mid Ax + \sum_{i=1}^k B_i y_i \leq b, A_i x + C_i y_i \leq b_i, i = 1, \dots, k\}.$$

2. Допустимая область для i -ого последователя при $\forall x \in X$:

$$S_i(x) = \{y_i \in Y_i \mid C_i y_i \leq b_i - A_i x\}.$$

3. Проекция S в область принятия решений лидера:

$$S(X) = \{x \in X \mid \exists (y_1, \dots, y_k) \in Y_1 \times \dots \times Y_k, (x, y_1, \dots, y_k) \in S\}.$$

4. Рациональная реакция i -ого последователя при фиксированной переменной лидера, такой, что $x \in S(X)$:

$$P_i(x) = \{y_i \in Y_i \mid y_i \in \arg \min [f_i(x, z) \mid z \in S_i(x)]\},$$

$$\text{где } \arg \min [f_i(x, z) \mid z \in S_i(x)] = \{y_i \in S_i(x) \mid f_i(x, y_i) \leq f_i(x, z), \forall z \in S_i(x)\}.$$

5. Область существования допустимого решения задачи ДЛМП:

$$IR = \{(x, y_1, \dots, y_k) \mid (x, y_1, \dots, y_k) \in S, y_i \in P_i(x), i = 1, \dots, k\}.$$

6. Область существования оптимального решения задачи ДЛМП:

$$\min \{F(x, y_1, \dots, y_k) \mid (x, y_1, \dots, y_k) \in IR\}.$$

Для решения задачи (22) необходимо определить переменные при целевых функциях, переменные матриц и ограничения, накладываемые на целевые функции.

Система ограничений и описание допустимой области задачи поиска качества продукции представлены в 3.3.1.

3.2.1. Описание допустимой области в многограннике качества продукции

Решение задачи двухуровневой оптимизации зависит от правила игры. В нашем случае лидер ходит первым, это значит, что он своим ходом ограничивает допустимую область последователя. Последователь, зная ход лидера, выбирает оптимальный шаг, после чего, зная шаг последователя, лидер корректирует допустимую область и пытается найти оптимальный для себя шаг [67].

Допустимые области для каждой целевой функции зададим через множество многогранников вида:

$$\langle X, Y, Z, T \rangle.$$

Многогранник X необходим для поиска оптимального значения целевой функции $Q(X, Y, Z, T)$, размерность многогранника зависит от количества аспектов оценки. Многогранник для вектора переменных x_j определим через матрицу $A = (a_{ij})$, где по индексу i перечисляются функциональные блоки изделия, а по индексу j – показатели качества изделия (например, линейные

размеры, устойчивость лакокрасочных покрытий и т.д.), по которым определяем элементы a .

Многогранник Y необходим для поиска оптимального значения целевой функции $F_1(x, y)$, размерность которого зависит от суммарных затрат на качество (описание затрат приведено ниже). Многогранник для вектора переменных y_j определим через матрицу $B_1 = (b_{ij})$, где индексу i ставим в соответствие затраты с j -им индексом. Известно, что в категорию затрат, например, затрат на оценку качества, попадают затраты, связанные с операционным контролем, испытанием готовой продукции. Исходя из этого, определим поправочные константы $b_i' \in B_1$, описывающие отдельные виды затрат: b_1' – на проведение операционного контроля, b_2' – на испытание продукции, b_3' – на анализ дефектов, b_4' – на возникновения дефектов по вине производства, b_5' – на возникновения дефектов по вине поставщика, b_6' – на обеспечение качества поставок (входной контроль).

Многогранник Z необходим для поиска оптимального значения целевой функции $F_1(x, z)$, размерность области определения матрицы $B_2 = (b_{ij})$ для функции равна количеству поставщиков b_i'' (где $b_i'' \in B_2$), задействованных в процессе производства продукции.

Многогранник T необходим для поиска оптимального значения целевой функции $F_3(x, t)$, размерность области определения матрицы $B_3 = (b_{ij})$, где индексу i ставим в соответствие технологическую операцию с j -ым индексом, по которому определяем единичные критерии качества x_j .

На основе полученных областей ограничений необходимо определить взаимосвязь между целевыми функциями. Взаимосвязи целевых функций и их частных критериев, в рамках описанных областей ограничений, описаны ниже.

3.2.2. Описание взаимосвязи целевых функций и области ограничений

Перед тем, как описывать целевые функции и их показатели, необходимо рассмотреть структурные связи в рамках модели двухуровневой линейной

оптимизации. Структурная схема, представленная на рисунке 9, показывает функциональную связь между уровнями лидера и последователя через коэффициенты системы ограничений.

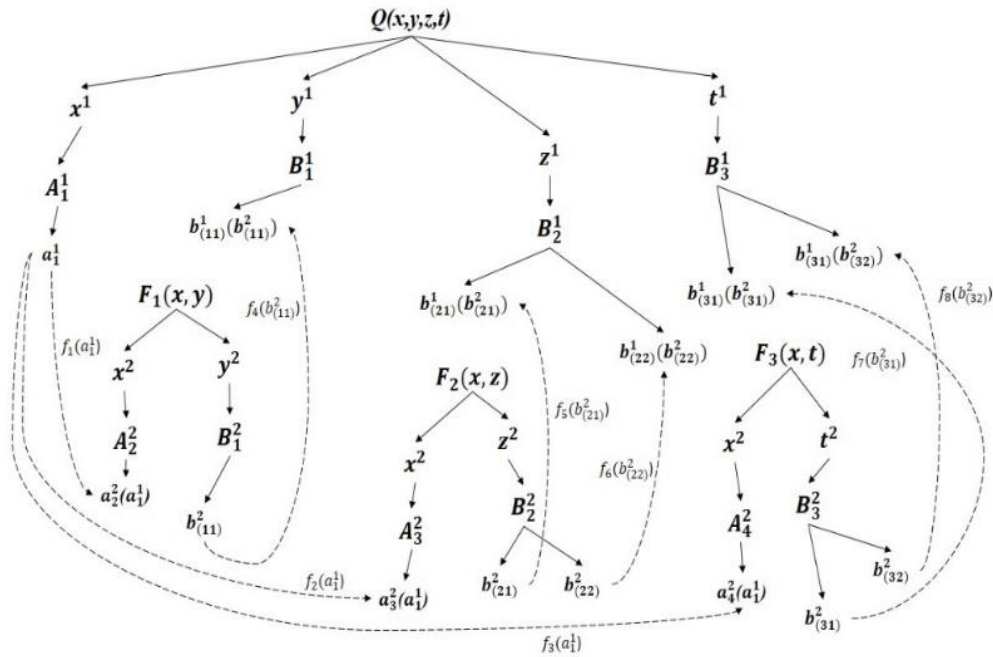


Рисунок 9 – Структура целевых функций

В соответствии с рисунком 9 переменные находим путем решения систем уравнений, задаваемой матрицей для первого уровня иерархии (лидер), при этом численные коэффициенты матриц B_1^1, B_2^1, B_3^1 функционально зависят от численных значений матриц B_1^2, B_2^2, B_3^2 нижнего уровня (последователи), а численные значения матрицы последователей $A_{1, \dots, 4}^2$ функционально зависят от численных значений матрицы лидера A_1^1 .

Функциональная зависимость переменных определяется формой кооперации. В нашем случае лидер ходит первым, последователь принимает во внимание ход лидера и максимизирует свою выгоду, после чего на основании хода последователя лидер корректирует свою стратегию и максимизирует свою выгоду с учетом хода последователя.

Форма взаимодействия объясняется логикой: каждый последователь имеет свой интерес, как и лидер, при этом степень свободы последователей ограничивается лидером. Например, последователь с целевой функцией $F_1(x, y_1)$

стремится минимизировать издержки на качество продукции, учитывая ограничения на изменение вектора переменных x .

3.2.3. Определение целевых функций для методики поиска качества продукции

Для численной формализации частных значений показателей (ЧПК) в [1] и [22] были предложены методы на основе расчета единичных показателей качества. В данных формулах, приведенных в работах [1], [22] не учтены разнородные источники информации необходимые для формирования многогранника качества продукции, а также применения двухуровневой линейной оптимизации. Для решения данных противоречий в 3.2.3.1 – 3.2.3.4 приведены методы расчета ЧПК, предложенные автором в работах [23] и [107], улучшающие традиционные квалиметрические методы расчета показателей качества применительно к задачам диссертационного исследования.

3.2.3.1. Описание функции качества

Функция качества должна описывать эффективность и результативность системы менеджмента качества, направленной на управление производством, технологией, поставщиками и затратами. Перечисленные элементы должны выступать в качестве аргументов в функции качества. Функциональная взаимосвязь представленных элементов выражается через функцию качества $Q(x, y, z, t)$ вида [107]:

$$Q(x, y, z, t) = \left(\sum_{j=1}^n x_j^1 \right)^N + \sum_{j=1}^n y_j^1 + \sum_{j=1}^n z_j^1 + \sum_{j=1}^n t_j^1, \quad (3)$$

где N – это количество ЧПК, не превышающих значения 0,5 по j -му столбцу; если все численные значения превышают 0,5, то $N = 1$.

Переменные векторов x^1, y^1, z^1, t^1 определяют следующие составляющие: x^1 – уровень выхода годной продукции, y^1 – коэффициент важности (КВ) для ЧПК «Степень результативности внедренных мероприятий по снижению затрат на качество», z^1 – КВ для ЧПК «Степень результативности и эффективности внедренных мероприятий по работе с поставщиками» и t^1 – КВ для ЧПК

«Степень результативности и эффективности внедренных мероприятий по управлению производством». Элементы ЧПК a_{1ij}^1 матрицы A_1^1 для вектора КВ x^1 функции качества находим по формуле:

$$a_{1ij}^1 = 1 - (DPU_{ij} / DPU_{ij(M)}), \quad (4)$$

где $DPU_{ij} = m_{ij} / n$ (m_{ij} – количество найденных отклонений по индексу i и по индексу j , n – количество проверенных единиц продукции), $DPU_{ij(M)}$ – максимально допустимое значение показателя DPU по индексу i и по индексу j (индекс i – порядковый номер показателя качества, индекс j – порядковый номер причины).

Вычисления по формуле (1) проводим с учетом возникновения отклонений (дефектов) в i -ом блоке изделия и в j -ом показателе качества при $DPU_{ij} = DPU_{ij(M)} = 1$.

Вектор КВ y^1 находим на матрице B_1^1 .

Элементы ЧПК $b_{(11)ij}^1$ матрицы B_1^1 находим следующим образом:

$$b_{(11)ij}^1(b_{(11)ij}^2) = \frac{|QC(P) - b_{(11)ij}^2|}{QC(P)} ij, \quad (5)$$

где $QC(P)$ – запланированные затраты на контроль и предупреждение дефектов, $b_{(11)ij}^2$ – фактические затраты на контроль и предупреждение дефектов при равенстве запланированных и реальных затрат $b_{(11)ij}^1(b_{(11)ij}^2) = 0$.

Матрицу B_2^1 для вектора КВ z составим из двух блоков, то есть $B_2^1 = [B_{21}^1, B_{22}^1]$, где с индексом 21 – элементы $b_{(21)ij}^1$, связанные с результативностью, а с индексом 22 – элементы $b_{(22)ij}^1$, связанные с эффективностью. Элементы КВ $b_{(21)ij}^1$ матрицы ЧПК B_2^1 находим по формуле:

$$b_{(21)ij}^1(b_{(21)ij}^2) = \frac{P_{ij} \times b_{(21)ij}^2}{P_{ij}}, \quad (6)$$

где P_{ij} – количество внедренных корректирующих мероприятий, направленных на устранение и предупреждение дефектов по вине поставщиков, $b_{(21)ij}^2$ – элементы, характеризующие результативность обращений к поставщику по возникающим вопросам.

Элементы ЧПК $b_{(22)ij}^1$ матрицы B_{22}^1 находим по формуле:

$$b_{(22)ij}^1(b_{(22)ij}^2) = \frac{CP_{(PA)ij}}{CB_{ij} \times b_{(22)ij}^2}, \quad (7)$$

где $CP_{(PA)ij}$ – затраты на устранение дефектов по вине поставщиков до внедрения корректирующих и предупреждающих мероприятий, CB_{ij} – стоимость поставки, $b_{(22)ij}^2$ – элемент, характеризующий своевременность доставки комплектующих.

Матрицу B_3^1 для вектора t^2 составим из двух блоков, то есть $B_3^1 = [B_{31}^1, B_{32}^1]$, где с индексом 31 – элементы $b_{(31)ij}^1$, связанные с результативностью, а с индексом 32 – элементы $b_{(32)ij}^1$, связанные с эффективностью.

Элементы ЧПК $b_{(31)ij}^1$ матрицы B_{31}^1 находим по формуле:

$$b_{(31)ij}^1(b_{(31)ij}^2) = \min \left[\frac{LI_B - LI_R}{LI_B \times b_{(31)ij}^2} ij, \frac{MC_B - MC_R}{MC_B \times b_{(31)ij}^2} ij \right], \quad (8)$$

где LI_B – общее планируемое время на выполнение технологического процесса, LI_R – реальное время на выполнение технологического процесса, MC_B – плановое количество затрачиваемого материала на выполнение технологического процесса, MC_R – количество затрачиваемого материала на выполнение технологического процесса, $b_{(31)ij}^2$ – относительная трудоемкость выполнения технологических операций.

Элементы ЧПК $b_{(32)ij}^1$ матрицы B_{32}^1 находим по формуле:

$$b_{(32)ij}^1(b_{(32)ij}^2) = \frac{CM_B - CM_R}{CM_B \times b_{(32)ij}^2}, \quad (9)$$

где CP_R – реальные производственные затраты на реализацию продукции, CB_B – плановые затраты, $b_{(32)ij}^2$ – относительная себестоимость выполнения технологических операций при $CP_R = CP_B \rightarrow b_{(32)ij}^1 = 0$.

Задачу поиска оптимального численного значения функции качества с учетом (4) – (9) зададим следующим образом:

$$\min_{x \in X} \{Q(x, y, z, t) = \left(\sum_{j=1}^n x_j^1 \right)^N + \sum_{j=1}^{n_{11}} y_{(1)j}^1 + \sum_{j=1}^{n_{21}} z_{(21)j}^1 + \sum_{j=1}^{n_{22}} z_{(22)j}^1 + \sum_{j=1}^{n_{31}} t_{(31)j}^1 + \sum_{j=1}^{n_{32}} t_{(32)j}^1 \}, \quad (10)$$

$$A_1^1 x^1 + B_1^1 y_{(1)}^1 + B_{21}^1 z_{(21)}^1 + B_{22}^1 z_{(22)}^1 + B_{31}^1 t_{(31)}^1 + B_{32}^1 t_{(32)}^1 \leq b.$$

Описание целевых функций для последователей представлено ниже.

3.2.3.2. Описание функции «Затраты на качество»

Для определения функции «Затраты на качество» применяем подход на основе модели сравнительных издержек (Cost-Ratio Model) [43], [74], [100].

Функцию «Затраты на качество» $F_1(x, y)$ определяем следующим образом:

$$F_1(x, y) = \left(\sum_{j=1}^n x_j^2 \right)^N + \sum_{j=1}^n y_j^2, \quad (11)$$

Переменные векторов x^2, y^2 для функции «Затраты на качество» определим следующим образом: x^2 – КВ для ЧПК «Относительный уровень затрат на устранение дефектов», y^2 – КВ для ЧПК «Относительный уровень затрат на контроль качества и предупреждение дефектов».

Элементы ЧПК a_{2ij}^2 матрицы A_2^2 для вектора переменных x^2 функции «Затраты на качество» находим по формуле:

$$a_{2ij}^2(a_{1ij}^1) = \frac{C(DPU_{ij})}{Ac_{ij} \times a_{1ij}^1} ij, \quad (12)$$

где $C(DPU_{ij})$ – затраты на устранение дефектов, возникших по вине производителя (в денежном эквиваленте), зависящие от показателя DPU_{ij} , Ac_{ij} – себестоимость производства изделий, a_{1ij}^1 – уровень выхода годной продукции.

Элементы ЧПК $b_{(11)ij}^2$ матрицы B_{11}^2 для функции «Затраты на качество» находим по формуле:

$$b_{(1)ij}^2 = \frac{C_1 + C_2}{Ac} ij, \quad (13)$$

где C_1 – затраты, направленные на обеспечение выхода годной продукции, C_2 – затраты на предупреждение дефектов в изделиях (в денежном эквиваленте), Ac_{ij} – себестоимость производства изделий.

Задачу поиска оптимального численного значения функции «Затраты на качество» с учетом выражений (12) – (13) зададим следующим образом:

$$\begin{aligned} \min_{y \in Y} \{ F_1(x, y) = \left(\sum_{j=1}^n x^2_j \right)^N + \sum_{j=1}^{m_1} y^2_{(1)j} \} \\ A_2^2 x^2 + B_1^2 y^2_{(1)} \leq b'. \end{aligned} \quad (14)$$

Перейдем к определению функции «Управление поставщиками».

3.2.3.3. Описание функции «Управление поставщиками»

Функцию «Управление поставщиком» $F_2(x, z)$ определяем следующим образом:

$$F_2(x, z) = \left(\sum_{j=1}^n x^2_j \right)^N + \sum_{j=1}^n z^2_j. \quad (15)$$

Переменные векторов КВ x^2, z^2 для функции «Управление поставщиками» определим следующим образом: x^2 – своевременность устранения замечаний к качеству изделий, z^2 – КВ для ЧПК «Своевременность доставки и результативность обращений к поставщику по возникающим вопросам».

Элементы ЧПК a_{3ij}^2 матрицы A_3^2 для вектора переменных x^2 функции «Управление поставщиками» находим по формуле:

$$a_{3ij}^2(a_{1ij}^1) = \left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{t_{bi1}}{t_{i1} \times a_{1ij}^1} \right)_{ij}^{N_{i1}}, \quad (16)$$

где t_{i1} – среднее время устранения несоответствия или удовлетворения потребителя при возникновении дефектов по вине поставщика, n_{i1} – число обращений к поставщику, t_b – время устранения несоответствия или удовлетворения потребителя в соответствии с контрактом.

По вектору КВ z^2 определяем два ЧПК, следовательно, матрицу B_2^2 составим из двух блоков: $B_2^2 = [B_{21}^2, B_{22}^2]$, где с индексом 21 – элементы $b_{(21)ij}^2$, характеризующие результативность обращений к поставщику по возникающим вопросам, элементы $b_{(22)ij}^2$ с индексом 22, характеризующие своевременность доставки комплектующих. Элементы $b_{(21)ij}^2$ матрицы B_{21}^2 функции «Управление поставщиками» находим по формуле:

$$b_{(21)ij}^2 = \left(\frac{q_c}{q_o} ij \right)^{1-d}, \quad (17)$$

где q_c – отношение закрытых вопросов к общему количеству вопросов q_o , d_i – отношение суммарной стоимости комплектующих к себестоимости изделия.

Элементы ЧПК $b_{(22)ij}^2$ матрицы B_{22}^2 функции «Управление поставщиками» находим по формуле:

$$b_{(22)ij}^2 = n \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{|t_{i2} - t_{ib}|}{t_{ib}}}, \quad (18)$$

где t_{i2} – среднее время поставки комплектующих i -ым поставщиком (начиная с даты заключения контракта), n – количество запланированных поставок, t_b – время поставки комплектующих i -ым поставщиком (по контракту).

Задачу поиска оптимального численного значения функции «Управление поставщиками» с учетом выражений (16) – (18) зададим следующим образом:

$$\min_{z \in Z} \{ F_2(x, z) = \left(\sum_{j=1}^n x_j^2 \right)^N + \sum_{j=1}^n z_{(21)j}^2 + \sum_{j=1}^n z_{(22)j}^2 \}. \quad (19)$$

$$A_2^2 x^2 + B_{21}^2 z_{(22)}^2 + B_{22}^2 z_{(22)}^2 \leq b''.$$

Далее перейдем к описанию функции технологичности.

3.2.3.4. Описание функции технологичности

Функцию технологичности $F_3(x, t)$ определяем следующим образом:

$$F_3(x, t) = \left(\sum_{j=1}^n x_j^2 \right)^n + \left(\sum_{j=1}^n t_j^2 \right), \quad (20)$$

Переменные векторов КВ x^2, t^2 для функции технологичности определим следующим образом: x^2 – КВ для ЧПК «Относительный уровень расхода материалов и сырья в процессе производства», t^2 – КВ для ЧПК «Относительная трудоемкость выполнения технологических операций и относительная себестоимость выполнения технологических операций».

Уровень расхода материалов и сырья при выполнении технологического процесса a_{4ij}^2 находим по формуле:

$$a_{4ij}^2(a_{1ij}^1) = 1 - \frac{\left(\frac{M}{M_B} + \frac{KH}{KH_B}\right) \cdot a_{1ij}^1}{2}, \quad (21)$$

где M – масса материала в готовом изделии, M_B – масса материала для выполнения технологического операции, KH – количество комплектующих изделий в готовом изделии, KH_B – количество используемых комплектующих для выполнения технологической операции.

По вектору КВ t^2 определяем три показателя по матрице B_3^2 . Следовательно, данная матрица примет вид: $B_3^2 = [B_{31}^2, B_{32}^2]$, где с индексом 31 – элементы $b_{(31)ij}^2$, характеризующие относительную трудоемкость выполнения технологических операций, с индексом 32 элементы $b_{(32)ij}^2$, характеризующие относительную себестоимость выполнения технологических операций.

Элементы ЧПК $b_{(31)ij}^2$ находим по формуле:

$$b_{(31)ij}^2 = 1 - \frac{T_N}{T_o + T_v + T_p} ij, \quad (22)$$

где T_o – основное технологическое время изготовления детали (изделия), равное $T_o = \frac{F}{N} ij$ (где F – заданное время работы оборудования, N – число изготовленных деталей (изделий)), T_v – время обслуживания рабочего места, T_p – профилактическое время обслуживания технологического оборудования, T_N – эталонное или плановое значение T_o ; если числитель равен знаменателю, то $T = 1$

Элементы ЧПК $b_{(32)ij}^2$ находим по формуле:

$$b_{(32)ij}^2 = 1 - \frac{P_N}{P_W} ij, \quad (23)$$

где P_W – суммарные финансовые затраты на выполнение технологической операции, P_N – запланированные затраты на выполнение технологической операции; если $P_W = P_N$, то $P = 1$.

Задачу поиска оптимального численного значения функции технологичности с учетом выражений (21) – (23) зададим следующим образом:

$$\min_{t \in T} \{F_3(x, t) = \left(\sum_{j=1}^n x_j^2 \right)^N + \sum_{j=1}^n t^2_{(31)j} + \sum_{j=1}^n t^2_{(32)j} \} \quad (24)$$

$$A_3^2 x^2 + B_{31}^2 t^2_{(32)} + B_{32}^2 t^2_{(32)} \leq b''''.$$

Как можно заметить, в описании целевых функций (10), (14), (19) и (24) не заданы ЧПК целевых функций, для решения следующей задачи:

$$\min_{x \in X} \{Q(x, y, z, t) = \left(\sum_{j=1}^n c_j^1 x_j^1 \right)^N + \sum_{j=1}^{n_{11}} d_j^{11} y_{(1)j}^1 + \sum_{j=1}^{n_{21}} d_j^{12} z_{(21)j}^1 + \sum_{j=1}^{n_{22}} d_j^{13} z_{(22)j}^1 + \sum_{j=1}^{n_{31}} d_j^{14} t_{(31)j}^1 + \sum_{j=1}^{n_{32}} d_j^{15} t_{(32)j}^1 \}$$

$$A_1^1 x^1 + B_1^1 y_{(1)}^1 + B_{21}^1 z_{(21)}^1 + B_{22}^1 z_{(22)}^1 + B_{31}^1 t_{(31)}^1 + B_{32}^1 t_{(33)}^1 \leq b$$

$$\min_{y \in Y} \{F_1(x, y) = \left(\sum_{j=1}^n c_j^2 x_j^2 \right)^N + \sum_{j=1}^{n_{11}} d_j^{21} y_{(1)j}^2 \}$$

$$A_2^2 x^2 + B_1^2 y_{(11)}^2 \leq b'$$

$$\min_{z \in Z} \{F_2(x, z) = \left(\sum_{j=1}^n c_j^3 x_j^3 \right)^N + \sum_{j=1}^n d_j^{22} z_{(21)j}^2 + \sum_{j=1}^n d_j^{23} z_{(22)j}^2 \}$$

$$(A_2^2 x^2 + B_{21}^2 z_{(22)}^2 + B_{22}^2 z_{(22)}^2) \leq b''$$

$$\min_{t \in T} \{F_3(x, t) = \left(\sum_{j=1}^n c_j^4 x_j^4 \right)^N + \sum_{j=1}^n d_j^{24} t_{(31)j}^2 + \sum_{j=1}^n d_j^{25} t_{(32)j}^2 \}$$

$$A_3^2 x^2 + B_{31}^2 t_{(32)}^2 + B_{32}^2 t_{(32)}^2 \leq b''''.$$

Традиционные методы определения ЧПК для целевых функций, применяемые в задачах квалиметрии [41], в данной модели (2) не применимы по причине отсутствия иерархической связи между целевыми функциями и отсутствия системы ограничений. Данный факт означает, что необходима методика, определяющая коэффициенты важности с учетом разнородной информации.

Разработка методики формализации ЧПК с целевыми функциями представлена в 3.3.

3.3. Разработка методики формализации разнородных компонентов векторов ЧПК с целевыми функциями

На основе проведенного сравнительного анализа в 2.2 был выбран алгоритм Такаги-Сугено. Для описания переменных x в функциях Такаги-Сугено необходимо определить их смысл при решении задачи оценки и улучшения качества продукции. В 3.3.1 приведено описание структуры системы нечеткого вывода для получения векторов ЧПК $c = (c_1, \dots, c_n)$ и $d = (d_1, \dots, d_n)$, на основе которой в 3.4.2 будет предложена численная методика формализации вектора КВ x .

3.3.1. Описание структуры базы данных нечетких правил

База данных нечетких правил должна охватывать все переменные (ЧПК) двухуровневой модели поиска оценки качества продукции [107]. В модель входят векторы ЧПК целевых функций c и d . Далее по тексту в рамках 3.4 c и d обозначены для краткости как константы. Двухуровневая модель поиска оценки качества продукции на базах данных нечетких правил для формирования ЧПК предложенная в работе автора [104], представлена на рисунке 10.

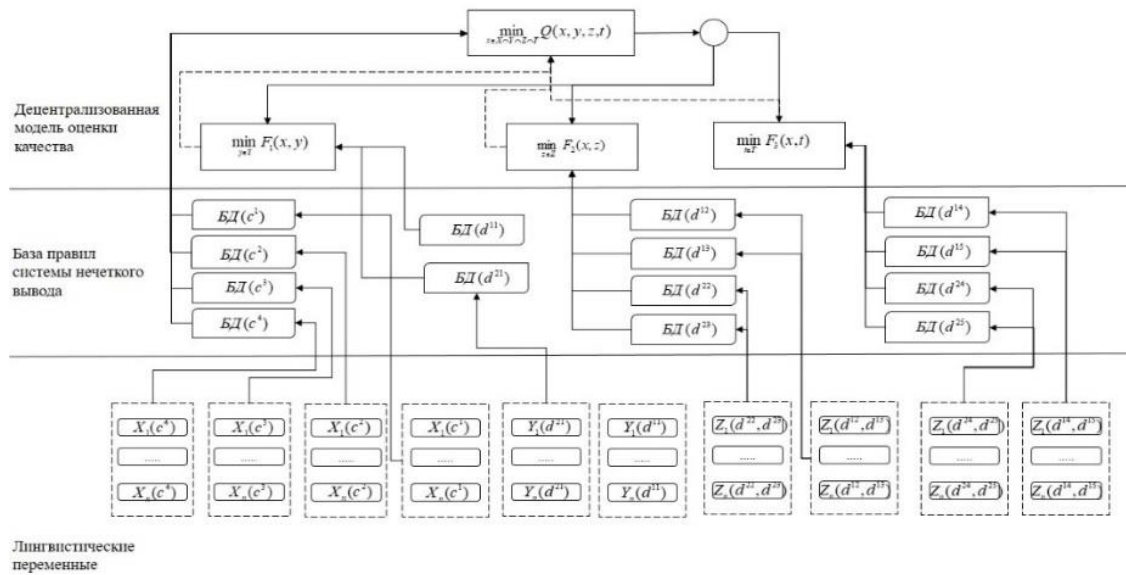


Рисунок 10 – Нечеткая система для модели поиска оценки качества продукции приборостроения

Подробное описание лингвистических переменных представлено в работах [80], [88] и [118]. Содержание лингвистических переменных согласно рисунку 10 будет приведено ниже. Терм-множество констант c и d включает три начальных оценивающих градации для выходных значений (консеквентов), которые вводим для дальнейшей разработки системы нечеткого вывода, т.е. $T(X_i) = T(c_i, d_i', d_i'') = ["низкий", "средний", "высокий"]$. Подобласть определения функции принадлежности нечеткой переменной g_i для каждой градации следующая: с "низкий" = $[0 \leq u_i(g_i) < 0.3]$, "средний" = $[0.3 \leq u_i(g_i) < 0.7]$, "высокий" = $[0.7 \leq u_i(g_i)]$. Функции принадлежности для входных нечетких переменных основываются на треугольной функции принадлежности:

$$f(g; a, b, c) = \begin{cases} 0, & g \leq a, \\ \frac{g-a}{b-a}, & a < g \leq b, \\ \frac{c-g}{c-b}, & b < g \leq c, \\ 0, & c < g, \end{cases} \quad (25)$$

где $a=0$, $b=1$, $c=1$.

Выходные значения системы нечеткого вывода (консеквенты) для алгоритма Такаги-Сугено задаем линейным уравнением $p_j = l_{1j}g_1 + l_{2j}g_2 + \dots + l_{ij}g_i + l_0$, где l_{1j} – нечеткий терм, g_i – переменные, задающие

масштаб нечеткого терма и его вклад в результирующее значение p_j по сравнению с другими нечеткими термами j -го правила. Для получения результирующих значений p_j помимо получения нечетких термов l_{1j} через определение констант c , d необходимо разработать методику определения численных значений коэффициентов важности нечетких термов x_i . В алгоритмах Такаги-Сугено существует множество способов получения переменных g_i , однако, в задаче оценки качества продукции наиболее подходящим решением является применение методов оценки важности критериев при многих критериях.

Для определения методики оценки важности переменных g_i необходимо задать требования, основываясь на содержании частных критериев целевой функции c , d . Для определения частных показателей качества (ЧПК) целевой функции «Уровень выхода годной продукции» можно использовать следующие лингвистические переменные [106]:

- структурная сложность изделия (ССИ) – l_1 ,
- доля комплектующих с разрешениями на отклонение (РО) – l_2 ,
- доля комплектующих с актами о браке (АБ) – l_3 ,
- доля комплектующих с актами о несоответствии (АН) – l_4 ,
- доля покупных комплектующих изделий (ПКИ), входящих в изделие – l_5 .

Решение лица, принимающего решение (ЛПР), зависит от полученных численных значений. Если опираться на соотношение $\{l_1, l_2, l_3\} < \{l_4, l_5\}$, то очевидно, что ЛПР будет стремиться понижать численные значения $\{l_4, l_5\}$ до приемлемого уровня. Однако, на практике решения могут отличаться от представленной выше логики. Для определения поведения ЛПР опишем сценарий принятия решения. Диаграмма сценария представлена на рисунке 11.

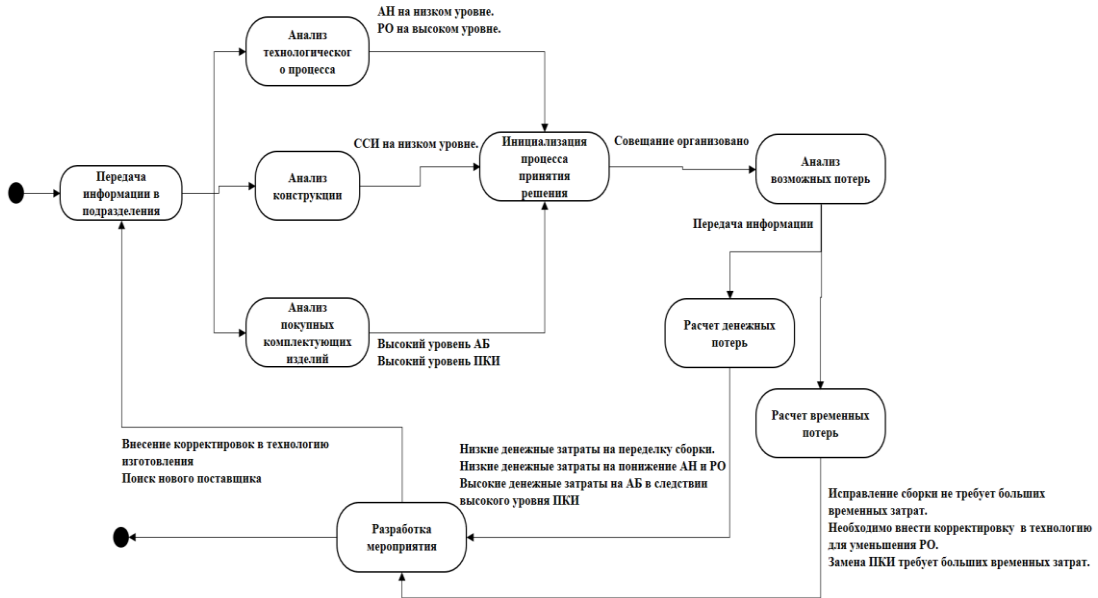


Рисунок 11 – Описание процесса принятия решений при управлении качеством продукции

Расшифровка обозначений на рисунке 11. АБ – забракованная продукция, ПКИ – покупные комплектующие изделия, РО – продукция с разрешениями на отклонение, АН – продукция с несоответствиями (дефектами), ССИ – структурная сложность изделия.

На рисунке 11 показано, что перед принятием решения и разработкой мероприятий происходит анализ возможных потерь при низком уровне АН и ССИ, высоком уровне РО, АБ и ПКИ. Анализ данной информации осуществляется с точки зрения временных и финансовых потерь, что в свою очередь влияет на функцию качества $Q(x, y, z, t)$. Исходя из этого можно сделать следующие выводы:

1. В процессе принятия решения необходимо учитывать временные и постоянные потери, что непосредственно влияет на функцию качества $Q(x, y, z, t)$.

2. Полученные численные значения лингвистических переменных могут находиться на разной удаленности друг от друга, при этом для каких-то переменных удаленность, например, на единицу может быть существенной (исходя из затрат на устранение несоответствий), а для каких-то – несущественной.

Для реализации представленной модели на рисунке 11 и реализации двухуровневой оптимизации для поиска оценки качества продукции с точки зрения заложенных целевых функций и критериев качества необходимо разработать методику численной оценки ЧПК для целевых функций, которая позволит оценивать важность переменных g_i , исходя из их удаленности от соответствующих идеальных значений.

Известны работы в области теории относительной важности критериев при решении многокритериальных задач [20-21]. Наиболее подходящей методикой определения количественной важности является методика, предложенная В.Д. Ногиным, которая основана на так называемом кванте информации. Методика позволяет определить степень компромисса для распределения долей от менее значимого векторного критерия к более значимому векторному критерию [98]. Квант информации позволяет определить Парето-оптимальное решение. Описание предложенного подхода на основе применения теории количественной оценки компромиссов [96] и алгоритма Такаги-Сугено [99] представлено в 3.3.2. Далее под квантом информации будет подразумеваться объем информации об объекте для его сравнения с другими аналогичными объектами. Представленная ниже методика количественной оценки важности критериев на основе кванта информации предложена автором в работе [97].

3.3.2. Разработка методики количественной оценки важности критериев на основе кванта информации

Парето-оптимальное решение находим следующим образом: пусть заданы два вектора y' и y'' ; чтобы определить Парето-оптимальное решение необходимо и достаточно, чтобы выполнялось соотношение $y' \succ y''$, т.е. $y' \geq y'' \Rightarrow y' \succ y''$. Соотношение $y' \geq y''$ определяем следующим образом: вектор y' по i -ому (где $i = 1, 2, \dots, n - 1$) критерию не лучше, чем вектор y'' , и хотя бы по одному критерию i лучше, чем y'' .

Опишем начальные условия алгоритма вычисления кванта информации, предложенные в работах [97] и [98]. Пусть $i, j, k \in I$ (где I – множество индексов), $i \neq j$, $i \neq k$, $j \neq k$; существуют такие группы, что $i \in A$, $j \in B$, $k \in C$, $A \neq \emptyset$, $B \neq \emptyset$, $C \neq \emptyset$, $A \cap B \cap C = \emptyset$, на которые распространяются следующие свойства: группа критериев A важнее группы критериев B с параметрами w_i для всех $i \in A$ и w_j для всех $j \in B$, а группа критериев B , в свою очередь, важнее группы критериев C с параметрами w_j для всех $j \in B$ и w_k для всех $k \in C$. Параметры w_i , w_j и w_k определяют степень компромисса, которые в свою очередь вычисляем по формуле:

$$\theta_{ij} = \frac{w_j}{w_j + w_i} . \quad (26)$$

Решение y' предпочтительнее y'' по всем критериям i , для которых $i \in A$, и в то же время оно менее предпочтительно, чем y' по всем критериям j , для которых $j \in B$. Остальные критерии (которые не входят ни в A , ни в B) в расчет можно не принимать, поскольку они имеют одинаковые значения как для y' , так и для y'' . Предпочтения y' над y'' по всем критериям j , для которых $j \in B$, менее предпочтительны, чем y' по всем критериям k , для которых $k \in C$, определяем следующим образом:

$$\theta_{jk} = \frac{w_k}{w_j + w_k} . \quad (27)$$

Сужение множества Парето с учетом введения степеней компромисса осуществляется путем включения в критериальное пространство функции вида:

$$q_{ij} = \theta_{ij} y'_i + (1 - \theta_{ij}) y'_j \quad (28)$$

$$q_{jk} = \theta_{jk} y'_j + (1 - \theta_{jk}) y'_k \quad (29)$$

Функции (28) и (29) заменяют менее важные критерии таким образом, что, чем быстрее θ_{ij} и θ_{jk} стремятся к единице (так как $0 \leq \theta_{ij}, \theta_{jk} \leq 1$), тем более важен критерий с индексом i , и, соответственно, тем быстрее критерий с индексом j стремится к критерию с индексом i . Замене не подлежит наиболее важный критерий в векторе [97].

Пример. Даны два решения: решение А и решение В. Векторный критерий решения А: $y' = (3;2)$, а решения В: $y'' = (2;4)$. Необходимо определить Парето-оптимальный вариант решения, используя функцию (28), так как вектор состоит из двух критериев. Известно, что $w_i = 0,7$, а $w_j = 0,3$.

Определим y' и y'' :

$$y' = (3, q_{ij}) \Rightarrow y' = (3, (3 \times 0,7 + 2 \times 0,3)) \Rightarrow y' = (3;2,7)$$

$$y'' = (2, q_{ij}) \Rightarrow y'' = (2, (2 \times 0,7 + 4 \times 0,3)) \Rightarrow y'' = (2;2,6)$$

Отсюда следует, что решение В является более предпочтительным по сравнению с решением А. В случае наличия трех критериев сначала необходимо определить θ_{jk} , а затем θ_{ij} .

При определении относительных коэффициентов важности применяем стратегию компенсации, при которой низкие показатели по одному критерию (или сразу по нескольким критериям) компенсируются высокими показателями по другому критерию (или одновременно по некоторым другим критериям).

Методика оценки важности переменных g для функций Такаги-Сугено на основе приведенного выше подхода представлена ниже.

3.3.2.1. Методика оценки важности переменных функции Такаги-Сугено

Для применения разработанной методики в решении задачи определения переменных l в функции $p_j = l_{1j}g_1 + l_{2j}g_2 + \dots + l_{ij}g_i + l_0$ необходимо выполнить следующее:

1. Сформулировать методику определения параметра w для векторных критериев.
2. Определить перечень векторных критериев.
3. Применить функции (28) и (29) для получения новых векторных критериев.
4. Нормализовать переменные g так, чтобы $\sum_{i=1}^n g_i = 1$, где $i = 1, 2, \dots, n$ – количество переменных в функции $p_j = l_{1j}g_1 + l_{2j}g_2 + \dots + l_{ij}g_i + l_0$.

Методика определения параметра w основана на следующем правиле: чем ближе полученный критерий к своему идеальному значению, тем он важнее, таким образом, порядок расположения критериев по важности определяется их удалённостью от идеального значения [96].

Пример. Пусть заданы два вектора y' , y'' с тремя критериями с индексами i, j, k . Соотношение между критериями $|y'_k - y''_k| < |y'_i - y''_i|, |y'_i - y''_i| < |y'_j - y''_j|$. Следовательно, порядок расположения критериев в новом векторе \bar{y} будет следующим: $\bar{y} = (j, i, k)$. Параметры w , исходя из правила, определяем через разности наилучших критериев в лучшем решении y' и полученном критерии в решении y'' . Например, если $y' = (5; 5; 5)$, а $y'' = (3; 1; 4)$, то $w_i = 2$, $w_j = 4$, $w_k = 1$ и, соответственно, $\bar{y} = (k; i; j) \Rightarrow \bar{y} = (1; 2; 4)$, где наиболее важным критерием является критерий с индексом k , а степени компромисса будут равны:

$$\theta_{ij} = \frac{w_i}{w_k + w_i} = \frac{1}{1 + 2} = 0,33.$$

$$\theta_{ki} = \frac{w_i}{w_j + w_i} = \frac{2}{4 + 2} = 0,33,$$

где новый вектор:

$$\bar{y} = (4, (4 \times 0,33 + 2 \times 0,67), (2 \times 0,33 + 1 \times 0,67)) \Rightarrow \bar{y} = (4; 2,66; 1,33).$$

Приведя критерии к предыдущим индексам, получим:

$$\bar{y} = (4; 2,66; 1,33) \Rightarrow y'' = (2,66; 1,33; 4).$$

Нормализацию полученных векторных критериев определяем как отношение критерия к сумме по критериям в новом векторе. В примере, представленном выше, получим $y'' = (2,66;4;1,33) \Rightarrow g = (0,33;0,5;0,17)$.

Численное значение после определения переменных функции $p_j = l_{1j}g_1 + l_{2j}g_2 + \dots + l_{ij}g_i + l_0$ будет следующим:

$$\langle l, g \rangle = 3 \times 0,33 + 1 \times 0,5 + 4 \times 0,17 = 2,17.$$

Полученное численное значение функции Такаги-Сугено описывает переменную частного критерия целевой функции в модели двухуровневой линейной оптимизации. Для придания данной переменной оценочного смысла необходимо разработать ранговую шкалу.

Разработанная методика оценки важности переменных l функции Такаги-Сугено, предложенная в работах автора [30] и [104], имеет следующие достоинства:

1. Степень важности определяется, исходя из отдаленности от целевого критерия.
2. Критерии с низким значением l не компенсируются критериями с более высокими значениями l .
3. Наибольший вес приобретают критерии, которые в наибольшей степени отдалены от своих идеальных значений.

Для смысловой и логической интерпретации полученных численных показателей целевых функций необходимо их оценить по ранговой шкале, которая позволяет определить удовлетворяют ли найденные значения целевых функций установленным требованиям. Разработка данной методики представлена в 3.4.

3.4. Разработка ранговой шкалы оценки показателей целевых функций

Для оценки степени удовлетворенности полученными численными значениями целевых функций необходимо их интерпретировать качественно по схеме «плохо – нормально – хорошо». Для интерпретации будет производиться привязка полученных численных значений целевых функций к рангам ранговой

шкалы. Размерность ранговой шкалы будет зависеть от сложности выполнения процессов организации, привязанных к целевым функциям, а также от трудоёмкости выполнения данных процессов. Сложность и трудоемкость выполнения процессов организации будет описываться с точки зрения понятия структурной информации и энтропии. Далее описанная методика формирования ранговой шкалы для оценки целевых функций предложена автором в работе [106].

В настоящее время наиболее популярным и эффективным инструментом описания состояний физических и нефизических процессов является теория измерения количества информации на основе меры Хотлинга [111] и Шеннона [111]. В данной работе будет использоваться мера Хотлинга [111]. Целесообразность применения меры Хотлинга обуславливается тем, что в данном случае не требуется большого объема статистической информации, а также учет разнородной информации, например, квалификация персонала, применяемые технологии, трудоемкость и т.д.

Исходя из вышесказанного необходимо разработать методику измерения структурной меры информации описанных процессов. В данном разделе определим меру информации процесса формирования частного показателя качества (ЧПК). С целью измерения меры информации процессов, необходимо учесть следующие особенности процессов [106]:

1. Потребители процесса.
2. Область процесса.
3. Информация о материалах, ресурсах и заданиях, подаваемая на вход процесса.
4. Функции процесса.
5. Технологии и методики по осуществлению процесса.
6. Выходы процесса.

Процесс получения информации в отношении частных показателей качества должен состоять из следующих операций:

1. Передача ресурсов и основных материалов для выполнения функций структурных подразделений, задействованных в процессе формирования информации в отношении частных показателей качества.
2. Операция выполнения основных функций структурных подразделений, задействованных в процессе формирования информации в отношении частных показателей качества.
3. Определение контрольной точки по проверке результатов деятельности структурных подразделений, задействованных в процессе формирования информации в отношении частных показателей качества.
4. Принятие решения в отношении полученных результатов.
5. Устранение замечаний без отката к предыдущей операции и использования ресурсов.
6. Устранение замечаний без отката к предыдущей операции, но с использованием ресурсов.
7. Устранение замечаний с откатом к предыдущей операции и с использованием ресурсов.

Для определения расширенного нечеткого множества опишем процесс формирования информации в отношении показателей качества через ориентированный граф – $G(V, E)$.

Зададим ориентированный граф для описания процессов организации со следующими особенностями:

1. Вершины графа есть вектор $V = (v_1, v_2, \dots, v_n)$, где $i = \overline{1, n}$ – есть операции процесса, а ребро есть вектор $E = (e_1, e_2, \dots, e_m)$, где $j = \overline{1, m}$ – есть номер ребра [16].
2. При переходе от одной операции к другой в рамках области определения процесса затрачиваются ресурсы, задаваемые как вектор $S = (s_1, s_2, \dots, s_m)$, где $e_j^+ = (v_i, v_{i+1})$ – есть плановые издержки, а $e_j^- = (v_{i-1}, v_i)$ издержки не плановые.

3. Сумма издержек зависит от способа устранения замечаний и стадии обнаружения замечаний.

4. Каждая издержка характеризуется своей энтропией, следовательно, содержанием энтропии является объем негативных факторов, приводящих к затратам. Следовательно:

$$H(s_i) = (-k) \log_2 \left(1 - \frac{s_i}{SP} \right), \quad (30)$$

где SP – плановые издержки, k – количество потребителей операции, на которой были выявлены несоответствия, общая энтропия графа по издержкам $H(S) = \sum_{i=1}^k H(s_i)$.

Для определения способа построения ранговой шкалы прибегнем к статистическим методам построения гистограмм [111]. Одним из методов является определение количества интервалов для количественной шкалы [111]:

$$k = 4 \lg(n), \quad (31)$$

где n – объем выборки, k – число интервалов деления.

Выбранный способ определения энтропии (30) основан на так называемой структурной энтропии или энтропии по Хартли, особенность которой заключается в равной вероятности возникновения всех заданных событий, а так как формула (31) применяется при равновероятном законе распределения, то выбор очевиден. Для определения издержек предварительно оформляем матрицу инцидентности, представленную в таблице 6.

Таблица 6 – Матрица инцидентности

Вершины (операции процесса)	Ребро (затраты/издержки)				
	s_1	s_2	.	.	s_m
v_1					
v_2					
.					
v_n					

В определении количества интервалов деления (31) учитываем только отрицательные значения ребер $-s_j$. После того, как количество интервалов деления будет определено, строим ранговую шкалу, где 0 означает отсутствие

энтропии, т.е. отсутствие замечаний, n – максимальный ранг шкалы (максимальное значение энтропии). Значение n соответствует значению, полученному по формуле (31). Пример соответствия шкалы энтропии ранговой шкале при $H(s_1) \approx 11$ и $k(8,04) \approx 14$, приведен в таблице 7. При построении шкалы применены следующие условия:

$$n = \begin{cases} k < 0, n = 1 \\ k = 0, n = 0 \\ 0,85 \leq k < 1, n = 2 \end{cases} .$$

Таблица 7 – Описание ранговой шкалы

s_i	H	K	n
0,2	11,60964	14,14901	14
0,25	10	13,28771	13
0,3	8,684828	12,47399	12
0,35	7,572866	11,68336	11
0,4	6,60964	10,89829	10
0,45	5,760015	10,10429	10
0,5	5	9,287712	9
0,55	4,312482	8,434074	8
0,6	3,684828	7,526389	7
0,65	3,107442	6,54291	6
0,7	2,572866	5,453505	5
0,75	2,075187	4,212967	4
0,8	1,60964	2,746954	3
0,85	1,172326	0,917497	2
0,9	0,760015	-1,5836	1
0,95	0,370003	-5,73757	1
1	0	0	0

Как видно из таблицы 11, при уменьшении объема запланированных издержек s_i энтропия H растёт, что связано с увеличением неизвестных негативных факторов. При этом число делений K прямо пропорционально значению H , а численные значения n – это округленные в меньшую сторону до целого значения градации для ранговой шкалы.

3.5. Разработка методики визуализации многогранника качества области

Парето

Сравнительный анализ, проведенный в 2.2, показал, что для решения проблемы оценки и улучшения качества продукции наиболее приемлемым методом является применение двухуровневой линейной оптимизации и последующее применение метода визуализации области Парето для поиска путей обеспечения или улучшения качества продукции приборостроения. Основным достоинством визуализации области Парето, для случая если у ЛПР более трех целевых функций или критериев, по сравнению с методами многокритериальной оптимизации, является возможность визуальной интерпретации оптимальных решений для ЛПР. На основе визуальной интерпретации ЛПР может сам выбрать наиболее предпочтительное решение для обеспечения или улучшения качества продукции приборостроения, в то время как методы многокритериальной оптимизации (МО) находят лишь одну оптимальную точку из области Парето, при этом механизм поиска области Парето для МО зависит от способа поиска компромиссов.

Далее будет представлен метод визуальной интерпретации области Парето в случае решения двухуровневой задачи оптимизации, применительно к проблемам управления качеством, предложенный автором в работе [107] и в работе [23].

3.5.1. Решение задачи визуализации области Парето для обеспечения и улучшения качества продукции приборостроения

Сформулированная в начале главы 3 задача оценки качества продукции позволяет определить слабые места при производстве продукции в таких направлениях, как технология изготовления продукции, работа с поставщиками, затраты на обеспечение качества, эффективность и результативность действующей системы менеджмента качества.

Для принятия решения по предоставленной информации для обеспечения или улучшения качества продукции приборостроения необходимо

продемонстрировать возможные пути решения проблем путем ориентации на наихудшие целевые функции, полученные на основе решения задачи поиска оценки качества продукции. Однако, целевые функции лишь отражают полученные численные значения, но не позволяют находить рациональные решения. Чтобы решить данную задачу необходимо определить перечень или область решения на области Парето [93], [95].

Трудности поиска оптимальных по Парето решений при применении моделей двухуровневой оптимизации заключаются в том, что, во-первых, в модели двухуровневой оптимизации целевые функции (лидер и последователь) располагаются последовательно в зависимости от иерархии и формы игры [61], а при применении многокритериальной оптимизации, основанной на оптимальности по Парето, происходит одновременный поиск недоминируемых решений. Во-вторых, целевая функция для главного уровня в модели двухуровневой оптимизации выражена в неявном виде, в том смысле, что она зависит от действия последователя, при этом ставится условие максимизации или минимизации полученных решений для главного уровня в ущерб целевой функции последователя, в то время как для поиска области Парето мы должны по возможности максимизировать все целевые функции.

Разработка алгоритмов поиска решений на области Парето при двухуровневой форме, будет выполнена с учетом следующих моментов: 1) поиск глобального оптимума, что даст дополнительную выгоду как для лидера, так и для последователей; 2) возможность применять уже существующие алгоритмы многокритериальной оптимизации для решения задач двухуровневой линейной оптимизации (эффективно при наличии большого количества переменных и ограничений); 3) возможность визуально интерпретировать полученные решения на области Парето.

Математическая модель перехода от двухуровневой линейной оптимизации к многокритериальной линейной оптимизации впервые представлена Фюлопом [75] и обобщена в работе [77]. В работе [77] был разработан основанный на многокритериальной линейной оптимизации алгоритм решения линейной

двухуровневой задачи на основе методики поиска эффективных точек, предложенный в работе [69].

Основное отличие приведенной ниже предложенной математической модели поиска области Парето для задачи двухуровневой линейной оптимизации заключается в применении альтернативной системы ограничений для минимизации расстояния между переменными, найденными при решении задачи двухуровневой линейной оптимизации, и переменными, полученными при решении задачи многокритериальной линейной оптимизации.

Основная идея применения подходов многокритериальной оптимизации при решении задач двухуровневой оптимизации заключается в приведении области $IR = \{(x, y) \mid (x, y) \in S, y \in P(x)\}$ к области $Ax \leq b$, при которой $C\bar{x} \geq Cx$.

Существует способ перехода из двухуровневой линейной оптимизации в многокритериальную линейную оптимизацию, основанный на матрице целевых функций. Матрица целевых функций при переходе от двухуровневой к многокритериальной оптимизации принимает следующий блочный вид (при условии двух переменных. Случай, когда количество переменных больше двух, рассмотрен ниже):

$$\min\{C\} = \begin{bmatrix} \bar{A} & 0 \\ -e^T \bar{A} & o_1^T \\ o_2^T & c_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \quad (32)$$

в допустимой области вида $Ax + By \leq b$.

Целевые функции считаются оптимальными, если выполнены условия $Ax + By \leq b$ и $c_1 \bar{x} + d_1 \bar{y} \leq c_1 x + d_1 y$, где \hat{x} – найденное минимальное значение переменной x .

Размерность матрицы (32) равна $k \times n$, где $k = r + 2$, а $n = n_1 + n_2$. Значение r находим путем определения ранга матрицы A , где n_1 – количество столбцов в матрице A , n_2 – количество столбцов в матрице A . 0 – это нулевая матрица размерности $r \times n_2$, o_1^T и o_2^T – нулевые векторы с размерностью n_1 и n_2 , e – единичный вектор размерности r соответственно.

Как следует из модели (32), многокритериальная задача оптимизации заключается в минимизации области допустимых решений A для вектора x и коэффициентов d_1 для вектора y . Заметим, что система ограничений в задаче (29) не меняется. Данный путь приводит к поиску неизвестных переменных на нижней области ограничений, что противоречит исходной задаче двухуровневой линейной оптимизации, так как найденные решения минимизируют возможную выгоду лидера или верхней целевой функции [69].

Возможные пути решения:

1. Поиск альтернативной системы для задачи (32), что максимизирует выгоду лидера в области Парето.
2. Введение дополнительных ограничений для задачи (32), чтобы ограничить ход последователя снизу.
3. Преобразование целевых функций для многокритериальной задачи в виде функций расстояния с целью минимизации отношения между решениями двухуровневой оптимизации и многокритериальной оптимизации.

Предлагаемая методика решения двухуровневой задачи оптимизации на основе многокритериальной оптимизации базируется на поиске альтернативных систем уравнений путем преобразования целевых функций и корректировки системы ограничений.

Рассмотрим решение задачи визуальной интерпретации области Парето для двухуровневой задачи линейной оптимизации.

Для решения задачи поиска Парето оптимальности будем использовать ранее описанные целевые функции следующим образом $Q(x, y, z, t)^P$, $F_1(x, y)^P$, $F_2(x, z)^P$ и $F_3(x, t)^P$. Оптимальное решение задачи двухуровневой оптимизации обозначим следующим образом: $Q(x, y, z, t)^{BL}$, $F_1(x, y)^{BL}$, $F_2(x, z)^{BL}$ и $F_3(x, t)^{BL}$.

Формулировка требований к области допустимых решений для задачи двухуровневой оптимизации состоит в том, чтобы найти численные значения векторов переменных, таких, что $[\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \bar{t}]: [x, y, z, t] \in IR$, приводящих к выполнению следующего условия:

$$Q(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \bar{t}) = \begin{cases} F_1(\bar{x}, \bar{y})^{BL} \leq F_1(x, y) = F_1(\bar{x}, \bar{y})^P, [\bar{x}, \bar{y}]: x, y \in S' \\ F_2(\bar{x}, \bar{z})^{BL} \leq F_2(x, z) = F_2(\bar{x}, \bar{z})^P, [\bar{x}, \bar{z}]: x, z \in S' \\ F_3(\bar{x}, \bar{t})^{BL} \leq F_3(x, t) = F_3(\bar{x}, \bar{t})^P, [\bar{x}, \bar{t}]: x, t \in S' \end{cases} \quad (33)$$

Множество S' – это область, при которой достигается выполнение условия Парето оптимальности в области IR для целевых функций нижнего уровня (последователя) и нижняя грань для целевой функции лидера в области IR .
Формулировка области S' следующая:

$$\begin{aligned} Ax + B_1y + B_2z + B_3t &\leq b \\ Q(x, y, z, t) &\geq Q(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \bar{t}) \\ F_1(x, y) &\geq F_1(\bar{x}, \bar{y}) \\ F_2(x, z) &\geq F_2(\bar{x}, \bar{z}) \\ F_3(x, t) &\geq F_3(\bar{x}, \bar{t}) \end{aligned} \quad (34)$$

Исходя из сказанного, необходимо доработать модель (33) с учетом области решений задачи двухуровневой оптимизации. Для этого необходимо получить дополнительную информацию о полиэдральном множестве модели (33), области Парето и области IR . На основе собранной информации необходимо построить систему ограничений, наиболее точно покрывающих область Парето при решении задачи двухуровневой оптимизации.

Для решения поставленной выше задачи, выделим множество решений с максимальным набором активных ограничений S , множество образующих конечный многогранник рецессивных направлений V и множество тривиальных решений системы неравенств T , таким образом, что $S, V, T \subset S'$.

Множество решений на области S' сформулируем следующим образом:

$$X = Co\{p^\tau, \tau = 1, \dots, t\} + Cone\{v^l, l = 1, \dots, k\} + T,$$

где $p^\tau, \tau = 1, \dots, t$ – решение задачи (34) из подпространства $S^T = \{Au = x, x: Ax = b\}$,
 $v^l, l = 1, \dots, k$ – образующие конечного многогранного конуса решений однородной системы линейных неравенств, порождаемой системой (34) из подпространства S .

Наибольший интерес в области допустимых решений представляет подобласть S^T , так как на пересечении границ данной области достигается

минимум или максимум целевой функции. Таким образом, чем больше активных ограничений достигается при решении задачи оптимизации, тем лучше результат. Преобразуем p^r, v^l к виду:

$$p^r = \{[x, y]^r : x^r \in X, y^r \in Y(X), v^l = [x, y]^l : x^l \in X, y^l \in Y(X)\}.$$

Из представленного выше описания векторов p^r, v^l видно, что вектор y^r последователя ограничен направлением вектора x^r , таким образом, рецессивное направление в случае с целевой функцией последователя зависит не только от базиса независимых переменных y , но и от неявной функции последователя вида $y(x) = f(x, y(x))$, где переменная y входит в область ограничения лидера.

В результате получаем, что максимально допустимое значение в области лидера $x = x + \lambda(x, z)z$, где $\lambda(x, z)$ – максимально допустимый шаг движения вектора, z – координаты направления вектора x . Для последователя $y = y + \lambda(y, z)z + b - Ax^T$.

При решении задачи многокритериальной оптимизации в области допустимых решений (34) максимально допустимое значение y не ограничивается условиями лидера, задаваемыми в виде функции $y(x) = f(x, y(x))$. Таким образом, при решении задачи поиска минимума антиградиент $-\nabla y$ целевой функции стремится к минимальному значению на границе области допустимых решений.

Для поиска области Парето при решении задачи двухуровневой оптимизации необходимо составить альтернативную систему ограничений.

Зададим следующее теоретико-множественное описание альтернативной системы:

$$\langle Z, X, Y, A, B, IR, S' \rangle$$

где Z – множество направлений роста или спада численных значений векторов $x = [x_1, \dots, x_n]$, $y = [y_1, \dots, y_n]$ с индексом $i = 1, \dots, n$, X и Y – множество допустимых значений векторов x, y , A и B – последовательность коэффициентов $a_{ij} : A = \{a_{ij}\}$ и $b_{ij} : B = \{b_{ij}\}$ с индексами $ij = 1, \dots, nm$.

При решении задачи двухкритериальной оптимизации направления градиентов многогранника, задаваемые как $z \in Z$, при поиске оптимальных переменных вектора y должны приводить к такому решению, для которого $y = \{\forall y : \langle y(x), z \rangle \xrightarrow{y_i \rightarrow \min(y_i)} b \subset Y \cap Y(X)\}$.

Для решения данной задачи определим оператор вида:

$$M : M(x + y) \subset IR$$

Найдем представленный выше оператор от задачи лидера вида:

$$\min_x \{\langle d^1, x \rangle + \langle d^2, y \rangle : Ax + By = b, x \geq 0, y \in \Psi_L(x)\},$$

где $\Psi_L(x) = \underset{y}{Arg \min} \{\langle c^1, x \rangle + \langle c^2, y \rangle : By \leq a - Ax\}$.

Построим многогранник $\Psi_L(x)$ как неявную функцию последователя вида

$$\Psi_L(x) = y(x) \leq a - Ax, x \geq 0. \quad (35)$$

Исходя из $\Psi_L(x)$, для решения поставленной задачи при поиске минимума оператор M должен ограничивать функцию последователя снизу, с учетом накладываемых ограничений лидера. Как можно заметить из определения $\Psi_L(x)$ и задачи лидера, оптимальное значение функции лидера завьисит от отклика лидера, область допустимых значений которого ограничивается областью допустимых значений лидера. Чтобы лидер получил отклик от последователя, последователю необходимо определить направление антиградиента в сторону ограниченной области лидера, т.е. максимально допустимый шаг, приводящий к градиенту области допустимых решений лидера.

Максимально допустимое численное решение для последователя определяется следующим образом:

$$y = y + \lambda(y, z)z + b - Ax^T. \quad (36)$$

Зафиксируем правую часть из определения (35) и преобразуем (37) к виду:

$$y = y + \lambda(y, z)z \leq y(x) = a - Ax^T, \quad (37)$$

где вектор $z = [-\nabla f(x, -\nabla y(x))_x, -\nabla f(x, -\nabla y(x))_y]$, а правая часть $a - A\bar{x}^T = \sum_{i=1}^n \bar{x} + \sum_{i=1}^n y(\bar{x})$, такая, что $\exists(\bar{x}, y(\bar{x})) : f(\bar{x}, y(\bar{x})) \leq \min\{-f(x, y(x))\}$.

Исходя из направления антиградиента как дополнительного ограничения в виде отклика для функции лидера, оператор M определим как единичную матрицу с отрицательной единицей в n -ой строке:

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & \dots \\ 0 & 0 & \dots & & -1 \end{pmatrix}$$

С учетом полученного оператора M преобразуем область S' к виду:

$$\begin{aligned} Ax + B_1y + B_2z + B_3t &\leq b \\ -\nabla F_1(x, y)_x - \nabla F_1(x, y)_y &\leq \min\{F_1(\bar{x}, \bar{y})^{BL}\} \\ -\nabla F_2(x, z)_x - \nabla F_2(x, z)_z &\leq \min\{F_2(\bar{x}, \bar{z})^{BL}\} \\ -\nabla F_3(x, t)_x - \nabla F_3(x, t)_t &\leq \min\{F_3(\bar{x}, \bar{t})^{BL}\} \end{aligned} \quad (38)$$

Для проверки работы предложенной методики по поиску области Парето решим задачу геометрической интерпретации области Парето:

$$\begin{aligned} \min_{x,y} F(x, y) &= x - 4y \\ -x - y &\leq -3 \\ -2x + y &\leq 0 \\ \min_y f(x, y) &= x + y \\ -3x + 2y &\geq -4 \\ 2x + y &\leq 12 \\ x \geq 0, y &\geq 0. \end{aligned}$$

Где переменные x – характеризуют выбор последователя (f), y – лидера (F).

Для алгоритмизации метода решения задачи поиска области Парето будет использоваться язык программирования «Python» с установленными модулями «Puomo», «Scipy», «Numpy» и «Matplotlib». Модуль «Puomo» необходим для решения задачи двухуровневой линейной оптимизации, модуль «Scipy» используем для решения задачи многокритериальной линейной оптимизации.

Визуализация области Парето для двухуровневой задачи линейной оптимизации представлена рисунке 12.

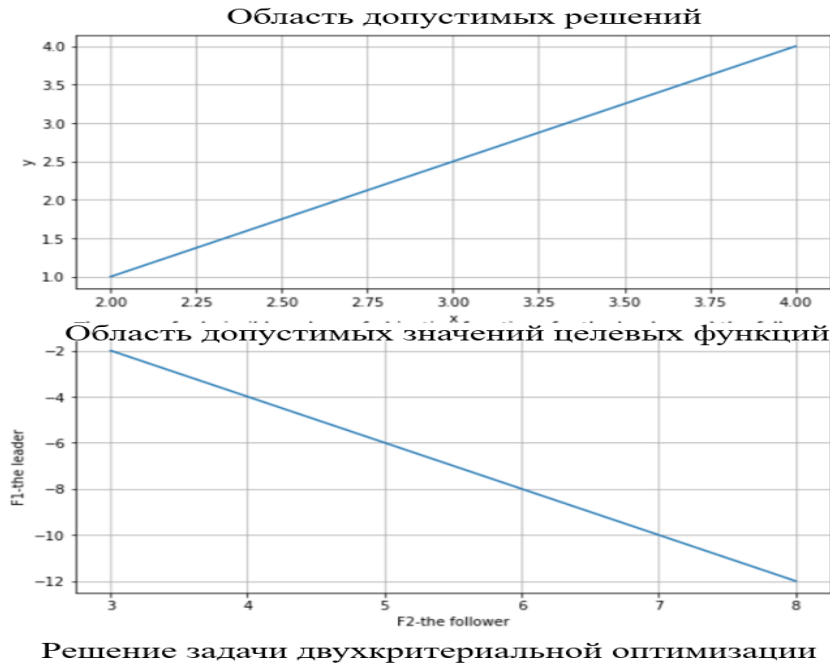


Рисунок 12 – Пример визуализации области Парето

Для поиска оптимального решения для задачи лидера необходимо в функции лидера заменить градиенты на противоположные, так, чтобы антиградиент стал градиентом. Оптимальное решение задачи двухуровневой оптимизации достигается в точках $x=4$ и $y=4$ с целевыми функциями $F(x, y) = -12$ и $f(x, y) = 8$. При решении задачи как задачи многокритериальной оптимизации, то есть при поиске области Парето оптимальное решение достигается в интервалах $x=[2,4]$ и $y=[1,4]$. Перечень алгоритмов решения задачи двухуровневой линейной оптимизации представлен в работе [76].

Алгоритм решения задачи поиска оценки качества продукции и визуализации области Парето для двухуровневой задачи оптимизации состоит из следующих шагов:

1. Решить задачу поиска качества продукции как задачу двухуровневой оптимизации по модели (1). Зафиксировать найденные переменные.
2. Преобразовать область ограничения модели (2) в модель (38).

3. Построить область Парето, изменяя правую часть системы ограничений в (38) для функций последователей от оптимального найденного значения до максимального допустимого значения.

Результаты и выводы по главе 3

Предложенный подход к оценке и улучшению качества продукции позволяет находить качество продукции с учетом затрат на качество, качества поставщиков, работы процессов производства. Разработанная методика позволяет увеличить объективность принимаемых решений и найти наилучшие пути обеспечения или улучшения качества продукции.

Разработанная модель, основанная на двухуровневой оптимизации, позволяет учитывать в процессе принятия решения бизнес-процессы, связанные не только с управлением качеством, но и со всеми основными и вспомогательными процессами производства изделий. Вследствие сказанного, разработанные модели поиска оценки качества продукции способны удовлетворять требованиям заказчиков и производства.

Предложенная система нечеткого вывода решает задачу обработки и анализа большого объема разнородной информации. Применение предлагаемой модели позволяет определить перечень показателей качества продукции, которые можно использовать в модели двухуровневой оптимизации с одним лидером и множеством последователей.

Предложенная методика принятия решений при управлении качеством продукции позволяет визуально интерпретировать решение задачи двухуровневой линейной оптимизации с одним лидером и множеством последователей на области Парето.

Глава 4. Применение методики оценки и улучшения качества в условиях приборостроительного предприятия

4.1. Описание объекта экспериментальных исследований

Объект экспериментальных исследований – модуль навигационной системы (МНС), который производит АО «Радиоавионика». МНС является составной частью многофункционального информационного комплекса (МИК) и предназначен для автоматического определения текущих координат местоположения по сигналам глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) ГЛОНАСС и GPS в частотном диапазоне L1. МНС представлен на рисунке 13.



Рисунок 13 – Модуль навигационной системы

Требования к модулю навигационной системы приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Требования к модулю навигационной системы

Наименование требования к изделию	Наименование группового показателя	Частные показатели качества	Требование к единичному показателю
Определение местоположения по данным МНС: глобальной навигационной спутниковой системы (ГЛОНАСС) и Global Position System (GPS)	Функциональный показатель	Определение топографических координат X и Y	
		Определение высоты Z	
		Захват рабочего созвездия	
		Восстановление слежения	
Масса МНС	Конструкторские показатели	Масса МНС	Не более 0.2 кг
Габаритные размеры должны соответствовать сборочному чертежу (СБ)		Габаритные размеры должны соответствовать сборочному чертежу (СБ)	
Установочные размеры должны соответствовать (СБ)		Установочные размеры должны соответствовать (СБ)	

Материалы и комплектующие элементы, применяемые в МНС, должны иметь документ или клеймо, подтверждающее их соответствие		Соответствие материалов и комплектующих элементов сопроводительной документации	
Внешний вид корпуса	Эстетические показатели	Отсутствие повреждений лакокрасочных и гальванических покрытий	
		Хромированный купол изделия	
		Читаемая маркировка, наличие маркировки	
МНС должен соответствовать требованиям безопасности	Показатели безопасности	В соответствии с ГОСТ В 20.39.107 – 84 и ГОСТ РВ 20.39.309 – 98.	
Транспортирование в упаковке предприятия производителя	Показатели транспортабельности	Соответствие ГОСТ РВ 20.39.304 – 98, ГОСТ В 9.001 – 72	
Покрытия корпуса МНС должно быть стойким к внешним воздействиям	Показатели устойчивости к внешним воздействиям	Покрытия корпуса МНС должно быть стойким к внешним воздействиям	
МНС должен быть прочным и устойчивым к воздействию синусоидальной вибрации		МНС должен быть прочным и устойчивым к воздействию синусоидальной вибрации	
МНС должен быть прочным и устойчивым к воздействию механического удара одиночного действия		МНС должен быть прочным и устойчивым к воздействию механического удара одиночного действия	
МНС должен быть прочным и устойчивым к воздействию механического удара многократного действия		МНС должен быть прочным и устойчивым к воздействию механического удара многократного действия	
МНС должен оставаться работоспособным после падения с высоты		МНС должен оставаться работоспособным после падения с высоты	
МНС должен быть прочным и устойчивым к воздействию повышенной рабочей температуры окружающей среды		МНС должен быть прочным и устойчивым к воздействию повышенной рабочей температуры окружающей среды	
МНС должен быть прочным и устойчивым к воздействию пониженной рабочей температуры окружающей среды		МНС должен быть прочным и устойчивым к воздействию пониженной рабочей температуры окружающей среды	
МНС должен соответствовать требованиям технических условий после воздействия изменения температуры		МНС должен соответствовать требованиям технических условий после воздействия изменения температуры	
МНС должен быть прочным и устойчивым к воздействию повышенной относительной влажности окружающей среды		МНС должен быть прочным и устойчивым к воздействию повышенной относительной влажности окружающей среды	
МНС должен быть прочным и устойчивым к воздействию пониженной относительной влажности окружающей среды		МНС должен быть прочным и устойчивым к воздействию пониженной относительной влажности окружающей среды	
МНС должен быть устойчивым к воздействию пониженного атмосферного давления	МНС должен быть устойчивым к воздействию пониженного атмосферного давления		
Средняя наработка МНС на отказ	Показатели надежности	Средняя наработка МНС на отказ	Не менее 3000 часов

Средний срок службы МНС		Средний срок службы МНС	8 лет со дня изготовления
Средний срок сохраняемости МНС		Средний срок сохраняемости МНС	Не менее 8 лет при хранении отапливаемом помещении согласно ГОСТ В 9.003 – 80 и ГОСТ РВ 9.515 – 99

Представленные в таблице 8 показатели качества формируются в процессе производства МНС. Для определения этапов (операций), на которых происходит формирование частных показателей качества и их изменение, используем методологию IDEF0 [4]. Данный подход к описанию процесса производства поможет определить контрольные точки сбора информации о качестве МНС. Диаграмма IDEF0 верхнего уровня представления процесса производства представлена на рисунке 14, декомпозиция диаграммы верхнего уровня – на рисунке 15.

Модель верхнего уровня представляет с собой общую модель изготовления МНС. Процесс изготовления выполняется за счет воздействия технологий (сборочные чертежи, монтажные чертежи, технические условия и т.д), которые применяются на таких операций технологического процесса, как механические операции, монтажные операции, сборочные операции и регулировочные операции. Заданные технологии выполняются благодаря инженерам, сотрудникам отдела технического контроля (ОТК), представителя заказчика (ПЗ), монтажников, сборщиков и другого персонала АО «Радиоавионика».



Рисунок 14 – Диаграмма IDEF0 верхнего уровня процесса производства МНС

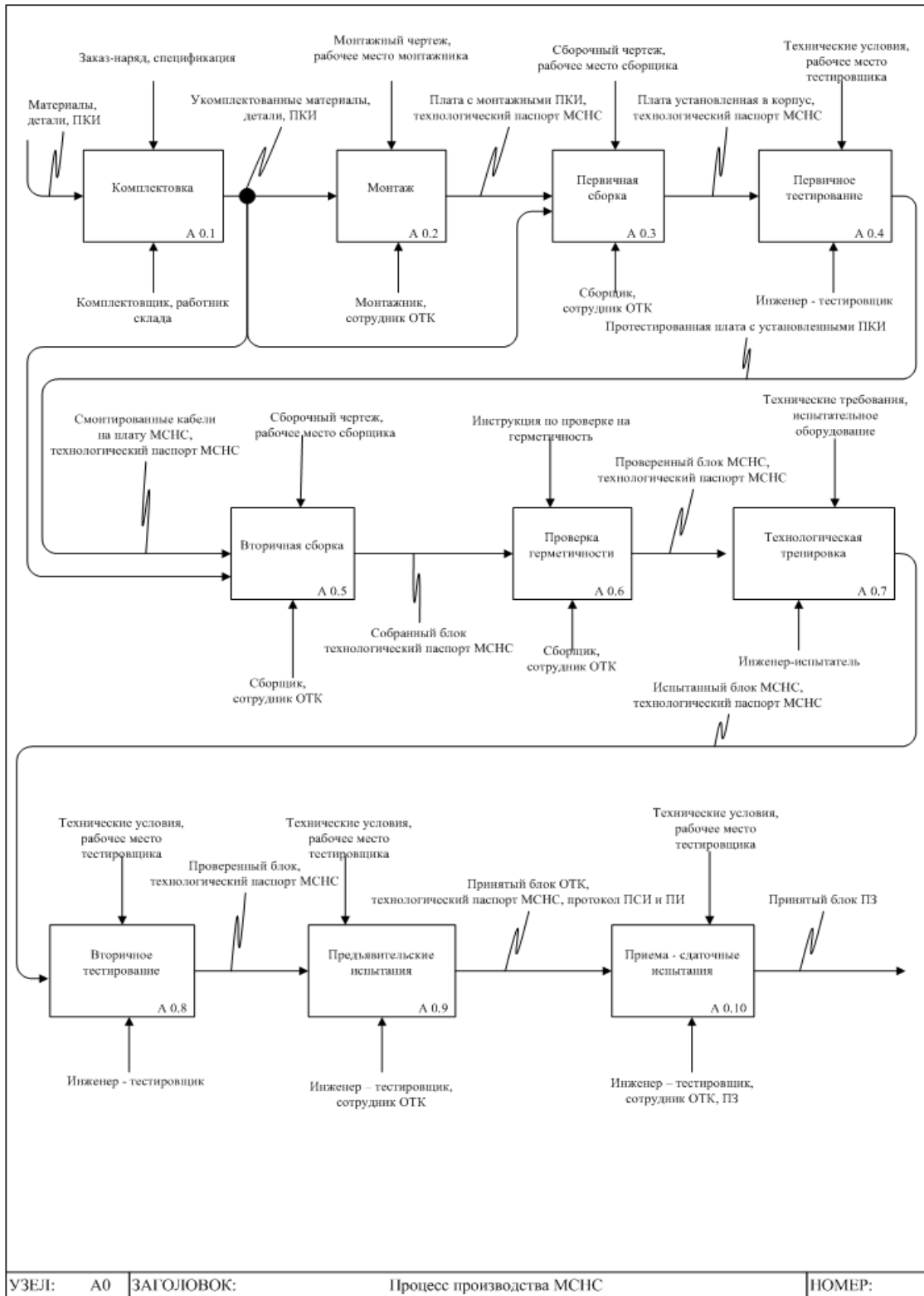


Рисунок 15 – Декомпозиция диаграммы верхнего уровня процессе производства МНС

Процесс производства МНС – это основной процесс, который закреплен за несколькими исполнителями и руководителями, данный процесс входит в процесс производства МИК.

Расшифровка функциональных блоков модели IDEF0 процесса производства МНС, согласно рисунку 15, представлена в таблице 9.

Таблица 9 – Расшифровка функциональных моделей IDEF0

№	Наименование операции	Описание технологической операции	Формируемые показатели качества МНС согласно требованиям к МНС
1.	Комплектовочная	Получение со склада сборочных единиц, деталей и материалов согласно спецификации на изделие. Получение расходных материалов. Контроль исполнителя 100%	Соответствие материалов и комплектующих элементов сопроводительной документации
2.	Первичная сборка	Установка платы с монтажными элементами на корпус МНС, фиксация соединительного кабеля на корпус МНС	Соответствие установочных размеров КД Соответствие вибрационной и ударной прочности
3.	Монтаж	Монтаж соединительного кабеля на плату с монтажными ПКИ	Выполнение МНС основных функций Соответствие вибрационной и ударной прочности
4.	Первичное тестирование	Проверка установленных в МНС параметров начальной инициализации. Проверка функции определения местоположения	
5.	Вторичная сборка	Установка крышки на корпус МНС	Соответствие габаритных размеров КД Соответствие вибрационной и ударной прочности
6.	Проверка герметичности	Проверка на герметичность МНС	Герметичность корпуса МНС
7.	Технологическая тренировка	Испытание МНС на тепловые и вибрационные воздействия	Соответствие требованиям к показателям устойчивости к внешней среде
8.	Вторичное тестирование	Проверка установленных в МНС параметров начальной инициализации. Проверка функции определения местоположения. Проверка соответствия местоположения требованиям среднее квадратического отклонения (СКО). Проверка времени восстановления слежения за спутниками навигационных систем	Выполнение МНС основных функций
9.	Предъявительские испытания	Проверка габаритных, установочных и присоединительных размеров.	Соответствие МНС требованиям ТУ
10.	Приемо-сдаточные испытания	Проверка кондиционности применяемых изделий и материалов. Проверка комплектности. Проверка основных параметров и характеристик МНС.	

На основании таблицы 9 и рисунка 15 можно сделать следующие выводы о производственных операциях МНС:

- процесс производства МНС начинается с комплектации необходимых покупных комплектующих изделий (ПКИ), материалов и завершается передачей МНС заказчику;
- в процессе производства МНС на операциях «предъявительские испытания» и «приемо-сдаточные испытания» происходит повторная проверка требований, которые были сформированы и проверены на предыдущих операциях. Данные операции необходимы с целью подтверждения качества технических характеристик МНС и соответствия МНС требованиям военной поставки;
- устойчивость к воздействующим факторам в соответствии с установленными требованиями технических условий (ТУ) закладывается при выполнении производственных операций, таких как сборка и монтаж;
- показатели надежности обеспечиваются при выполнении всех производственных операций.

4.2. Разработка методики проверки достоверности построенной модели поиска качества продукции

Методика проверки достоверности разработанной модели оценки качества продукции на стадии производства основана на оценке совместимости системы линейных уравнений. Выбранный подход оценки достоверности основан на том факте, что математическая модель оценки качества продукции построена на модели двухуровневой линейной оптимизации, состоящей из целевых функций и систем ограничений.

Для проверки совместимости системы линейных неравенств используем алгоритм внутренних точек [122]. Проверка будет проведена путем замены неравенств на равенства [122].

4.2.1. Методика проверки достоверности системы уравнений задачи поиска качества продукции приборостроения

Предложенная методика проверки системы уравнений на совместимость основана на составлении альтернативной системы неравенств и алгоритме внутренних точек [60].

В случае обнаружения несовместности системы уравнений, требования к качеству продукции и производства будут понижаться путем изменения правой части системы ограничений согласно алгоритму, предложенному в 3.1.

Альтернативная система уравнений $A^T u = 0$, $u \geq 0$, $b^T u = 1$ основана на теории Гейла [61]. Альтернативы: существует вектор $x \in R^n$ такой, что

$$Ax \geq b,$$

либо существует вектор $u \in R^m$ такой, что

$$A^T u = 0, u \geq 0, b^T u = 1.$$

Алгоритм внутренних точек выполняется следующим образом:

Шаг 1. Находим начальное приближение x_j^k , $j = 1, \dots, n$, $k = 0, 1, 2, \dots$ (номер итерации вычислений) в виде стартовой точки для решения задачи при условии $x_j^k > 0$, например $x_j^k = 1$.

Шаг 2. Для начального решения вычисляем вектор невязок ограничений-равенств $r^k \in R^m$, где $r^k = b - Ax^k$. Если $r^k = 0$, то вычисления прекращаются, так как ответ уже найден, если $r^k \neq 0$, то вектор x^k не является решением системы. В этом случае выполняем действие №3.

Шаг 3. Вычисляем вектор весовых коэффициентов $d^k \in R^n$ по правилу $d_j^k = (x_j^k)^2$, $j = 1, \dots, n$.

Шаг 4. Определяем направление корректировки как результата решения задачи поиска вектора $s \in R^n$, где $0,5 \times \sum_{j=0}^n (s_j)^2 / d_j^k \rightarrow \min$, $As = r^k$.

Шаг 5. Вычисляем направления шага корректировки $\lambda_k = \min\{1, \tilde{\lambda}_k\}$, где $\tilde{\lambda}_k = \gamma \times \{x_j^k / -s_j^k : j \in J_-(s^k)\}$, $J_-(s^k) = \{j : s_j^k < 0\}$, где γ – параметр алгоритма (величина от 0 до 0,66). Если $J_-(s^k) = 0$, то $\lambda_k = 1$.

Шаг 6. После вычисления шага находим вектор переменных вида $x^{k+1} = x^k + \lambda_k s^k$. Подставляем новый вектор в задачу и проверяем условия по шагу 2, в случае невыполнения условий повторяем шаги 3-6 или принимаем условия согласно 3.1.

Цель данной методики: определить корректность требования к качеству продукции и процессу производства в соответствии с возможностями самого производства.

4.3. Расчет переменных области определения целевых функций

Для поиска численных значений целевых функций необходимо рассчитать переменные по представленным в главе 3 формулам. Расчет переменных осуществляется после сбора информации, представленной в таблице 4. Сбор и обработку первичных источников информации осуществляют структурные подразделения АО «Радиоавионика». В сборе и анализе информации принимают участие отделы и структурные подразделения, отвечающие за управление качеством, управление экономикой, управление поставщиками и договорами, а также управление технологиями. Формы сбора и регистрации информации соответствуют формам, представленным в документированных процедурах системы менеджмента качества АО «Радиоавионика». На рисунках ниже будет представлена информация, собранная отделами и структурными подразделениями АО «Радиоавионика» за первое полугодие 2023 года.

Введем условное разделение МНС на 4 сборки. Условное название сборок, сборка №1 – это плата МНС с монтажными элементами, сборка №2 – монтаж кабеля и необходимых проводов на поверхность платы, сборка №3 – герметический корпус с необходимыми элементами внутри, сборка №4 – это готовое изделие МНС с установленным программным обеспечением. Первичная информация службы качества (отдел технического контроля) представлена на рисунке 16.

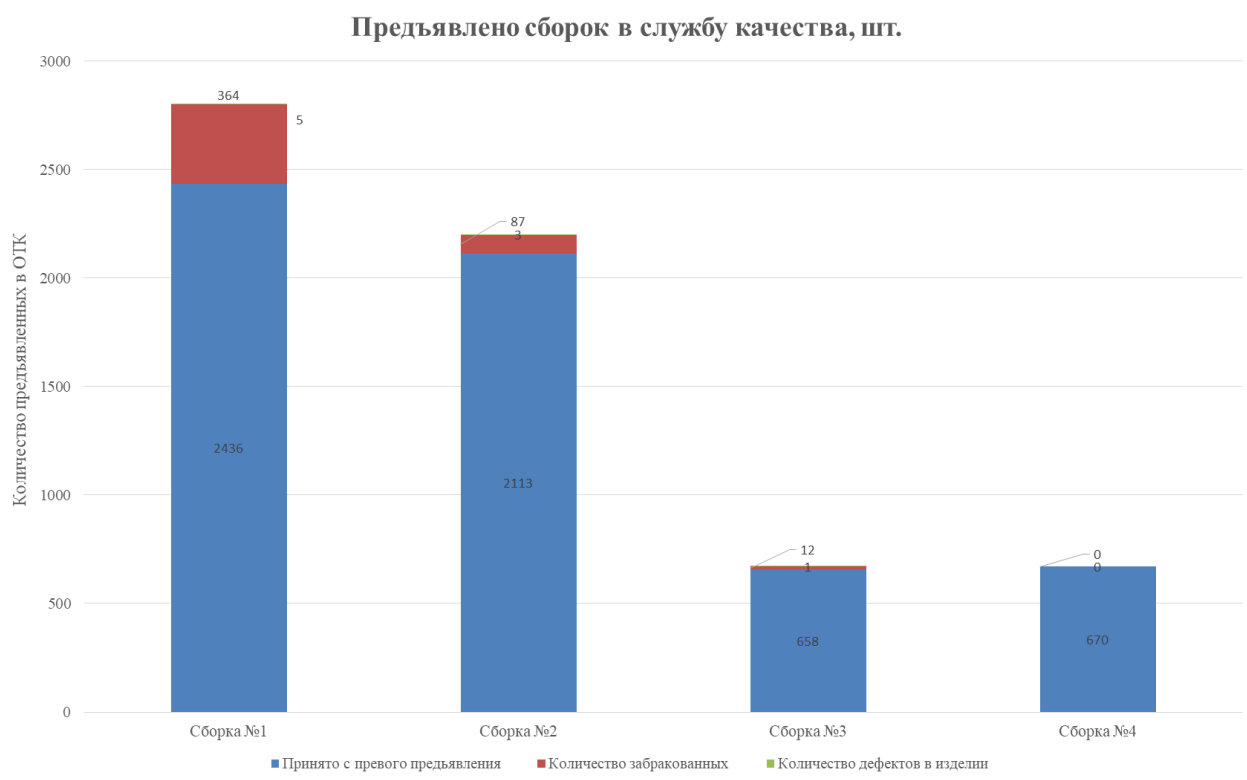


Рисунок 16 – Информация, представленная службой качества

Информация, собранная технологическим отделом и производственными цехами АО «Радиоавионика», представлена на рисунках 17 и 18.

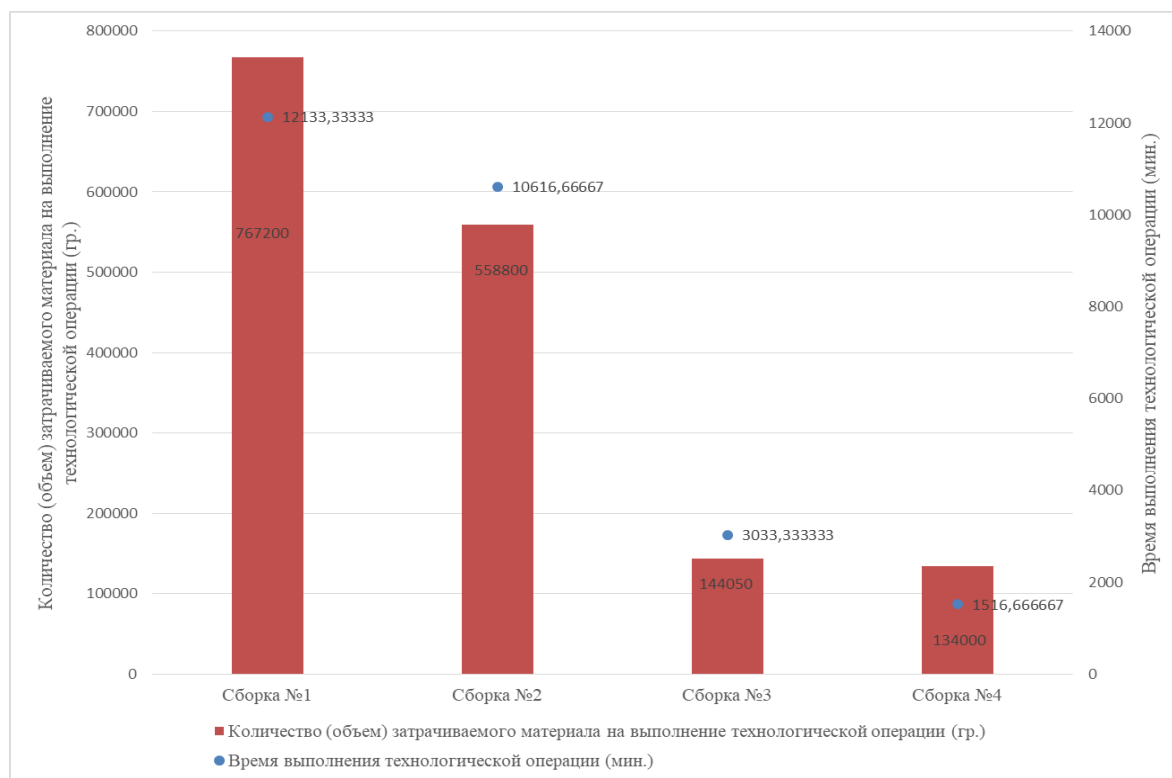


Рисунок 17 – Описание трудоёмкости изготовления МНС по составным частям

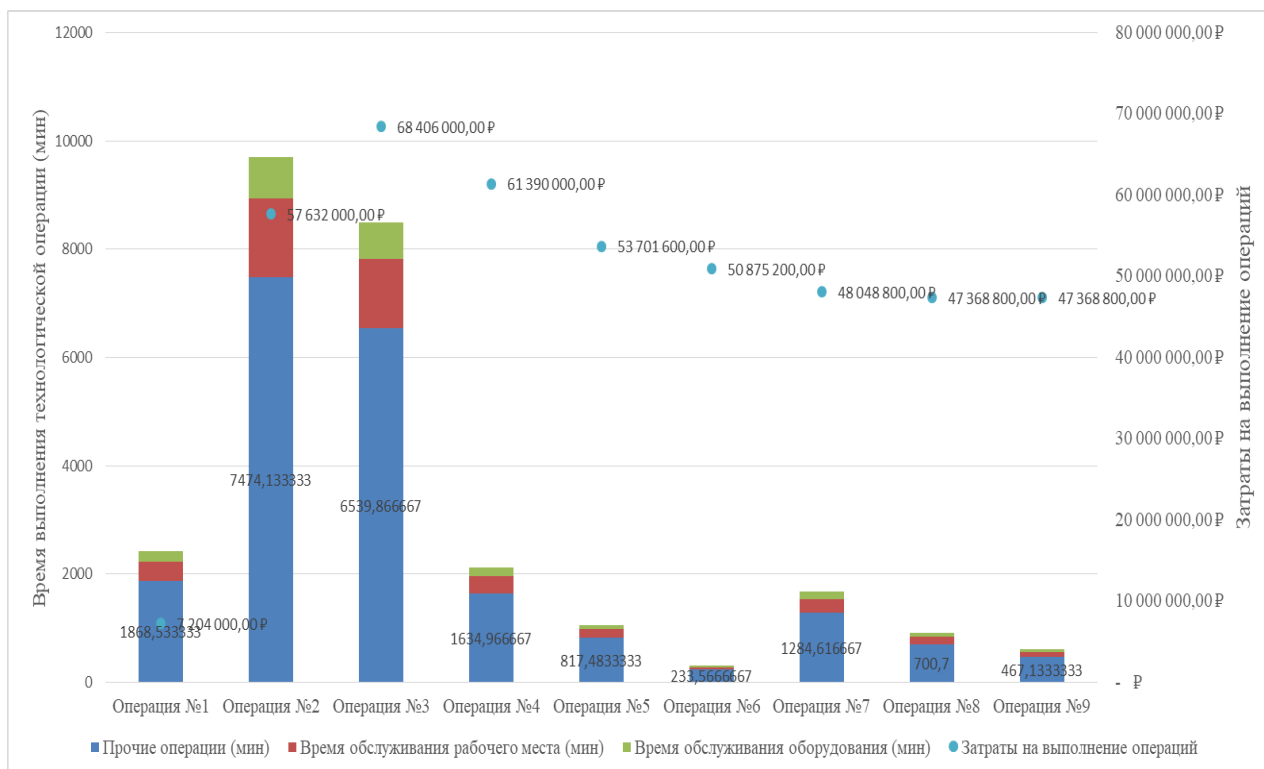


Рисунок 18 – описание трудоемкости изготовления МНС по технологическим операциям

Информация, собранная экономической службой АО «Радиоавионика», представлена на рисунках 19 и 20.

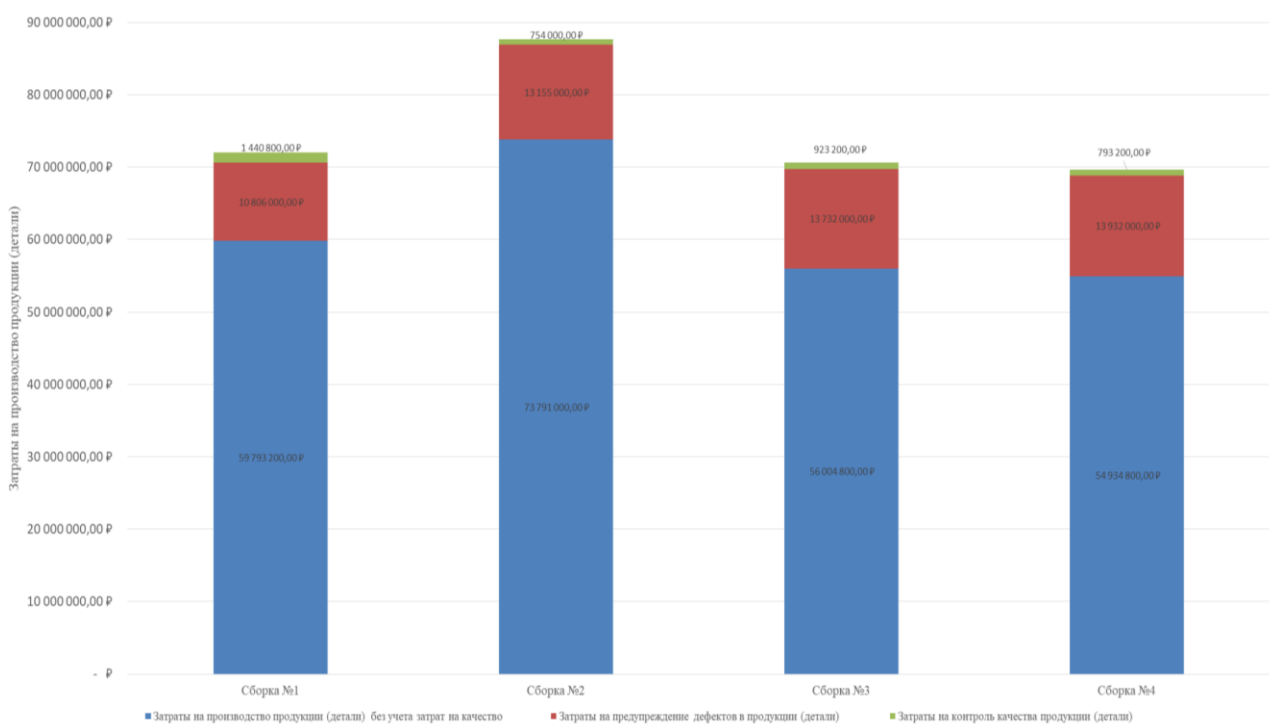


Рисунок 19 – затраты на производство МНС по составным частям

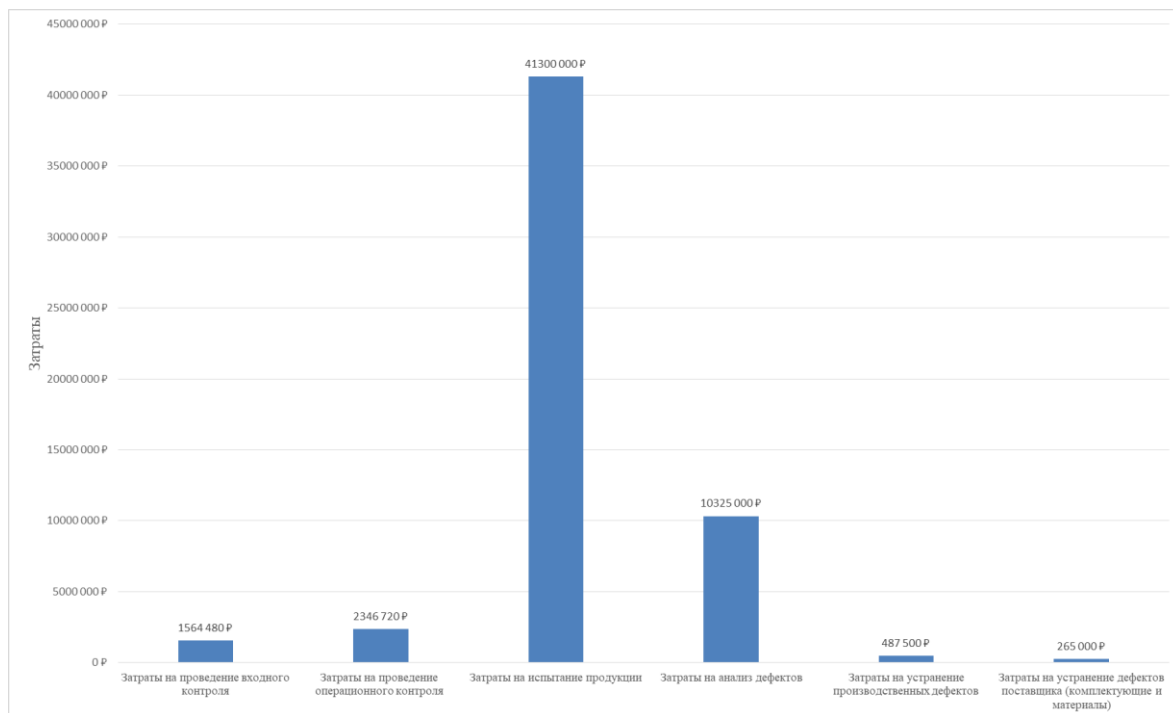


Рисунок 20 – Затраты на качество

Информация, собранная службой управления поставщиками или контрактами, представлена на рисунке 21.

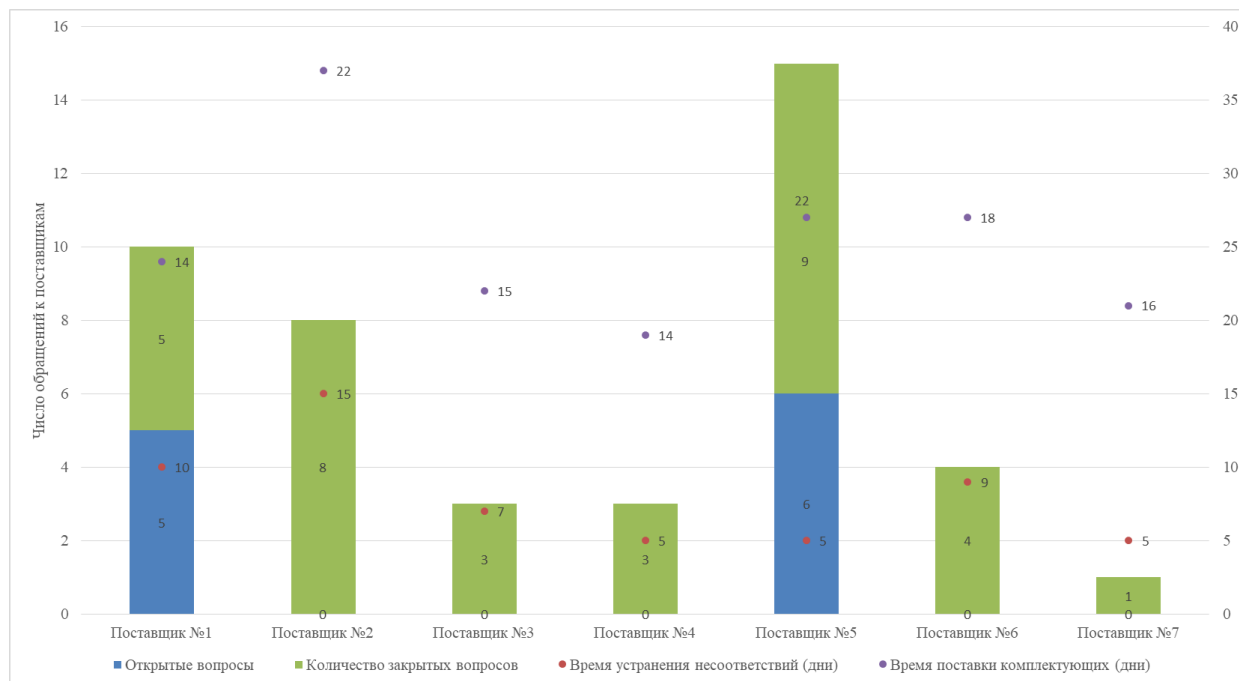


Рисунок 21 – Статистика по работе с поставщиками

В 4.4 представлен расчет переменных с применением формул (13) – (18), (21) – (22), (25) – (27) и (30) – (32). Описание данных формул приведено в главе 3. На основе найденных переменных будет построена система ограничений или

система линейных неравенств для поиска численных значений целевых функций, представленные в главах 2 и 3.

4.4. Расчет констант системы ограничений для поиска значений целевых функций

Для поиска оптимальных значений целевых функций и решения задачи поиска оценки качества продукции необходимо найти переменные системы линейных уравнений, характеризующие оценку по каждому частному показателю целевой функции, описанные главе 3.

Для расчета применены формулы (4) – (10), (12) – (14), (16) – (19) и (21) – (24).

4.4.1. Расчет констант для системы ограничений функции качества
 Расчет переменных по формулам (4) – (9), приведённые в главе 3, для системы ограничений функции качества представлен в таблице 10.

Таблица 10 – Переменные для системы ограничений функции качества

Номер детали	a_{ij}	$b_{(1)ij}^1$	$b_{(2)ij}^1$	$b_{(22)ij}^1$	$b_{(3)ij}^1$	$b_{(32)ij}^1$
Сборка №1	0,13	0,33	0,8	0,79	0,28	0,79
Сборка №2	0,60	0,32	0,68	0,80	0,26	0,71
Сборка №3	0,91	0,11	1	0,92	0,06	0,95
Сборка №4	1,00	0,00	1	1,00	1	0,98

На основе полученных численных значений переменных перепишем задачу оптимизации верхнего уровня для поиска оптимального значения функции качества следующим образом:

$$\min_{x \in X} \{Q(x, y, z, t) = (x^1_j)^N + y^1_{(1)j} + z^1_{(21)j} + z^1_{(22)j} + t^1_{(31)j} + t^1_{(32)j}\}$$

$$0,13x^1 + 0,33y^1_{(1)} + 0,8z^1_{(21)} + 0,21z^1_{(22)} + 0,72t^1_{(31)} + 0,21t^1_{(33)} \leq b_1$$

$$0,6x^1 + 0,32y^1_{(1)} + 0,68z^1_{(21)} + 0,2z^1_{(22)} + 0,74t^1_{(31)} + 0,29t^1_{(33)} \leq b_2$$

$$0,91x^1 + 0,11y^1_{(1)} + z^1_{(21)} + 0,08z^1_{(22)} + 0,94t^1_{(31)} + 0,05t^1_{(33)} \leq b_3$$

$$x^1 + 0y^1_{(1)} + z^1_{(21)} + 0z^1_{(22)} + t^1_{(31)} + 0,02t^1_{(33)} \leq b_4.$$

Визуализация и описание переменных, представленных в таблице 10, приведены на рисунке 22. Информация, представленная на рисунке 22 описывает ЧПК для поиска функции качества.

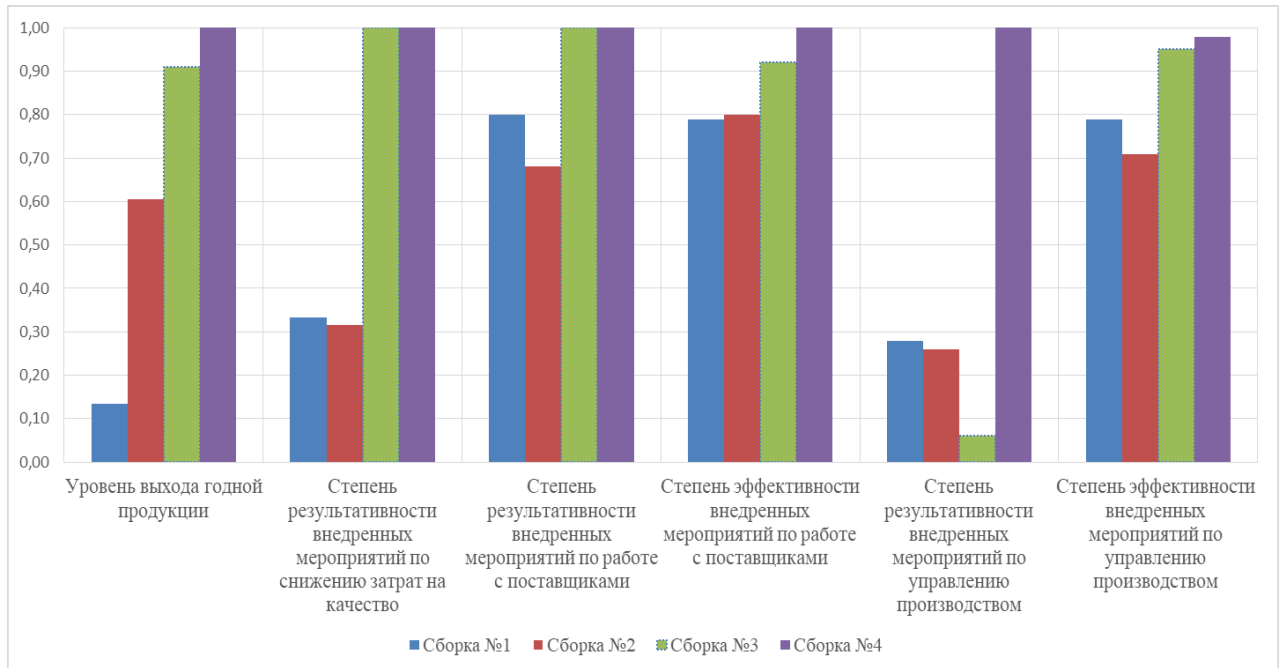


Рисунок 22 – Найденные переменные для системы ограничений функции качества

На основе найденных переменных (рисунок 22) можно сделать следующие выводы:

1. Наиболее высокий процент брака наблюдается у сборки №1 и сборки №2 на монтажной операции и первичной сборке.
2. Уровень брака прямо влияет на затраты на качество на начальных технологических операциях, что может быть связано с неправильно выбранными мероприятиями по управлению качеством и снижению брака комплектующих элементов, выявленных на монтажных и сборочных операциях.
3. Наибольшее влияние на уровень брака можно наблюдать по таким константам, как $b_{(11)}^1$ и $b_{(31)}^1$.

4.4.2. Расчет констант для системы ограничений функции «Затраты на качество»

Результаты расчета переменных по формулам (12) – (13) для системы ограничений функции «Затраты на качество» представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Переменные системы ограничений функции «Затраты на качество»

Группа затрат	a_{2ij}	$b_{(11)ij}$
---------------	-----------	--------------

Затраты на проведение входного контроля	0	0,021
Затраты на проведение операционного контроля	0	0,031
Затраты на испытание продукции	0	0,546
Затраты на анализ дефектов	0	0,136
Затраты на устранение производственных дефектов	0,007	0
Затраты на устранение дефектов поставщика (комплектующие и материалы)	0,004	0

На основе полученных численных значений переменных перепишем задачу оптимизации нижнего уровня для поиска оптимального значения функции «Затраты на качество» следующим образом:

$$\min_{y \in Y} \{F_1(x, y) = (x^2_j)^N + y^2_{(11)j}\}$$

$$0x^2 + 0,021y^2_{(11)} \leq b'_1$$

$$0x^2 + 0,031y^2_{(11)} \leq b'_2$$

$$0x^2 + 0,546y^2_{(11)} \leq b'_3$$

$$0x^2 + 0,136y^2_{(11)} \leq b'_4$$

$$0,007x^2 + 0y^2_{(11)} \leq b'_5$$

$$0,004x^2 + 0y^2_{(11)} \leq b'_6.$$

Визуализация и описание переменных, представленных в таблице 11, приведены на рисунке 23.



Рисунок 23 – Описание ЧПК для функции «Затраты на качество»

На основе найденных переменных функции «Затрат на качество» можно сделать следующие выводы:

1. Наибольшее относительное значение затрат на качество получено по таким категориям затрат, как «Затраты на испытание» и «Затраты на анализ дефектов».

2. Невысокие затраты на проведение входного контроля обеспечивают невысокие затраты на устранение дефектов поставщиков.

3. Затраты на операционный контроль выше, чем затраты на проведение входного контроля, при этом затраты на устранение производственных дефектов находятся на том же уровне, что и затраты на устранение дефектов поставщиков.

4.4.3. Расчет констант для системы ограничений функции «Управление поставщиками»

Результаты расчета переменных по формулам (16) – (18) для системы ограничений функции «Управление поставщиками» представлены в таблице 12.

Таблица 12 – Переменные функции «Управление поставщиками»

Наименование поставщика	a_{3ij}	$b(21)ij$	$b(22)ij$
Поставщик №1	0,73	0,50	0,23
Поставщик №2	0,73	1,00	0,21
Поставщик №3	0,32	1,00	0,15
Поставщик №4	0,38	1,00	0,13
Поставщик №5	0,60	0,60	0,21
Поставщик №6	0,60	1,00	0,04
Поставщик №7	0,43	1,00	0,08

На основе полученных численных значений переменных перепишем задачу оптимизации нижнего уровня для поиска оптимального значения функции «Управление поставщиками» следующим образом:

$$\min_{z \in Z} \{ F_2(x, z) = (x^2_j)^N + z^2_{(21)j} + z^2_{(22)j} \}$$

$$0,73x^2 + 0,93z^2_{(22)} + 0,77z^2_{(22)} \leq b_1^{//}$$

$$0,73x^2 + 0z^2_{(22)} + 0,79z^2_{(22)} \leq b_2^{//}$$

$$0,32x^2 + 0z^2_{(22)} + 0,85z^2_{(22)} \leq b_3^{//}$$

$$0,38x^2 + 0z^2_{(22)} + 0,87z^2_{(22)} \leq b_3^{//}$$

$$0,6x^2 + 0,83z^2_{(22)} + 0,79z^2_{(22)} \leq b_4^{//}$$

$$0,6x^2 + 0z^2_{(22)} + 0,96z^2_{(22)} \leq b_5^{//}$$

$$0,43x^2 + 0z^2_{(22)} + 0,92z^2_{(22)} \leq b_6^{//}$$

Визуализация и описание переменных, представленных в таблице 12, приведены на рисунке 24.

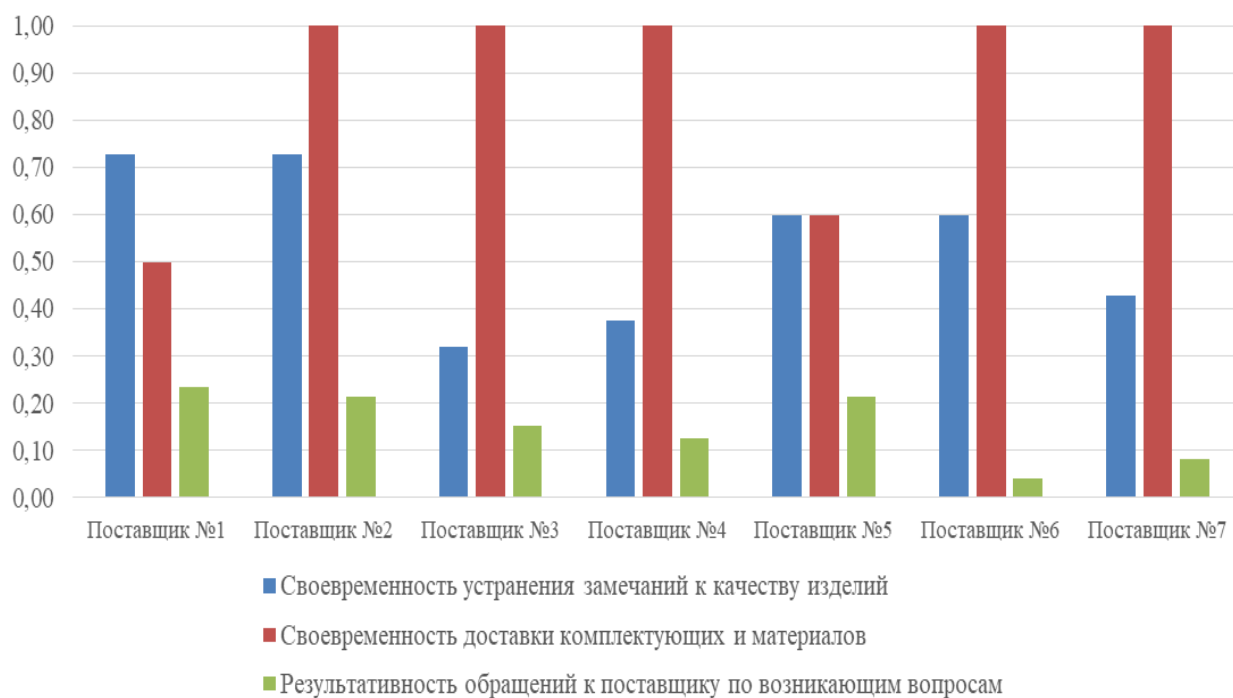


Рисунок 24 – Описание ЧПК для функции «Управление поставщиками»

На основе найденных переменных можно сделать следующие выводы:

1. Наиболее высокие показания по уровню устранения замечаний у поставщика №1, при этом своевременность доставки на более низком уровне, чем у всех поставщиков, кроме поставщика №5.

2. По всем поставщикам своевременность ответа находится на низком уровне, что связано с недостаточной результативностью процедуры системы менеджмента качества по управлению поставщиками.

4.4.4. Расчет констант для системы ограничений функции технологичности

Расчет переменных по формулам (21) – (23) для системы ограничений функции технологичности представлен в таблице 13.

Таблица 13 – Переменные для системы ограничений функции технологичности

Наименование технологической операции	a_{4ij}	$b(31)_{ij}$	$b(32)_{ij}$
Операция №1	0,97	0,93	0,93
Операция №2	0,95	0,97	0,91
Операция №3	0,82	0,82	0,8
Операция №4	0,84	0,87	0,82
Операция №5	0,87	0,89	0,85
Операция №6	0,94	0,91	0,91
Операция №7	1	0,91	0,91
Операция №8	1	0,92	0,92

Операция №9	1	1	1
-------------	---	---	---

На основе полученных численных значений переменных переписем задачу оптимизации нижнего уровня для поиска оптимального значения функции технологичности следующим образом:

$$\min_{t \in T} \{ F_3(x, t) = (x^2_j)^N + t^2_{(31)j} + t^2_{(32)j} \}$$

$$0,98x^2 + 0,93t^2_{(32)} + 0,93t^2_{(32)} \leq b_1'''$$

$$0,95x^2 + 0,97t^2_{(32)} + 0,91t^2_{(32)} \leq b_2'''$$

$$0,87x^2 + 0,89t^2_{(32)} + 0,85t^2_{(32)} \leq b_3'''$$

$$0,94x^2 + 0,91t^2_{(32)} + 0,91t^2_{(32)} \leq b_4'''$$

$$x^2 + 0,91t^2_{(32)} + 0,91t^2_{(32)} \leq b_5'''$$

$$x^2 + 0,92t^2_{(32)} + 0,92t^2_{(32)} \leq b_6'''$$

$$x^2 + t^2_{(32)} + t^2_{(32)} \leq b_7''' .$$

Визуализация и описание переменных, представленных в таблице 13, приведены на рисунке 25.

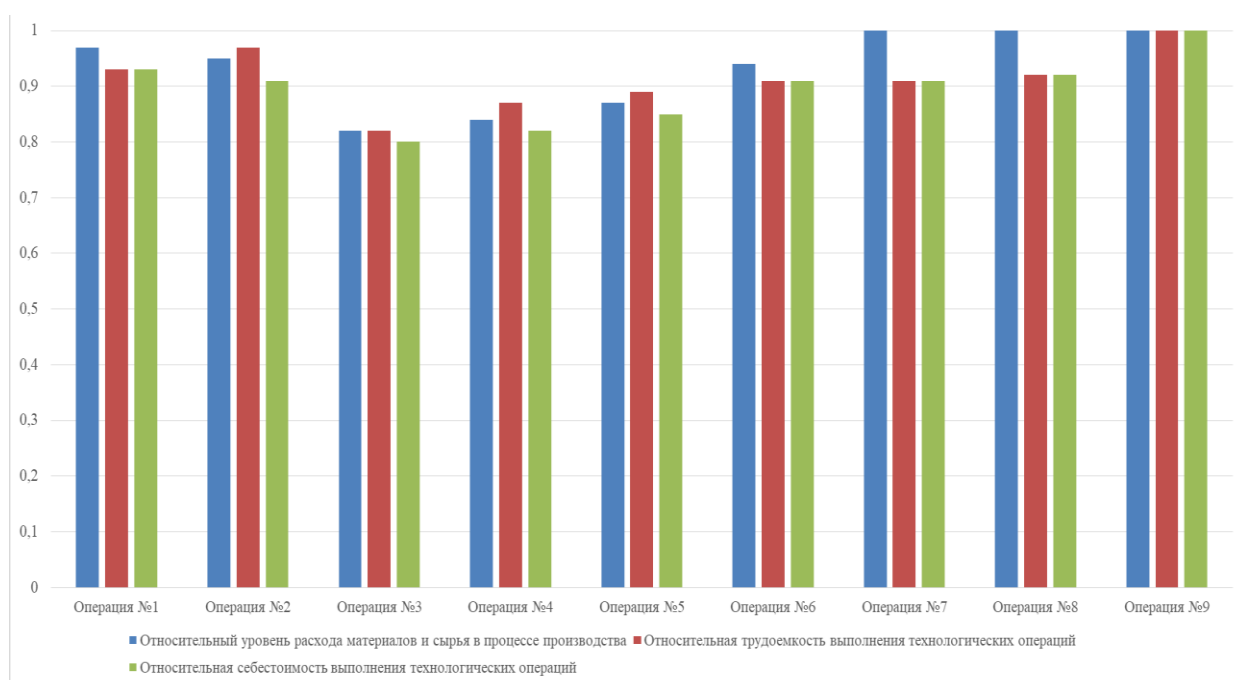


Рисунок 25 – Описание ЧПК для функции технологичности

На основе найденных переменных можно сделать следующие выводы:

1. Наилучшие показатели получены на операции №1, №2, №9.
2. Сверхнормативный расход материала при переделке брака или дефекта приводит к повышению стоимости выполнения технологических операций.

3. Чем выше расход материалов, связанный с переделкой брака, тем выше трудоемкость выполнения технологических операций.

В 4.5 будет представлен расчет относительных коэффициентов важности для каждого частного показателя целевой функции.

4.5. Определение относительных коэффициентов важности для частных показателей целевой функции

В данном разделе описан расчет и получение нечетких множеств функции Такаги-Сугено для каждого частного показателя целевой функции, а также способ нахождения неизвестных переменных функций Такаги-Сугено, основанный на теории количественного описания компромиссов.

Для определение относительных коэффициентов важности будет осуществляется путем анализа функции качества. Функция качества формируется на основе шести частных показателей, функция «Затраты на качество» – из двух частных показателей, функция «Управление поставщиками» – из трех частных показателей, функция технологичности – из трех частных показателей. Основываясь на данной информации, для расчета и получения относительных коэффициентов важности (ОКВ) необходимо выполнить следующие действия:

1. Построить базу правил для каждого частного показателя.
2. Применить логические операции объединения и (или) пересечения для входных функций принадлежности.
3. Поставить в соответствие каждой логической связке входных функций принадлежности выходные значения функций принадлежности
4. Применить алгоритм Такаги-Сугено и получить точные значения на основе нечетких множеств.
5. Поставить численные значения найденных ОКВ в частные показатели всех четырёх целевых функций.

Для построения универсального множества и определения нечетких подмножеств необходимо описать частные значения функции качества через терм-множество.

Терм-множество для входных и выходных значений функций принадлежности будет состоять из четырех лингвистических переменных (ЛП): «Низкое значение», «Среднее значение», «Удовлетворительное значение», «Высокое значение».

4.5.1. Расчет относительных коэффициентов важности для частных показателей целевых функций

Нечеткие выводы для получения относительных коэффициентов важности осуществляются при следующих условиях:

1. Получение функций принадлежности осуществляется с применением сплайн-функций типа S -функций и Z -функций в зависимости от характера роста или спада графика зависимости.
2. Объединение входных значений в левой части базы правил нечеткого вывода осуществляется с применением операции пересечения.
3. Операция импликации для входных и выходных функций принадлежности осуществляется с применением операции пересечения.
4. Объединение результатов базы нечетких правил (или выполнение операции аккумуляции) осуществляется с применением операции максимума.
5. Операция дефазификации осуществляется с применением метода центра тяжести для поиска точных значений функции нечеткого вывода.

Входные и выходные значения терм-множеств задаются следующим образом:

- «Низкое значение» – $T \leq 0,4$;
- «Удовлетворительное значение» – $0,4 < T \leq 0,6$;
- «Среднее значение» – $0,6 < T \leq 0,8$;
- «Высокое значение» – $0,8 < T$.

Перед расчетом относительных коэффициентов важности (ОКВ) целевых функций необходимо определить источники информации, влияющие на каждый

частный показатель целевых функций. Как известно из задачи поиска оценки качества продукции, представленной в главе 3, принятие решений и управление качеством осуществляется путем поиска оптимального значения функции последователя (в нашем случае функции качества), остальные функции последователей зависят от функции лидера. Исходя из этого условия, полученные численные значения ОКВ также будут распределены между функциями последователей. Описание частных показателей функции качества и лингвистических переменных для их определения, приведены в таблице 14.

Таблица 14 – Описание лингвистических переменных

Наименование частного показателя	Наименование лингвистической переменной
Уровень выхода годной продукции	Доля неисправимого дефекта (брак) – $c_1(x)$. Доля дефектов – $c_2(x)$. Доля полученных разрешений на отклонение – $c_3(x)$.
Степень эффективности от внедренных мероприятий по снижению затрат на качество	Доля затрат на устранение производственного дефекта – $d_1(y)$. Доля затрат на устранение производственного брака – $d_2(y)$. Доля затрат на устранение дефектов поставщика – $d_3(y)$. Доля затрат на проведение анализа дефектов – $d_4(y)$.
Степень результативности от внедренных мероприятий по работе с поставщиками	Доля забракованной продукции поставщиков – $d_1(z_1)$. Доля покупных комплектующих в изделии или в блоке – $d_2(z_1)$. доля поставщиков с пройденными аудитами – $d_3(z_1)$.
Степень эффективности от внедренных мероприятий по работе с поставщиками	Доля затрат на устранение дефектов собственными силами (на территории производства) – $d_1(z_2)$. Доля затрат на повторное проведение входного контроля и операционного контроля, на котором был обнаружен дефект или брак – $d_2(z_2)$, Доля затрат на unplanned проведение аудита поставщика – $d_3(z_2)$.
Степень результативности от внедренных мероприятий по управлению производством	Степень износа оборудования – $d_1(t_1)$. Доля производственного дефекта – $d_2(t_1)$. Количество внесенных корректировок или исправлений в технологический процесс – $d_3(t_1)$.
Степень эффективности от внедренных мероприятий по управлению производством	Расход материалов при выполнении технологического процесса – $d_1(t_2)$. Время изготовления единицы продукции – $d_2(t_2)$.

	Расход оснасток и инструмента при выполнении технологического процесса – $d_3(t_2)$.
--	---

ЛП «Уровень выхода годной продукции» задаем следующим образом:

$$\{C, X, T(X), U\},$$

где множество C такое, что образует следующий вектор констант $c_i \subseteq C$ для функции качества, X – название переменной, $T(X)$ – терм-множество переменной X , а $U = [0,1]$ – универсальное множество.

База правил для вывода переменной «Уровень выхода годной продукции» представлена в таблице 15.

Таблица 15 – База правил для вывода переменной «Уровень выхода годной продукции»

Название входного термина			Название выходного термина
c_1	c_2	c_3	X
Высокое значение	Высокое значение	Высокое значение	Низкое значение
Высокое значение	Высокое значение	Среднее значение	
Высокое значение	Среднее значение	Высокое значение	
Удовлетворительное значение	Среднее значение	Среднее значение	Удовлетворительное значение
Низкое значение	Среднее значение	Высокое значение	
Удовлетворительное значение	Удовлетворительное значение	Удовлетворительное значение	
Низкое значение	Среднее значение	Среднее значение	Среднее значение
Низкое значение	Удовлетворительное значение	Низкое значение	
Низкое значение	Низкое значение	Низкое значение	Высокое значение
Низкое значение	Низкое значение	Среднее значение	

ЛП для оценки степени эффективности внедренных мероприятий по снижению затрат на качество, задаем следующим образом:

$$\{D, Y, T(Y), U\},$$

где множество D такое, что образует следующий вектор констант $d_i \subseteq D$ для функции качества, Y – название переменной, $T(Y)$ – терм-множество переменной Y , а $U = [0,1]$ – универсальное множество.

База правил для вывода переменной «Степень эффективности от внедренных мероприятий по снижению затрат на качество» представлена в таблице 16.

Таблица 16 – База правил для вывода переменной «Степень эффективности от внедренных мероприятий по снижению затрат на качество»

Название входного термина				Название выходного термина
$y(d_1)$	$y(d_2)$	$y(d_3)$	$y(d_4)$	y
Среднее значение	Высокое значение	Высокое значение	Среднее значение	Низкое значение
Среднее значение	Высокое значение	Высокое значение	Высокое значение	
Высокое значение	Среднее значение	Среднее значение	Среднее значение	
Высокое значение	Высокое значение	Высокое значение	Высокое значение	
Среднее значение	Низкое значение	Среднее значение	Среднее значение	Удовлетворительное значение
Среднее значение	Низкое значение	Среднее значение	Среднее значение	
Удовлетворительное значение	Удовлетворительное значение	Низкое значение	Среднее значение	
Среднее значение	Удовлетворительное значение	Среднее значение	Среднее значение	Среднее значение
Удовлетворительное значение	Удовлетворительное значение	Низкое значение	Низкое значение	
Низкое значение	Низкое значение	Низкое значение	Низкое значение	Высокое значение
Низкое значение	Удовлетворительное значение	Низкое значение	Низкое значение	

ЛП для оценки степени результативности и эффективности внедренных мероприятий по работе с поставщиками задаем следующим образом:

$$\{D, Z, T(Z_{1,2}), U\},$$

где множество D такое, что образует следующий вектор констант $d_i \subseteq D$ для функции качества, $Z_{1,2}$ – название переменной, $T(Z_{1,2})$ – терм-множество переменной $Z_{1,2}$, а $U = [0,1]$ – универсальное множество.

База правил для вывода переменных по степени результативности и эффективности от внедренных мероприятий по работе с поставщиками представлена в таблице 17.

Таблица 17 – База правил для вывода переменных по степени результативности и эффективности от внедренных мероприятий по работе с поставщиками

Название входного термина			Название выходного термина
$z_{1,2}(d_1)$	$z_{1,2}(d_2)$	$z_{1,2}(d_3)$	$Z_{1,2}$
Высокое значение	Высокое значение	Среднее значение	Низкое значение
Среднее значение	Высокое значение	Высокое значение	
Среднее значение	Удовлетворительное значение	Среднее значение	Удовлетворительное значение
Удовлетворительное значение	Удовлетворительное значение	Среднее значение	
Низкое значение	Низкое значение	Среднее значение	Среднее значение
Низкое значение	Удовлетворительное значение	Удовлетворительное значение	
Низкое значение	Низкое значение	Удовлетворительное значение	Высокое значение

ЛП для оценки степени результативности и эффективности внедренных мероприятий по управлению производством задается следующим образом:

$$\{D, T, G(T_{1,2}), U\},$$

где множество D такое, что образует следующий вектор констант $d_i \in D$ для функции качества, $T_{1,2}$ – название переменной, $G(T_{1,2})$ – терм-множество переменной $T_{1,2}$, $U = [0,1]$ – универсальное множество.

Далее проведен расчет констант для целевых функций на основе разработанной в главе 3 методики.

4.5.2. Расчет неизвестных переменных функции Такаги-Сугено с применением методики количественной оценки компромиссов

Для применения разработанной в главе 3 методики получения функции Такаги-Сугено с применением методики количественной оценки компромиссов необходимо выполнить следующие действия:

1. Задать предпочтения для каждого терм-множества.

2. Определить вектор критериев, исходя из базы правил и термножеств.
3. Определить параметр w для каждого входного значения базы правил.
4. В зависимости от интервальной шкалы, предложенной в 4.5.1, вычислить квант информации θ для каждого термина в зависимости от правила.
5. Подставить полученные значения векторов θ в качестве переменных x в функцию Такаги-Сугено.
6. Применить алгоритм Такаги-Сугено для вычисления точных значений констант целевых функций.

Предпочтения для лингвистической переменной (ЛП) «Уровень выхода годной продукции» зададим, исходя из мощности термножества. Известно, что термножество данной ЛП состоит из трех переменных $c = [c_1, c_2, c_3]$. Предположим, что есть ЛП «Уровень выхода годной продукции» с эталонными значениями, обозначим данную ЛП через x' , а найденную ЛП через x'' . Как было сказано выше, данные две альтернативы состоят из трех критериев вида $c = [c_1, c_2, c_3]$. Зададим предпочтения для данных критериев следующим образом:

$$|x'(c_3) - x''(c_3)| < |x'(c_2) - x''(c_2)| < |x'(c_1) - x''(c_1)|.$$

Аналогичным образом определяем предпочтения и для остальных ЛП.

Предпочтения по ЛП «Степень эффективности от внедренных мероприятий по снижению затрат на качество»:

$$|y'(d_4) - y''(d_4)| < |y'(d_3) - y''(d_3)| < |y'(d_1) - y''(d_1)| < |y'(d_2) - y''(d_2)|.$$

Предпочтения по ЛП «Степень результативности от внедренных мероприятий по работе с поставщиками» и по всем остальным ЛП следующие:

$$|z'_1(d_3) - z''_1(d_3)| < |z'_1(d_2) - z''_1(d_2)| < |z'_1(d_1) - z''_1(d_1)|.$$

Найденные значения θ для всех ЛП представлены в таблице 18.

Таблица 18 – Найденные переменные для функции Такаги-Сугено

Номер правила	Найденные переменные (веса)			
	$\theta(c_1)$	$\theta(c_2)$	$\theta(c_3)$	-
1	0,33	0,33	0,33	-
2	0,33	0,35	0,31	
3	0,36	0,33	0,32	

4	0,29	0,33	0,38	-
5	0,18	0,32	0,50	
6	0,33	0,33	0,33	
7	0,18	0,36	0,46	-
8	0,22	0,46	0,32	
9	0,33	0,33	0,33	-
10	0,33	0,24	0,43	
-	$\theta(d_1)$	$\theta(d_2)$	$\theta(d_3)$	$\theta(d_4)$
1	0,18	0,32	0,32	0,18
2	0,2	0,3	0,3	0,2
3	0,45	0,18	0,12	0,25
4	0,25	0,25	0,25	0,25
5	0,34	0,26	0,24	0,16
6	0,25	0,42	0,22	0,11
7	0,4	0,22	0,18	0,2
8	0,25	0,25	0,25	0,25
9	0,18	0,5	0,16	0,16
10	0,25	0,25	0,25	0,25
-	$\theta(z_{1,2}, t_{1,2})$	$\theta(z_{1,2}, t_{1,2})$	$\theta(z_{1,2}, t_{1,2})$	-
1	0,33	0,35	0,31	-
2	0,35	0,33	0,31	-
3	0,36	0,18	0,46	-
4	0,38	0,33	0,29	-
5	0,22	0,46	0,32	-
6	0,33	0,33	0,33	-
7	0,33	0,24	0,43	-

Визуализация базы нечеткого вывода по ЛП «Уровень выхода годной продукции» представлена на рисунке 26.



Рисунок 26 – Визуализация ЛП «Уровень выхода годной продукции»
 Результирующий график по результату объединения всех нечетких правил
 ЛП «Уровень выхода годной продукции» представлен на рисунке 27.

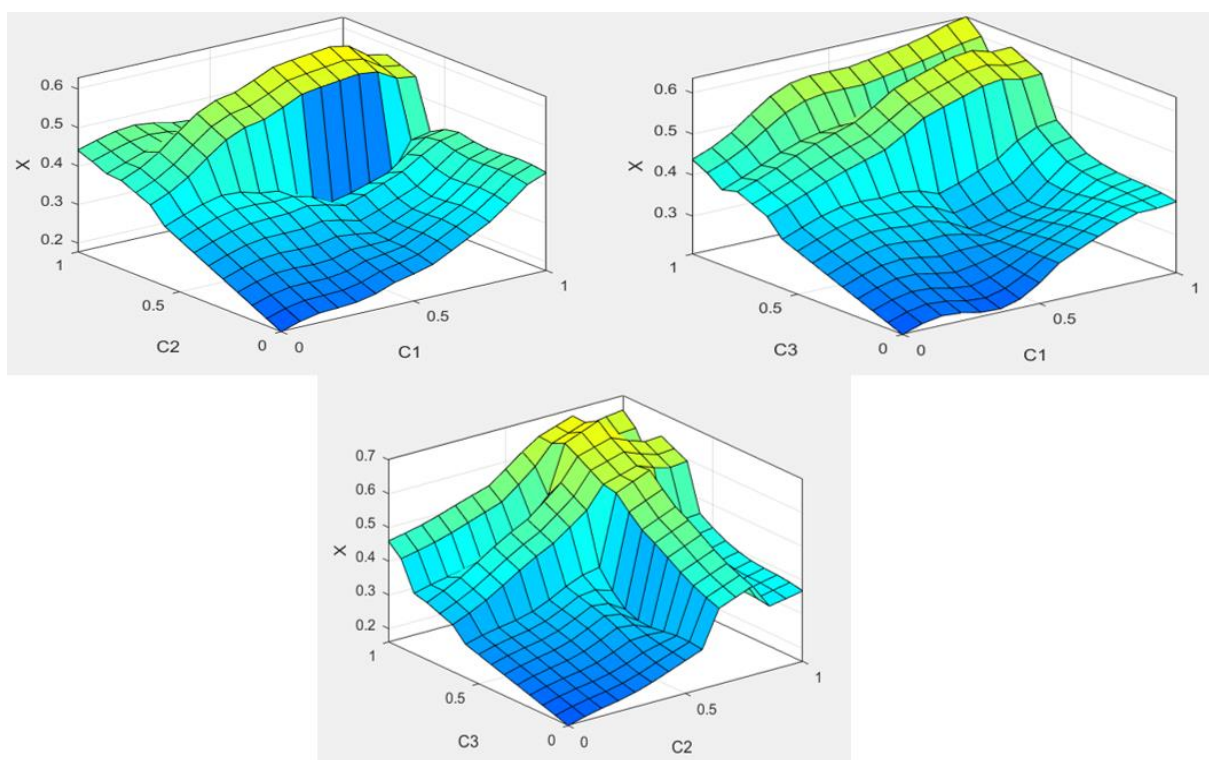


Рисунок 27 – Результирующий график по ЛП «Уровень выхода годной
 продукции»

Как следует из рисунков 26 и 27, на уровень роста численного значения ЛП
 «Уровень выхода годной продукции» наибольшее влияние оказывает рост

значения термина $C3$, наименьшее – рост значения термина $C2$ при зафиксированном значении термина $C1$. Стоит отметить, что наибольшая дельта наблюдается при спаде значения термина $C1$ при зафиксированных значениях $C2$ и $C3$. Приведенное наблюдение полностью соответствует предпочтениям по важности, приведенным выше. Визуализация базы нечеткого вывода по ЛП «Степень эффективности от внедренных мероприятий по снижению затрат на качество» представлена на рисунке 28.

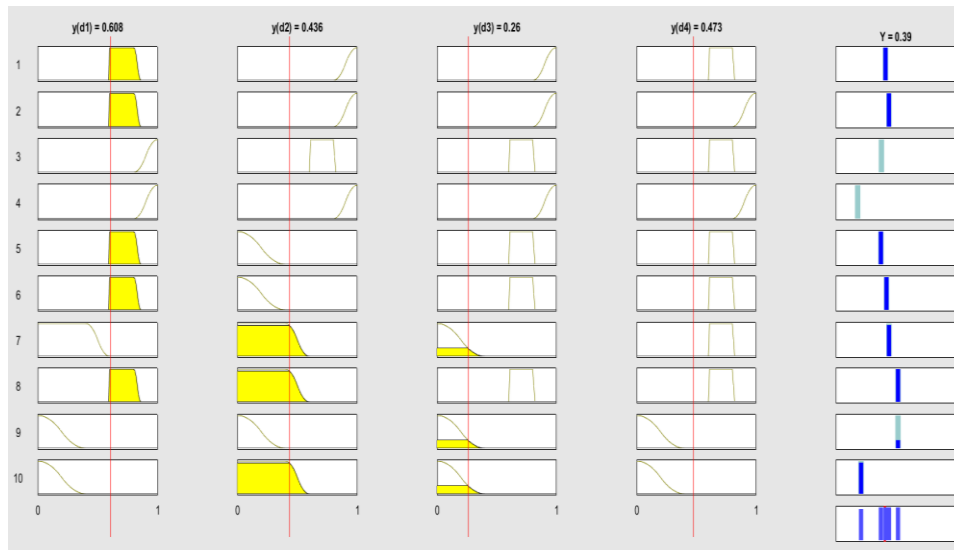


Рисунок 28 – ЛП «Степень результативности внедренных мероприятий по снижению затрат на качество»

Результирующий график объединения всех нечетких правил ЛП «Степень результативности внедренных мероприятий по снижению затрат на качество» представлен на рисунке 29.

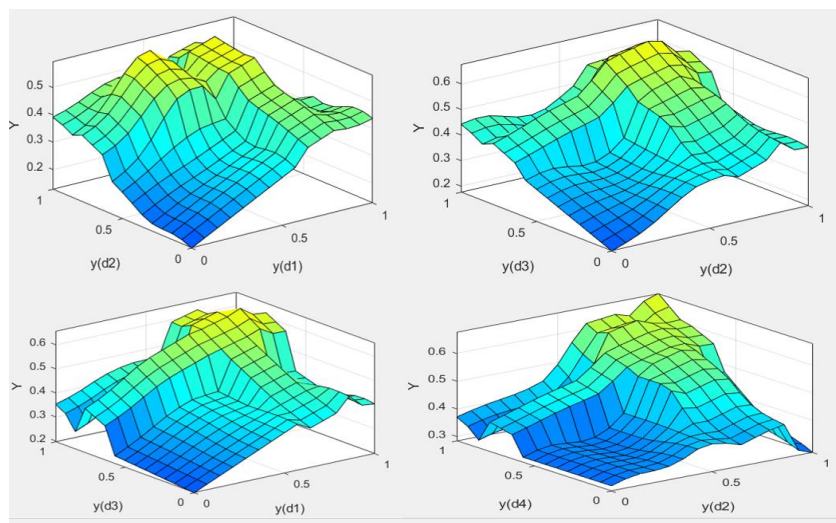


Рисунок 29 – Результирующий график по ЛП «Степень результативности внедренных мероприятий по снижению затрат на качество»

Как следует из рисунков 28 и 29, зависимость ЛП от изменения элементов терм-множества прямо пропорциональна предпочтениям, заданным на терм-множестве ЛП «Степень эффективности от внедренных мероприятий по снижению затрат на качество».

Визуализация базы нечеткого вывода по ЛП «Степень результативности и эффективности от внедренных мероприятий по работе с поставщиками» и «Степень результативности и эффективности от внедренных мероприятий по управлению производством» представлены на рисунке 30.

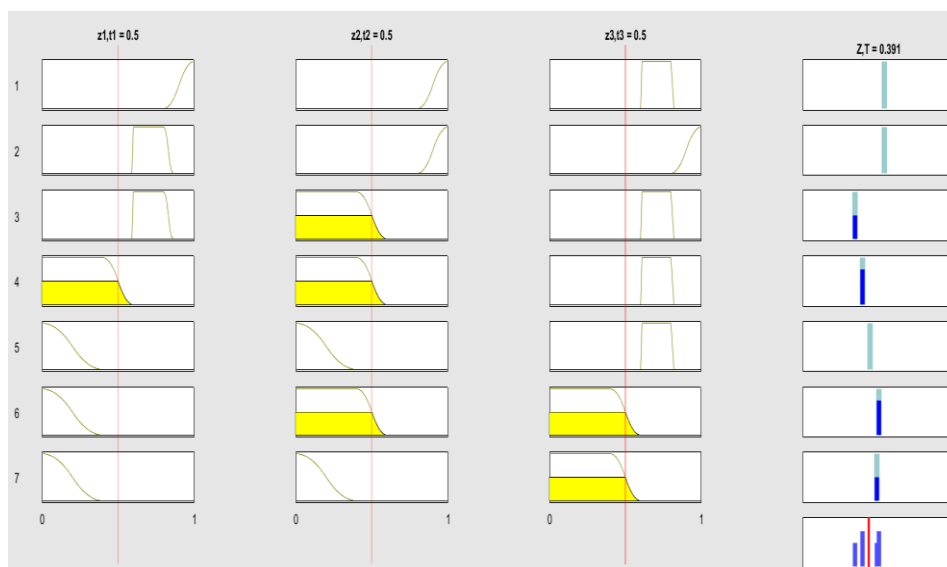


Рисунок 30 – Визуализация базы нечетких правил по четырём последним ЛП

Результирующий график по базе данных согласно рисунку 16 представлен на рисунке 31.

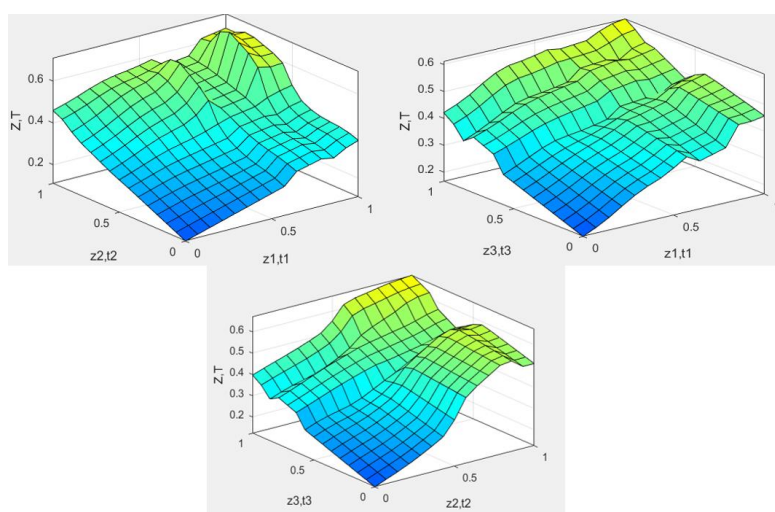


Рисунок 31 – Результирующий график по базе данных согласно рисунку 30

Логика зависимости и собственно функциональная зависимость, представленные на рисунке 31, аналогичны рисункам 28 и 29.

Исправленная аналитическая модель поиска оценки качества продукции приборостроения согласно найденным переменных целевых функций и системы ограничений представлена ниже:

$$\begin{aligned} & \min_{x \in X} \{ Q(x, y, z, t) = 0,87x^1 + 0,49y^1 + 0,58z^1(21) + 0,62z^1(22) + 0,83t^1(31) + 0,93t^1(32) \} \\ & 0,13x^1 + 0,33y^1(1) + 0,8z^1(21) + 0,21z^1(22) + 0,72t^1(31) + 0,21t^1(33) \geq 0,4 \\ & 0,6x^1 + 0,32y^1(1) + 0,68z^1(21) + 0,2z^1(22) + 0,74t^1(31) + 0,29t^1(33) \geq 0,47 \\ & 0,91x^1 + 0,11y^1(1) + z^1(21) + 0,08z^1(22) + 0,94t^1(31) + 0,05t^1(33) \geq 0,52 \\ & 0x^1 + 0y^1(1) + z^1(21) + 0z^1(22) + t^1(31) + 0,02t^1(33) \geq 0,34 \\ & \min_{y \in Y} \{ F_1(x, y) = 0,87x^2 + 0,49y^2(11) \} \\ & 0x^2 + 0,021y^2(11) \geq 0,01 \\ & 0x^2 + 0,031y^2(11) \geq 0,015 \\ & 0x^2 + 0,546y^2(11) \geq 0,27 \\ & 0x^2 + 0,136y^2(11) \geq 0,068 \\ & 0,007x^2 + 0y^2(11) \geq 0,003 \\ & 0,004x^2 + 0y^2(11) \geq 0,002 \\ & \min_{z \in Z} \{ F_2(x, z) = 0,87x^2 + 0,58z^2(21) + 0,62z^2(22) \} \\ & 0,73x^2 + 0,93z^2(22) + 0,77z^2(22) \geq 0,81 \\ & 0,73x^2 + 0z^2(22) + 0,79z^2(22) \geq 0,50 \\ & 0,32x^2 + 0z^2(22) + 0,85z^2(22) \geq 0,39 \\ & 0,38x^2 + 0z^2(22) + 0,87z^2(22) \geq 0,41 \\ & 0,6x^2 + 0,83z^2(22) + 0,79z^2(22) \geq 0,74 \\ & 0,6x^2 + 0z^2(22) + 0,96z^2(22) \geq 0,52 \\ & 0,43x^2 + 0z^2(22) + 0,92z^2(22) \geq 0,45 \\ & \min_{t \in T} \{ F_3(x, t) = 0,87x^2 + 0,83t^2(31) + 0,93t^2(32) \} \\ & 0,98x^2 + 0,93t^2(32) + 0,93t^2(32) \geq 0,94 \\ & 0,95x^2 + 0,97t^2(32) + 0,91t^2(32) \geq 0,94 \\ & 0,87x^2 + 0,89t^2(32) + 0,85t^2(32) \geq 0,87 \\ & 0,94x^2 + 0,91t^2(32) + 0,91t^2(32) \geq 0,92 \\ & x^2 + 0,91t^2(32) + 0,91t^2(32) \geq 0,95 \\ & x^2 + 0,92t^2(32) + 0,92t^2(32) \geq 0,94 \\ & x^2 + t^2(32) + t^2(32) \geq 1 \\ & x^1 + y^1(1) + z^1(21) + z^1(22) + t^1(31) + t^1(33) \leq 6 \\ & x, y, z, t \leq 1. \end{aligned}$$

Правую часть системы ограничений (кроме дополнительных ограничений, накладываемых на переменные), как правило, должно определять высшее руководство. В данной работе правая часть для функции качества определена, исходя из максимального частного слагаемого в системе ограничений, а для

последователя – как среднее значение частных слагаемых системы ограничений. В первом и во втором случаях ограничение задаем со знаком \geq .

4.6. Определение ранговых шкал для оценки целевых функций

Для принятия решений в отношении полученных численных значений целевых функций необходимо их оценить по ранговой шкале, где каждому делению будет соответствовать степень критичности для разработки определенных мероприятий по улучшению или обеспечению качества приборостроительной продукции.

Как было показано в 3.5, для определения ранговой шкалы необходимо выделить процессы на предприятии и описать их. В зависимости от структурной сложности процесса и потерь при выполнении самого процесса строим ранговую шкалу.

4.6.1. Определение ранговой шкалы по объему энтропии процессов

Ранговую шкалу строим для оценки функции качества, функции «Затраты на качество», функции «Управление поставщиками» и функции технологичности. Схема процессов представлена на рисунке 32.

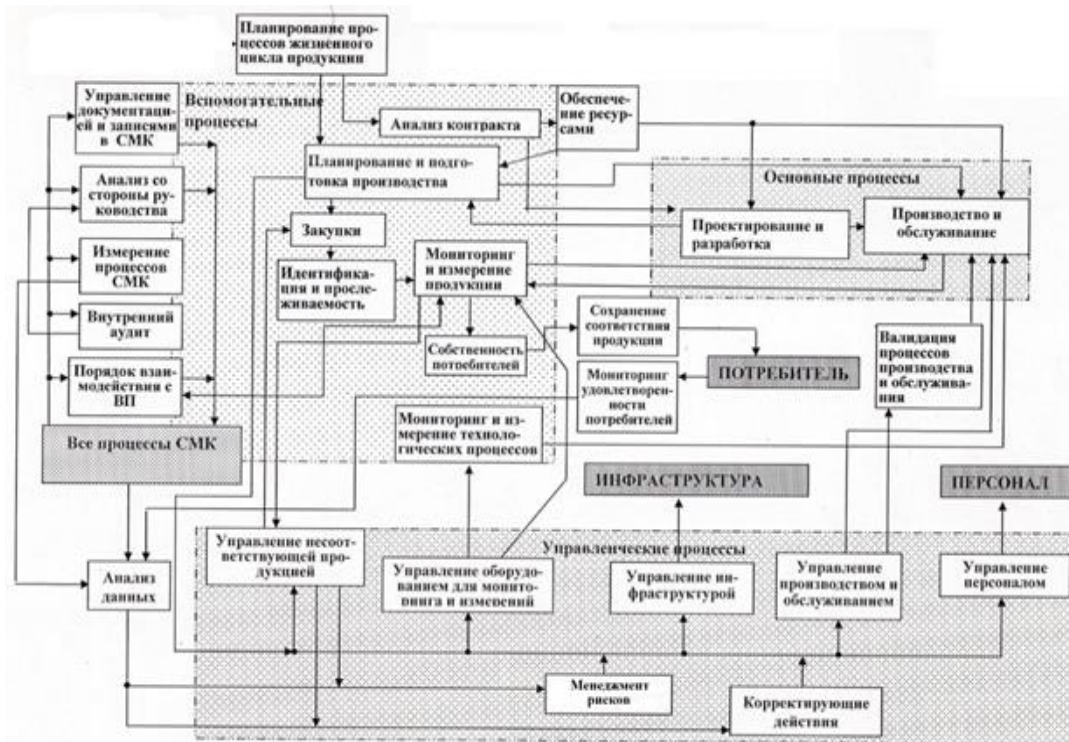


Рисунок 32 – Схема процессов АО «Радиоавионика»

Определим взаимосвязь между процессами на рисунке 32 и целевыми функциями для определения структурной сложности описанных процессов. Взаимосвязь процессов представлена в таблице 18. Взаимосвязи между целевыми функциями и процессами устанавливаем путем определения владельцев процессов и ответственных за расчет целевых функций. При наличии связи в таблице 19 ставим знак «+», а при отсутствии – знак «-».

Таблица 19 – Взаимосвязь процессов

Наименование процесса	Наименование целевой функции			
	Функция качества	Функция «Затраты на качество»	Функция «Управление поставщиками»	Функция технологичности
Управление документацией и записями СМК	+	-	-	-
Анализ со стороны руководства	+	-	-	-
Измерение процессов СМК	+	-	-	-
Внутренний аудит	+	-	-	-
Порядок взаимодействия с ВП	+	-	-	-
Анализ данных	+	+	-	-
Управление несоответствующей продукцией	+	-	+	+
Управление инфраструктурой	-	-	+	+
Управление производством и обслуживанием	-	-	+	+
Управление персоналом	+	+	+	+
Менеджмент рисков	+	+	-	-
Мониторинг и измерение технологических процессов	+	-	-	+
Мониторинг удовлетворенности потребителей	+	-	-	-
Валидация процессов производства	-	-	-	+
Сохранение соответствия продукции	+	-	+	+

Собственность потребителя	+	+	-	+
Мониторинг и измерение продукции	+	-	-	+
Идентификация и прослеживаемость	+	-	+	+
Закупки	+	+	+	-
Планирование и подготовка производства	+	-	-	+
Проектирование и разработка	+	-	-	+
Производство и обслуживание	+	-	-	+
Анализ контрактов	+	+	+	-
Обеспечение ресурсами	-	+	+	
Планирование процессов жизненного цикла	+	+	+	+
Корректирующие действия	+	-	-	+
Итого процессов	22	8	10	25

Количество делений для ранговых шкал целевых функций приведено в таблице 20.

Таблица 20 – Количество делений

Номер шкалы	Количество делений	Наименование целевой функции
1	6	Функция качества
2	7	Функция «Затраты на качество»
3	6	Функция «Управление поставщиками»
4	5	Функция технологичности

Как видно из таблицы 19, количество делений или реперных точек на ранговой шкале зависит от таких факторов, как количество ответственных за выполнение процессов, издержки при выполнении процессов в виде денежных и временных потерь, а также несоответствия, которые возникают при выполнении процессов. Описание ранговых шкал для целевых функций представлено в таблице 21.

Таблица 21 – Описание ранговых школ

Номер деления	Интервальная оценка	Описание
Функция качества		
1	[0÷0,16)	Разработанные мероприятия управления качеством продукции при выполнении процессов организации не работают. Необходимо разработать новый комплект документированных процедур, технологической и технической документации.
2	[0,16÷0,36)	Разработанные мероприятия управления качеством продукции при выполнении процессов организации не работают. Необходимо разработать новый комплект документированных процедур.
3	[0,36÷0,52)	Высокие издержки при выполнении процессов организации. Необходимо произвести корректировку действующих мероприятий управления качеством.
4	[0,52÷0,68)	Необходимо определить причины возникновения повышенного уровня дефектов и откорректировать точно процессы организации.
5	[0,68÷0,84)	Необходимо провести внеплановый внутренний аудит процессов СМК для проверки процессов организации.
6	[0,84÷1]	Корректировка и разработка новых мероприятий по улучшению качества не требуется.
Функция «Затраты на качество»		
1	[0÷0,14)	Разработанные мероприятия управления качеством продукции при выполнении процессов организации не работают. Необходимо разработать новый комплект документированных процедур, технологической и технической документации.
2	[0,14÷0,28)	Комплекс мер по управлению затратами не работает. Необходимо разработать новый комплект документированных процедур для управления затратами.
3	[0,28÷0,42)	Высокие затраты на качество при выполнении процессов организации. Необходимо провести корректировку действующих мероприятий управления качеством.
4	[0,42÷0,56)	Повышенный уровень дефектной продукции. Затраты на проведение анализа дефектов возросли. Необходимо провести проверку операций входного контроля, операционного контроля и контроля готовой продукции.
5	[0,56÷0,7)	Затраты на контроль качества и испытание готовой продукции возросли. Необходимо провести проверку рабочих мест и испытательного оборудования с целью корректировки методик проведения контроля качества и испытания готовой продукции.
6	[0,7÷0,84)	Затраты на проведение операционного контроля возросли. Необходимо провести летучий контроль для проверки выполнения операций контроля качества.
7	[0,84÷1]	Приемлемый уровень затрат на качество.
Функция «Управление поставщиками»		
1	[0÷0,16)	Разработанные мероприятия управления поставщиками не работают. Необходимо разработать новый комплект документированных процедур и технологической документации.
2	[0,16÷0,36)	Комплекс мер по управлению поставщиками не работает. Необходимо разработать новый комплект документированных процедур для управления поставщиками.
3	[0,36÷0,52)	Необходима корректировка перечня поставщиков путем замены наиболее ненадежных поставщиков.
4	[0,52÷0,68)	Поставки осуществляются с нарушением сроков, при этом процент дефектов комплектующих в изделии больше 15%. Необходимо пересмотреть работу с поставщиком по срокам замены и доставки комплектующих, а также оказать методическую помощь для устранения причин дефектов.
5	[0,68÷0,84)	Обнаружены дефекты на этапе входного контроля. Необходимо провести внеплановый аудит поставщика.

6	[0,84÷1]	Дефекты на этапе входного контроля не обнаружены. Комплектующие и материалы поставляются в соответствии с договорами.
Функция технологичности		
1	[0÷0,2)	Существующее технологическое обеспечение не позволяет выполнять технологический процесс в соответствии с установленными нормативами. Необходимо определить узкие места в технологическом процессе и устранить их путем замены оборудования и (или) корректировки технологии изготовления.
2	[0,2÷0,4)	Существующие методики выполнения технологических процессов не позволяют обслуживать рабочие места оперативно. Кроме того, контрольные операции не позволяют обнаруживать дефекты, которые в дальнейшем обнаруживаются на последующих операциях. Необходимо пересмотреть существующие методики обеспечения качества на этапе процесса изготовления продукции.
3	[0,4÷0,6)	Время и издержки при выполнении технологических процессов не соответствуют нормативам на изготовление изделия. Необходимо внести корректировки в технологическую документацию по выполнению технологических операций.
4	[0,6÷0,8)	Повышенный уровень расходования материалов при выполнении технологических процессов. Необходимо провести внеплановую проверку выполнения технологических операций в соответствии с технологической документацией.
5	[0,8÷1]	Технология изготовления продукции осуществляется в соответствии с внутренней нормативно-технической и технологической документацией.

Разработанная ранговая шкала будет использоваться для определения необходимости в корректировке существующих мероприятий по управлению качеством или разработке новых мероприятий. Пример применения ранговой шкалы, представленной в таблице 23, приведен в 4.7.

4.7. Реализация методики поиска оценки качества продукции приборостроения на основе двухуровневой линейной оптимизации

Для решения представленной выше задачи используем программное обеспечение на языке программирования «Python» с установленными модулями «Pymoo», «Scipy», «Numpy» и «Matplotlib». Модуль «Pymoo» необходим для решения задачи двухуровневой линейной оптимизации, модуль «Scipy» использован для решения задачи многокритериальной линейной оптимизации. Решение задачи представлено в таблице 22.

Таблица 22 – Решение задачи поиска оценки качества продукции

Обозначение целевой функции	Найденные численные значения частных показателей целевых функций						Численное значение целевой функции	
							Найденное	Эталонное
Q	0,70	0,25	0,09	0,09	0,15	0,01	1,29	4,32
F_1	0,70	0,25	0,00	0,00	0,00	0,01	0,95	1,35

F_2	0,70	0,00	0,09	0,09	0,00	0,01	0,89	2,1
F_3	0,70	0,00	0,00	0,00	0,15	0,01	0,85	2,6
-	Найденное значение относительной важности частного значения целевой функции						-	-
	x	y	z_1	z_2	t_1	t_2	-	-
	0,81	0,5	0,15	0,15	0,18	0,01	-	-

Измерим полученные оценки по ранговым шкалам, предложенным в 4.6.

Полученные оценки представлены в таблице 23.

Таблица 23 – Применение ранговой шкалы

Наименование целевой функции	Найденная оценка	Ранговая шкала	Описание полученной оценки
Функция качества	0,3	2	Разработанные мероприятия управления качеством продукции при выполнении процессов организации не работают. Необходимо разработать новый комплект документированных процедур.
Функция «Затрат на качество»	0,7	6	Затраты на проведение операционного контроля возросли. Необходимо провести проверку операции контроля качества.
Функция «Управление поставщиками»	0,42	3	Необходима корректировка перечня поставщиков путем замены наиболее ненадежных поставщиков.
Функция технологичности	0,33	2	Существующие методики выполнения технологических процессов не позволяют обслуживать рабочие места оперативно. Кроме того, контрольные операции не позволяют находить дефекты, которые в дальнейшем обнаруживаются на последующих операциях. Необходимо пересмотреть существующие методики обеспечения качества на этапе процесса изготовления продукции.

Наиболее наглядными графиками визуализации области Парето двухуровневой задачи оптимизации являются трехмерные графики, где по оси Oz откладываем численные значения функции качества, по оси Oy – численные значения одной из функций последователя, по оси Ox – численные значения другой функции последователя. Третья функция последователя будет зафиксирована в начальном положении L . Изменение границ целевых функций

подуровней осуществляется до эталонных значений. Последовательность визуализации области Парето представлена в таблице 24.

Таблица 24 – Визуализация области Парето

Стратегия	$0z$	$0y$	$0x$	L
A	Q	F_1	F_2	F_3
B	Q	F_1	F_3	F_2
C	Q	F_2	F_3	F_1

Визуализация на области Парето представлена на рисунке 33.

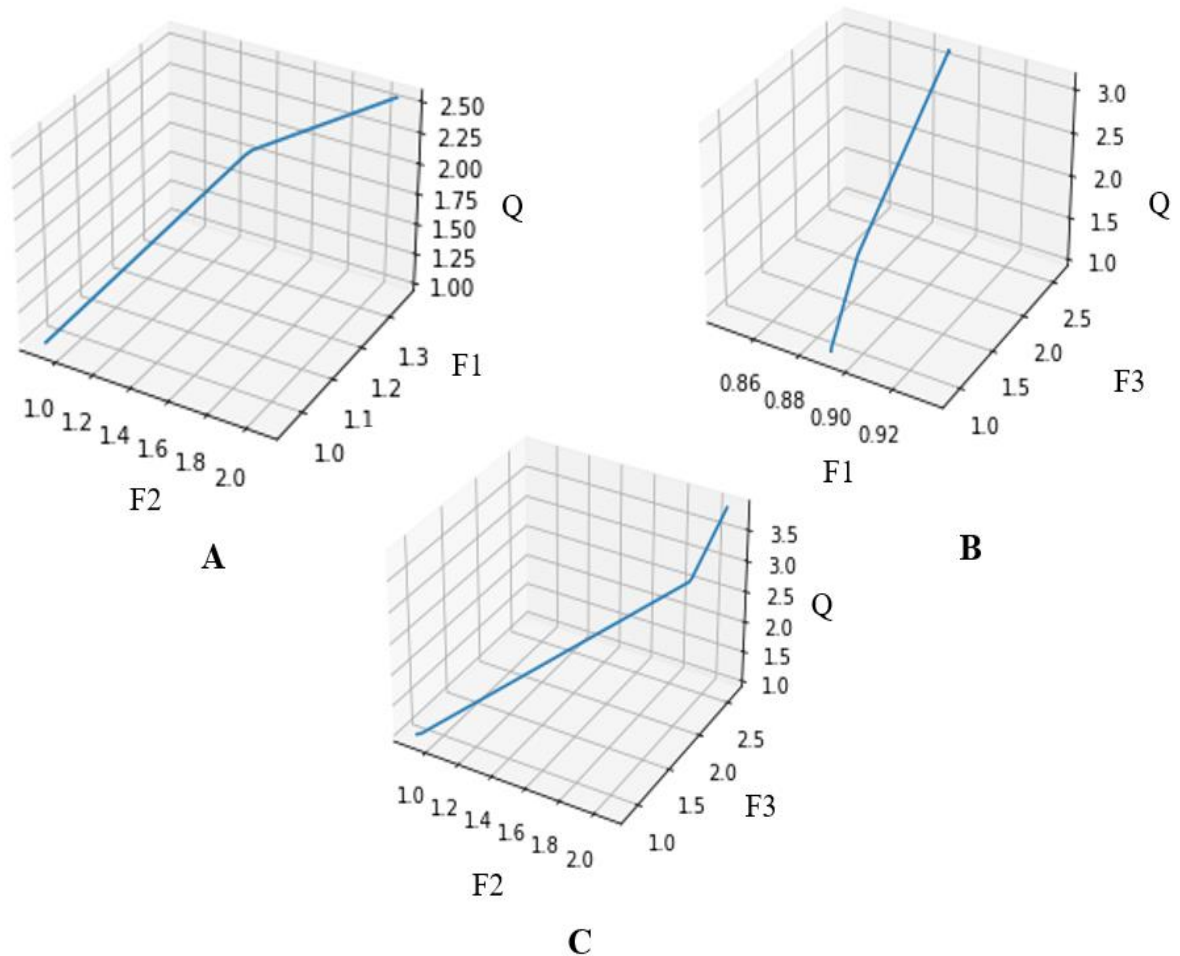


Рисунок 33 – Визуализация областей Парето

Наиболее предпочтительным путем улучшения качества продукции, ориентируясь на область Парето (рис. 33), является стратегия С. При использовании данной стратегии достигается максимальное значение функции качества, при этом, как можно заметить по взаимосвязи целевых функций, уровень затрат на качество не повышается.

Для определения рационального пути улучшения качества продукции необходимо определить, на какой итерации изменения целевых функций для

подуровней можно получить высокое значение функции качества. График зависимости функции качества от изменения численных значений всех целевых функций подуровней представлен на рисунке 34.

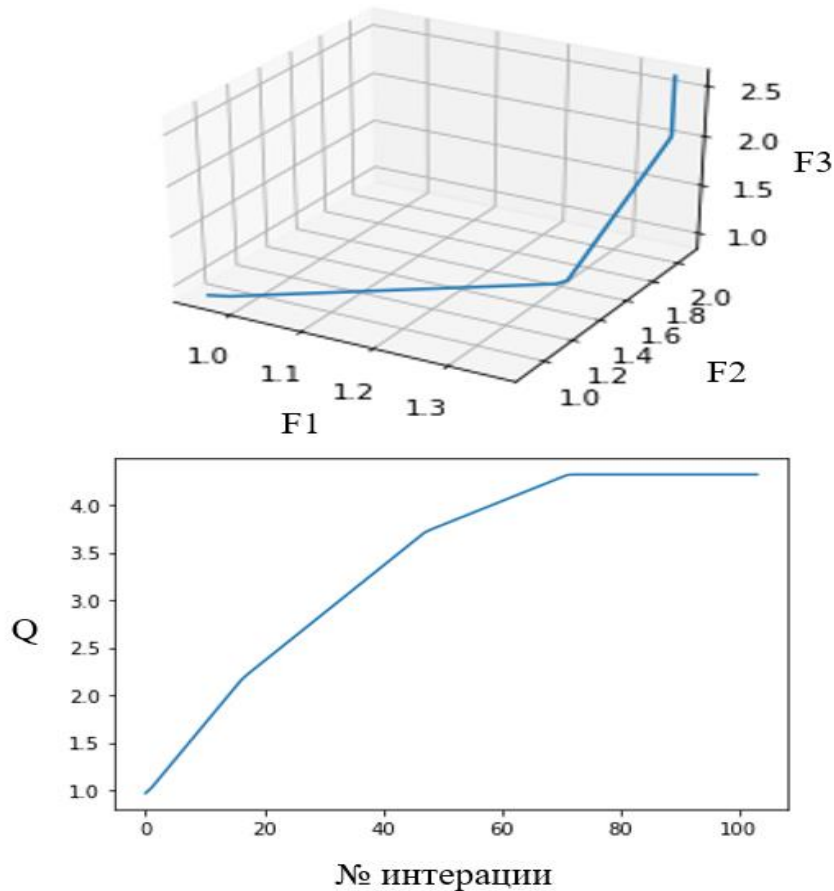


Рисунок 34 – Визуализация области Парето по функции качества

Как видно из рисунка 34, высокое значение функции качества достигается на итерации №51, где $Q=3,8$, $F1=1,3$, $F2=2,1$, $F3=2,1$. Решим задачи поиска оценки качества продукции при численных значениях целевых функций, найденных на итерации №51. Решение задачи представлено в таблице 25.

Таблица 25 – Решение задачи улучшения качества продукции

Обозначение целевой функции	Найденные численные значения частных показателей целевых функций						Численное значение целевой функции	
							Найденное	Эталонное
Q	0,87	0,48	0,58	0,62	0,30	0,87	3,8	4.32
F_1	0,87	0,48	0,00	0,00	0,00	0,87	1,35	1.35
F_2	0,87	0,00	0,58	0,62	0,00	0,87	2,07	2.1
F_3	0,87	0,00	0,00	0,00	0,30	0,87	2,10	2.6
-	Найденное значение относительной важности частного значения целевой функции						-	-
	x	y	z_1	z_2	t_1	t_2	-	-

	1	0,98	1	1	0,36	1	-	-
--	---	------	---	---	------	---	---	---

Как следует из таблицы 35, поиск рациональных путей улучшения качества продукции позволяет минимизировать затраты на качество продукции и получить высокое значение функции качества при высоких значениях целевых функций подуровней. При принятии решений, найденных на итерации №103, численные значения всех целевых функций для подуровней изменятся незначительно, при этом возрастут затраты на качество.

Применим повторно ранговую шкалу для проверки выбранной стратегии принятия решений. Результаты повторного применения ранговой шкалы представлены в таблице 26.

Таблица 26 – Повторное применение ранговой шкалы

Наименование целевой функции	Найденная оценка	Ранговая шкала	Описание полученной оценки
Функция качества	0,88	6	Корректировка и разработка новых мероприятий по улучшению качества не требуется
Функция «Управление затратами на качество»	1	7	Приемлемый уровень затрат на качество
Функция «Управление поставщиками»	0,99	6	Дефекты на этапе входного контроля не обнаружены. Комплектующие и материалы поставляются в соответствии с договорами
Функция технологичности	0,81	5	Технология изготовления продукции соответствует внутренней нормативно-технической и технологической документации.

Автоматизированная система поиска оценки качества продукции и принятия решений при управлении качеством продукции представлена в 4.8.

4.8. Автоматизированная система поиска оценки качества приборостроительной продукции

Автоматизированная система оценки и улучшения качества продукции разработана на базе высокоуровневого языка программирования «Python». Данный язык был выбран по следующим причинам:

1. Большой перечень пакетов для выполнения различных расчетов и разработки алгоритмов.

2. Возможность получать и загружать информацию в базу данных для сохранения информации.
3. Совместимость с BI-системами, что позволяет оперативно получать отчеты и интерпретировать информацию в удобном виде.
4. Программный код языка можно интерпретировать на других языках программирования, например, C++.

Для разработки автоматизированной системы были применены следующие пакеты и библиотеки:

- «Matplotlib» – пакет для визуализации данных в Python;
- «SciPy» – библиотека Python с открытым исходным кодом, предназначенная для решения научных и математических задач;
- «NumPy» – библиотека, добавляющая поддержку больших многомерных массивов и матриц;
- «Puomo» – пакет, который содержит ряд инструментов для формулирования, решения и анализа оптимизационных моделей;
- «Tkinter» – библиотека для разработки графического интерфейса.

4.8.1. Описание алгоритма работы программы поиска оценки качества приборостроительной продукции

Автоматизированная система оценки и улучшения качества продукции состоит из следующих блоков:

1. Блок интерфейса.
2. Блок ввода и обработки информации.
3. Блок анализа информации.
4. Блок вывода и интерпретации информации.

Алгоритма автоматизированной системы оценки и улучшения качества представлен на рисунке 35.

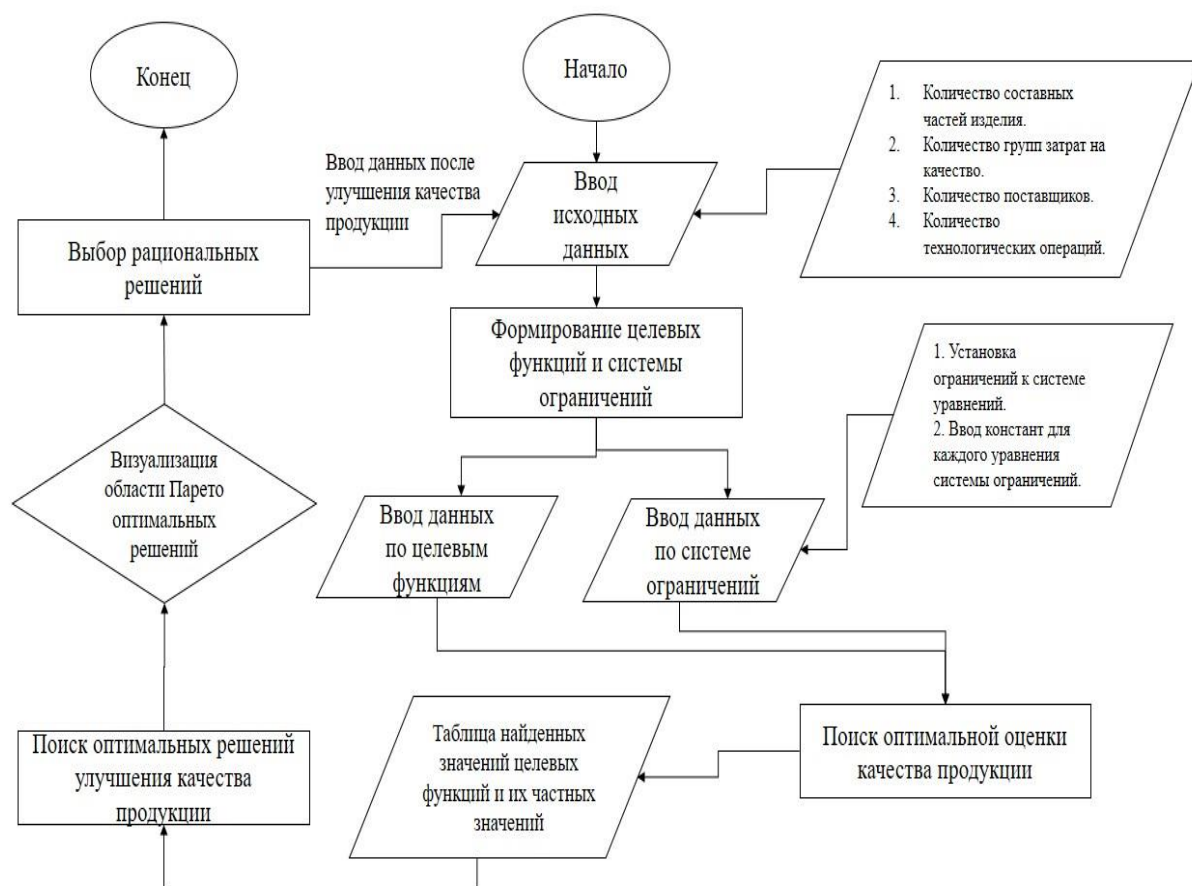


Рисунок 35 – Алгоритм работы программного обеспечения

Алгоритм решения задачи двухуровневой линейной оптимизации оценки качества продукции представлен в приложении А. Алгоритм поиска области Парето для задачи двухуровневой оптимизации представлен в приложении Б. Визуализация области Парето для принятия решений при управлении качеством продукции в приложении В.

В 4.8.2 приведена апробация и визуальное описание приведенного выше алгоритма.

4.8.2. Описание автоматизированной системы оценки и улучшения качества продукции приборостроения

Ввод данных в систему осуществляется службами и отделами централизованно, через службу качества. Первичной информацией являются таблицы 14–19, представленные в 4.3. Расчет оценок для частных значений

целевых функций и уравнений системы ограничений выполняется службой качества, на основе таблиц 14–19.

После поиска оценки качества продукции и получения области Парето для принятия решений, служба качества предоставляет возможные варианты решения проблем главному конструктору, начальнику производства, начальнику финансово-экономического отдела и главному технологу для выбора наиболее предпочтительных решений из области Парето.

Для работы автоматизированной системы необходимо внести информацию по таким вкладкам главного меню как функция качества, функция «Затраты на качество», функция «Управление поставщиками», требования к качеству продукции, условия поиска оценки качества продукции, а также поиск области Парето для принятия решений. Главное меню приведено на рисунке 36.

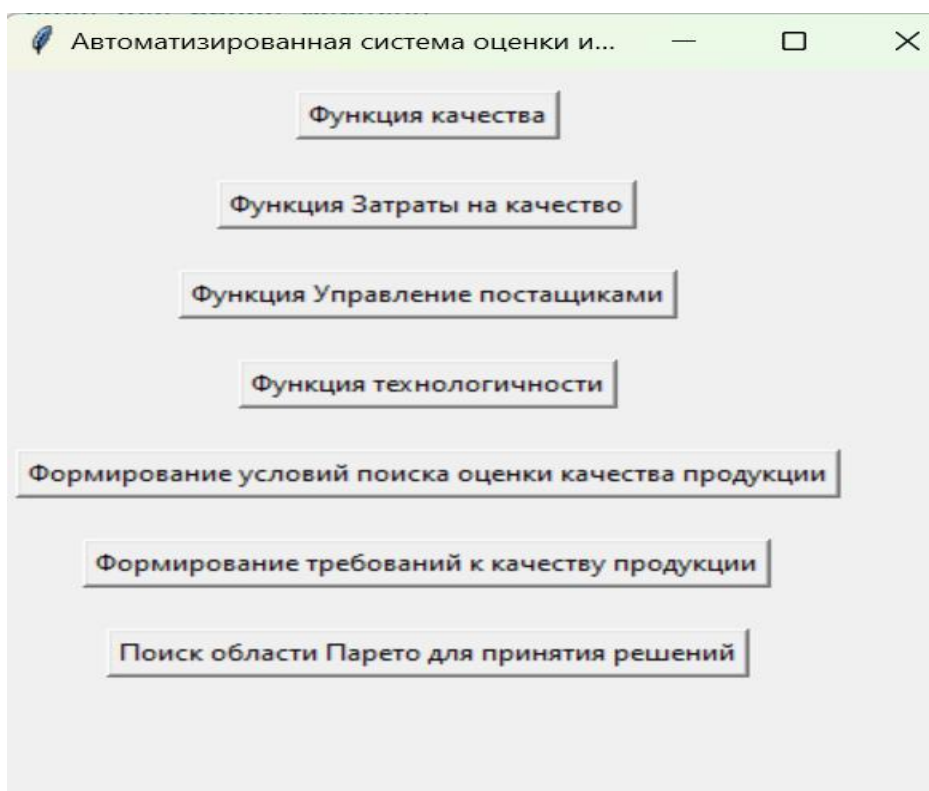


Рисунок 36 – Главное меню программы

Перед тем как начать поиск оптимальных целевых функций необходимо перейти во вкладку «Формирование условий поиска оценки качества продукции», после чего внести следующие данные:

1. Количество составных частей (блоков) изделия.

2. Количество групп затрат на качество.
3. Количество поставщиков комплектующих.
4. Количество технологических операций.

Графический интерфейс с приведенной информацией представлен на рисунке 37.

Рисунок 37 – Окно формирования условий поиска оценки качества продукции

После ввода перечисленной информации в закладках с названиями целевых функций появляется таблица для ввода оценок для каждой системы ограничений.

Пример, для функции качества представлен на рисунке 38.

Номер составной части (блока)	Уровень выхода одной продукции	Степень эффективности (по снижению затрат на к. по работе с поставщиками)	Степень результативности от внедрения (по работе с поставщиками)	Степень эффективности (по управлению производством)	Степень результативности от внедрения (по управлению производством)	Степень эффективности от внедренных мероприятий
1	0.55	0.25	0.15	0.36	0.25	0.25
2	0.75	0.25	0.85	0.25	0.67	0.25

Рисунок 38 – Оценки для системы ограничений функции качества

Задача поиска качества продукции решается с применением следующего кода, представленного на рисунке 39.

```

1 from pyomo.environ import *
2 from pao.pyomo import *
3 import numpy as np
4 # Quality function model with variables x-----
5 M = ConcreteModel()
6 M.x = Var(bounds=(0, None), domain=Reals)
7
8 # Provider management function model with variables y-----
9 M.L = SubModel(fixed=M.x)
10 M.L.y = Var(bounds=(0, None), domain=Reals)
11
12 # Model of the function "Quality Costs" with variables z-----
13 M.L1 = SubModel(fixed=M.x)
14 M.L1.z = Var(bounds=(0, None), domain=Reals)
15
16 # Manufacturability function model with variables t-----
17 M.L2 = SubModel(fixed=M.x)
18 M.L2.t = Var(bounds=(0, None), domain=Reals)
19
20 # Input information for the quality function-----
21-----
22 N1 = 8 # Number of quality indicators
23 N2 = 15 # Number of components in the product
24 A = np.ones((N2,N1)) # Moving from the matrix to the list
25 N3 = int(input('Please enter number of active blocks')) # Number of active blocks
26 A[N3:15]=0
27 MN = list(A) # Quality metrics matrix
28 for i in range(N3): # Condition for transition from the matrix to the list
29     MN[i] = [float(i) for i in input('Please enter numerical values for each quality indicator for components in the product').split()]
30 MM=np.array(MN)
31 MM1=np.array(MM1)
32
33 # Constraint Conditions for the Quality Function-----
34-----
35 MM=np.array(MN)
36 n = []
37 for i in range(len(MM)):
38     if len(MM[i])==(sum(MM[i])):
39         n.append(sum(MM[i]))
40     elif sum(MM[i])==1:
41         n.append(sum(MM[i]))
42     else:
43         n.append(sum(MM[i]))
44 m=np.array(MM)
45 for i in range(len(m)):
46     for j in range(len(m[i])):
47         if m[i,j]==1 or m[i,j]>=1 or m[i,j]>0:
48             m[i,j]=1
49         else:
50             m[i,j]=0
51 N = []
52 for i in range(len(m)):
53     if len(m[i])==(sum(m[i])):
54         N.append(sum(m[i]))
55     elif sum(MM[i])==1:
56         N.append(sum(m[i]))
57     else:
58         N.append(sum(m[i]))

```

Рисунок 39 – Фрагмент кода

Полное описание кода, представленного на рисунке 39, приведено в приложении А. Представленный выше код решает задачу двухуровневой линейной оптимизации с одной целевой функцией на верхнем уровне и тремя целевыми функциями на нижнем уровне.

После нахождения оптимальных целевых функций необходимо нажать на вкладку «Поиск области Парето для принятия решений». Данная задача решается с применением следующего кода, представленного в приложении Б и на рисунке 40.


```
[21]: import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.optimize import linprog
import numpy as np
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
#----- Система ограничений для функции качества
A1=np.dot([0.13,0.33,0.8,0.21,0.72,0.21],-1)
A2=np.dot([0.6,0.32,0.68,0.2,0.72,0.23],-1)
A3=np.dot([0.91,0.11,1,0.88,0.94,0.89],-1)
A4=np.dot([0,0,1,0,1,0.82],-1)
A5=np.array([1,1,1,1,1,1])
#----- Система ограничений для функции "Затраты на качество"
B1=np.dot([0,0.021,0,0,0,0],-1)
B2=np.dot([0,0.031,0,0,0,0],-1)
B3=np.dot([0,0.546,0,0,0,0],-1)
B4=np.dot([0,0.136,0,0,0,0],-1)
B5=np.dot([0,0.007,0,0,0,0],-1)
B6=np.dot([0,0.894,0,0,0,0],-1)
B7=np.array([1,1,0,0,0,0])
#----- Система ограничений для функции "Управление поставщиками"
C1=np.dot([0.73,0,0,0.93,0.77,0,0],-1)
C2=np.dot([0.73,0,0,0.79,0,0],-1)
C3=np.dot([0.32,0,0,0.85,0,0],-1)
C4=np.dot([0.38,0,0,0.87,0,0],-1)
C5=np.dot([0.6,0,0.83,0.79,0,0],-1)
C6=np.dot([0.6,0,0,0.96,0,0],-1)
C7=np.dot([0.43,0,0,0.92,0,0],-1)
C8=np.array([1,0,1,1,0,0])
#----- Система ограничений для функции технологичности
D1=np.dot([0.98,0,0,0.93,0.93],-1)
D2=np.dot([0.95,0,0,0.97,0.91],-1)
D3=np.dot([0.87,0,0,0.89,0.85],-1)
D4=np.dot([0.94,0,0,0.91,0.91],-1)
D5=np.dot([1,0,0,0.91,0.91],-1)
D6=np.dot([1,0,0,0.92,0.92],-1)
D7=np.array([1,0,0,0,1,1])
#----- Целевые функции
F1=np.dot([1,1,0,0,0,0],-1) # функция "Затраты на качество"
F2=np.dot([1,0,1,1,0,0],-1) # функция "Управление поставщиками"
F3=np.dot([1,0,0,1,1,1],-1) # функция технологичности
Q=np.dot([1,1,1,1,1,1],1) # функция качества
lhs_ineq = [A1,A2,A3,A4,A5,B1,B2,B3,B4,B5,B6,B7,C1,C2,C3,C4,C5,C6,C7,C8,D1,D2,D3,D4,D5,D6,D7]
rhs_ineq=[-0.4,-0.47,-0.52,0.34,6,-0.01,-0.0015,-0.027,-0.068,0.003,0.002,2,-0.81,-0.5,-0.39,-0.41,-0.74,-0.52,-0.45,3,-0.94,-0.7]
bnd = [(0, 1), (0, 1), (0, 1), (0, 1), (0, 1), (0, 1)]
opt = linprog(c=Q, A_ub=lhs_ineq, b_ub=rhs_ineq, bounds=bnd, method="revised simplex")
f1=0.87*opt.x[0]+0.49*opt.x[1]
f2=0.87*opt.x[0]+0.58*opt.x[2]+0.62*opt.x[3]
f3=0.87*opt.x[0]+0.83*opt.x[4]+0.93*opt.x[5]
QQ=0.87*opt.x[0]+0.49*opt.x[1]+0.58*opt.x[2]+0.62*opt.x[3]+0.83*opt.x[4]+0.93*opt.x[5]
print(QQ,f1,f2,f3)
opt.x
```

Рисунок 40 – Код поиска области Парето

Представленный выше код основан на решении задачи двухуровневой оптимизации с применением перехода к задаче многокритериальной оптимизации.

Визуализация области Парето реализуется следующим кодом, представленным на рисунке 41.

```
# Алгоритм визуализации области Парето для задачи управления качеством продукции
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.optimize import linprog
import numpy as np
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
l=np.arange(0,2.6,0.025)
def Q(l):
    F11=np.dot([0.87,0.49,0,0,0,0],-1) # Функция "Затраты на качество"
    F21=np.dot([0.87,0,0.58,0.62,0,0],-1) # Функция "Управление поставщиками"
    F31=np.dot([0.87,0,0,0.83,0.93],-1) # Функция технологичности
    Q1=np.dot([0.87,0.49,0.58,0.62,0.83,0.93],1) # Функция качества
    Q2=np.dot([0.87,0.49,0.58,0.62,0.83,0.93],1) # Функция качества
    lhs_ineq1 = [F11,F21,F31]
    rhs_ineq1=[-0.95-1,-0.89-1,-0.85-1] # Целевые функции найденные при решении задачи многокритериальной оптимизации
    bnd1 = [(0, 1),(0, 1),(0, 1),(0, 1),(0, 1),(0, 1)] # Дополнительные ограничения
    opt1 = linprog(c=Q2, A_ub=lhs_ineq1, b_ub=rhs_ineq1,bounds=bnd1, method="revised simplex")
    return opt1.x
x = []
y = []
Q1 = []
F1 = []
F2 = []
F3 = []
y=np.arange(0,104,1)
for i in l:
    x.append(i)
    Q1.append(0.87*Q(i)[0]+0.49*Q(i)[1]+0.58*Q(i)[2]+0.62*Q(i)[3]+0.83*Q(i)[4]+0.93*Q(i)[5])
    F1.append(0.87*Q(i)[0]+0.49*Q(i)[1])
    F2.append(0.87*Q(i)[0]+0.58*Q(i)[2]+0.62*Q(i)[3])
    F3.append(0.87*Q(i)[0]+0.83*Q(i)[4]+0.93*Q(i)[5])
plt.plot(y,Q1)
plt.show()
print(F3[51])
```

Рисунок 41 – Код визуализации области Парето

Результаты применения разработанной методики на трех предприятиях приборостроения, представлены на рисунке 42.

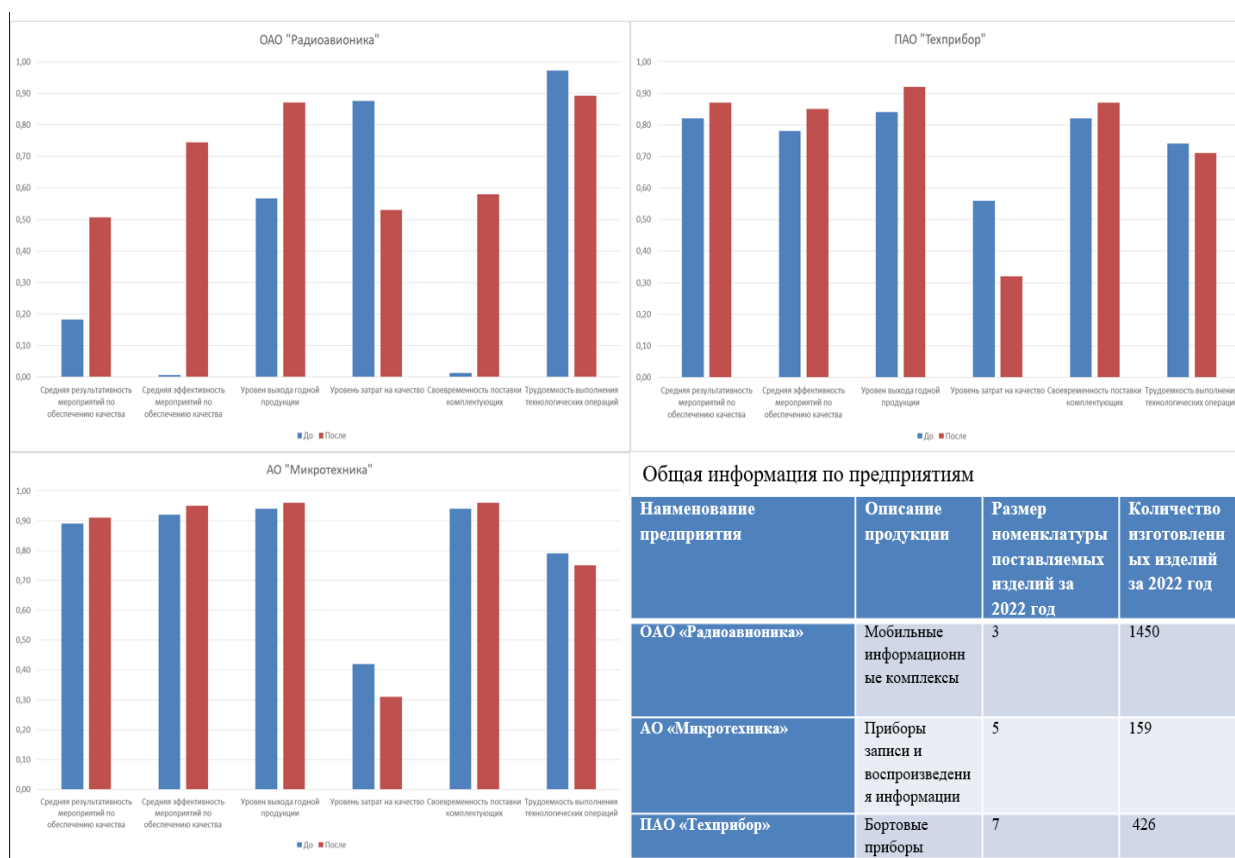


Рисунок 42 – Результаты применения методики оценки и улучшения качества продукции приборостроения

Проведенная проверка методики оценки и улучшения качества продукции приборостроения, дала следующие результаты:

1. Результаты использования основных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечили снижение доли дефектной продукции на операционном контроле в среднем на 13,4% и повышение выхода годной продукции на 7% за счет централизованного поступления информации из различных источников и последующего вывода оценки уровня качества и разработки рекомендуемых мероприятий по совершенствованию. Сэкономленное время позволит разгрузить начальников отделов и персонал среднего звена для решения других проблем и понизить затраты на качество в среднем на 23,1%.

2. Предложенная методика поиска оценки качества продукции на основе модели двухуровневой линейной оптимизации позволяет учитывать большой объем информации по сравнению с традиционными квалиметрическими моделями оценки качества продукции приборостроения.

3. Учет разнородной информации при формализации целевых функций и критериев качества на базе нечетких моделей позволяет расширить существующий перечень учитываемых показателей качества продукции.

4. Предложенная методика поддержки принятия решения при управлении качеством продукции на основе визуализации области Парето позволила повысить результативность мероприятия по обеспечению качества в среднем на 13,2%.

5. Разработанная автоматизированная система поиска оценки качества продукции позволяет сократить трудоемкость сбора, обработки и анализа информации о качестве продукции за счет устранения промежуточных форм предоставления информации в отношении качества продукции.

6. Предложенная методика поддержки принятия решений на основе визуализации области Парето позволяет улучшить производство продукции приборостроения за счет уменьшения трудоемкости выполнения технологических операций в среднем на 5%.

Результаты и выводы по главе 4

Произведенные в главе расчеты позволяют сделать следующие выводы:

1. Разработана аналитическая модель поиска оценки качества продукции на основе двухуровневой линейной оптимизации с учетом требований приборостроительной отрасли.

2. Разработана методика получения частных значений целевых функций и системы ограничений на основе нечеткой логики и теории принятия решений.

3. Разработана математическая модель интерпретации решений задачи двухуровневой оптимизации на область Парето для поддержки принятия решений.

4. Разработана методика визуализации области Парето для выбора рациональных решений управления качеством продукции.

5. Разработана методика проверки достоверности решения задачи двухуровневой линейной оптимизации на основе алгоритма внутренних точек.

6. Разработано программное обеспечение для автоматизации поиска оценки качества продукции и поиска рациональных решений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе достигнута поставленная цель исследования, а именно: разработана методика оценки и улучшения качества продукции приборостроения. Предложенная методика позволяет улучшить процесс принятия решений путем увеличения объема обрабатываемой информации и поиска оценки качества продукции с учетом требований к производству продукции приборостроения.

Автором получены следующие результаты:

1. Разработана иерархия показателей качества приборостроительной продукции. Иерархия показателей качества продукции включает экономические, технологические, конструкторские показатели и описывает качество приборостроительной продукции.

Новизна предложенной иерархии показателей качества в отличие от традиционной иерархии показателей качества выражается в совместном применении децентрализованной модели управления качеством продукции и двухуровневой линейной оптимизации. При этом элементами иерархии являются целевые функции, объединяющие различные качественные и количественные показатели, характеризующие качество, применяемые технологии изготовления, экономику и работу с поставщиками, позволяющие управлять качеством продукции приборостроения.

2. Разработаны показатели качества продукции приборостроения. Для поиска численных значений целевых функций показатели определены в виде суммы частных слагаемых, где в качестве частных слагаемых входят произведения неизвестных переменных. Переменные определены как частные показатели, характеризующие объект, описываемый целевой функцией, а неизвестная переменная – вес данного частного показателя.

Новизна предложенного метода определения и численной формализации целевых функций заключается, в отличие от известных квалиметрических методов оценки, в применении методов и моделей теории информации, теории нечетких множеств и нечеткой кластеризации, что обеспечивает обработку информации, получаемой в процессе производства, и ее синтеза с целью получения линейных целевых функций и их частных показателей при решении задач оценки и управления качеством продукции.

3. Разработана аналитическая модель поиска оценки качества продукции приборостроения на основе модели двухуровневой линейной оптимизации.

Новизна предложенного метода решения задачи поиска оценки качества продукции, в отличии от известных методов (аналитические, статистические, экспертные методы), заключается в применении модели двухуровневой оптимизации для реализации принципов децентрализованного управления и аналитическом задании зависимости между целевыми функциями. Как результат применения данного метода поиска оценки качества продукции приборостроения производитель приборостроительной продукции получает вектор численных значений, характеризующих состояние производства и качество продукции.

4. Разработана методика принятия решений, на основе полученных после применения методики поиска оценки качества продукции приборостроения численных значений показателей качества.

Новизна предложенного метода принятия решений заключается в проекции возникающих затрат или потерь, характеризующих найденное численное

значение качества продукции приборостроения, на область Парето. Также новизна предложенного метода заключается в способе оценки достоверности решения задачи поиска оценки качества продукции на основе предложенного метода принятия решений.

5. Разработана автоматизированная система поиска оценки качества продукции на базе высокоуровневого языка программирования Python. Новизна применения данного подхода заключается в использовании библиотеки `Pyomo` для задания в программе Python алгоритма расчета двухуровневой задачи оптимизации оценки качества продукции приборостроения.

В рамках проведенных исследований была разработана программа поиска оценки качества продукции на базе высокоуровневого языка программирования Python. На разработанную программу получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022661438 Российская Федерация. Программа поиска оптимальной оценки качества продукции: № 2022660814: заявл. 10.06.2022: опубл. 21.06.2022 / Г. Т. Пипия, Л. В. Черненькая; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Список литературы

1. Анцев, В. Ю. Методика квалиметрической оценки качества производственных процессов / В. Ю. Анцев, Н. А. Витчук // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – № 8-1. – С. 324-331.
2. Воронин А.Н. Нелинейная схема компромиссов в многокритериальных задачах оценивания и оптимизации/ А.Н. Воронин // Кибернетика и системный анализ, 2009, Т. 45. №4. – С. 106-114.
3. Варжапетян А. Г., Антохина Ю. А., Глущенко П. В. Метод оценки в организации производства критического набора ситуаций в процессе риск-менеджмента /Варжапетян А. Г., Антохина Ю. А., Глущенко П. В//Управление экономическими системами: электронный научный журнал. – 2013. – №. 10 (58). – С. 11.
4. ГОСТ Р 51814.6-2005. Системы менеджмента качества в автомобилестроении. Менеджмент качества при планировании, разработке и подготовке производства автомобильных компонентов. – М.: Стандартформ, 2005. – 39 с.
5. ГОСТ Р 51901.12-2007. Менеджмент риска. Метод анализа видов и последствий отказов. – М.: Стандартформ, 2008. – 36 с.
6. ГОСТ Р ИСО 13053-1-2013. Статистические методы. Методология улучшения процессов «Шесть сигм». Часть 1. Методология DMAIC. – М.: Стандартформ, 2014. – 39 с.
7. ГОСТ Р ИСО 31000-2019. Менеджмент риска. Принципы и руководство. – М.: Стандартформ, 2020. – 14 с.
8. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Система менеджмента качества. Требования. – М.: Стандартформ, 2015. – 32 с.
9. ГОСТ Р ИСО/ТО 10013-2007 «Руководство по документированию системы менеджмента».
10. Гурьянов, А. В., Заколдаев, Д. А., Жаринов, И. О., & Нечаев, В. А. Принципы организации цифровых проектных и производственных предприятий

- Индустрии 4. 0 / Гурьянов, А. В., Заколдаев, Д. А., Жаринов, И. О., Нечаев, В. А.//Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2018. – Т. 18. – №. 3. – С. 421-427.
11. Григорян, Е. С. Методические подходы к оценке результативности системы управления качеством /Е. С. Григорян, Н. С. Яшин//Вестник Саратовского государственного социально-экономического университета. – 2018. – № 1(70). – С. 24-27.
12. Дегтярева, Н. М. Методические подходы к выбору и оценке поставщиков предприятия /Н. М. Дегтярева, Р. Яковлев// Вестник Волжского университета им. В.Н. Татищева. – 2015. – № 1(33). – С. 100-105.
13. Дмитриев М. Г., Ломазов В. А. Оценка чувствительности линейной свертки частных критериев при экспертном определении весовых коэффициентов / Дмитриев М. Г., Ломазов В. А.//Искусственный интеллект и принятие решений. – 2014. – №. 1. – С. 52-56.
14. Дмитриев М. Г., Курина Г. А. Сингулярные возмущения в задачах управления / Дмитриев М. Г., Курина Г. А.//Автоматика и телемеханика. – 2006. – №. 1. – С. 3-51.
15. Дыкман, Е. С. Современные методы управления затратами на качество на промышленных предприятиях / Е. С. Дыкман // Актуальные проблемы экономики и менеджмента. – 2015. – № 3(7). – С. 20-26.
16. Клевец, Н. И. Сравнительный анализ методов многокритериального ранжирования альтернатив / Н. И. Клевец // Научный вестник: финансы, банки, инвестиции. – 2018. – № 2(43). – С. 153-163.
17. Левенцов В. А., Радаев А. Е., Николаевский Н. Н. Аспекты концепции «Индустрия 4. 0» в части проектирования производственных процессов/ В. А. Левенцов, А. Е. Радаев, Н. Н. Николаевский//π-Economy. – 2017. – Т. 10. – №. 1. – С. 19-31.
18. Маякова, А. В. Генезис и развитие философии качества / А. В. Маякова // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2014. – № 12-1. – С. 258-260.

19. Маякова, А. В. Философско-методологический анализ категории "качество": от классической основы до современных интерпретаций / А. В. Маякова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Экономика. Социология. Менеджмент. – 2015. – № 1(14). – С. 133-139.
20. Ногин, В. Д. Линейная свертка критериев в многокритериальной оптимизации / В. Д. Ногин // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2014. – № 4. – С. 73-82.
21. Ногин В. Д. Многокритериальный выбор на основе предпочтений ЛПР в интерактивном режиме / Ногин В. Д. // Системный анализ в проектировании и управлении. – 2023. – Т. 26. – №. 1. – С. 32-39.
22. Пестерев, Д. А. Методика квалиметрической оценки / Д. А. Пестерев, И. А. Михайловский, Е. И. Гун // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2018. – Т. 9, № 2. – С. 48-51. – EDN XZWNWJF.
23. Пипия, Г. Т. Методы оптимизации и принятия решений в отношении качества продукции при наличии нескольких целевых функций / Г.Т. Пипия, Л.В. Черненькая // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2022. – № 1. – С. 24-38.
24. Пипия Г.Т. Повышение эффективности и результативности принятия решений при управлении качеством продукции / Л.В. Черненькая, Г.Т. Пипия // Экономика и управление: проблемы, решения. – 2021. – Т. 4, № 11(119). – С. 65-73.
25. Пипия, Г.Т. Методика формализации единичных критериев качества продукции приборостроения для двухуровневой модели. Ч. 1. Единичные критерии целевых функций качества / Г.Т. Пипия, Л.В. Черненькая // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2020. – Т. 63, № 7. – С. 650-656.
26. Пипия, Г.Т. Методика формализации единичных критериев качества продукции приборостроения для двухуровневой модели. Ч. II. Формализация единичных критериев верхнего и нижнего уровней / Г.Т. Пипия, Л.В. Черненькая // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2020. – Т. 63, № 8. – С. 749-755.

27. Пипия Г.Т. Модель мониторинга показателей качества в многокритериальной среде / Г.Т. Пипия // Стандарты и качество. – 2019. – № 3. – С. 108.
28. Пипия Г.Т. Оценка уровня качества многопараметрической продукции с помощью методов условной оптимизации / Г.Т. Пипия // Контроль. Диагностика. – 2018. – № 5. – С. 20-25.
29. Пипия, Г.Т. Методика многокритериальной оценки как инструмент планирования мероприятий по обеспечению качества / Г.Т. Пипия // Радиопромышленность. – 2018. – № 2. – С. 115-120.
30. Пипия Г.Т. Мероприятия повышения надежности дефектоскопа на основе FMEA-анализа / Г.Т. Пипия, А.А. Шашмурын // Наука и бизнес: пути развития. – 2018. – № 6(84). – С. 121-125.
31. Пипия Г.Т. Оценка уровня качества при производстве электронной продукции с учетом ухудшения значений единичных показателей / Г.Т. Пипия, Г.И. Коршунов // Вопросы радиоэлектроники. – 2017. – № 10. – С. 89-93.
32. Пипия Г.Т. Методика оценки уровня качества технической продукции на основе математической модели с учетом множества единичных показателей качества / Г.Т. Пипия, А.М. Струев // Глобальный научный потенциал. – 2017. – № 11(80). – С. 76-78.
33. Пипия Г. Т. Способ формирования уточненного перечня показателей качества продукции по правилу Парето с использованием статистических данных о количестве возникающих дефектов на этапе производства / Г.Т. Пипия // Juvenis Scientia. – 2017. – № 8. – С. 4-7.
34. Пипия Г. Т. Аспекты математического моделирования и автоматизации плазменных методов переработки твердых видов топлива / О. И. Золотов, А. М. Струев, Г. Т. Пипия // Интернет-журнал Науковедение. – 2017. – Т. 9, № 6. – С. 76.
35. Пипия Г.Т. Алгоритм работы системы мониторинга качества продукции при децентрализованном управлении / Г.Т. Пипия, Л.В. Черненькая // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем:

Сборник докладов Третьей Всероссийской научной конференции, Санкт-Петербург, 18–22 апреля 2022 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2022. – С. 178-182.

36. Пипия Г.Т. Методы двухуровневой оптимизации в задачах управления качеством продукции / Г.Т. Пипия, Л.В. Черненькая // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве: Тезисы докладов I Международного форума, Санкт-Петербург, 10–11 ноября 2021 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2021. – С. 251-253.

37. Пипия Г.Т. Двухуровневая оптимизация оценки качества продукции приборостроения / Г.Т. Пипия, Л.В. Черненькая // Системный анализ в проектировании и управлении: сборник научных трудов XXV Международной научной и учебно-практической конференции: в 3 ч., Санкт-Петербург, 13–14 октября 2021 года. – Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2021. – С. 357-363.

38. Пипия Г. Т. Методика определения показателей качества на основе статистического анализа данных / Л. И. Назарова, Г. Т. Пипия, Л. В. Черненькая // Системный анализ в проектировании и управлении: сборник научных трудов XXIII Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 10–11 июня 2019 года / Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Том Часть 3. – Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2019. – С. 263-272.

39. Пипия Г.Т. Целевые критерии для многокритериальной модели условной оптимизации оценки качества продукции / Г.Т. Пипия // Системный анализ в проектировании и управлении: сборник научных трудов XXII Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 22–24 мая 2018 года. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2018. – С. 184-190.

40. Пипия Г.Т. Определение векторных критериев для оценки уровня качества продукции на этапе производства / Г.Т. Пипия, А.А. Шашмулин // Вестник современных исследований. – 2018. – № 8.1(23). – С. 290-293.
41. Пипия Г. Т. Сравнительный анализ квалиметрических методов свертки единичных показателей качества на примере многофункционального информационного комплекса / Г. Т. Пипия // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: Сборник докладов, Санкт-Петербург, 06–10 апреля 2015 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2015. – С. 70-73.
42. Подиновский, В. В. Количественная важность критериев и аддитивные функции ценности / В. В. Подиновский // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2013. – Т. 53, № 1. – С. 133.
43. Розанова, С. К. Затраты на качество: состав и классификация в современных условиях хозяйствования / С. К. Розанова, А. С. Истомин // Теория и практика сервиса: экономика, социальная сфера, технологии. – 2015. – № 3(25). – С. 33-37.
44. Сазыкина, О. В. Оценка, прогнозирование и мониторинг потенциала производственной системы / О. В. Сазыкина, А. Г. Кудряков, В. Г. Сазыкин // Путь науки. – 2014. – № 10(10). – С.
45. Толстых Т. О., Гамидуллаева Л. А., Шкарупета Е. В. Ключевые факторы развития промышленных предприятий в условиях индустрии 4.0/ Т. О. Толстых, Л. А. Гамидуллаева, Е. В. Шкарупета//Экономика промышленности/Russian Journal of Industrial Economics. – 2018. – Т. 11. – №. 1. – С. 11-19.
46. Тушавин В. А. Производственная система как интегрированная система менеджмента качества: роль информационных технологий /Тушавин В. А//Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. – 2014. – №. 12. – С. 54-59.

47. Тушавин В. А. Кайдзен и Scrum проекты как инструмент организационного научения в ИТ-компании /Тушавин В. А//Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент». – 2014. – №. 2. – С. 27.
48. Яшин Н. С., Попова Л. Ф., Бочарова С. В. Развитие методологии анализа результативности системы менеджмента качества промышленных предприятий / Н. С. Яшин, Л. Ф. Попова, С. В. Бочарова //Вестник Саратовского государственного социально-экономического университета. – 2016. – №. 4 (63). – С. 51-56.
49. Ahmad, W., Khan, S. A., Islam, M. M., Kim, J. M. A reliable technique for remaining useful life estimation of rolling element bearings using dynamic regression models / W. Ahmad, S. A. Khan, M. M. Islam, J. M. Kim//Reliability Engineering & System Safety. – 2019. – Т. 184. – С. 67-76.
50. Aktar Demirtas E., Ayva O., Buruk Y. A case study in mixture design: Multi response optimization of glaze formulation/ Demirtas E. Aktar, O. Ayva, Y. Buruk //Quality Engineering. – 2015. – Т. 27. – №. 2. – С. 186-195.
51. Akteke-Ozturk B., Koksals G., Weber G. W. Nonconvex optimization of desirability functions/B. Akteke-Ozturk, G. Koksals, G. W. Weber//Quality Engineering. – 2018. – Т. 30. – №. 2. – С. 293-310.
52. Alfares H. K., Khursheed S. N., Noman S. M. Integrating quality and maintenance decisions in a production-inventory model for deteriorating items / H. K. Alfares, S. N. Khursheed, S. M. Noman//International Journal of Production Research. – 2005. – Т. 43. – №. 5. – С. 899-911.
53. Antony, J., Sony, M., Furterer, S., McDermott, O., & Pepper, M. Quality 4.0 and its impact on organizational performance: an integrative viewpoint / J.Antony, M. Sony, S. Furterer, O.McDermott, & M.Pepper//The TQM Journal. – 2022. – Т. 34. – №. 6. – С. 2069-2084.
54. Bahria N. et al. Integrated production, statistical process control, and maintenance policy for unreliable manufacturing systems / N. Bahria, A. Chelbi, H.

- Bouchriha, I. H. Dridi//International Journal of Production Research. – 2019. – T. 57. – №. 8. – C. 2548-2570.
55. Bahria N. et al. Maintenance and quality control integrated strategy for manufacturing systems / N. Bahria, A. Chelbi, H. Bouchriha, I. H. Dridi //European Journal of Industrial Engineering. – 2018. – T. 12. – №. 3. – C. 307-331.
56. Baraldi A., Blonda P. A survey of fuzzy clustering algorithms for pattern recognition. I /A. Baraldi, P. Blonda//IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics). – 1999. – T. 29. – №. 6. – C. 778-785.
57. Bezdek J. C., Bezdek J. C. Objective function clustering / J. C. Bezdek, J. C. Bezdek//Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms. – 1981. – C. 43-93.
58. Bhattacharyya S. K., Cheluyan A. S. Optimization of a subsea production system for cost and reliability using its fault tree model / S. K. Bhattacharyya, A. S. Cheluyan //Reliability Engineering & System Safety. – 2019. – T. 185. – C. 213-219.
59. Bouslah B., Gharbi A., Pellerin R. Joint production, quality and maintenance control of a two-machine line subject to operation-dependent and quality-dependent failures /B. Bouslah, A. Gharbi, R. Pellerin//International Journal of Production Economics. – 2018. – T. 195. – C. 210-226.
60. Burachik R. S., Rizvi M. M. On weak and strong Kuhn–Tucker conditions for smooth multiobjective optimization /Burachik R. S., Rizvi M. M//Journal of Optimization Theory and Applications. – 2012. – T. 155. – C. 477-491.
61. Castelletti A., Lotov A. V., Soncini-Sessa R. Visualization-based multi-objective improvement of environmental decision-making using linearization of response surfaces /A. Castelletti, A. V. Lotov, R. Soncini-Sessa//Environmental Modelling & Software. – 2010. – T. 25. – №. 12. – C. 1552-1564.
62. Čermáková M., Bris P. Managing the costs of quality in a Czech manufacturing company /M. Čermáková,P. Bris//Scientific papers of the University of Pardubice. Series D, Faculty of Economics and Administration. 41/2017. – 2017.

63. Cheng G. Q., Zhou B. H., Li L. Integrated production, quality control and condition-based maintenance for imperfect production systems/ Cheng G. Q., Zhou B. H., Li L//Reliability Engineering & System Safety. – 2018. – T. 175. – C. 251-264.
64. Chiarini A. Industry 4.0, quality management and TQM world. A systematic literature review and a proposed agenda for further research/ Chiarini A//The TQM Journal. – 2020. – T. 32. – №. 4. – C. 603-616.
65. Clerc R., Oumouni M., Schoefs F. SCAP-1D: A Spatial Correlation Assessment Procedure from unidimensional discrete data/Clerc R., Oumouni M., Schoefs F //Reliability Engineering & System Safety. – 2019. – T. 191. – C. 106498.
66. Degtyareva N, Yakovlev R 2015 Approaches for selection and assessment of supplier company Bulletin of Volzhsky University after V. N. Tatishchev 33 pp 100–105
67. Dempe S. Foundations of bilevel programming. – Springer Science & Business Media, 2002.
68. Durakbasa N. M., Bauer J., Poszvek G. Advanced metrology and intelligent quality automation for industry 4.0-based precision manufacturing systems / Durakbasa N. M., Bauer J., Poszvek G//Solid state phenomena. – 2017. – T. 261. – C. 432-439.
69. Ecker, Joseph G., Kouada I. A. "Finding all efficient extreme points for multiple objective linear programs/Ecker, Joseph G., Kouada I. A//Mathematical programming 14 (1978): 249-261.
70. Epprecht E. K., Aparisi F., Ruiz O. Optimum variable-dimension EWMA chart for multivariate statistical process control / Epprecht E. K., Aparisi F., Ruiz O //Quality Engineering. – 2018. – T. 30. – №. 2. – C. 268-282.
71. Farahani A., Tohidi H., Shoja A. An integrated optimization of quality control chart parameters and preventive maintenance using Markov chain / Farahani A., Tohidi H., Shoja A//Advances in production engineering & management. – 2019. – T. 14. – №. 1.

72. Farahani B. V. et al. A digital image correlation analysis on a sheet AA6061-T6 bi-failure specimen to predict static failure /Farahani B. V. et al.//Engineering Failure Analysis. – 2018. – T. 90. – C. 179-196.
73. Ferrario E., Pedroni N., Zio E. Evaluation of the robustness of critical infrastructures by Hierarchical Graph representation, clustering and Monte Carlo simulation / Ferrario E., Pedroni N., Zio E.//Reliability Engineering & System Safety. – 2016. – T. 155. – C. 78-96.
74. Frej E. A., Ekel P., de Almeida A. T. A benefit-to-cost ratio based approach for portfolio selection under multiple criteria with incomplete preference information / Frej E. A., Ekel P., de Almeida A. T.//Information sciences. – 2021. – T. 545. – C. 487-498.
75. Fülöp J. On the equivalence between a linear bilevel programming problem and linear optimization over the efficient set / Fülöp J.//Techn. Rep. WP. – 1993. – C. 93-1.
76. G. Zhang, J. Lu, and Y. Gao, Multi-level decision-making. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015, 377 p.
77. Glackin J., Ecker J. G., Kupferschmid M. Solving bilevel linear programs using multiple objective linear programming /Glackin J., Ecker J. G., Kupferschmid M.//Journal of optimization theory and applications. – 2009. – T. 140. – C. 197-212.
78. Godina R., Matias J. C. O. Quality control in the context of industry 4.0 / Godina R., Matias J. C. O.//Industrial Engineering and Operations Management II: XXIV IJCIEOM, Lisbon, Portugal, July 18–20 24. – Springer International Publishing, 2019. – C. 177-187.
79. Haeser G., Ramos A. Constraint qualifications for Karush–Kuhn–Tucker conditions in multiobjective optimization /Haeser G., Ramos A.//Journal of Optimization Theory and Applications. – 2020. – T. 187. – C. 469-487.
80. Hoppner F. Fuzzy cluster analysis: methods for classification, data analysis and image recognition. – John Wiley, 1999.
81. Jeon J., Sohn S. Y. Product failure pattern analysis from warranty data using association rule and Weibull regression analysis: A case study / Jeon J., Sohn S. Y.//Reliability Engineering & System Safety. – 2015. – T. 133. – C. 176-183.

82. Jin H. et al. Linguistic spherical fuzzy aggregation operators and their applications in multi-attribute decision making problems / Jin H. et al//Mathematics. – 2019. – T. 7. – №. 5. – C. 413.
83. Kim J. H. Further improvement of Jensen inequality and application to stability of time-delayed systems / Kim J. H//Automatica. – 2016. – T. 64. – C. 121-125.
84. Korshunov G. I., Polyakov S. L. Creation of cyber-physical systems based on basic structures in conditions of uncertainty / Korshunov G. I., Polyakov S. L//Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – T. 1399. – №. 2. – C. 022034.
85. Korshunov G. I., Smirnov V. A., Milova V. M. Multi-criteria fuzzy model for system technical condition estimation at the life cycle stages /Korshunov G. I., Smirnov V. A., Milova V. M//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2019. – T. 537. – №. 4. – C. 042019.
86. Korshunov G., Smirnov V. Frolova, E., & Nazarevich S. Fuzzy models and system technical condition estimation criteria / Korshunov G., Smirnov V. Frolova, E., & Nazarevich S//Fourth International Congress on Information and Communication Technology: ICICT 2019, London, Volume 1. – Springer Singapore, 2020. – C. 179-189.
87. Korshunov G. I., Polyakov S. L. Creation of cyber-physical systems based on basic structures in conditions of uncertainty /Korshunov G. I., Polyakov S. L //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – T. 1399. – №. 2. – C. 022034.
88. Kumar P., Goel P. Product quality optimization using fuzzy set concepts: A case study / Kumar P., Goel P//Quality Engineering. – 2002. – T. 15. – №. 1. – C. 1-8.
89. Li C. et al. A comparison of fuzzy clustering algorithms for bearing fault diagnosis / Li C. et al//Journal of Intelligent & Fuzzy Systems. – 2018. – T. 34. – №. 6. – C. 3565-3580.
90. Li, X., Makis, V., Zhao, Z., Zuo, H., Duan, C., & Zhang, Y. Optimal Bayesian maintenance policy for a gearbox subject to two dependent failure modes / Li, X., Makis, V., Zhao, Z., Zuo, H., Duan, C., & Zhang, Y//Quality and Reliability Engineering International. – 2019. – T. 35. – №. 2. – C. 659-676.

91. Liu, Y. Y., Xu, L. L., Zhou, S. J., Yang, L., Li, Y. Q., & Feng, D. D. Identification of major power quality disturbance sources in regional grid based on monitoring data correlation analysis / Liu, Y. Y., Xu, L. L., Zhou, S. J., Yang, L., Li, Y. Q., & Feng, D. D//2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON). – IEEE, 2018. – C. 4257-4263.
92. Lobanov A.S. The basic concepts of qualimetry / Lobanov A.S// Scientific and Technical Information Processing. –2013. –T. 40. –№ 2. –C. 72-82.
93. Lotov A. V., Miettinen K. Visualizing the Pareto frontier /Lotov A. V., Miettinen K//Multiobjective optimization: interactive and evolutionary approaches. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. – C. 213-243.
94. Milovančević, M. D., Anđelković, B., Stefanović-Marinović, J., & Vračar, L. Application of embedded condition monitoring systems in pallet industry / Milovančević, M. D., Anđelković, B., Stefanović-Marinović, J., & Vračar, L//Journal of Applied Engineering Science. – 2015. – T. 13. – №. 2. – C. 71-78.
95. Noghin V. D. Reducing the Pareto set based on set-point information / Noghin V. D//Scientific and Technical Information Processing. – 2011. – T. 38. – №. 6. – C. 435-439.
96. Noghin V. D. What is the relative importance of criteria and how to use it in MCDM / Noghin V. D//Multiple criteria decision making in the new millennium. – Springer, Berlin, Heidelberg, –2001. – C. 59-68.
97. Noghin V. D. What is the relative importance of criteria and how to use it in MCDM / Noghin V. D//Multiple Criteria Decision Making in the New Millennium: Proceedings of the Fifteenth International Conference on Multiple Criteria Decision Making (MCDM) Ankara, Turkey, July 10–14, 2000. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2001. – C. 59-68.
98. Noghin V. D. Reducing the Pareto set based on set-point information / Noghin V. D //Scientific and Technical Information Processing. – 2011. – T. 38. – №. 6. – C. 435-439.

99. Oblak L., Kuzman M. K., Grošelj P. A fuzzy logic-based model for analysis and evaluation of services in a Manufacturing company / Oblak L., Kuzman M. K., Grošelj P. // *Journal of Applied Engineering Science*. – 2017. – T. 15. – №. 3.
100. Pando V., San-José L. A., Sicilia J. A new approach to maximize the profit/cost ratio in a stock-dependent demand inventory model / Pando V., San-José L. A., Sicilia J. // *Computers & Operations Research*. – 2020. – T. 120. – C. 104940.
101. Perry III, D. A., Olson, B., Blessner, P., & Blackburn, T. D. Evaluating the systems engineering problem management process for industrial manufacturing problems / Perry III, D. A., Olson, B., Blessner, P., & Blackburn, T. D. // *Systems Engineering*. – 2016. – T. 19. – №. 2. – C. 133-145.
102. Pipiyay G., Chernenkaya L. Modern Methods of Searching for the Optimal Assessment of Product Quality / Pipiyay G., Chernenkaya L. // *Advances in Automation IV: Proceedings of the International Russian Automation Conference, RusAutoCon2022, September 4-10, 2022, Sochi, Russia*. – Cham: Springer International Publishing, 2023. – C. 94-104
103. Pipiyay G. T., Chernenkaya L. V., Mager V. E. Solution of the Decentralized Task of Evaluating and Improving Product Quality / Pipiyay G. T., Chernenkaya L. V., Mager V. E. // *International Scientific Conference "Far East Con" (ISCFEC 2020)*. – Atlantis Press, 2020. – C. 2840-2846.
104. Pipiyay G. T., Chernenkaya L. V., Mager V. E. Fuzzy inference system for a bilevel quality assessment optimization model / Pipiyay G. T., Chernenkaya L. V., Mager V. E. // *International Journal of Productivity and Quality Management*. – 2021. – T. 1. – №. 1
105. Pipiyay G. T., Chernenkaya L. V., Mager V. E. Solution of the Decentralized Task of Evaluating and Improving Product Quality / Pipiyay, G. T., Chernenkaya, L. V., & Mager, V. E. // *International Scientific Conference "Far East Con" (ISCFEC 2020)*. – Atlantis Press, 2020. – C. 2840-2846.
106. Pipiyay G., Chernenkaya L., Mager V. Fuzzy formalization of individual quality criteria for quality level evaluation by using two-level optimization model / Pipiyay G., Chernenkaya L., Mager V. // *Proceedings of the 6th International Conference on*

Industrial Engineering (ICIE 2020) Volume II 6. – Springer International Publishing, 2021. – C. 557-565.

107. Pipiya G. T., Chernenkaya L. V. Optimization and Decision-Making Strategies with Respect to Product Quality in the Presence of Several Objective Functions / Pipiya G. T., Chernenkaya L. V. // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2022. – T. 51. – №. 7. – C. 689-701.

108. Pipiyay, G. T. Quality Indicators of Instrumentation Products According to the "quality 4.0" Concept / G. T. Pipiyay, L. V. Chernenkaya, V. E. Mager // Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2021, Moscow, 26–28 января 2021 года. – Moscow, 2021. – P. 1032-1036.

109. Ruspini E. H., Bezdek J. C., Keller J. M. Fuzzy clustering: A historical perspective / Ruspini E. H., Bezdek J. C., Keller J. M. // IEEE Computational Intelligence Magazine. – 2019. – T. 14. – №. 1. – C. 45-55.

110. Sader S., Husti I., Daroczi M. Total quality management in the context of Industry 4.0 / Sader S., Husti I., Daróczi M. // Synergy International Conferences-Engineering, Agriculture and Green Industry Innovation. – 2017. – №. June 2018. – C. 9001.

111. Saraswat S. K., Digalwar A. K. Evaluation of energy alternatives for sustainable development of energy sector in India: An integrated Shannon's entropy fuzzy multi-criteria decision approach / Saraswat S. K., Digalwar A. K. // Renewable Energy. – 2021. – T. 171. – C. 58-74.

112. Sony M., Antony J., Douglas J. A. Essential ingredients for the implementation of Quality 4.0: a narrative review of literature and future directions for research / Sony M., Antony J., Douglas J. A. // The TQM Journal. – 2020. – T. 32. – №. 4. – C. 779-793.

113. Tadic, D., Gumus, A. T., Arsovski, S., Aleksic, A., & Stefanovic, M. An evaluation of quality goals by using fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methodology / Tadic, D., Gumus, A. T., Arsovski, S., Aleksic, A., & Stefanovic, M. // Journal of Intelligent & Fuzzy Systems. – 2013. – T. 25. – №. 3. – C. 547-556.

114. Tasiyas K. A., Nenes G. Optimization of a fully adaptive quality and maintenance model in the presence of multiple location and scale quality shifts / Tasiyas K. A., Nenes G//Applied Mathematical Modelling. – 2018. – T. 54. – C. 64-81.
115. Wen, J., Wei, X., Liu, H., Rong, Y. Fuzzy Cluster Analysis on Influencing Factors of College Student Scores / Wen, J., Wei, X., Liu, H., Rong, Y//Revue d'Intelligence Artificielle. – 2020. – T. 34. – №. 5.
116. Woodall W. H., Montgomery D. C. Some current directions in the theory and application of statistical process monitoring / Woodall W. H., Montgomery D. C//Journal of Quality Technology. – 2014. – T. 46. – №. 1. – C. 78-94.
117. Xie X., Schenkendorf R., Krewer U. Efficient sensitivity analysis and interpretation of parameter correlations in chemical engineering / Xie X., Schenkendorf R., Krewer U//Reliability Engineering & System Safety. – 2019. – T. 187. – C. 159-173.
118. Yanar T., Kocaman S., Gokceoglu C. Use of Mamdani fuzzy algorithm for multi-hazard susceptibility assessment in a developing urban settlement (Mamak, Ankara, Turkey) / Yanar T., Kocaman S., Gokceoglu C//ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2020. – T. 9. – №. 2. – C. 114.
119. Zhang, G., Lu, J., Liu, A., Song, Y. Data-driven decision support under concept drift in streamed big data / Zhang, G., Lu, J., Liu, A., Song, Y. //Complex & intelligent systems. – 2020. – T. 6. – №. 1. – C. 157-163.
120. Zhang R., Tao J., Gao F. A new approach of Takagi–Sugeno fuzzy modeling using an improved genetic algorithm optimization for oxygen content in a coke furnace / Zhang R., Tao J., Gao F//Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2016. – T. 55. – №. 22. – C. 6465-6474.
121. Zonnenshain A., Kenett R. S. Quality 4.0—the challenging future of quality engineering /Zonnenshain A., Kenett R. S//Quality Engineering. – 2020. – T. 32. – №. 4. – C. 614-626.
122. Zorkaltsev V. I., Mokryi I. V. Interior point algorithms in linear optimization / Zorkaltsev V. I., Mokryi I. V//Journal of Applied and Industrial Mathematics. – 2018. – T. 12. – C. 191-199.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Код программы решения задачи оценки качества продукции на основе двухуровневой линейной оптимизации.

```

=====
from pyomo.environ import *
from pao.pyomo import *
import numpy as np
# Quality function model with variables x-----
M = ConcreteModel()
M.x = Var(bounds=(0, None), domain=Reals)
# Provider management function model with variables y -----
-----
M.L = SubModel(fixed=M.x)
M.L.y = Var(bounds=(0, None), domain=Reals)
# Model of the function "Quality Costs" with variables z -----
-----
M.L1 = SubModel(fixed=M.x)
M.L1.z = Var(bounds=(0, None), domain=Reals)
# Manufacturability function model with variables t -----
-----
M.L2 = SubModel(fixed=M.x)
M.L2.t = Var(bounds=(0, None), domain=Reals)

# Input information for the quality function -----
-----
N1 = 8 # Number of quality indicators
N2 = 15 # Number of components in the product
A = np.ones((N2,N1)) # Moving from the matrix to the list
N3 = int(input('Please enter number of active blocks')) # Number of active blocks
A[N3:15]=0
MN = list(A) # Quality metrics matrix
for i in range(N3): # Condition for transition from the matrix to the list
    MN[i] = [float(i) for i in input('Please enter numerical values for each quality indicator for components in
the product').split()]
MM=np.array(MN)
# Input information for the "Manage Suppliers" function -----
-----
N11 = 3 # Number of quality indicators
N21 = 20 # Number of suppliers
A11 = np.ones((N21,N11)) # Moving from the matrix to the list
N31 = int(input('Please enter number of active blocks')) # Number of active blocks
A1[N3:20]=0
MN1 = list(A1) # Quality metrics matrix
for i in range(N31): # Condition for transition from the matrix to the list
    MN1[i] = [float(i) for i in input('Please enter numerical values for each quality indicator for each supplier
').split()]
MM1=np.array(MN1)
# Input information for the function "Cost of quality" -----
-----
N12 = 3 # Number of quality indicators
N22 = 6 # Quality cost categories
A12 = np.ones((N22,N12)) # Moving from the matrix to the list
N32 = int(input('Please enter number of active blocks')) # Number of active blocks
A2[N3:6]=0
MN2 = list(A2) # Quality metrics matrix
for i in range(N32): # Condition for transition from the matrix to the list

```

```

MN2[i] = [float(i) for i in input('Please enter numerical values for each quality indicator for quality cost
categories ').split()]
MM2=np.array(MN2)
# Input information for manufacturability function -----
-
N13 = 4 # Number of quality indicators
N23 = 20 # Number of technological operations
A13 = np.ones((N23,N13)) # Moving from the matrix to the list
N33 = int(input('Please enter number of active blocks')) # Number of active blocks
A3[N3:20]=0
MN3 = list(A3) # Quality metrics matrix
for i in range(N33): # Condition for transition from the matrix to the list
    MN3[i] = [float(i) for i in input('Please enter numerical values for each quality indicator for number of
technological operations ').split()]
MM3=np.array(MN3)
# Constraint Conditions for the Quality Function-----
-----
MM=np.array(MN)
n = []
for i in range(len(MM)):
    if len(MM[i])==(sum(MM[i])):
        n.append(sum(MM[i]))
    elif sum(MM[i])==1:
        n.append(sum(MM[i]))
    else:
        n.append(sum(MM[i]))
m=np.array(MM)
for i in range(len(m)):
    for j in range(len(m[i])):
        if m[i,j]==1 or m[i,j]>=1 or m[i,j]>0:
            m[i,j]=1
        else:
            m[i,j]=0
N = []
for i in range(len(m)):
    if len(m[i])==(sum(m[i])):
        N.append(sum(m[i]))
    elif sum(MM[i])==1:
        N.append(sum(m[i]))
    else:
        N.append(sum(m[i]))
c1=np.array(n)
c2=np.array(N)
C=[]
for i in range(len(c1)):
    if c1[i]>0 and c2[i]>0:
        C.append(c1[i]/c2[i])
    else:
        C.append(0)
for i in range(len(m)):
    if 0<C[i]<1:
        MM[i]=MM[i]*-1
        C[i]=C[i]*-1
    else:
        MM[i]=MM[i]
        C[i]=C[i]

```

Restriction Conditions for Manage Vendors-----

```

-----
MM1=np.array(MN1)
n1 = []
for i in range(len(MM1)):
    if len(MM1[i])==sum(MM1[i]):
        n1.append(sum(MM1[i]))
    elif sum(MM1[i])==1:
        n1.append(sum(MM1[i]))
    else:
        n1.append(sum(MM1[i]))
m1=np.array(MM1)
for i in range(len(m1)):
    for j in range(len(m1[i])):
        if m1[i,j]==1 or m1[i,j]>=1 or m1[i,j]>0:
            m1[i,j]=1
        else:
            m1[i,j]=0
N1 = []
for i in range(len(m1)):
    if len(m1[i])==sum(m1[i]):
        N1.append(sum(m1[i]))
    elif sum(MM1[i])==1:
        N1.append(sum(m1[i]))
    else:
        N1.append(sum(m1[i]))
c11=np.array(n1)
c21=np.array(N1)
C1=[]
for i in range(len(c11)):
    if c11[i]>0 and c21[i]>0:
        C1.append(c11[i]/c21[i])
    else:
        C1.append(0)
for i in range(len(m1)):
    if 0<C1[i]<1:
        MM1[i]=MM1[i]*-1
        C1[i]=C1[i]*-1
    else:
        MM1[i]=MM1[i]
        C1[i]=C1[i]

```

Constraint Conditions for Quality Cost-----

```

MM2=np.array(MN2)
n2 = []
for i in range(len(MM2)):
    if len(MM2[i])==sum(MM2[i]):
        n2.append(sum(MM2[i]))
    elif sum(MM2[i])==1:
        n2.append(sum(MM2[i]))
    else:
        n2.append(sum(MM2[i]))
m2=np.array(MM2)
for i in range(len(m2)):
    for j in range(len(m2[i])):
        if m2[i,j]==1 or m2[i,j]>=1 or m2[i,j]>0:
            m2[i,j]=1
        else:

```



```

    m2[i,j]=0
N2 = []
for i in range(len(m2)):
    if len(m2[i])==sum(m2[i]):
        N2.append(sum(m2[i]))
    elif sum(MM2[i])==1:
        N2.append(sum(m2[i]))
    else:
        N2.append(sum(m2[i]))
c12=np.array(n2)
c22=np.array(N2)
C2=[]
for i in range(len(c12)):
    if c12[i]>0 and c22[i]>0:
        C2.append(c12[i]/c22[i])
    else:
        C2.append(0)
for i in range(len(m2)):
    if 0<C2[i]<1:
        MM2[i]=MM2[i]*-1
        C2[i]=C2[i]*-1
    else:
        MM2[i]=MM2[i]
        C2[i]=C2[i]
# Constraint Conditions for the Manufacturability Function -----
-----
MM3=np.array(MN3)
n3 = []
for i in range(len(MM3)):
    if len(MM3[i])==sum(MM3[i]):
        n3.append(sum(MM3[i]))
    elif sum(MM3[i])==1:
        n3.append(sum(MM3[i]))
    else:
        n3.append(sum(MM3[i]))
m3=np.array(MM3)
for i in range(len(m3)):
    for j in range(len(m3[i])):
        if m3[i,j]==1 or m3[i,j]>=1 or m3[i,j]>0:
            m3[i,j]=1
        else:
            m3[i,j]=0
N3 = []
for i in range(len(m3)):
    if len(m3[i])==sum(m3[i]):
        N3.append(sum(m3[i]))
    elif sum(MM3[i])==1:
        N3.append(sum(m3[i]))
    else:
        N3.append(sum(m3[i]))
c13=np.array(n3)
c23=np.array(N3)
C3=[]
for i in range(len(c13)):
    if c13[i]>0 and c23[i]>0:
        C3.append(c13[i]/c23[i])
    else:

```

```

C3.append(0)
for i in range(len(m3)):
    if 0<C3[i]<1:
        MM3[i]=MM3[i]*-1
        C3[i]=C3[i]*-1
    else:
        MM3[i]=MM3[i]
        C3[i]=C3[i]

# Objective functions -----
M.obj = Objective(expr=M.model().x - M.model().L.y - M.model().L.y + M.model().L1.z + M.model().L1.z
+ M.model().L2.t + M.model().L2.t + M.model().L2.t, sense=minimize)# Objective function Q(x,y,z,t)
M.L.obj = Objective(expr = M.model().x + M.model().L.y + M.model().L.y , sense=minimize) # Objective
function F1(x,y)
M.L1.obj = Objective(expr= (1-M.model().x) + M.model().L1.z + M.model().L1.z, sense=minimize) #
Objective function F2(x,z)
M.L2.obj = Objective(expr=(1-M.model().x) + (1-M.model().L2.t) + (1-M.model().L2.t) + M.model().L2.t,
sense=minimize) # Objective function F3(x,t)
# Constraint system for objective function Q(x,y,z,t) -----
---
M.c1 = Constraint(expr=MM[0,0]*M.model().x - MM[0,1]*M.model().L.y - MM[0,2]*M.model().L.y +
MM[0,3]*M.model().L1.z + MM[0,4]*M.model().L1.z + MM[0,5]*M.model().L2.t +
MM[0,6]*M.model().L2.t + MM[0,7]*M.model().L2.t <= C[0])
M.c2 = Constraint(expr=MM[1,0]*M.model().x - MM[1,1]*M.model().L.y - MM[1,2]*M.model().L.y +
MM[1,3]*M.model().L1.z + MM[1,4]*M.model().L1.z + MM[1,5]*M.model().L2.t +
MM[1,6]*M.model().L2.t + MM[1,7]*M.model().L2.t <= C[1])
M.c3 = Constraint(expr=MM[2,0]*M.model().x - MM[2,1]*M.model().L.y - MM[2,2]*M.model().L.y +
MM[2,3]*M.model().L1.z + MM[2,4]*M.model().L1.z + MM[2,5]*M.model().L2.t +
MM[2,6]*M.model().L2.t + MM[2,7]*M.model().L2.t <= C[2])
M.c4 = Constraint(expr=MM[3,0]*M.model().x - MM[3,1]*M.model().L.y - MM[3,2]*M.model().L.y +
MM[3,3]*M.model().L1.z + MM[3,4]*M.model().L1.z + MM[3,5]*M.model().L2.t +
MM[3,6]*M.model().L2.t + MM[3,7]*M.model().L2.t <= C[3])
M.c5 = Constraint(expr=MM[4,0]*M.model().x - MM[4,1]*M.model().L.y - MM[4,2]*M.model().L.y +
MM[4,3]*M.model().L1.z + MM[4,4]*M.model().L1.z + MM[4,5]*M.model().L2.t +
MM[4,6]*M.model().L2.t + MM[4,7]*M.model().L2.t <= C[4])
M.c6 = Constraint(expr=MM[5,0]*M.model().x - MM[5,1]*M.model().L.y - MM[5,2]*M.model().L.y +
MM[5,3]*M.model().L1.z + MM[5,4]*M.model().L1.z + MM[5,5]*M.model().L2.t +
MM[5,6]*M.model().L2.t + MM[5,7]*M.model().L2.t <= C[5])
M.c7 = Constraint(expr=MM[6,0]*M.model().x - MM[6,1]*M.model().L.y - MM[6,2]*M.model().L.y +
MM[6,3]*M.model().L1.z + MM[6,4]*M.model().L1.z + MM[6,5]*M.model().L2.t +
MM[6,6]*M.model().L2.t + MM[6,7]*M.model().L2.t <= C[6])
M.c8 = Constraint(expr=MM[7,0]*M.model().x - MM[7,1]*M.model().L.y - MM[7,2]*M.model().L.y +
MM[7,3]*M.model().L1.z + MM[7,4]*M.model().L1.z + MM[7,5]*M.model().L2.t +
MM[7,6]*M.model().L2.t + MM[7,7]*M.model().L2.t <= C[7])
M.c9 = Constraint(expr=MM[8,0]*M.model().x - MM[8,1]*M.model().L.y - MM[8,2]*M.model().L.y +
MM[8,3]*M.model().L1.z + MM[8,4]*M.model().L1.z + MM[8,5]*M.model().L2.t +
MM[8,6]*M.model().L2.t + MM[8,7]*M.model().L2.t <= C[8])
M.c10 = Constraint(expr=MM[9,0]*M.model().x - MM[9,1]*M.model().L.y - MM[9,2]*M.model().L.y +
MM[9,3]*M.model().L1.z + MM[9,4]*M.model().L1.z + MM[9,5]*M.model().L2.t +
MM[9,6]*M.model().L2.t + MM[9,7]*M.model().L2.t <= C[9])
M.c11 = Constraint(expr=MM[10,0]*M.model().x - MM[10,1]*M.model().L.y - MM[10,2]*M.model().L.y +
MM[10,3]*M.model().L1.z + MM[10,4]*M.model().L1.z + MM[10,5]*M.model().L2.t +
MM[10,6]*M.model().L2.t + MM[10,7]*M.model().L2.t <= C[10])
M.c12 = Constraint(expr=MM[11,0]*M.model().x - MM[11,1]*M.model().L.y - MM[11,2]*M.model().L.y +
MM[11,3]*M.model().L1.z + MM[11,4]*M.model().L1.z + MM[11,5]*M.model().L2.t +
MM[11,6]*M.model().L2.t + MM[11,7]*M.model().L2.t <= C[11])

```

M.c13 = Constraint(expr=MM[12,0]*M.model().x - MM[12,1]*M.model().L.y - MM[12,2]*M.model().L.y + MM[12,3]*M.model().L1.z + MM[12,4]*M.model().L1.z + MM[12,5]*M.model().L2.t + MM[12,6]*M.model().L2.t + MM[12,7]*M.model().L2.t <= C[12])

M.c14 = Constraint(expr=MM[13,0]*M.model().x - MM[13,1]*M.model().L.y - MM[13,2]*M.model().L.y + MM[13,3]*M.model().L1.z + MM[13,4]*M.model().L1.z + MM[13,5]*M.model().L2.t + MM[13,6]*M.model().L2.t + MM[13,7]*M.model().L2.t <= C[13])

M.c15 = Constraint(expr=MM[14,0]*M.model().x - MM[14,1]*M.model().L.y - MM[14,2]*M.model().L.y + MM[14,3]*M.model().L1.z + MM[14,4]*M.model().L1.z + MM[14,5]*M.model().L2.t + MM[14,6]*M.model().L2.t + MM[14,7]*M.model().L2.t <= C[14])

Constraint system for objective function F1(x,y) -----

-

M.L.c1 = Constraint(expr=MM1[0,0]*M.model().x + MM1[0,1]*M.model().L.y + MM1[0,2]*M.model().L.y <= C1[0])

M.L.c2 = Constraint(expr=MM1[1,0]*M.model().x + MM1[1,1]*M.model().L.y + MM1[1,2]*M.model().L.y <= C1[1])

M.L.c3 = Constraint(expr=MM1[2,0]*M.model().x + MM1[2,1]*M.model().L.y + MM1[2,2]*M.model().L.y <= C1[2])

M.L.c4 = Constraint(expr=MM1[3,0]*M.model().x + MM1[3,1]*M.model().L.y + MM1[3,2]*M.model().L.y <= C1[3])

M.L.c5 = Constraint(expr=MM1[4,0]*M.model().x + MM1[4,1]*M.model().L.y + MM1[4,2]*M.model().L.y <= C1[4])

M.L.c6 = Constraint(expr=MM1[5,0]*M.model().x + MM1[5,1]*M.model().L.y + MM1[5,2]*M.model().L.y <= C1[5])

M.L.c7 = Constraint(expr=MM1[6,0]*M.model().x + MM1[6,1]*M.model().L.y + MM1[6,2]*M.model().L.y <= C1[6])

M.L.c8 = Constraint(expr=MM1[7,0]*M.model().x + MM1[7,1]*M.model().L.y + MM1[7,2]*M.model().L.y <= C1[7])

M.L.c9 = Constraint(expr=MM1[8,0]*M.model().x + MM1[8,1]*M.model().L.y + MM1[8,2]*M.model().L.y <= C1[8])

M.L.c10 = Constraint(expr=MM1[9,0]*M.model().x + MM1[9,1]*M.model().L.y + MM1[9,2]*M.model().L.y <= C1[9])

M.L.c11 = Constraint(expr=MM1[10,0]*M.model().x + MM1[10,1]*M.model().L.y + MM1[10,2]*M.model().L.y <= C1[10])

M.L.c12 = Constraint(expr=MM1[11,0]*M.model().x + MM1[11,1]*M.model().L.y + MM1[11,2]*M.model().L.y <= C1[11])

M.L.c13 = Constraint(expr=MM1[12,0]*M.model().x + MM1[12,1]*M.model().L.y + MM1[12,2]*M.model().L.y <= C1[12])

M.L.c14 = Constraint(expr=MM1[13,0]*M.model().x + MM1[13,1]*M.model().L.y + MM1[13,2]*M.model().L.y <= C1[13])

M.L.c15 = Constraint(expr=MM1[14,0]*M.model().x + MM1[14,1]*M.model().L.y + MM1[14,2]*M.model().L.y <= C1[14])

M.L.c16 = Constraint(expr=MM1[15,0]*M.model().x + MM1[15,1]*M.model().L.y + MM1[15,2]*M.model().L.y <= C1[15])

M.L.c17 = Constraint(expr=MM1[16,0]*M.model().x + MM1[16,1]*M.model().L.y + MM1[16,2]*M.model().L.y <= C1[16])

M.L.c18 = Constraint(expr=MM1[17,0]*M.model().x + MM1[17,1]*M.model().L.y + MM1[17,2]*M.model().L.y <= C1[17])

M.L.c19 = Constraint(expr=MM1[18,0]*M.model().x + MM1[18,1]*M.model().L.y + MM1[18,2]*M.model().L.y <= C1[18])

M.L.c20 = Constraint(expr=MM1[19,0]*M.model().x + MM1[19,1]*M.model().L.y + MM1[19,2]*M.model().L.y <= C1[19])

Constraint system for objective function F2(x,z) -----

-

M.L1.c1 = Constraint(expr=MM2[0,0]*M.model().x + M2[0,1]*M.model().L1.z + MM2[0,3]*M.model().L1.z <= C2[0])

M.L1.c2 = Constraint(expr=MM2[1,0]*M.model().x + MM2[1,1]*M.model().L1.z + MM2[1,3]*M.model().L1.z <= C2[1])

```

M.L1.c3 = Constraint(expr=MM2[2,0]*M.model().x + MM2[2,1]*M.model().L1.z +
MM2[2,3]*M.model().L1.z <= C2[2])
M.L1.c4 = Constraint(expr=MM2[3,0]*M.model().x + MM2[3,1]*M.model().L1.z +
MM2[3,3]*M.model().L1.z <= C2[3])
M.L1.c5 = Constraint(expr=MM2[4,0]*M.model().x + MM2[4,1]*M.model().L1.z +
MM2[4,3]*M.model().L1.z <= C2[4])
M.L1.c6 = Constraint(expr=MM2[5,0]*M.model().x + MM2[5,1]*M.model().L1.z +
MM2[5,3]*M.model().L1.z <= C2[5])
# Constraint system for objective function F3(x,t) -----
-
M.L2.c1 = Constraint(expr=MM3[0,0]*M.model().x + MM3[0,1]*M.model().L2.t +
MM3[0,2]*M.model().L2.t + MM3[0,3]*M.model().L2.t <= C3[0])
M.L2.c2 = Constraint(expr=MM3[1,0]*M.model().x + MM3[1,1]*M.model().L2.t +
MM3[1,2]*M.model().L2.t + MM3[1,3]*M.model().L2.t <= C3[1])
M.L2.c3 = Constraint(expr=MM3[2,0]*M.model().x + MM3[2,1]*M.model().L2.t +
MM3[2,2]*M.model().L2.t + MM3[2,3]*M.model().L2.t <= C3[2])
M.L2.c4 = Constraint(expr=MM3[3,0]*M.model().x + MM3[3,1]*M.model().L2.t +
MM3[3,2]*M.model().L2.t + MM3[3,3]*M.model().L2.t <= C3[3])
M.L2.c5 = Constraint(expr=MM3[4,0]*M.model().x + MM3[4,1]*M.model().L2.t +
MM3[4,2]*M.model().L2.t + MM3[4,3]*M.model().L2.t <= C3[4])
M.L2.c6 = Constraint(expr=MM3[5,0]*M.model().x + MM3[5,1]*M.model().L2.t +
MM3[5,2]*M.model().L2.t + MM3[5,3]*M.model().L2.t <= C3[5])
M.L2.c7 = Constraint(expr=MM3[6,0]*M.model().x + MM3[6,1]*M.model().L2.t +
MM3[6,2]*M.model().L2.t + MM3[6,3]*M.model().L2.t <= C3[6])
M.L2.c8 = Constraint(expr=MM3[7,0]*M.model().x + MM3[7,1]*M.model().L2.t +
MM3[7,2]*M.model().L2.t + MM3[7,3]*M.model().L2.t <= C3[7])
M.L2.c9 = Constraint(expr=MM3[8,0]*M.model().x + MM3[8,1]*M.model().L2.t +
MM3[8,2]*M.model().L2.t + MM3[8,3]*M.model().L2.t <= C3[8])
M.L2.c10 = Constraint(expr=MM3[9,0]*M.model().x + MM3[9,1]*M.model().L2.t +
MM3[9,2]*M.model().L2.t + MM3[9,3]*M.model().L2.t <= C3[9])
M.L2.c11 = Constraint(expr=MM3[10,0]*M.model().x + MM3[10,1]*M.model().L2.t +
MM3[10,2]*M.model().L2.t + MM3[10,3]*M.model().L2.t <= C3[10])
M.L2.c12 = Constraint(expr=MM3[11,0]*M.model().x + MM3[11,1]*M.model().L2.t +
MM3[11,2]*M.model().L2.t + MM3[11,3]*M.model().L2.t <= C3[11])
M.L2.c13 = Constraint(expr=MM3[12,0]*M.model().x + MM3[12,1]*M.model().L2.t +
MM3[12,2]*M.model().L2.t + MM3[12,3]*M.model().L2.t <= C3[12])
M.L2.c14 = Constraint(expr=MM3[13,0]*M.model().x + MM3[13,1]*M.model().L2.t +
MM3[13,2]*M.model().L2.t + MM3[13,3]*M.model().L2.t <= C3[13])
M.L2.c15 = Constraint(expr=MM3[14,0]*M.model().x + MM3[14,1]*M.model().L2.t +
MM3[14,2]*M.model().L2.t + MM3[14,3]*M.model().L2.t <= C3[14])
M.L2.c16 = Constraint(expr=MM3[15,0]*M.model().x + MM3[15,1]*M.model().L2.t +
MM3[15,2]*M.model().L2.t + MM3[15,3]*M.model().L2.t <= C3[15])
M.L2.c17 = Constraint(expr=MM3[16,0]*M.model().x + MM3[16,1]*M.model().L2.t +
MM3[16,2]*M.model().L2.t + MM3[16,3]*M.model().L2.t <= C3[16])
M.L2.c18 = Constraint(expr=MM3[17,0]*M.model().x + MM3[17,1]*M.model().L2.t +
MM3[17,2]*M.model().L2.t + MM3[17,3]*M.model().L2.t <= C3[17])
M.L2.c19 = Constraint(expr=MM3[18,0]*M.model().x + MM3[18,1]*M.model().L2.t +
MM3[18,2]*M.model().L2.t + MM3[18,3]*M.model().L2.t <= C3[18])
M.L2.c20 = Constraint(expr=MM3[19,0]*M.model().x + MM3[19,1]*M.model().L2.t +
MM3[19,2]*M.model().L2.t + MM3[19,3]*M.model().L2.t <= C3[19])
solver = Solver('pao.pyomo.FA')
results = solver.solve(M, tee=True)

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Код программы поиска области Парето.

```

import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.optimize import linprog
import numpy as np
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
#----- Система ограничений для функции качества
A1=np.dot([0.13,0.33,0.8,0.21,0.72,0.21],-1)
A2=np.dot([0.6,0.32,0.68,0.2,0.72,0.29],-1)
A3=np.dot([0.91,0.11,1,0.08,0.94,0.05],-1)
A4=np.dot([0,0,1,0,1,0.02],-1)
A5=np.array([1,1,1,1,1,1])
#----- Система ограничений для функции "Затраты на качество"
B1=np.dot([0,0.021,0,0,0,0],-1)
B2=np.dot([0,0.031,0,0,0,0],-1)
B3=np.dot([0,0.546,0,0,0,0],-1)
B4=np.dot([0,0.136,0,0,0,0],-1)
B5=np.dot([0.007,0,0,0,0,0],-1)
B6=np.dot([0.004,0,0,0,0,0],-1)
B7=np.array([1,1,0,0,0,0])
#----- Система ограничений для функции "Управление поставщиками"
C1=np.dot([0.73,0,0.93,0.77,0,0],-1)
C2=np.dot([0.73,0,0,0.79,0,0],-1)
C3=np.dot([0.32,0,0,0.85,0,0],-1)
C4=np.dot([0.38,0,0,0.87,0,0],-1)
C5=np.dot([0.6,0,0.83,0.79,0,0],-1)
C6=np.dot([0.6,0,0,0.96,0,0],-1)
C7=np.dot([0.43,0,0,0.92,0,0],-1)
C8=np.array([1,0,1,1,0,0])
#----- Система ограничений для функции технологичности
D1=np.dot([0.98,0,0,0.93,0.93],-1)
D2=np.dot([0.95,0,0,0.97,0.91],-1)
D3=np.dot([0.87,0,0,0.89,0.85],-1)
D4=np.dot([0.94,0,0,0.91,0.91],-1)
D5=np.dot([1,0,0,0.91,0.91],-1)
D6=np.dot([1,0,0,0.92,0.92],-1)
D7=np.array([1,0,0,0,1,1])
#----- Целевые функции
F1=np.dot([1,1,0,0,0,0],-1) # Функция "Затраты на качество"
F2=np.dot([1,0,1,1,0,0],-1) # Функция "Управление поставщиками"
F3=np.dot([1,0,0,0,1,1],-1) # Функция технологичности
Q=np.dot([1,1,1,1,1,1],1) # Функция качества
lhs_ineq=[A1,A2,A3,A4,A5,B1,B2,B3,B4,B5,B6,B7,C1,C2,C3,C4,C5,C6,C7,C8,D1,D2,D3,D4,D5,D6,D7]
rhs_ineq=[-0.4,-0.47,-0.52,-0.34,6,-0.01,-0.0015,-0.027,-0.068,0.003,0.002,2,-0.81,-0.5,-0.39,-0.41,-0.74,-0.52,-0.45,3,-0.94,-0.94,-0.87,-0.92,-0.95,-0.94,3]
bnd = [(0, 1),(0, 1),(0, 1),(0, 1),(0, 1),(0, 1)]
opt = linprog(c=Q, A_ub=lhs_ineq, b_ub=rhs_ineq,bounds=bnd, method="revised simplex")
f1=0.87*opt.x[0]+0.49*opt.x[1]
f2=0.87*opt.x[0]+0.58*opt.x[2]+0.62*opt.x[3]
f3=0.87*opt.x[0]+0.83*opt.x[4]+0.93*opt.x[5]
QQ=0.87*opt.x[0]+0.49*opt.x[1]+0.58*opt.x[2]+0.62*opt.x[3]+0.83*opt.x[4]+0.93*opt.x[5]
print(QQ,f1,f2,f3)
opt.x

```

**ПРИЛОЖЕНИЕ В. Код программы визуализации области Парето для
решения задачи обеспечения и улучшения качества продукции
приборостроения.**

```
# Алгоритм визуализации области Парето для задачи управления качеством продукции
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.optimize import linprog
import numpy as np
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
l=np.arange(0,2.6,0.025)
def Q(l):
    F11=np.dot([0.87,0.49,0,0,0,0],-1) # Функция "Затраты на качество"
    F21=np.dot([0.87,0,0.58,0.62,0,0],-1) # Функция "Управление поставщиками"
    F31=np.dot([0.87,0,0,0,0.83,0.93],-1) # Функция технологичности
    Q1=np.dot([0.87,0.49,0.58,0.62,0.83,0.93],1) # Функция качества
    Q2=np.dot([0.87,0.49,0.58,0.62,0.83,0.93],1) # Функция качества
    lhs_ineq1 = [F11,F21,F31]
    rhs_ineq1=[-0.95-1,-0.89-1,-0.85-1] # Целевые функции найденные при решении задачи
    многокритериальной оптимизации
    bnd1 = [(0, 1),(0, 1),(0, 1),(0, 1),(0, 1),(0, 1)] # Дополнительные ограничения
    opt1 = linprog(c=Q2, A_ub=lhs_ineq1, b_ub=rhs_ineq1,bounds=bnd1, method="revised
    simplex")
    return opt1.x
x = []
y = []
Q1 = []
F1 = []
F2 = []
F3 = []
y=np.arange(0,104,1)
for i in l:
    x.append(i)
    Q1.append(0.87*Q(i)[0]+0.49*Q(i)[1]+0.58*Q(i)[2]+0.62*Q(i)[3]+0.83*Q(i)[4]+0.93*Q(i)[5])
    F1.append(0.87*Q(i)[0]+0.49*Q(i)[1])
    F2.append(0.87*Q(i)[0]+0.58*Q(i)[2]+0.62*Q(i)[3])
    F3.append(0.87*Q(i)[0]+0.83*Q(i)[4]+0.93*Q(i)[5])
plt.plot(y,Q1)
plt.show()
```

ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Акт внедрения ПАО «Техприбор».



ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ТЕХПРИБОР»

ПАО «Техприбор» 196128, Россия, г. Санкт-Петербург,
ул. Варшавская, д. 5А, тел. (812) 648-85-82,
тел./факс: (812) 648-85-80 e-mail: info@techpribor.ru,
телетайп: 322157 «Стрела» ИНН 7810237177, КПП 781001001

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ПАО «Техприбор»

К.В. Абрамян



«18» 01 2023г

АКТ РЕАЛИЗАЦИИ

результатов диссертационной работы Пипии Георгия Тенгизовича «Управление качеством продукции приборостроения на основе математических методов двухуровневой оптимизации и принятия решений»

Комиссия в составе:

Председатель:

Заместитель генерального директора по качеству – Начальник службы управления качеством и сертификации №85 - Воронов Алексей Викторович

Члены комиссии:

Главный конструктор – кандидат экономических наук - Новиков Андрей Юрьевич

Начальник отдела технического контроля №11 - Ребрий Анатолий Александрович

составила настоящий акт о том, что в ПАО «Техприбор» использованы результаты диссертационной работы при улучшении системы менеджмента качества, в частности положения диссертационной работы использованы в процессе управления несоответствиями, в процессе внутреннего аудита, в процессе анализа системы менеджмента качества со стороны руководства.

В процессах системы менеджмента качества ПАО «Техприбор» реализованы следующие результаты диссертационной работы Пипии Г.Т.:

- 1) Методика идентификации показателей качества и их оценки для описания целевых функций и допустимых областей существования целевых функций.
- 2) Аналитическая модель поиска оценки качества продукции, и методика решения задачи поиска оптимальных численных значений целевых функций, характеризующих качество продукции.
- 3) Методика поддержки принимаемых решений для обеспечения и улучшения качества продукции на основе визуализации области Парето.

Внедрение в систему менеджмента качества ПАО «Техприбор» перечисленных выше результатов, позволило:

- снизить процент дефектной продукции на операционном контроле на 7% ;
- снизить затраты на качество в 1,3 раза;
- снизить трудоемкость выполнения технологических операций в 1,05 раза;
- обрабатывать и анализировать разнородную информацию при проведении внутреннего аудита и оформлении отчетностей о качестве продукции.

Председатель:

Заместитель генерального директора по качеству –

Нач. службы управления качеством и сертификации №85-


 Воронов А.В.

Члены комиссии:

Главный конструктор – кандидат экономических наук -

 Новиков А.Ю.

Начальник отдела технического контроля №11 -

 Ребрий А.А.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Акт внедрения АО «Микротехника».



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«МИКРОТЕХНИКА»

АО «Микротехника»
197110, Санкт-Петербург, ул. Пионерская, 44, литера Р
тел.: +7 (812) 230-45-33, факс: +7 (812) 237-19-63
e-mail: secretary@microt.ru, www.microt.ru

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
АО «Микротехника»



[Signature] Г.А. Арустамов

«04» 04 2023г

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

результатов диссертационной работы Пипии Георгия Тенгизовича
«Управление качеством продукции приборостроения на основе математических методов
двухуровневой оптимизации и принятия решений».

Комиссия в составе:

Председатель: Начальник специального конструкторского бюро, канд.тех.наук Кроуз, К.М.

Члены комиссии:

Начальник конструкторско – технологического отдела, Литвинова Е.В.

Начальник производства, Дудин В.Ф

Главный метролог, Меллер Г. Е.

составила настоящий акт о том, что в АО «Микротехника» внедрена автоматизированная система оценки и улучшения качества продукции приборостроения, разработанная Пипией Георгием Тенгизовичем. В системе реализованы результаты диссертационной работы Пипии Г.Т., представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, а именно:

- модель многогранника качества продукции приборостроения на основе показателей, характеризующих качество продукции приборостроения через перечень целевых функций;
- методика идентификации показателей качества и их оценки для описания целевых функций и допустимых областей существования целевых функций;
- аналитическая модель поиска оценки качества продукции, и методика решения задачи поиска оптимальных численных значений целевых функций, характеризующих качество продукции;
- методика поддержки принимаемых решений для обеспечения и улучшения качества продукции на основе визуализации области Парето;

- автоматизированная система оценки и улучшения качества продукции приборостроения.

Внедрение в АО «Микротехника» автоматизированной системы оценки и улучшения качества продукции приборостроения, разработанной Пипией Георгием Тенгизовичем, позволило снизить процент дефектной продукции на операционном контроле с 8% до 3%, повысить выход годной продукции с 95% до 98%, снизить затраты на качество в 1,4 раза, а также обеспечило возможность обрабатывать и анализировать разнородную информацию при управлении качеством продукции. Результативность мероприятий по обеспечению качества повысилась с 89% до 93%, трудоемкость выполнения технологических операций снизилась в 1,1 раза, автоматизирован процесс оценки и повышения качества продукции.

Председатель комиссии



К.М. Кроуз

Члены комиссии



Е.В. Литвинова



В.Ф. Дудин



Г.Е. Меллер

ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Акт внедрения АО «Радиоавионика».**РАДИОАВИОНИКА**

Акционерное общество

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор



к.т.н. А.Ю. Каплин

"27" июня 2023 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы Пипии Георгия Тенгизовича «Управление качеством продукции приборостроения на основе математических методов двухуровневой оптимизации и принятия решений»

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Пипия Георгия Тенгизовича на тему «Управление качеством продукции приборостроения на основе математических методов двухуровневой оптимизации и принятия решений» использованы в АО «Радиоавионика». Были использованы следующие результаты диссертационной работы:

а) модель многогранника качества на основе целевых функций, выражающие характеристики продукции;

б) методика решения задачи поиска оптимальных численных значений целевых функций, характеризующих качество продукции;

в) методика поддержки принимаемых решений для обеспечения и улучшения качества основе визуализации области Парето.

Перечисленные выше результаты использованы в АО «Радиоавионика» в процессе составления ежегодных отчетов, аудите поставщиков и внутреннем аудите в рамках системы менеджмента предприятия.

Использование основных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечило снижение дефектов на этапе входного контроля (в среднем на 13%) и на этапе операционного контроля (в среднем на 7%) в процессе производства ультразвуковых дефектоскопов типов АВИКОН-11, АВИКОН -15 и АВИКОН -31, а также мобильных информационных комплексов.

Заместитель генерального конструктора
по развитию методов и средств
неразрушающего контроля, д.т.н.


26.06.2023

А.А. Марков

Главный специалист
по дефектоскопии



С.Л. Молотков

Начальник отдела методов и средств
неразрушающего контроля, к.т.н.



В.В. Мосягин