

Министерство образования и науки Российской Федерации
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт компьютерных наук и технологий
Высшая школа киберфизических систем и управления

Работа допущена к защите

Руководитель ОП

_____ А.А. Ефремов

« ____ » _____ 20 ____ г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

МОДЕЛИ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ДЛЯ ЗАДАЧИ ОЦЕНКИ И УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

по направлению 09.03.02 Информационные системы и технологии
по образовательной программе
09.03.02_02 Информационные системы и технологии

Выполнил
студент гр. 43503/6

Л. И. Назарова

Руководитель
д.т.н., профессор

Л. В. Черненкокая

Санкт-Петербург

2019

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО**
Институт компьютерных наук и технологий

УТВЕРЖДАЮ
Руководитель ОП
_____ А. А. Ефремов
« » _____ 2019 г.

ЗАДАНИЕ
по выполнению выпускной квалификационной работы
студенту

Назаровой Людмиле Ильдаровне, 43503/6
фамилия, имя, отчество (при наличии), номер группы

1. Тема работы: Модели многокритериальной оптимизации для задачи оценки и улучшения качества продукции приборостроения.

2. Срок сдачи студентом законченной работы: _____

3. Исходные данные по работе:

Набор данных из 1287 строк, содержащий информацию о видах производимых деталей и количестве обнаруженных дефектов.

4. Содержание работы (перечень подлежащих разработке вопросов):

- Определить целевые функции уровня качества и его критериальные показатели;
- Проанализировать существующие модели оптимизации и программные среды для реализации выбранной модели;
- Сравнить и выбрать наиболее корректную модель многокритериальной оптимизации;
- Разработать методику оценки уровня качества на основе выбранной модели многокритериальной оптимизации.

5. Перечень графического материала (с указанием обязательных чертежей):
Диаграммы, графики, блок-схемы.

7. Дата выдачи задания _____

Руководитель ВКР _____
(подпись)

Л.В. Черненко
фамилия, инициалы

Задание принял к исполнению _____
(дата)

Студент _____
(подпись)

Л.И. Назарова
фамилия, инициалы

РЕФЕРАТ

На 105 с., 15 рисунков, 26 таблиц, 2 приложения.

ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА, СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ, ЯЗЫК ПРОГРАММИРОВАНИЯ R, БОЛЬШИЕ ДАННЫЕ, МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ, ОЦЕНКА КАЧЕСТВА, ДЕФЕКТОСКОП.

Объектом исследования данной работы является методика оценки уровня качества дефектоскопа на этапе его производства. Дефектоскоп предназначен для сплошного и вторичного контроля рельсов с целью обнаружения дефектов, выборочного ручного контроля и определения координат обнаруженных дефектов. Предмет исследования – оценка и улучшение качества дефектоскопа. Цель работы заключается в выборе модели многокритериальной оптимизации для задачи оценки и улучшения качества продукции.

THE ABSTRACT

105 pages, 15 pictures, 26 tables, 2 applications.

QUALITY INDICATORS, STATISTICAL DATA PROCESSING, PROGRAMMING LANGUAGE R, BIG DATA, MULTICRITERAL DECISION MAKING METHODS, QUALITY CONTROL, DEFECTOSCOPE.

The object of research of this work is the methodology for assessing the quality level of a defectoscope at the stage of its production. The defectoscope is designed for continuous and secondary inspection of rails with purpose of detecting defects, selective manual control and determining the coordinates of detected defects. The subject of the study is the assessment and improvement of the quality of the defectoscope. The goal of the work is to choose a multi-criteria optimization model for the task of assessing and improving product quality.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1 ОПИСАНИЕ ПРОБЛЕМНОЙ ОБЛАСТИ	8
1.1 Показатели качества	11
1.2 Методы оценки качества продукции	20
1.3 Результаты и выводы к главе 1	21
2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ УРОВНЯ КАЧЕСТВА ДЕФЕКТОСКОПА	22
2.1 Исследование влияния различных факторов на показатели качества	22
2.1.1 Исходные данные	22
2.1.2 Статистический анализ данных	24
2.1.3 Кластерный анализ данных	27
2.1.4 Результаты исследования	31
2.2 Разработка концептуальной модели многокритериальной оптимизации оценки уровня качества дефектоскопа	32
2.2.1 Модель мониторинга показателей качества	32
2.2.2 Формирование целевых функций для оценки уровня качества	33
2.3 Выбор метода принятия многокритериального решения	34
2.3.1 Обзор методов принятия многокритериального решения	34
2.3.2 Сравнительный анализ методов принятия многокритериального решения	37
2.3.3 Решение задачи с помощью нелинейной схемы компромиссов	42
2.4 Результаты и выводы к главе 2	47
3 ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПРОИЗВОДСТВА ДЕФЕКТОСКОПА	48
3.1 Вычисление оценки качества производства дефектоскопа	48

3.2 Проверка разработанной методики оценки уровня качества на основе модели многокритериальной оптимизации с нелинейной функцией полезности	51
3.3 Результаты и выводы к главе 3	53
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	54
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	55
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Исходные данные для анализа	57
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Код программы	97

ВВЕДЕНИЕ

На данный момент всё изготовление какой-либо продукции в большинстве своём автоматизировано, вследствие чего растет уровень качества и конкуренция среди производителей. Для обеспечения, а также повышения качества продукции необходимо уменьшать долю брака и увеличивать ее конкурентоспособность. С этой задачей может справиться правильно подобранный метод контроля и оценки уровня качества изготавливаемой продукции.

Объектом исследования данной работы является методика оценки уровня качества дефектоскопа на этапе его производства. Дефектоскоп предназначен для сплошного и вторичного контроля рельсов с целью обнаружения дефектов, выборочного ручного контроля и определения координат обнаруженных дефектов. Предмет исследования - оценка и улучшение качества дефектоскопа.

Цель работы заключается в выборе модели многокритериальной оптимизации для задачи оценки и улучшения качества продукции.

Определены следующие задачи для достижения заданной цели:

- Изучить и обработать исходные данные, определить показатели, наиболее чувствительные к дефектам;
- Определить целевые функции уровня качества и его критериальные показатели;
- Проанализировать существующие методы принятия многокритериального решения;
- Выбрать наиболее корректную модель многокритериальной оптимизации;
- Разработать методику оценки уровня качества на основе выбранной модели многокритериальной оптимизации;
- Найти цель, позволяющую улучшить качество производства.

При подготовке выпускной квалификационной работы были использованы материалы таких учебных дисциплин, как «Квалиметрия», «Управление качеством», «Принятие решений», «Методы оптимизации» и «Управление операциями».

Научная новизна состоит в изучении экспериментальных набора больших данных из более чем 1000 строк с помощью методики, основанной на языке программирования R для статистической обработки данных и работы с графикой, и использовании полученных результатов в разработке методики оценки уровня качества.

Практическая значимость заключается в обеспечении и повышении качества продукции. Также по этой теме могут быть проведены дальнейшие научные исследования с помощью других инструментов и методов.

1 ОПИСАНИЕ ПРОБЛЕМНОЙ ОБЛАСТИ

В процессе производства продукции необходимо управлять качеством изделий путем регулирования его показателей. Для этого следует определить, какие показатели качества продукции в наибольшем объеме описывали бы ее качество, затем с помощью наиболее подходящих методов установить значение показателей и, в конце концов, оценить качество продукции, в зависимости от того, насколько сильно они разнятся с базовыми значениями.

Процесс производства рассматриваемого объекта исследования – дефектоскопа – можно разбить на следующие этапы (таблица 1.1):

Таблица 1.1

Этапы производства дефектоскопа

№	Этап	Описание
1.	Изготовление механических деталей	Изготовление механических деталей
2.	Сборка	Установка и закрепление сборочных единиц на штанге дефектоскопа в соответствии технологическому паспорту, контроль сборки согласно сборочному чертежу
3.	Монтаж	Подключение кабелей согласно схеме электрической
4.	Проверка функционирования изделия, настройка	Установка ПО, проверка соответствия технологическому паспорту
5.	Приемо-сдаточные испытания (ПСИ)	Проверка всех параметров дефектоскопа по техническим условиям (ТУ)
6.	Метрологическая поверка	Контроль функционирования по ТУ
7.	Упаковка	Укладка в ящик в соответствии с документацией
8.	Хранение	Контроль и учёт продукции
9.	Комплектация, установка ПО	Проверка соответствия сопроводительным документам и установка ПО

При производстве дефектоскопа применяются следующие методики оценки и управления качеством продукции:

- FMEA – анализ (анализ видов и последствий потенциальных дефектов);

- Статистический анализ, на основе журналов операционного контроля качества продукции.

FMEA – анализ применяется на этапе производства. Основной целью данной методики является предупреждение возникновения критических дефектов или отказов на этапе эксплуатации продукции (дефектоскопа). Анализ и выявление потенциальных отказов осуществляется путем привлечения экспертной комиссии (конструктора, технологи, метрологи и т.д.). Экспертная комиссия (по результатам анализа) дает оценку по трем показателям (тяжесть последствия отказа для потребителя, вероятность возникновения отказа и рейтинг обнаружения отказа на этапе производства). Итоговый показатель определяется как произведение от трех (частных) показателей. На основе итогового показателя выявляются критические элементы в конструкции изделия или в технологии производства.

Оценка качества на основе статистического анализа выполняется по алгоритму согласно рисунку 1.1. Здесь (см. рисунок 1.1) запись в журнал производится сотрудником отдела технического контроля (ОТК), группировка и обобщение статистики по принятой продукции также проводится сотрудником ОТК и инженером по качеству, а в блок оценки обобщенной информации также входит расчет процента сдачи начиная с первого предъявления.

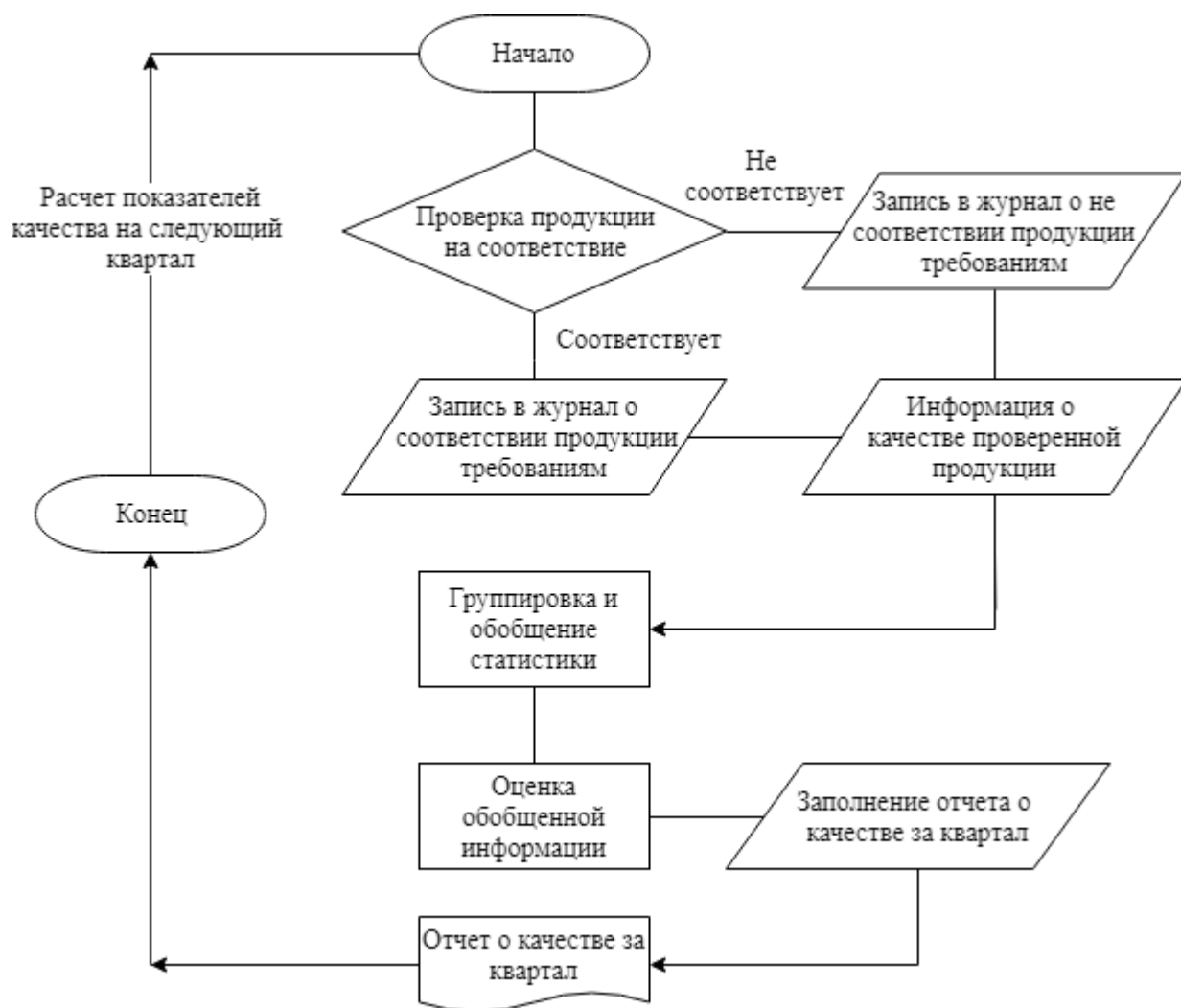


Рисунок 1.1 - Алгоритм оценки качества на основе статистического анализа

Схема алгоритма на рисунке 1.1 выполнена в соответствии с [5].

На каждом этапе производства продукции закладываются свои показатели качества, но мы выберем лишь несколько тех, что в полной мере опишут качество изделий.

Оценку уровня качества можно представить следующим образом:

$$A_i ? A_{i0},$$

где $A_i (i = 1, \dots, n)$ - i -ый показатель качества изделия, A_{i0} - базовый показатель качества, соответствующий i -му показателю качества изделия, n – количество показателей, выбранных для оценки уровня качества.

Таким образом, для положительной оценки уровня качества (или минимального допустимого качества продукта) необходимо выполнение следующих

условий:

$$\forall A_i \geq A_{i0} \text{ или } \forall A_{i \text{ отн}} \geq 1,$$

где $A_{i \text{ отн}} = \frac{A_i}{A_{i0}}$ - i -ый относительный показатель качества.

Существует множество методов для контроля и оценки уровня качества производимой продукции, а для учета нескольких показателей будет разработана новая методика на основе многокритериальной оптимизации.

В данной главе будут рассмотрены основные показатели качества продукции (характеризующие качество продукции на этапе производства) и методы их оценки.

1.1 Показатели качества

Из [4]:

Свойство продукции - объективная особенность продукции, которая может проявляться при ее создании, эксплуатации или потреблении.

Качество продукции - совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением.

Показатель качества продукции - количественная характеристика одного или нескольких свойств продукции, входящих в ее качество, рассматриваемая применительно к определенным условиям ее создания и эксплуатации или потребления. Показатель качества продукции может выражаться в различных единицах, например, километрах в час, часах на отказ, баллах и т.п., а также может быть безразмерным.

Классификация показателей качества представлена на рисунке 1.2 [1].



Рисунок 1.2 - Классификация показателей качества

Рассмотрим классификации по количеству свойств и их характеристикам подробнее. По количеству характеризующих свойств показатели качества делятся на 4 группы (таблица 1.2).

Таблица 1.2

Группы показателей качества

Термин	Определение	Пример
1	2	3
Единичный показатель качества продукции	Показатель качества продукции, характеризующий одно из ее свойств	<ul style="list-style-type: none"> - наработка радиоприемника на отказ; - интенсивность отказов резистора; - калорийность топлива; - коэффициент вариации проволоки по толщине; - средний ресурс автомобилей, выпущенных данным заводом за год; - среднее квадратическое отклонение ресурса автомобилей

Продолжение таблицы 1.2

1	2	3
Комплексный показатель качества продукции	Показатель качества продукции, характеризующий несколько ее свойств	Коэффициент готовности $K_T = \frac{T}{T + T_B},$ где T –показатель безотказности, T_B – показатель ремонтпригодности
Определяющий показатель качества продукции	Показатель качества продукции, по которому принимают решение оценивать ее качества	Экспертами для каждого показателя устанавливается коэффициент весомости и ставится оценка (например, в баллах от 1 до 5), затем средние результаты оценки умножают на коэффициенты весомости и произведения суммируют
Интегральный показатель качества продукции	Показатель качества продукции, являющийся отношением суммарного полезного эффекта от эксплуатации или потребления продукции к суммарным затратам на ее создание и эксплуатацию или потребление	Вычисляется по формуле: $И = \frac{\mathcal{E}}{З_c + З_{\mathcal{E}}},$ где \mathcal{E} - суммарный полезный эффект от эксплуатации или потребления продукции, $З_c$ - суммарные затраты на создание продукции, $З_{\mathcal{E}}$ - суммарные затраты на эксплуатацию продукции

Таблица 1.2 составлена по [4].

В [14] показатели качества по характеристикам свойств делятся на 11 групп (см. рис. 1.2):

Показатели назначения - характеризуют свойства продукции, определяющие основные функции, для выполнения которых она предназначена и обуславливает область ее применения.

Показатели надежности - определяют свойство продукции сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров.

Показатели унификации - характеризуют степень использования в продукции стандартизованных изделий и уровень унификации составных частей изделия.

Патентно-правовые показатели - характеризуют степень патентной защиты и патентной чистоты изделия.

Эргономические показатели, характеризующие систему «человек – изделие - среда», устанавливают соответствие свойств изделия тем или иным свойствам человека.

Эстетические показатели продукции характеризуют ее эстетическое воздействие на человека.

Показатели транспортабельности характеризуют приспособленность продукции к перемещениям, не сопровождающимся ее использованием и потреблением.

Показатели безопасности характеризуют свойства продукции, обуславливающие безопасность человека при потреблении или использовании продукции.

Экологические показатели характеризуют уровень вредного воздействия на окружающую среду в процессе эксплуатации изделия.

Для описания качества процесса больше всего подходят показатели технологичности и экономного расходования ресурсов, поэтому рассмотрим их подробнее:

Показатели технологичности – характеризуют совокупность свойств конструкции изделия, которая определяет ее приспособленность к достижению оптимальных затрат при производстве, эксплуатации и ремонте для заданных показателей качества, объема выпуска и условий выполнения работ, к ним относятся (таблица 1.3):

Таблица 1.3

Показатели технологичности

Показатель	Определение
1	2
Показатели трудоемкости (количество труда в человеко-часах, затрачиваемое на технологический процесс изготовления продукции или выполнения работ)	
Штучная трудоемкость	Трудоемкость единицы производимой продукции или работ: $t_{шт} = t_0 + t_{\epsilon} + t_{m.o.},$ где $t_0 = \frac{F}{N}$ - основное время производства работ, F – заданное время работы изделия, N - число изготовленной продукции в заданных единицах или число выполненных операций за тот же период времени, t_{ϵ} - вспомогательное время, $t_{m.o.}$ - время технологического обслуживания
Суммарная трудоемкость	Суммарная трудоемкость изготовления изделия, а также суммарная трудоемкость производства продукции или услуг, выполняемых с помощью данного изделия: $T = \sum_{i=1}^k t_i,$ где t - трудоемкость отдельных видов работ, входящих в технологический процесс изготовления изделия, k – количество видов работ
Структурная трудоемкость	Трудоемкость по рабочим местам, участкам, цехам
Удельная трудоемкость	Трудоемкость, приходящаяся на единицу главного параметра B : $T_{уд} = \frac{T}{B},$ где T - трудоемкость вида работ, B - показатель определяющего (главного) параметра

Продолжение таблицы 1.3

1	2
Сравнительная трудоемкость	<p>Характеризует уровень трудозатрат:</p> $Y_{mp} = \frac{T}{T_{баз}},$ <p>где $T_{баз}$ - базовая трудоемкость, принятая для сравнения при оценке уровня технологичности по трудоемкости изготовления изделия</p>
Относительная трудоемкость	<p>Характеризует долю трудозатрат по отдельным видам работ в суммарной трудоемкости.</p> $T_{отн} = \frac{t_i}{T},$ <p>где t_i - трудоемкость i-го вида работ</p>
<p align="center">Показатели материалоемкости (характеризуют количество материала, затраченного на изготовление изделия)</p>	
Суммарная материалоемкость	<p>Суммарная материалоемкость всех частей изделия:</p> $M = \sum_{i=1}^n m_i,$ <p>где m_i - материалоемкость i-ой составной части изделия, n - количество составных частей изделия</p>
Структурная материалоемкость	<p>Выражает количество отдельных видов (классов, марок, сортов) материалов и является структурным элементом суммарной материалоемкости</p>
Удельная материалоемкость	<p>Отношение суммарной материалоемкости изделия к величине главного параметра:</p> $M_{y\partial} = \frac{M}{B},$ <p>где M – чистая масса изделия, B - показатель определяющего (главного) параметра</p>

Продолжение таблицы 1.3

1	2
Сравнительная материалоемкость	<p>Отношение суммарной материалоемкости к базовому значению материалоемкости:</p> $M_{\text{м}} = \frac{M}{M_{\text{баз}}},$ <p>где $M_{\text{баз}}$ - базовое значение материалоемкости, принятое для сравнительной оценки</p>
Относительная материалоемкость	<p>Отношение массы данного материала к суммарной материалоемкости изделия:</p> $M_{\text{отн}} = \frac{m_i}{M},$ <p>где m_i - масса данного материала</p>
Коэффициент применимости материала	Выражает долю применения в данном изделии определенных, наиболее прогрессивных, видов, классов, марок и сортов материала
Коэффициент использования материала	<p>Характеризует эффективность использования материальных ресурсов при производстве изделия и определяется как отношение количества (массы) материала в готовой продукции к количеству (массе) вводимого в технологический процесс материала:</p> $K_{\text{и.м.}} = \frac{M}{M_{\text{г}}},$ <p>где $M_{\text{г}}$ - количество (масса, определяемая по весу) материала в готовом изделии, M - количество (масса) материала, введенного в технологический процесс</p>
Показатели себестоимости	
Суммарная себестоимость	Себестоимость изготовления изделия с учетом всех видов затрат
Структурная себестоимость	Характеризует финансовые затраты по всем видам работ, входящих в технологический процесс изготовления изделия

Продолжение таблицы 1.3

1	2
Удельная себестоимость	<p>Отношение суммарной себестоимости изделия на величину главного параметра:</p> $C_{уд} = \frac{C}{B},$ <p>где B - показатель определяющего (главного) параметра</p>
Сравнительная себестоимость	<p>Сравнительная себестоимость или уровень себестоимости Y_c определяется по отношению к базовому показателю себестоимости, принятому или заданному для сравнительной оценки технологичности по данному параметру:</p> $Y_c = \frac{C}{C_{баз}},$ <p>где $C_{баз}$ - базовая себестоимость, принятая для сравнительной оценки технологичности по себестоимости изготовления изделия</p>
Относительная себестоимость	<p>Отношение себестоимости по видам производимых работ к суммарной себестоимости:</p> $C_{отн} = \frac{C_{в.р.}}{C},$ <p>где $C_{в.р.}$ - себестоимость по видам производимых работ</p>

Показатели экономного расходования ресурсов (таблица 1.4) характеризуют те свойства изделия, которые отражают его техническое совершенство по количеству потребляемых в процессе производства ресурсов.

Таблица 1.4

Показатели экономного расходования ресурсов

Показатель	Определение
Показатели экономичности энергопотребления	
Коэффициент полезного действия	<p>Отношение полезной работы ко всей энергии, полученной системой (машиной):</p> $\eta = \frac{A_n}{A} = \frac{A - A_e}{A} = 1 - \frac{A_e}{A},$ <p>где A_n - полезная работа, A - энергия, полученная системой (машиной), A_e - теряемая энергия или мощность от действия сил сопротивления. Для реальной машины коэффициент полезного действия всегда меньше единицы</p>
Удельный расход электроэнергии	<p>Отношение абсолютных значений энергозатрат на величину главного параметра или полезного эффекта от эксплуатации данного изделия:</p> $\mathcal{E}_y = \frac{W \cdot Q \cdot K_{u.d.} \cdot K_e}{P_s},$ <p>где W - номинальная мощность двигателя, Q - расход энергии (удельный) на единицу мощности двигателя, $K_{u.d.}$ - коэффициент использования двигателей, K_e - коэффициент пересчета единиц времени, P_s - эксплуатационная производительность</p>

Рассмотрим также не включенный в данную классификацию (см. рисунок 1.2) коэффициент дефектности продукции.

Коэффициент дефектности продукции определяется как среднее взвешенное количество дефектов, приходящееся на единицу продукции и рассчитывается по формуле (1.1).

Для определения коэффициента дефектности берется выборка из n единиц

продукции, и в ней подсчитывают все дефекты, разбитые заранее на α видов. Для каждого вида дефекта устанавливается коэффициент весомости r_i , где $i = 1, 2, \dots, \alpha$.

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{\alpha} m_i \cdot r_i, \quad (1.1)$$

где m_i - число дефектов каждого вида в выборке.

Коэффициент весомости может быть определен экспертным методом или по стоимости устранения дефекта данного вида, или вовсе быть опущен, тогда получится формула (1.2):

$$D = \frac{m}{n}, \quad (1.2)$$

где m – количество найденных дефектов из n проверенных единиц.

Можно также вычислить **относительный коэффициент дефектности**:

$$Q = \frac{D}{D_0},$$

где D_0 - базовое значение коэффициента дефектности, соответствующее определенному базовому периоду производства.

1.2 Методы оценки качества продукции

Оценка уровня качества продукции - совокупность операций, включающая выбор номенклатуры показателей качества оцениваемой продукции, определение значений этих показателей и сопоставление их с базовыми.

Согласно [4] существуют следующие методы оценки качества продукции (таблица 1.5):

Таблица 1.5

Методы оценки качества продукции

Термин	Определение
Дифференциальный метод оценки качества продукции	Метод оценки качества продукции, основанный на использовании единичных показателей ее качества
Комплексный метод оценки качества продукции	Метод оценки качества продукции, основанный на использовании комплексных показателей ее качества
Смешанный метод оценки качества продукции	Метод оценки качества продукции, основанный на одновременном использовании единичных и комплексных показателей ее качества
Статистический метод оценки качества продукции	Метод оценки качества продукции, при котором значения показателей качества продукции определяют с использованием правил математической статистики

1.3 Результаты и выводы к главе 1

Во время изготовления продукции следует регулировать показатели для сохранения достойного уровня качества. На каждом этапе производства продукции закладываются свои показатели качества, и в этой главе были рассмотрены и выбраны показатели, которые будут использоваться для дальнейшего исследования.

Также в данной главе были рассмотрены процесс производства рассматриваемого объекта исследования – дефектоскопа, классификация показателей качества и методики оценки и управления качеством продукции.

На данный момент существуют различные методы для оценки уровня качества продукции, далее будет разработана методика на основе многокритериальной оптимизации для учета нескольких показателей.

2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ УРОВНЯ КАЧЕСТВА ДЕФЕКТОСКОПА

Перед выбором метода контроля и оценки уровня качества изготавливаемой продукции необходимо определить, какие показатели качества подвержены наибольшему влиянию, у каких составляющих готовой продукции на каких этапах производства чаще выявляются дефекты. Данное действие позволит снизить трудоемкость выполнения расчетов и ускорить поиск коренных проблем ухудшения уровня качества дефектоскопа на этапе производства.

В этой главе будут определены показатели качества, которые необходимо улучшить, сформирована модель мониторинга показателей качества и разработана методика оценки уровня качества.

2.1 Исследование влияния различных факторов на показатели качества

В этой части главы будут определяться показатели качества, которые необходимо улучшить, за счёт анализа статистических данных. С помощью методики, основанной на языке программирования R для статистической обработки данных и работы с графикой, был исследован набор данных из более чем 1000 строк с целью нахождения зависимости выявления дефектов от различных факторов.

2.1.1 Исходные данные

Как и в [9], для анализа будут учитываться 4 этапа из процесса изготовления дефектоскопа (см. табл. 1.1), так как именно на этих этапах возникают дефекты в процессе изготовления дефектоскопов:

- Изготовление механических деталей;
- Сборка;
- Монтаж;
- ПСИ (приемо-сдаточные испытания).

Также при анализе будут учитываться следующие показатели (в скобках указан порядковый номер, который будет использован далее):

– Показатели назначения, в которые входят:

- Показатели функциональной и технической эффективности (далее «функциональные») (1);
 - Конструктивные показатели (3).
- Показатели надежности (2);
- Эргономические показатели (4);
- Эстетические показатели (5);
- Показатели технологичности (6).

С помощью прямого метода определения коэффициентов важности [13] показателей качества вычислим коэффициенты для каждого вида продукции на основе следующих предположений:

1) Качество механических деталей в равной степени определяется следующими показателями: конструктивные, эргономические, эстетические, технологичности;

2) Качество кабелей, плат и карт памяти в равной степени определяется следующими показателями: функциональные и надежности;

3) Качество полусборок и готовой продукции в равной степени определяется всеми показателями.

Таким образом, всю указанную информацию можно представить записью (где 1-6 –показатели качества в соответствии с нумерацией выше, а $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ - количественная информация для видов продукции в соответствии с предположениями выше):

$$\theta_1 = \{1 \approx 2, 2 \prec^2 3, 3 \approx 4, 4 \approx 5, 5 \approx 6\} \rightarrow \underbrace{\left(\frac{1}{5 \cdot 2}; \frac{1}{5 \cdot 2}\right)}_{\frac{1}{5}}; \frac{1}{5}; \frac{1}{5}; \frac{1}{5}; \frac{1}{5}.$$

$$\theta_2 = \{1 \approx 2, 2 \succ^4 3, 3 \approx 4, 4 \approx 5, 5 \approx 6\} \rightarrow \frac{1}{3}; \frac{1}{3}; \underbrace{\left(\frac{1}{3 \cdot 4}; \frac{1}{3 \cdot 4}; \frac{1}{3 \cdot 4}; \frac{1}{3 \cdot 4}\right)}_{\frac{1}{3}}.$$

$$\theta_3 = \{1 \approx 2, 2 \approx 3, 3 \approx 4, 4 \approx 5, 5 \approx 6\} \rightarrow \frac{1}{6}; \frac{1}{6}; \frac{1}{6}; \frac{1}{6}; \frac{1}{6}; \frac{1}{6}.$$

В таблице 2.1 представлены коэффициенты важности показателей качества по видам продукции с помощью количественной информации.

Таблица 2.1

Коэффициенты важности показателей качества по видам продукции

Показатель Вид детали	Функциональные	Надежности	Конструктивные	Эргономические	Эстетические	Технологичности
Механические детали	0,100	0,100	0,200	0,200	0,200	0,200
Кабели	0,333	0,333	0,083	0,083	0,083	0,083
Полусборка	0,167	0,167	0,167	0,167	0,167	0,167
Готовая продукция	0,167	0,167	0,167	0,167	0,167	0,167
Плата с навесными элементами	0,333	0,333	0,083	0,083	0,083	0,083
Карта памяти	0,333	0,333	0,083	0,083	0,083	0,083

Для анализа был использован набор данных, содержащий следующие столбцы, представленные в таблице 2.2 (показаны первые 5 строк), весь набор данных можно увидеть в приложении 1:

Таблица 2.2

Набор данных

Вид продукции	Этап производства	Предъявлено	Принято	Всего дефектов
Механические детали	Изготовление механических деталей	10	5	5
Карта памяти	Сборка	21	21	0
Полусборка	Сборка	6	6	0
Полусборка	Сборка	7	7	0
Кабели	Монтаж	10	10	0

2.1.2 Статистический анализ данных

На основе формулы (1.1) был рассчитан коэффициент дефектности, построена диаграмма (рисунок 2.1) и гистограмма (рисунок 2.2) на которых можно увидеть, что готовая продукция и плата с навесными элементами не подвержены дефектам, а самый высокий средний коэффициент дефектности у полусборок,

самое большое количество как продукции, так и дефектов у механических деталей, средние коэффициенты дефектности равны у конструктивных, эргономических, эстетических и показателя технологичности, также равны значения у функциональных показателей и показателей надежности.

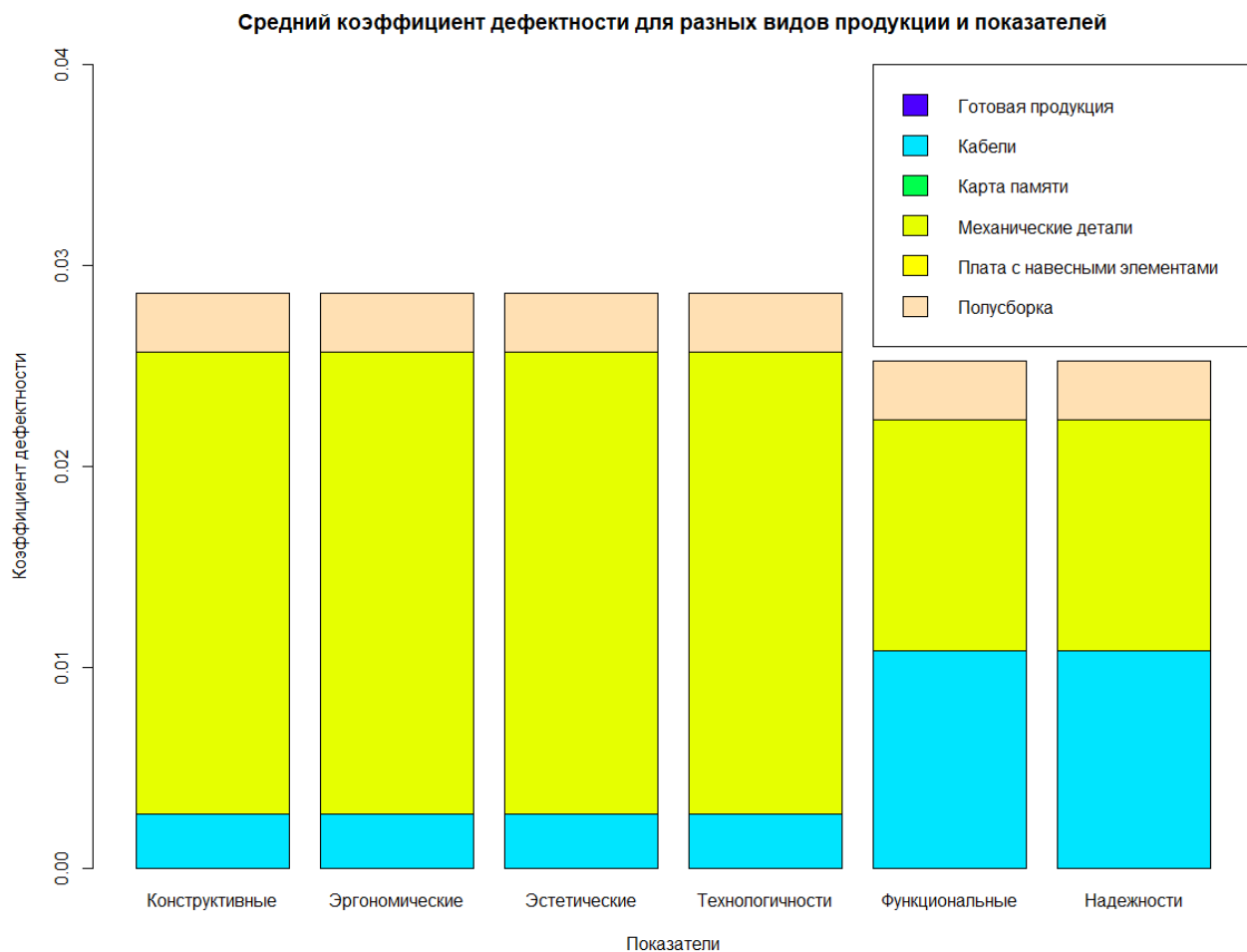


Рисунок 2.1 - Средний коэффициент дефектности для различных показателей качества

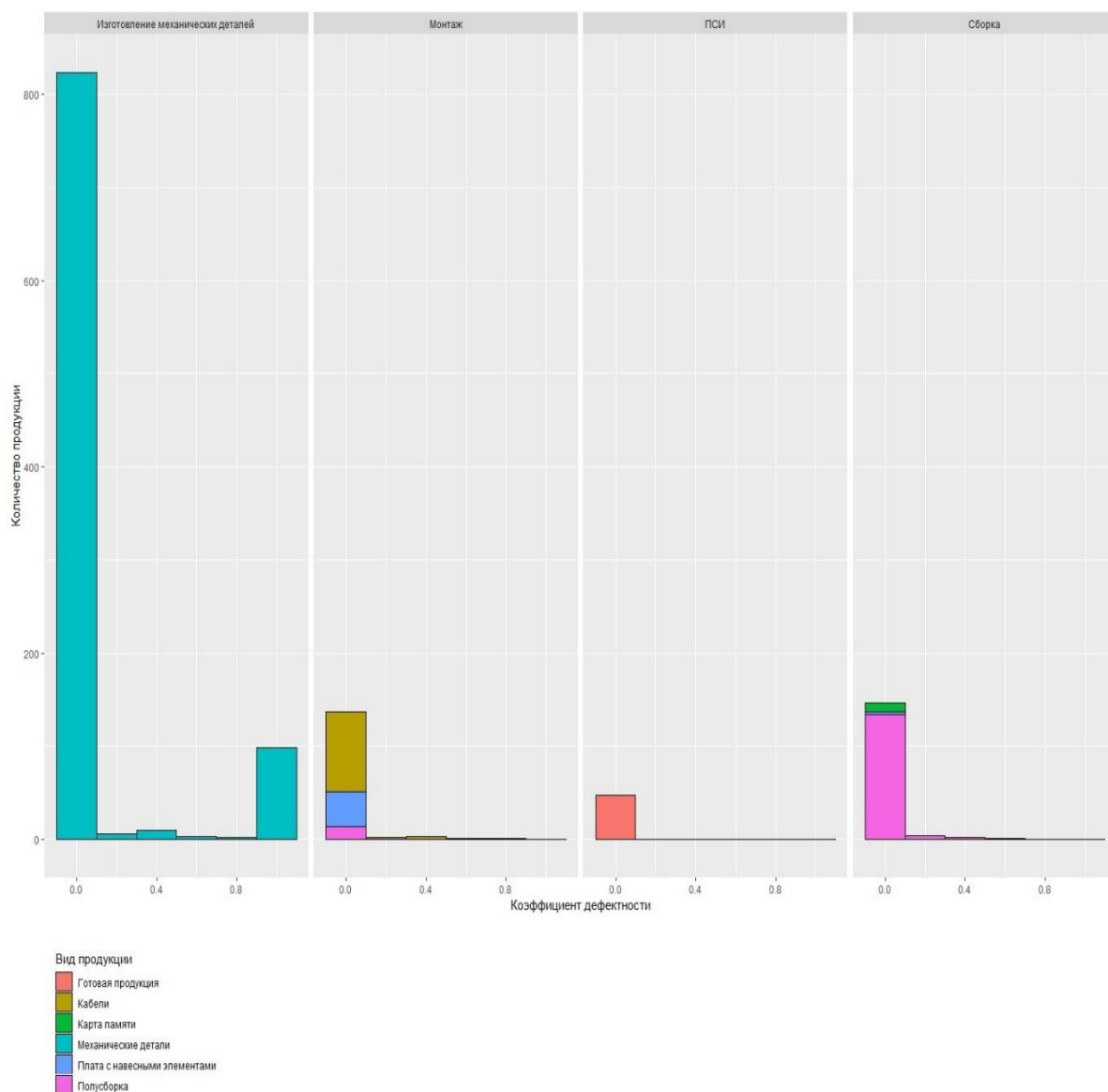


Рисунок 2.2 - Гистограмма распределения значений коэффициента дефектности

Коэффициент корреляции показывает степень взаимосвязи между двумя переменными. Он представляет собой безразмерную величину, которая изменяется от -1 до $+1$. Чем сильнее связь, тем больше величина коэффициента корреляции. Положительные значения коэффициента указывают на положительную (прямую) связь, а отрицательные - на отрицательную (обратную) связь.

Вычислим коэффициент корреляции Пирсона и построим диаграмму на основе коэффициента корреляции весов показателей и коэффициента дефектности (рисунок 2.3).

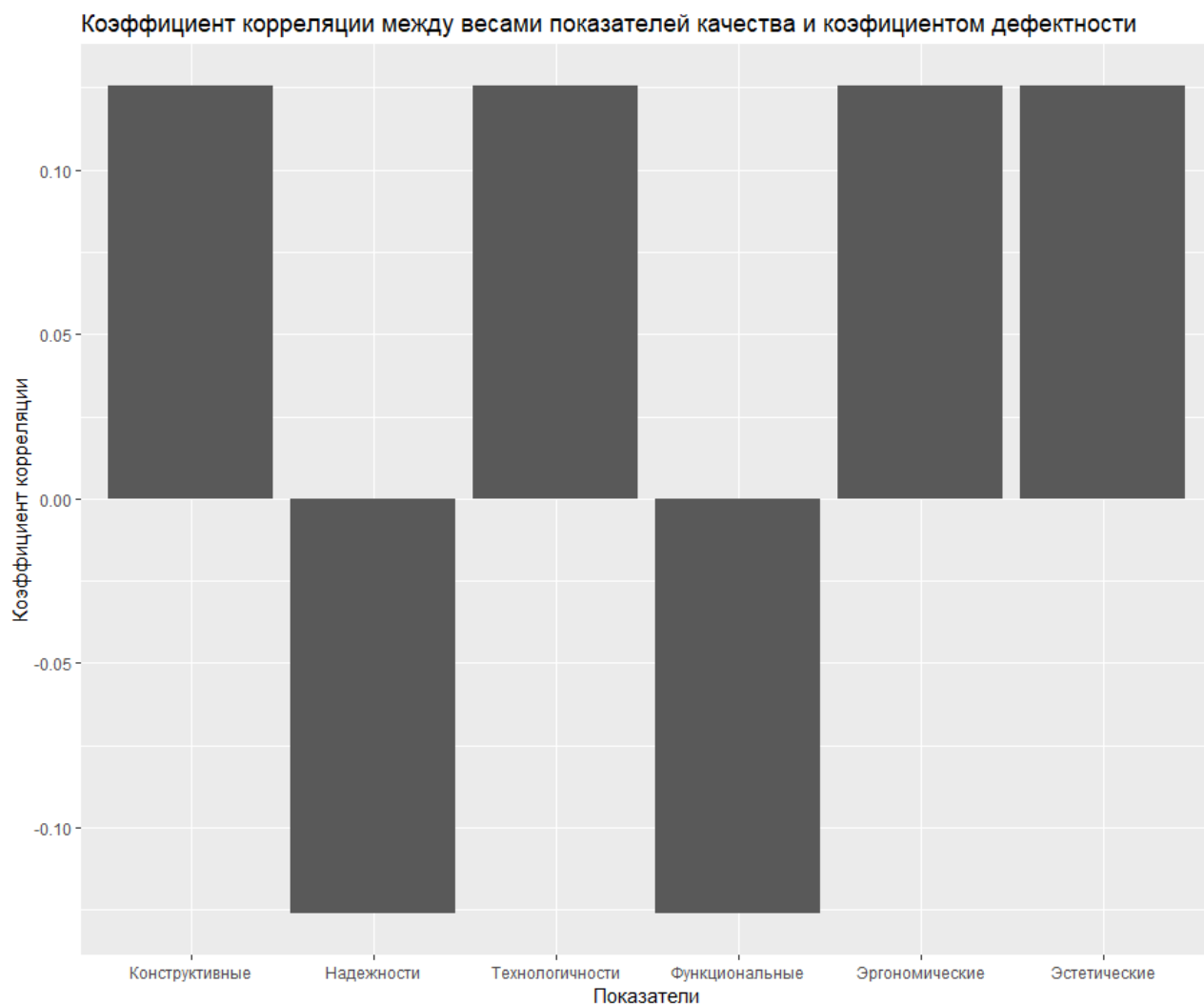


Рисунок 2.3 - Диаграмма коэффициента корреляции между различными показателями качества и коэффициентом дефектности

На рисунке 2.3 заметна равная положительная корреляция у конструктивных, эргономических, эстетических показателей и показателя технологичности и отрицательная корреляция у показателя надежности и функциональных показателей.

Чтобы выразить в количественной форме связь между изделиями и показателями качества, исследуем набор данных с помощью кластеризации.

2.1.3 Кластерный анализ данных

Проведем кластерный анализ, используя метод Варда и k-средних. Для анализа были выбраны столбцы с коэффициентами дефектности и значениями весов показателей качества.

Построим график (рисунок 2.4) с помощью Elbow method (“метод согнутого колена”, “метод каменистой осыпи”). По оси абсцисс отмечено число кластеров k , а по оси ординат – значения функции $W(k)$, которая определяет внутригрупповой разброс в зависимости от числа кластеров. С помощью графика было выбрано оптимальное количество кластеров – 3 (число кластеров, при котором наблюдается резкий изгиб на графике).

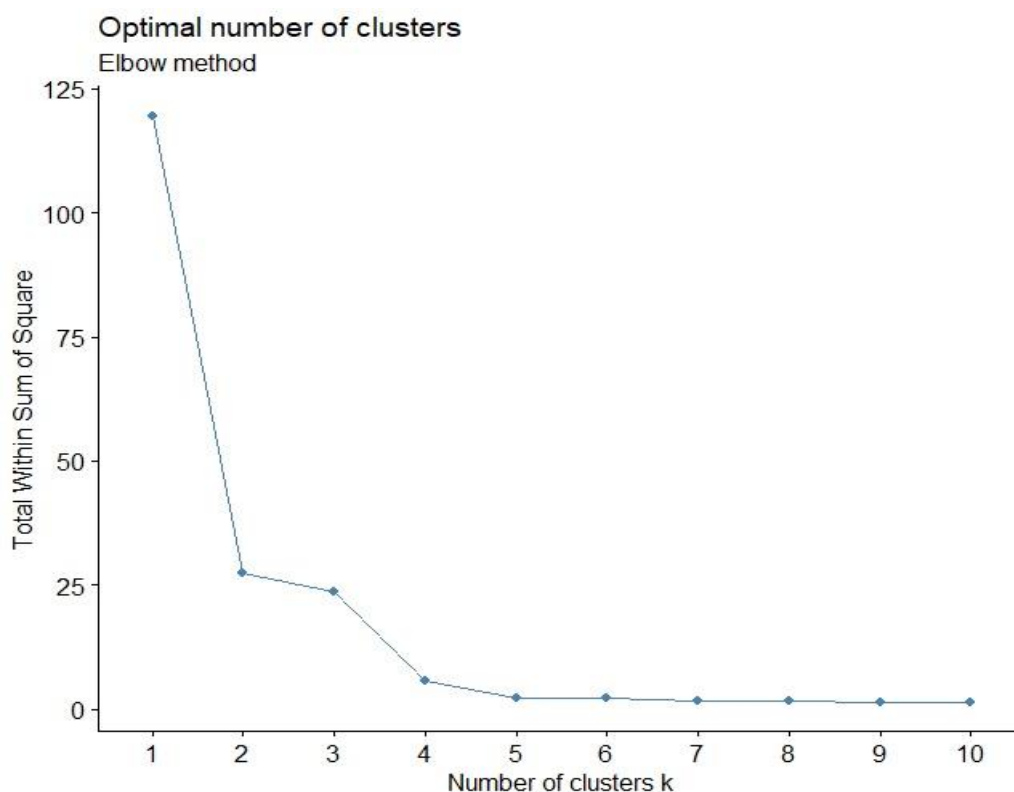


Рисунок 2.4 - График зависимости внутригруппового разброса от числа кластеров

Построим дендрограмму по методу Варда (рисунок 2.5), где красным цветом выделены 3 кластера. Из-за большого числа дальнейшего деления на кластеры, вместо их названий наблюдаются черные полосы.

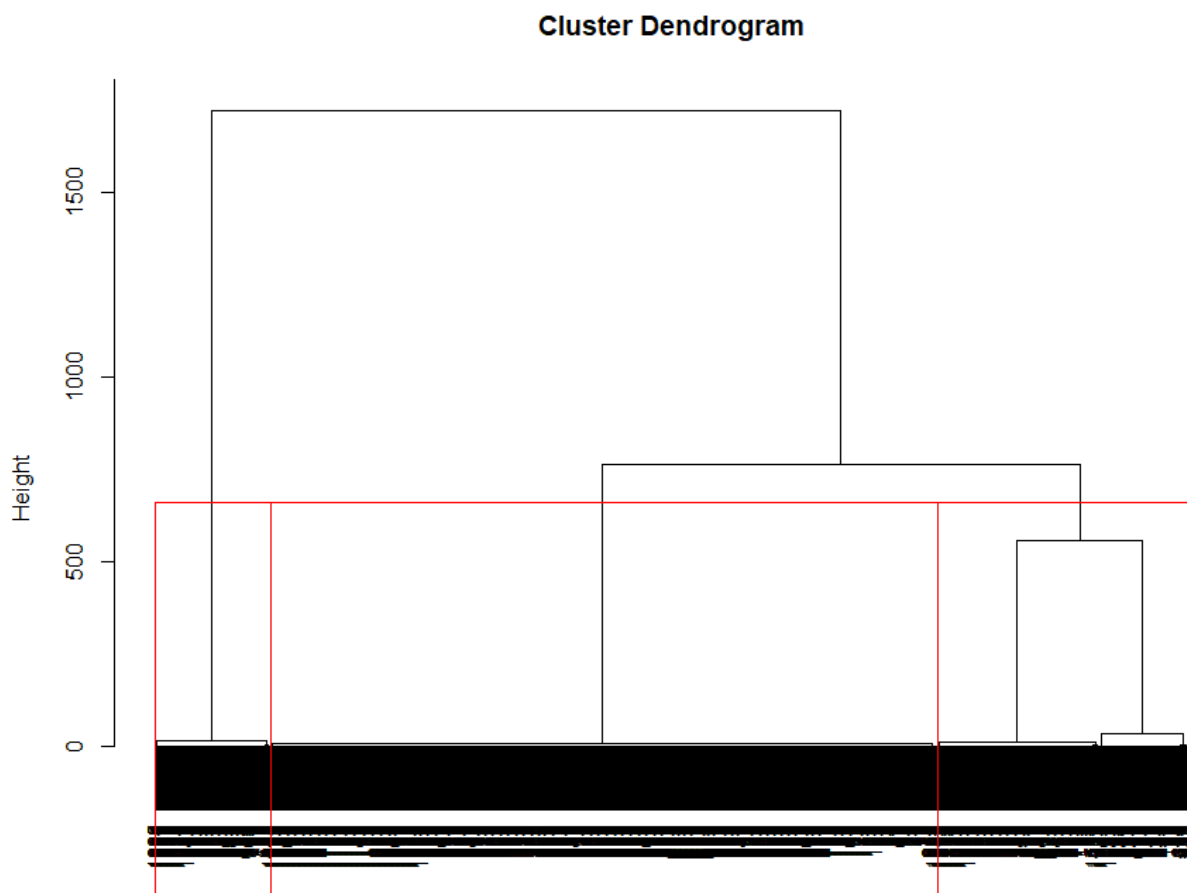


Рисунок 2.5 - Дендрограмма методом Варда

Построим гистограмму (рисунок 2.6) на основе полученных кластеров, на которой видно распределение не только по коэффициенту дефектности, но и по видам продукции. В первый кластер были отнесены механические детали с высоким коэффициентом дефектности и полусборки с готовой продукцией с нулевым коэффициентом. Во второй кластер отнесены кабели, платы и карты памяти, у которых тоже в большинстве показатель дефектности равен 0. Третий кластер включает механические детали с низкими значениями показателя дефектности.

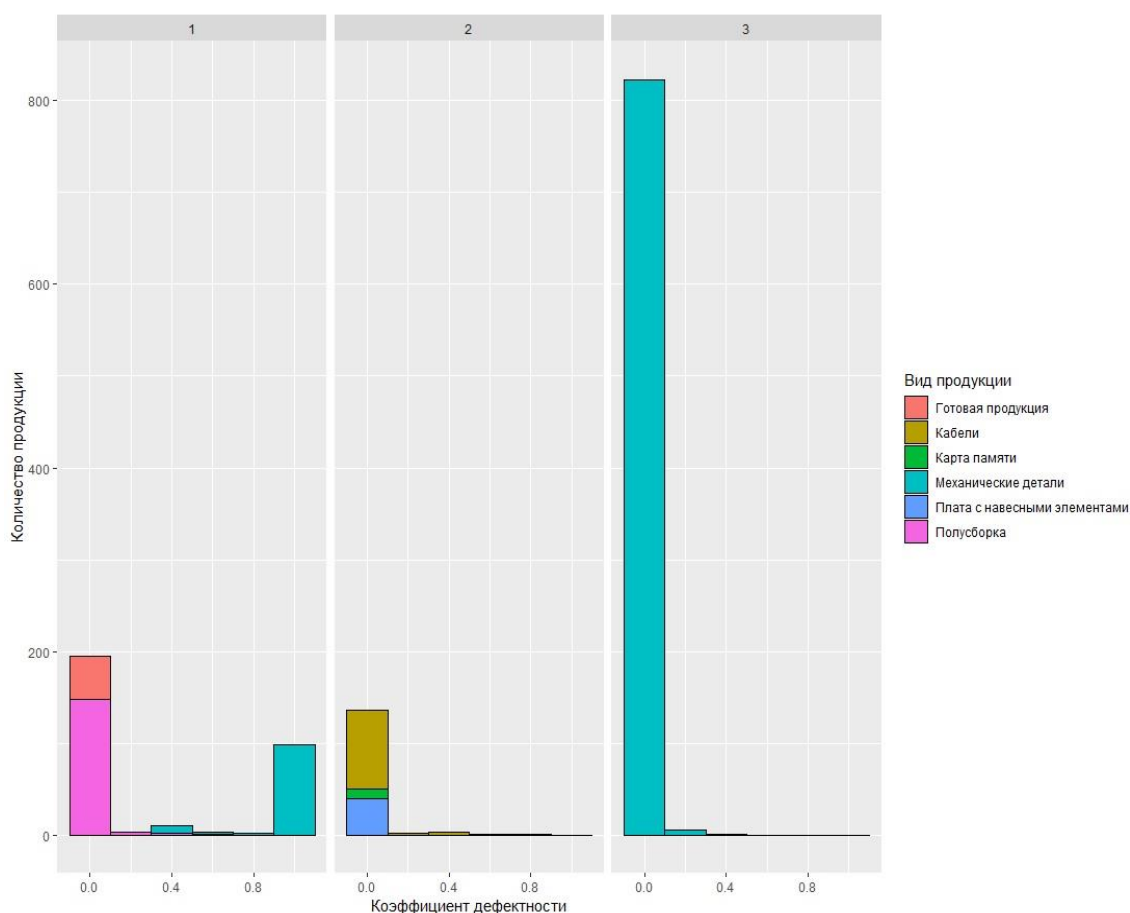


Рисунок 2.6 - Гистограмма распределения значений коэффициента дефектности

С помощью метода k -средних были получены следующие кластеры (рисунок 2.7). В данной таблице строкам соответствуют кластеры, в которых отображены средние значения соответствующих столбцов.

Cluster means:							
	defCoef	Функциональные	Надежности	Конструктивные	Эргономические	Эстетические	Технологичности
1	0.004980282	0.1129594	0.1129594	0.1936170	0.1936170	0.1936170	0.1936170
2	0.011735900	0.3330000	0.3330000	0.0830000	0.0830000	0.0830000	0.0830000
3	0.950098450	0.1053097	0.1053097	0.1973451	0.1973451	0.1973451	0.1973451

Рисунок 2.7 - Средние значения для различных кластеров

Сравнив результаты кластеризации методом Варда и k -средних, получили 77% совпадения.

Построим график (рисунок 2.8), для сравнения влияния полученных кластеров и видов продукции на различные показатели качества. Как можно заме-

тять, средние коэффициенты дефектности равны у конструктивных, эргономических, эстетических и показателя технологичности, также равны значения у функциональных показателей и показателей надежности, а кластеры имеют примерно одинаковые коэффициенты дефектности для каждого показателя.

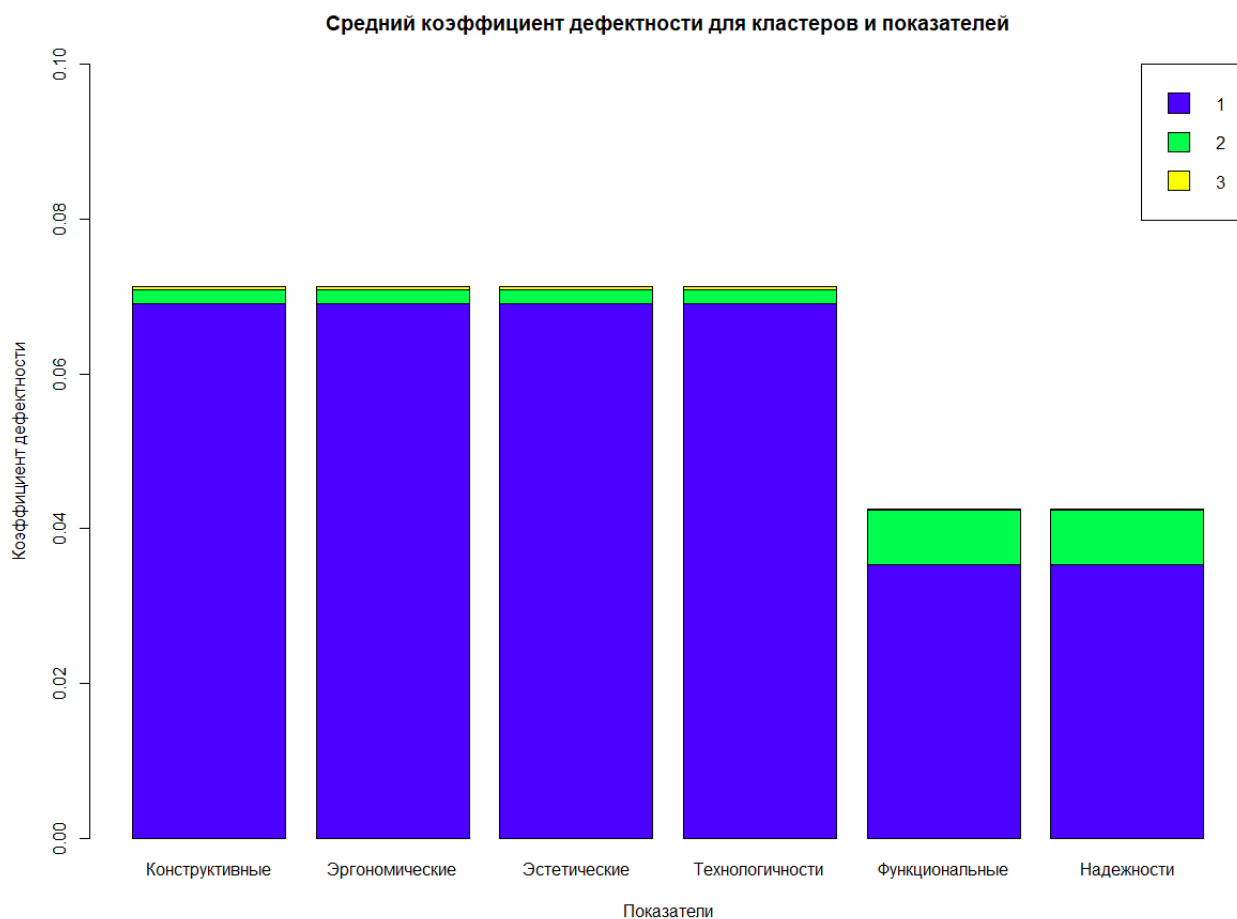


Рисунок 2.8 - Средний коэффициент дефектности для различных показателей качества и кластеров

2.1.4 Результаты исследования

На основе проведенных исследований выявлены показатели качества, которые подвержены наибольшему влиянию дефектов:

- конструктивные;
- эргономические;
- эстетические;
- технологичности.

Также был обнаружен вид продукции, у которого чаще всего выявляются дефекты – это механические детали, но это происходит скорее из-за количества. Продукция с самым высоким средним коэффициентом дефектности – это полусборки, хотя их намного меньше. Их дефекты больше всего влияют на конструктивные, эргономические, эстетические и показатель технологичности. Данный метод имеет преимущество при оценке уровня качества, так как основан на больших данных, которые позволяют анализировать все доступные многообразные данные быстро и эффективно.

2.2 Разработка концептуальной модели многокритериальной оптимизации оценки уровня качества дефектоскопа

2.2.1 Модель мониторинга показателей качества

Модель мониторинга показателей качества продукции будет представлена математической моделью:

$$\langle C, X, Y, F \rangle$$

где C – затраты на качество; X – множество учитываемых этапов производства (см. п. 2.1.1); Y – множество учитываемых показателей качества производимой продукции (см. п. 2.1.4); F – функция уровня качества производимой продукции.

Функция уровня качества продукции будет задана следующим образом:

$$F = f(C(Y), Y(X)).$$

В п. 2.1.4 были определены группы показателей качества, которые подвержены наибольшему влиянию дефектов, следовательно множество показателей качества имеет вид многогранника $Y^j (j=1, \dots, n)$, где $n=4$ – количество учитываемых групп показателей качества (конструктивные, эргономические, эстетические показатели и показатель технологичности). Каждая группа показателей качества связана с этапами производства X_i .

В процессе формирования перечисленных показателей технической продукции предприятие затрачивает определенные ресурсы. В теории управления качеством в соответствии с моделью затрат на качество по схеме предупреждение – оценка – отказы затраты делятся на [6]:

- затраты на оценку качества;
- затраты на предупреждение несоответствий;
- затраты на устранение внутренних несоответствий;
- затраты на устранение внешних несоответствий.

Функция $C(Y)$ исходя из перечисленных групп затрат будет определяться на множестве $Y^j (j=1, \dots, n)$. При этом затраты на качество связаны с этапами производства X_i .

2.2.2 Формирование целевых функций для оценки уровня качества

Для оценки уровня качества будут использоваться две целевые функции: функция бездефектности F_1 и функция затрат на качество F_2 .

Функция бездефектности рассчитывается следующим образом:

$$F_1 = Y(X) = \inf(c_i, w_i),$$

где c_i – константа, определяемая как степень принадлежности этапа производства на формирование качества продукции; w_i – коэффициент значимости константы.

Численное значение константы c_i находится по формуле (2.1):

$$c_i = \frac{x-a}{b-a}, \quad (2.1)$$

где x – это количество наименований групп показателей качества, формируемые i -ой технологической операцией, a – минимально возможное количество групп показателей качества дефектоскопа, а b – максимально возможное количество групп показателей качества дефектоскопа.

Для определения затрат на качество рассчитывают суммарные расходы z_{sum} .

Функция затрат на качество:

$$F_2 = C(Y) = \sup(z_i z_{sum}, w_i) = \sup(z_i, w_i),$$

где w_i – коэффициент значимости константы, z_i – обратная относительная величина затрат на единицу продукции, которая находится по формуле (2.2):

$$z_i = \frac{S_i}{P_c \cdot n}, \quad (2.2)$$

S_i – группа затрат, P_c – стоимость производства одной единицы готовой продукции, n – количество единиц выпущенной готовой продукции.

Для определения весовых значений целевых функций необходимо сформировать пространство возможных весовых значений. Сформированная модель мониторинга предлагает поиск целевых функций на многограннике $Y^j (j=1, \dots, n)$ где $n=4$ – количество учитываемых групп показателей качества (конструктивные, эргономические, эстетические показатели и показатель технологичности). Данный многогранник состоит из множества показателей качества, т.е. является матрицей показателей качества продукции. Для расчета уровня качества продукции определим коэффициенты a_{ij} в матрице $Ax = b$ как коэффициент дефектности D , рассчитывающийся по формуле (1.2).

Коэффициент дефектности определяют для каждого единичного показателя качества производимой продукции. В свою очередь единичные показатели качества примут следующий матричный вид:

$$A = \begin{pmatrix} D_{11} & D_{12} & \dots & D_{1n} \\ D_{21} & D_{22} & \dots & D_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ D_{m1} & D_{m2} & \dots & D_{mn} \end{pmatrix}$$

Привязка к целевым функциям осуществляется по j -м индексам. По i -й строке идут перечни единичных показателей качества производимой продукции.

2.3 Выбор метода принятия многокритериального решения

2.3.1 Обзор методов принятия многокритериального решения

Рассмотрим некоторые методы многокритериальной оптимизации:

1) Метод системных (решающих) матриц

В [8] описаны основные алгоритмы обработки матриц решений

$$A = \begin{pmatrix} & F_1 & F_2 & \dots & F_n \\ E_1 & e_{11} & e_{12} & \dots & e_{1n} \\ E_2 & e_{21} & e_{22} & \dots & e_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ E_m & e_{m1} & e_{m2} & \dots & e_{mn} \end{pmatrix}, \text{ состоящей из вариантов } E_i, \text{ условий (критериев) } F_j \text{ и}$$

оценок e_{ij} . Объединим алгоритмы в одной таблице (таблица 2.3), где e_{ir} – оценочная функция – функция, соответствующая каждому варианту E_i и характеризующая в целом все последствия выбора этого варианта (решения).

Таблица 2.3

Стратегии обработки матриц решений

Название стратегии	Критерий	Описание
Стратегия компромисса между оптимистическим и пессимистическим подходами (Критерий Гурвица)	$\max_i e_{ir} = \max_i (\min_j e_{ij} + \max_j e_{ij})$	$\min_j e_{ij}$ соответствуют «стратегии пессимизма», а величина $\max_j e_{ij}$ – «стратегии оптимизма», а сумма этих величин дает оценку компромисса
Стратегия оптимизма (азартного игрока)	$\max_i e_{ir} = \max_i (\max_j e_{ij})$	Из матрицы решений выбирается максимальный элемент
Стратегия пессимизма (Критерий Вальда)	$\max_i e_{ir} = \max_i (\min_j e_{ij})$	Гарантирует в наихудших условиях максимальный выигрыш
Стратегия нейтралитета (Критерий Байеса)	$\max_i e_{ir} = \max_i \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n e_{ij} \right)$	Все встречающиеся отклонения от среднего допустимы и выбор параметров с этой точки зрения - оптимальный
Стратегия относительного пессимизма (Критерий Сэвиджа)	$\max_i e_{ir} = \min_i \max_j (\max_j e_{ij} - e_{ij})$	Оцениваются потери по сравнению с определенным по каждому варианту наилучшим результатом, а затем из совокупности наихудших результатов выбирает наилучший результат

Выбор оптимального варианта производится следующим образом:

$$E_0 = \{E_{i0} \mid E_{i0} \in E_i \wedge (e_{i0} = f(e_{i0}))\},$$

т.е. множество E_0 оптимальных вариантов состоит из тех вариантов E_{i0} , которые принадлежат множеству вариантов E_i , и оценка e_{i0} , которая выбрана среди всех оценок в соответствии со стратегией f (см. таблицу 2.3).

2) Метод усредненного критерия [2]

Каждому критерию f_i назначается весовой коэффициент a_i . В результате:

$$f(a) = \sum_{i=1}^n a_i f_i,$$

$$a_i \geq 0, \quad \sum_{i=1}^n a_i = 1.$$

Оптимальным решением будет:

$$f^* = \min f(a).$$

3) Метод свертки Гермейера [2]

Каждому критерию f_i назначается весовой коэффициент a_i и решение выбирается из наихудших вариантов:

$$f(a) = \max_i (a_i f_i),$$

$$a_i \geq 0, \quad \sum_{i=1}^n a_i = 1,$$

$$f^*(a) = \min f(a).$$

4) Метод ε -ограничений [2]

Решаем следующие n задач:

$$f_k^{(n)} = \min f_k,$$

$$k = 1, 2, \dots, n.$$

Пусть $[x^{(n)}, f_k^{(n)}] (f_k^{(n)} = f_k(x^{(n)}))$ - единственное глобальное решение задачи. В результате получаем однокритериальную задачу, в которой один из критериев (например, n -й критерий) используется как целевая функция, а остальные – как дополнительные ограничения. Тогда решается следующая задача:

$$\min f_n, \quad k = 1, 2, \dots, n,$$

$$f_i \leq \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, n-1, \varepsilon_i > 0,$$

где $\varepsilon_i > 0$ удовлетворяют:

$$f_k^{(n)} \leq \varepsilon_k, k = 1, 2, \dots, n-1.$$

5) Нелинейная схема компромиссов

Рассмотрим нелинейную схему компромиссов из [3] для нашей задачи.

В данной работе введено понятие напряженности ситуации как меры близости относительных частных критериев к своему предельному значению (единице):

$$\rho_i = 1 - f_i, \rho_i \in [0; 1], i \in [1, n].$$

Напряженной ситуацией будет считаться случай, когда ρ_i близок нулю, а спокойной – к единице.

Выражением схемы компромиссов в случае напряженной ситуации ($\rho_i = 0$) является модель на основе минимаксной стратегии (обратная пессимистической стратегии в п.1):

$$x^* = \arg \min_x \max_{i \in [1, n]} f_i(x)$$

В случае $\rho_i = 1$, т.е. спокойной ситуации, схема компромиссов выражается моделью интегральной оптимальности:

$$x^* = \arg \min_x \sum_{i=1}^n f_i(x).$$

Нелинейной схеме компромиссов соответствует модель векторной оптимизации (2.3), в явном виде зависящая от характеристик напряженности ситуации ρ_i :

$$x^* = \arg \min_x \sum_{i=1}^n a_i \rho_i^{-1} = \arg \min_x \sum_{i=1}^n a_i [1 - f_i(x)]^{-1} \quad (2.3)$$

2.3.2 Сравнительный анализ методов принятия многокритериального решения

Сравним рассмотренные в п. 2.3.1 методы принятия многокритериального решения.

Для анализа будут учитываться 4 этапа из процесса изготовления дефектоскопа (рисунок 2.9), так как именно на этих этапах возникают дефекты в процессе изготовления дефектоскопов:

- Изготовление механических деталей;

- Сборка;
- Монтаж;
- ПСИ (приемо-сдаточные испытания);



Рисунок 2.9 - Процесс производства дефектоскопа

Для примера используем следующий набор данных (таблица 2.4):

Таблица 2.4

Набор данных для примера

№	Вид продукции	Этап производства	Предъявлено	Принято	Всего дефектов	D_i
1	Механические детали	Изготовление механических деталей	10	7	3	0,300
2	Механические детали	Изготовление механических деталей	18	2	16	0,889
3	Карта памяти	Сборка	21	13	8	0,380
4	Полусборка	Сборка	7	3	4	0,571
5	Кабели	Монтаж	10	8	2	0,200
6	Плата с навесными элементами	Монтаж	13	5	8	0,615
7	Готовая продукция	ПСИ	4	3	1	0,25
8	Готовая продукция	ПСИ	4	1	3	0,75

Для примера проведем вычисления для этапа «Монтаж», а в конце будут приведены результаты для всех этапов, полученные тем же образом.

1) Метод системных (решающих) матриц

Найдем оптимальное решение с помощью критерия Гурвица (см. таб. 2.3), вычисления приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5

Пример вычисления с помощью критерия Гурвица

Вид детали Показатель	Кабели	Плата с навесными элементами	$\min_j e_{ij} + \max_j e_{ij}$	\max_i
Конструктивные	0,083	0,083	$0,083+0,083=0,166$	0,166
Эргономические	0,083	0,083	$0,083+0,083=0,166$	
Эстетические	0,083	0,083	$0,083+0,083=0,166$	
Технологичности	0,083	0,083	$0,083+0,083=0,166$	

Значит $f^* = 0,166$.

Найдем оптимальное решение с помощью критерия Сэвиджа (см. таб. 2.3), вычисления приведены в таблице 2.6:

Таблица 2.6

Пример вычисления с помощью критерия Сэвиджа

Вид детали Показатель	Кабели	Плата с навесными элементами
Конструктивные	$0,083-0,083=0$	$0,083-0,083=0$
Эргономические	$0,083-0,083=0$	$0,083-0,083=0$
Эстетические	$0,083-0,083=0$	$0,083-0,083=0$
Технологичности	$0,083-0,083=0$	$0,083-0,083=0$
\max_j	0	0
\min_i	0	

Таким образом $f^* = 0,083$.

2) Метод усредненного критерия

Здесь $f(a) = \sum_{i=1}^n a_i f_i$, где $a_i = 1$, вычисления с помощью метода усредненного

критерия приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7

Пример вычисления с помощью метода усредненного критерия

Вид детали Показатель	Кабели	Плата с навесными элементами	$f(a)$
Конструктивные	0,083	0,083	0,166
Эргономические	0,083	0,083	0,166
Эстетические	0,083	0,083	0,166
Технологичности	0,083	0,083	0,166

Следовательно $f^* = \min f(a) = 0,166$.

3) Метод свертки Гермейера

Каждому критерию f_i назначим весовой коэффициент $a_i = 1$ и решение выберем из наихудших вариантов $f(a) = \max_i (a_i f_i)$, вычисления приведены в таблице

2.8:

Таблица 2.8

Пример вычисления с помощью метода свертки Гермейера

Вид детали Показатель	Кабели	Плата с навесными элементами	$f(a)$
Конструктивные	0,083	0,083	0,083
Эргономические	0,083	0,083	0,083
Эстетические	0,083	0,083	0,083
Технологичности	0,083	0,083	0,083

Оптимальным решением будет:

$$f^*(a) = \min f(a) = 0,083.$$

4) Метод ε -ограничений

Данная методика не подходит для решения задачи оценки уровня качества дефектоскопа, так как решение задачи должно позволять определять слабые

участки в производственном процессе изготовления дефектоскопа, а при выделении одного из двух целевых функций в качестве важнейшего мы ограничиваем поиск допустимых значений и заранее делаем выбор целевой функции, чьи частные значения мы хотим улучшить.

В таблице 2.9 приведены результаты вычисления оптимальных коэффициентов важности для каждого этапа производства, используя методы, описанные выше:

Таблица 2.9

Оптимальные значения коэффициентов важности этапов, полученные различными методами

№	Этап	Критерий Гурвица	Критерий Сэвиджа	Метод усредненного критерия	Метод свертки Гермейера
1	Изготовление механических деталей	0,4	0,2	0,4	0,2
2	Сборка	0,25	0,167	0,25	0,167
3	Монтаж	0,166	0,083	0,166	0,083
4	ПСИ	0,334	0,167	0,334	0,167

Опираясь на теорию управления качеством и в частности теорию квалиметрии, в ходе исследования существующих работ в области многокритериальной оптимизации уровня качества продукции были выбраны, согласно работе [12], следующие критерии сравнительного анализа (таблица 2.10):

Таблица 2.10

Сравнение методов принятия многокритериального решения

Критерий	Метод				
	Системных матриц	Усредненного критерия	Свертки Гермейера	ε - ограничений	Нелинейная схема компромиссов
Отсутствие дублирования показателей свойств	+	+	+	+	+
Чувствительность при пороговых значениях	-	+	-	-	-
Нормированность	+	+	+	+	+
Сопоставимость	+	+	+	+	+
Репрезентативность	+	+	+	+	+
Доступность информации для расчета	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-

Из таблицы следует, что все методы удовлетворяют всем критериям, кроме метода усредненного критерия, который чувствителен к пороговым значениям.

Таким образом можно сделать вывод о том, что все методы в целом подходят для анализа.

2.3.3 Решение задачи с помощью нелинейной схемы компромиссов

Для решения задачи с помощью нелинейной схемы компромисса, проведем оценку полученных (с помощью методов, перечисленных в таблице 2.9) оптимальных весовых коэффициентов важности.

Для получения нормализованных оценок в таблице 2.11 была использована шкала Харрингтона (таблица 2.12) [7], интервалы которой были умножены на максимальное среднее значение в таблице 2.11 для получения новой подходящей шкалы.

Для поиска весовых значений второй целевой функции будет использоваться симплекс-метод.

Таблица 2.11

Нормализованные оценки

№	Этап	Критерий Гурвица	Критерий Сэвиджа	Метод усред- ненного кри- терия	Метод свертки Гермейера	Сред- нее	Оценка
1	Изготовление механических деталей	0,4	0,2	0,4	0,2	0,3	5
2	Сборка	0,25	0,167	0,25	0,167	0,209	4
3	Монтаж	0,166	0,083	0,166	0,083	0,125	3
4	ПСИ	0,334	0,167	0,334	0,167	0,25	5

Таблица 2.12

Шкала оценок

Балл	1	2	3	4	5
Интервал оценок	0-0,2	0,2-0,37	0,37-0,63	0,63-0,8	0,8-1
Новый интервал оценок	0-0,06	0,06-0,111	0,111-0,189	0,189-0,24	0,24-0,3

С помощью прямого метода определения коэффициентов важности [13] вычислим коэффициенты w_i для каждого этапа производства на основе оценок в таблице 2.11 (по принципу чем выше оценка, тем выше важность):

$$\theta = \{w_1 \succ^{5/4} w_2; w_2 \succ^{4/3} w_3; w_3 \prec^{3/5} w_4; w_4 \approx w_1\}$$

Преобразуем запись в систему и решим ее:

$$\left\{ \begin{array}{l} w_1 = w_2 \\ w_2 = \frac{5}{4} w_3 \\ w_3 = \frac{3}{5} w_4 \\ w_4 = w_1 \\ w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1 \end{array} \right. \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} w_1 = 0,294 \\ w_2 = 0,235 \\ w_3 = 0,177 \\ w_4 = 0,294 \end{array} \right.;$$

Пусть частный критерий $f_i(x)$, рассчитываемый для каждого этапа производства, будет равен линейной свертке [10] рассмотренных в 2.2 целевых функций F_{i1} и F_{i2} :

$$f_i(x) = Q_i = F_{i1} \cdot m_1 + (1 - F_{i2}) \cdot m_2,$$

где

$$F_{i1} = c_i w_i, \quad F_{i2} = \sum z_j u_j.$$

Найдем u_j с помощью метода линейного программирования, для этого сначала составим матрицу A (таблица 2.13), где a_3 – общее количество дефектов, a_4 – количество дефектов, которые можно исправить, $a_5 = a_3 - a_4$ – количество дефектов, которые невозможно исправить. Эти значения поделены на количество выпущенной готовой продукции $n=8$.

Таблица 2.13

Матрица A

	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
Конструктивные	0	0	42/8=5,25	18/8=2,25	24/8=3
Эргономические	0	0	42/8=5,25	18/8=2,25	24/8=3
Эстетические	0	0	42/8=5,25	18/8=2,25	24/8=3
Технологичности	0	0	42/8=5,25	18/8=2,25	24/8=3

Рассчитаем z_j по формуле (2.2) и примем для примера $P_c = 5620500$, $n=8$.
Значения затрат S_j и вычисленные z_j приведены в таблице 2.14.

Таблица 2.14

Значения затрат и функции

Группа затрат S_j	Значение	z_j	Значение
S_1	6695300	z_1	0,149
S_2	4460500	z_2	0,099
S_3	3830500	z_3	0,085
S_4	2860000	z_4	0,064
S_5	1251000	z_5	0,028

В таблице 2.15 приведены вычисленные оптимальные значения u_j с помощью симплекс-метода в среде MATLAB.

Данную систему можно представить в математическом виде:

$$\begin{cases} 5,25u_3 + 2,25u_4 + 3u_5 \geq 2,1 \\ 5,25u_3 + 2,25u_4 + 3u_5 \geq 2,1 \\ 5,25u_3 + 2,25u_4 + 3u_5 \geq 2,1 \\ 5,25u_3 + 2,25u_4 + 3u_5 \geq 2,1 \\ u_1 + u_2 \leq 0,4 \\ u_1 + u_2 + u_3 + u_4 + u_5 = 1 \end{cases}$$

Использовался следующий программный код (рисунок 2.10):

```
f=[-0.149;-0.099;-0.085;-0.064;-0.028];%целевая функция, меняем знаки для нахождения максимума
A=[0 0 -5.25 -2.25 -3;
  0 0 -5.25 -2.25 -3;
  0 0 -5.25 -2.25 -3;
  0 0 -5.25 -2.25 -3;
  1 1 0 0 0];%матрица, меняются знаки, если неравенство не "меньше или равно"
b=[-2.1;
  -2.1;
  -2.1;
  -2.1;
  0.4];%ограничения,меняются знаки, если неравенство не "меньше или равно"
%задаем уравнение
Aeq=[1 1 1 1 1];
beq=1;
lb=[0;0;0;0;0];%нижние ограничения
[x,fval,exitflag,output,lambda] = linprog(f,A,b,Aeq,beq,lb);
```

Рисунок 2.10 - Симплекс-метод

В таблице 2.15 b_j – ограничения, которые ставятся по следующему правилу: если частные значения i -го уравнения отличаются от 1, мы должны поставить справа среднее значение этих величин со знаком \geq ; если все частные значения i -го уравнения равны 1, то справа мы ставим число 1 со знаком \leq ; если уравнение имеет одну переменную, то ограничение ставится со знаком \leq , со значением переменной.

Таблица 2.15

Симплекс-метод

	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	b_j
Конструктивные	0	0	5,25	2,25	3	$\geq 2,1$
Эргономические	0	0	5,25	2,25	3	$\geq 2,1$
Эстетические	0	0	5,25	2,25	3	$\geq 2,1$
Технологичности	0	0	5,25	2,25	3	$\geq 2,1$
$\sum_{i=1}^n u_i = 1$	1	1	1	1	1	$= 1$
$u_1 + u_2 \leq 0,4$	1	1	0	0	0	$\leq 0,4$
Найденные оптимальные значения u_j	0,4	0	0,6	0	0	

Таким образом $F_{i2} = \sum_{j=1}^n z_j u_j = 0,111$.

Рассчитаем c_i по формуле (2.1) для каждого этапа и примем для примера $m_1 = 0,56$, $m_2 = 0,44$. Дальнейшие расчеты приведены в таблице 2.16.

Для получения качественной оценки необходимо модель (2.3) привести к скалярной свертке:

$$Y = \sum_{i=1}^n w_i [1 - f_i(x)]^{-1} = 1,950,$$

а затем его нормировать:

$$Y_0 = 1 - \frac{1}{Y} = 1 - \frac{1}{1,950} = 0,487.$$

Таблица 2.16

Расчет оценки качества

Этап производства	c_i	w_i	F_{i1}	F_{i2}	$f_i(x) = Q_i$	$[1 - f_i(x)]^{-1}$
Изготовление механических деталей	$\frac{4-1}{6} = 0,5$	0,294	0,147	0,111	0,474	1,900
Сборка	$\frac{6-1}{6} = 0,833$	0,235	0,196	0,111	0,501	2,004
Монтаж	$\frac{2-1}{6} = 0,167$	0,177	0,029	0,111	0,408	1,689
ПСИ	$\frac{6-1}{6} = 0,833$	0,294	0,245	0,111	0,528	2,121

После чего полученное значение Y_0 соотнесем со шкалой в таблице 2.17, в результате чего оценка качества производства – «Удовлетворительное». Чтобы улучшить оценку качества, необходимо уменьшить значение функции z_5 , т.е. уменьшить количество дефектов, которые нельзя исправить.

Таблица 2.17

Шкала оценок

Оценка качества	Интервалы Y_0
Неприемлемое	1,0-0,7
Низкое	0,7-0,5
Удовлетворительное	0,5-0,4
Хорошее	0,4-0,2
Высокое	0,2-0,0

2.4 Результаты и выводы к главе 2

В данной главе был изучен набор данных и на основе проведенных исследований выявлены показатели качества, которые подвержены наибольшему влиянию дефектов:

- конструктивные;
- эргономические;
- эстетические;
- технологичности.

Также была сформирована математическая модель мониторинга показателей качества:

$$\langle C, X, Y, F \rangle$$

где C – затраты на качество; X – множество учитываемых этапов производства; Y – множество учитываемых показателей качества производимой продукции; F – функция уровня качества производимой продукции.

Выбраны целевые функции для оценки уровня качества – функция бездефектности и затрат на качество:

$$F_1 = Y(X) = \inf(c_i, w_i),$$

$$F_2 = C(Y) = \sup(z_i z_{sum}, w_i) = \sup(z_i, w_i).$$

Был проведен сравнительный анализ следующих методов многокритериальной оптимизации:

- Метод системных матриц;
- Метод усредненного критерия;
- Метод свертки Гермейера;
- Метод ε -ограничений;

Для оценки уровня качества была выбрана схема нелинейного компромисса.

С использованием всего вышеперечисленного и симплекс-метода была разработана методика оценки уровня качества и приведен пример её вычисления.

3 ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПРОИЗВОДСТВА ДЕФЕКТОСКОПА

В предыдущей главе была сформирована методика оценки качества производства дефектоскопа и был приведен пример вычисления оценки на небольшой таблице. В этой главе будет применена данная методика на набор данных, приведенный в приложении 1.

3.1 Вычисление оценки качества производства дефектоскопа

С помощью языка программирования R были найдены количество дефектов $a_3 = 1592$, количество дефектов, которые можно исправить $a_4 = 955$, $a_5 = a_3 - a_4 = 637$ – количество дефектов, которые невозможно исправить и количество выпущенной готовой продукции $n = 47$. Программный код представлен в приложении 2.

Составим матрицу A (таблица 3.1):

Таблица 3.1

Матрица A

	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
Конструктивные	0	0	$1592/47=33,872$	$955/47=20,319$	$637/47=13,553$
Эргономические	0	0	$1592/47=33,872$	$955/47=20,319$	$637/47=13,553$
Эстетические	0	0	$1592/47=33,872$	$955/47=20,319$	$637/47=13,553$
Технологичности	0	0	$1592/47=33,872$	$955/47=20,319$	$637/47=13,553$

Рассчитаем z_j по формуле (2.2), где $P_c = 5620500$, $n = 47$. Значения затрат S_j и вычисленные z_j в таблице 3.2.

Таблица 3.2

Значения затрат и функции

Группа затрат S_j	Значение	z_j	Значение
S_1	6695300	z_1	0,025
S_2	4460500	z_2	0,017
S_3	3830500	z_3	0,015
S_4	2860000	z_4	0,011
S_5	1251000	z_5	0,005

Данную систему можно представить в математическом виде:

$$\begin{cases} 33,872u_3 + 20,319u_4 + 13,553u_5 \geq 13,549 \\ 33,872u_3 + 20,319u_4 + 13,553u_5 \geq 13,549 \\ 33,872u_3 + 20,319u_4 + 13,553u_5 \geq 13,549 \\ 33,872u_3 + 20,319u_4 + 13,553u_5 \geq 13,549 \\ u_1 + u_2 \leq 0,4 \\ u_1 + u_2 + u_3 + u_4 + u_5 = 1 \end{cases}$$

С помощью следующего программного кода получены оптимальные значения в таблице 3.3 (рисунок 3.1):

```
f=[-0.025;-0.017;-0.015;-0.011;-0.005];%целевая функция, меняем знаки для нахождения максимума
A=[0 0 -33.872 -20.319 -13.549;
  0 0 -33.872 -20.319 -13.549;
  0 0 -33.872 -20.319 -13.549;
  0 0 -33.872 -20.319 -13.549;
  1 1 0 0 0];%матрица, меняются знаки, если неравенство не "меньше или равно"
b=[-13.549;
  -13.549;
  -13.549;
  -13.549;
  0.4];%ограничения,меняются знаки, если неравенство не "меньше или равно"
%задаем уравнение
Aeq=[1 1 1 1 1];
beq=1;
lb=[0;0;0;0;0];%нижние ограничения
[x,fval,exitflag,output,lambda] = linprog(f,A,b,Aeq,beq,lb);
```

Рисунок 3.1 - Симплекс-метод

Таблица 3.3

Симплекс-метод

	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	b_j
Конструктивные	0	0	33,872	20,319	13,553	$\geq 13,549$
Эргономические	0	0	33,872	20,319	13,553	$\geq 13,549$
Эстетические	0	0	33,872	20,319	13,553	$\geq 13,549$
Технологичности	0	0	33,872	20,319	13,553	$\geq 13,549$
$\sum_{i=1}^n u_i = 1$	1	1	1	1	1	$=1$
$u_1 + u_2 \leq 0,4$	1	1	0	0	0	$\leq 0,4$
Найденные оптимальные значения u_j	0,4	0	0,6	0	0	

Таким образом $F_{i2} = \sum_{j=1}^n z_j u_j = 0,019$.

Рассчитаем c_i по формуле (2.1) для каждого этапа и примем $m_1 = 0,56$, $m_2 = 0,44$. Расчеты показаны в таблице 3.4.

Таблица 3.4

Расчет оценки качества

Этап производства	c_i	w_i	F_{i1}	F_{i2}	$f_i(x) = Q_i$	$[1 - f_i(x)]^{-1}$
Изготовление механических деталей	$\frac{4-1}{6} = 0,5$	0,294	0,147	0,019	0,514	2,058
Сборка	$\frac{6-1}{6} = 0,833$	0,235	0,196	0,019	0,541	2,180
Монтаж	$\frac{2-1}{6} = 0,167$	0,177	0,029	0,019	0,448	1,812
ПСИ	$\frac{6-1}{6} = 0,833$	0,294	0,245	0,019	0,569	2,319

Скалярная свертка:

$$Y = \sum_{i=1}^n w_i [1 - f_i(x)]^{-1} = 2,118,$$

следовательно, нормированное значение будет:

$$Y_0 = 1 - \frac{1}{Y} = 1 - \frac{1}{2,118} = 0,528.$$

Y_0 соотнесем со шкалой в таблице 2.17, оценка качества производства – «Низкое» качество. Чтобы улучшить оценку качества, необходимо уменьшить значение функции z_5 , т.е. уменьшить количество дефектов, которые нельзя исправить.

3.2 Проверка разработанной методики оценки уровня качества на основе модели многокритериальной оптимизации с нелинейной функцией полезности

Для проверки правильности вычисления оценки с помощью разработанной методики была построена диаграмма (рисунок 3.2) динамики изменения нормированной оценки Y_0 для измененных значений частных критериев $f_i(x)$ из таблицы 3.4.

В соответствии со шкалой (см. табл. 2.17) при уменьшении значения различных частных критериев $f_i(x)$ (то есть улучшении), нормированная оценка постепенно тоже уменьшается (то есть тоже улучшается) и наоборот. Следовательно, вычисления верны.

Согласно [11], лицо, принимающее решение заинтересовано в получении по возможности больших значений каждой компоненты критерия $f_i(x)$, что мы и видим на рисунке 3.3 – оптимальному решению f_i^* соответствует многоугольник, у которого все стороны равны.

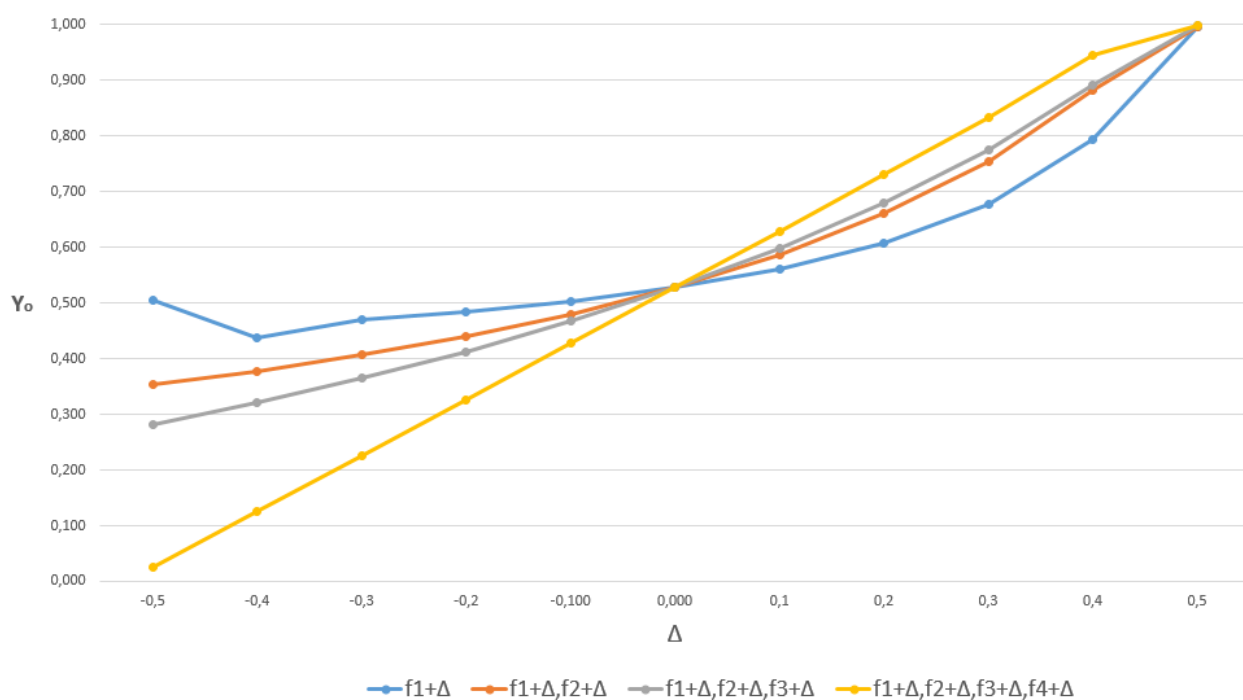


Рисунок 3.2 - Динамика изменения нормированной оценки в зависимости от частных критериев

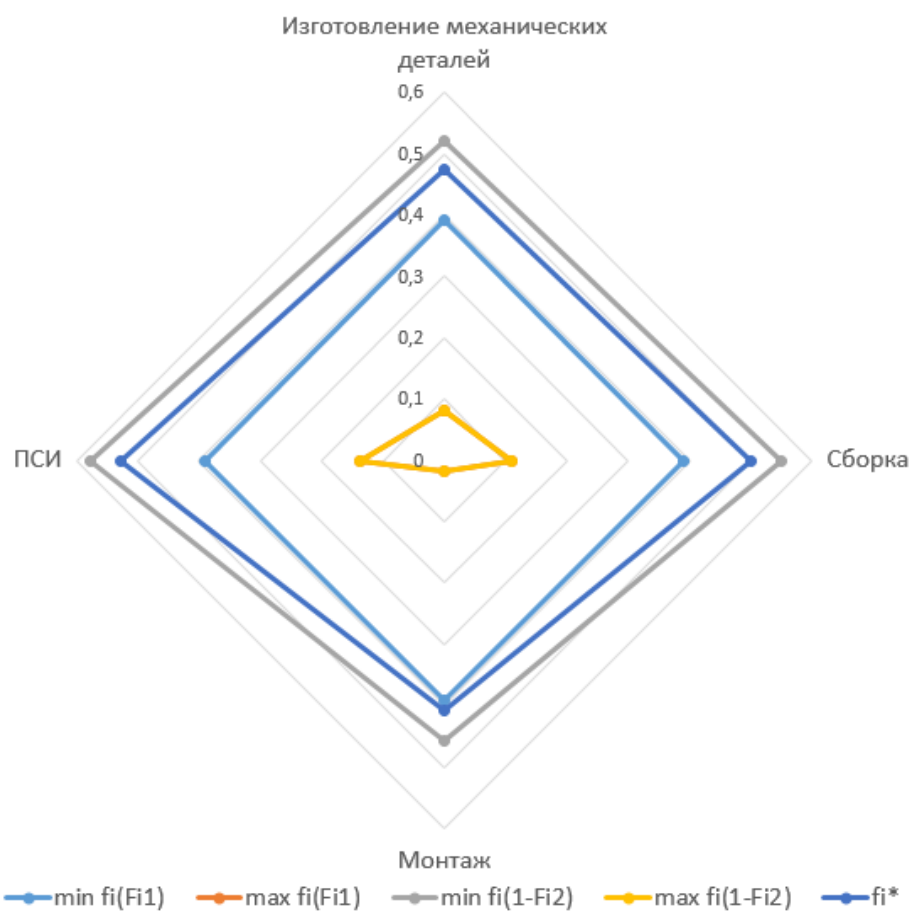


Рисунок 3.3 - Отображение допустимой области и оптимальных точек качества дефектоскопа

Таким образом, полученное оптимальное решение можно считать достоверным.

3.3 Результаты и выводы к главе 3

В данной главе была использована методика, разработанная в главе 2, на наборе данных из приложения 1.

В результате работы была поставлена оценка качеству производства дефектоскопа – «Низкое» качество, а также определена цель, которая позволит улучшить качество производства – это количество дефектов, которые можно исправить.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе написания выпускной бакалаврской работы на тему «Модели многокритериальной оптимизации для задачи оценки и улучшения качества продукции приборостроения» были выполнены все задачи, поставленные во введении.

В первой главе были рассмотрены процесс производства рассматриваемого объекта исследования – дефектоскопа, классификация показателей качества и методики оценки и управления качеством продукции.

Во второй главе был изучен набор данных из более чем 1000 строк с помощью статистического анализа и на основе проведенных исследований выявлены показатели качества, которые подвержены наибольшему влиянию дефектов, сформирована математическая модель мониторинга показателей качества, определены целевые функции для оценки уровня качества, проведен сравнительный анализ следующих методов многокритериальной оптимизации и, наконец, с использованием схемы нелинейного компромисса и симплекс-метода была разработана методика оценки уровня качества и приведен пример её вычисления на небольшом наборе данных.

В третьей главе методика, разработанная во второй главе, была применена на набор данных, приведенный в приложении 1.

Одним из использованных источников является публикация [9] в XXIII Международной Научно-Практической Конференции «Системный анализ в проектировании и управлении» (SAEC-2019).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варжапетян А. Г. Квалиметрия: Учебное пособие// СПбГУАП. СПб., 2005. 176 с.
2. Волин Ю. М., Островский Г. М. Многокритериальная оптимизация технологических процессов в условиях неопределенности// Автомат. и телемех., 2007, выпуск 3, 165–180.
3. Воронин А.Н., Зиатдинов Ю.К. Нелинейная схема компромиссов в многокритериальных задачах // Artificial Intelligence and Decision Making. International Book Series “Information Science & Computing”. – 2008. – No.7. – с.79-85.
4. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия, термины и определения. Введ. 1979-01-26. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 23 с
5. ГОСТ 19.701-90. Схемы алгоритмов, программ, данных и систем. Введ. 1992-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2010. – 21 с.
6. Елиферов В. Г. Управление качеством. Сказки, мифы и проза жизни: стандарты ИСО 9000 и система менеджмента. СПб. – М.: Вершина, 2006. 295 с.
7. Исмагилов И. И. Принятие решений при количественных и качественных критериях описания альтернатив// Исслед. по информ., 2003, выпуск 6, 21–28.
8. Козлов В. Н. Системный анализ, оптимизация и принятие решений: учеб. пособие /В. Н. Козлов. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 244 с.
9. Назарова Л.И., Пипия Г.Т., Черненькая Л.В. Методика определения показателей качества на основе статистического анализа данных// Системный анализ в проектировании и управлении: Сборник научных трудов XXIII Междунар. Науч.-практич. Конф. Ч.3. – СПб.:Изд-во Политех-Пресс, 2019, с. 263-272.
10. Ногин В.Д. Линейная свертка критериев в многокритериальной оптимизации // Искусственный интеллект и принятие решений, 2014, № 4, с. 98-112.
11. Ногин В. Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. –М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 144 с.
12. Пипия Г. Т. Сравнительный анализ квалиметрических методов свертки // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: Сборник докладов. М.: Издательство СПбГУАП/СПб. – 2015.

13. Подиновский В.В. Введение в теорию важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 64 с.
14. Хамханова Д.В. Основы квалиметрии. Учеб. пособие. - Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2003. – 142 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Исходные данные для анализа

Вид продукции	Наименование операции по ТП	Предъявлено	Принято	Всего несоответствий
Полусборка	Сборка	45	45	0
Карта памяти	Сборка	17	17	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	1	1	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	1	1	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	1	1	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	1	1	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	1	1	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	1	1	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	1	1	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	1	1	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	1	1	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	1	1	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	1	1	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	1	0	1
Механические детали	Изготовление механических деталей	1	1	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	2	1	1
Механические детали	Изготовление механических деталей	1	1	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	1	1	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	1	1	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	2	1	1
Механические детали	Изготовление механических деталей	1	1	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	1	1	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	2	0	2
Механические детали	Изготовление механических деталей	1	1	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	1	1	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	1	0	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	1	1	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	1	0	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	1	1	0

Механические детали	Изготовление механических деталей	9	0	9
Механические детали	Изготовление механических деталей	1	0	1
Механические детали	Изготовление механических деталей	24	20	4
Механические детали	Изготовление механических деталей	212	212	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	102	102	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	1	0	1
Механические детали	Изготовление механических деталей	90	90	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	40	40	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	10	10	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	30	30	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	2	2	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	2	0	2
Механические детали	Изготовление механических деталей	10	5	5
Карта памяти	Сборка	21	21	0
Полусборка	Сборка	6	6	0
Полусборка	Сборка	7	7	0
Кабели	Монтаж	10	10	0
Кабели	Монтаж	40	40	0
Кабели	Монтаж	30	20	10
Кабели	Монтаж	40	40	0
Плата с навесными элементами	Монтаж	30	30	0
Кабели	Монтаж	5	4	1
Кабели	Монтаж	5	5	0
Кабели	Монтаж	30	30	0
Полусборка	Монтаж	5	5	0
Полусборка	Сборка	1	1	0
Полусборка	Сборка	1	1	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	2	2	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	4	4	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	49	49	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	10	9	1
Механические детали	Изготовление механических деталей	10	10	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	1	1	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	1	0	1
Механические детали	Изготовление механических деталей	1	1	0

[illegible]

[illegible]

Механические детали	Изготовление механических деталей	30	30	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	30	30	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	30	30	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	30	30	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	60	60	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	30	30	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	30	0	30
Механические детали	Изготовление механических деталей	80	80	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	54	54	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	1	1	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	8	8	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	20	20	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	7	7	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	7	7	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	6	6	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	2	2	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	30	30	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	30	0	30
Механические детали	Изготовление механических деталей	30	30	0
Плата с навесными элементами	Монтаж	2	2	0
Кабели	Монтаж	9	9	0
Полусборка	Монтаж	9	9	0
Кабели	Монтаж	10	10	0
Кабели	Монтаж	35	22	13
Карта памяти	Сборка	57	57	0
Полусборка	Сборка	1	1	0
Полусборка	Сборка	96	96	0
Полусборка	Сборка	20	20	0
Кабели	Монтаж	4	4	0
Полусборка	Сборка	9	9	0
Кабели	Монтаж	20	15	5
Кабели	Монтаж	10	10	0
Кабели	Монтаж	1	1	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	2	2	0
Полусборка	Сборка	1	1	0

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

Механические детали	Изготовление механических деталей	83	83	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	21	21	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	21	21	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	40	40	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	20	20	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	50	50	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	20	20	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	20	20	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	40	40	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	22	22	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	40	40	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	20	20	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	41	41	0
Плата с навесными элементами	Монтаж	2	2	0
Плата с навесными элементами	Монтаж	1	1	0
Полусборка	Монтаж	5	5	0
Кабели	Монтаж	5	5	0
Полусборка	Сборка	34	34	0
Полусборка	Сборка	83	70	13
Полусборка	Сборка	37	37	0
Полусборка	Сборка	29	29	0
Плата с навесными элементами	Монтаж	5	5	0
Полусборка	Сборка	10	10	0
Плата с навесными элементами	Монтаж	20	20	0
Кабели	Монтаж	6	6	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	4	4	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	2	2	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	2	0	2
Механические детали	Изготовление механических деталей	3	3	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	3	3	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	40	40	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	5	5	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	42	42	0

[illegible]

Готовая продукция	ПСИ	1	1	0
Готовая продукция	ПСИ	1	1	0
Готовая продукция	ПСИ	1	1	0
Готовая продукция	ПСИ	1	1	0
Готовая продукция	ПСИ	1	1	0
Готовая продукция	ПСИ	1	1	0
Готовая продукция	ПСИ	1	1	0
Готовая продукция	ПСИ	1	1	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	6	6	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	6	6	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	10	10	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	10	10	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	5	5	0
Механические детали	Изготовление механических деталей		0	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	2	2	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	5	5	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	2	2	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	125	125	0
Полусборка	Сборка	57	57	0
Полусборка	Сборка	10	10	0
Полусборка	Сборка	12	12	0
Полусборка	Сборка	12	12	0
Плата с навесными элементами	Монтаж	30	30	0
Полусборка	Сборка	17	17	0
Полусборка	Сборка	6	6	0
Полусборка	Сборка	19	19	0
Плата с навесными элементами	Монтаж	13	13	0
Полусборка	Сборка	10	10	0
Кабели	Монтаж	2	2	0
Полусборка	Сборка	10	10	0
Плата с навесными элементами	Монтаж	2	2	0
Кабели	Монтаж	20	10	10
Кабели	Монтаж	10	10	0
Полусборка	Сборка	1	1	0
Полусборка	Сборка	1	1	0
Полусборка	Сборка	1	1	0
Полусборка	Сборка	1	1	0
Полусборка	Сборка	1	1	0
Кабели	Монтаж	10	10	0

[illegible]

Механические детали	Изготовление механических деталей	33	33	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	5	5	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	4	4	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	24	24	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	40	40	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	2	1	1
Механические детали	Изготовление механических деталей	4	1	3
Механические детали	Изготовление механических деталей	4	0	4
Механические детали	Изготовление механических деталей	2	2	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	5	5	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	5	5	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	3	3	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	18	18	0
Полусборка	Сборка	10	10	0
Полусборка	Сборка	54	54	0
Полусборка	Сборка	11	11	0
Полусборка	Сборка	6	6	0
Полусборка	Монтаж	20	20	0
Плата с навесными элементами	Монтаж	11	11	0
Полусборка	Сборка	3	3	0
Кабели	Монтаж	14	4	10
Полусборка	Сборка	13	13	0
Плата с навесными элементами	Монтаж	4	4	0
Кабели	Монтаж	15	15	0
Кабели	Монтаж	29	10	19
Плата с навесными элементами	Монтаж	2	2	0
Полусборка	Сборка	1	1	0
Полусборка	Сборка	18	18	0
Полусборка	Сборка	5	5	0
Полусборка	Сборка	25	10	15
Механические детали	Изготовление механических деталей	6	6	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	4	4	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	4	4	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	4	4	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	2	2	0

[illegible]

[illegible]

[illegible]

Механические детали	Изготовление механических деталей	8	8	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	14	14	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	20	20	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	11	11	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	12	12	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	33	33	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	16	16	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	8	8	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	9	9	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	9	9	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	14	14	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	13	13	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	10	10	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	210	210	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	9	9	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	6	6	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	6	6	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	16	16	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	32	32	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	8	8	0
Полусборка	Сборка	20	20	0
Плата с навесными элементами	Монтаж	17	17	0
Плата с навесными элементами	Монтаж	3	3	0
Плата с навесными элементами	Монтаж	10	10	0
Полусборка	Сборка	5	5	0
Кабели	Монтаж	1	1	0
Кабели	Монтаж	1	1	0
Кабели	Монтаж	1	1	0
Кабели	Монтаж	1	1	0
Полусборка	Сборка	20	20	0
Кабели	Монтаж	1	1	0
Кабели	Монтаж	1	1	0
Кабели	Монтаж	1	1	0
Кабели	Монтаж	1	1	0

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

Механические детали	Изготовление механических деталей	12	12	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	86	86	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	10	10	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	5	0	5
Механические детали	Изготовление механических деталей	5	0	5
Механические детали	Изготовление механических деталей	12	12	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	4	4	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	10	10	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	1	1	0
Полусборка	Сборка	4	4	0
Полусборка	Сборка	4	4	0
Полусборка	Сборка	4	4	0
Полусборка	Сборка	36	36	0
Полусборка	Сборка	23	23	0
Кабели	Монтаж	12	12	0
Полусборка	Сборка	4	4	0
Кабели	Монтаж	8	8	0
Кабели	Монтаж	10	10	0
Кабели	Монтаж	10	10	0
Полусборка	Сборка	5	5	0
Полусборка	Монтаж	6	6	0
Полусборка	Сборка	3	3	0
Плата с навесными элементами	Монтаж	2	2	0
Кабели	Монтаж	1	1	0
Кабели	Монтаж	1	1	0
Полусборка	Сборка	8	8	0
Полусборка	Сборка	10	10	1
Кабели	Монтаж	1	1	0
Кабели	Монтаж	1	1	0
Полусборка	Сборка	2	2	0
Полусборка	Сборка	4	4	0
Полусборка	Сборка	4	3	1
Полусборка	Сборка	4	4	0
Полусборка	Сборка	36	36	0
Полусборка	Сборка	23	23	0
Кабели	Монтаж	12	12	0
Полусборка	Сборка	4	4	0
Кабели	Монтаж	8	8	0
Кабели	Монтаж	10	10	0
Кабели	Монтаж	10	10	0
Полусборка	Сборка	5	5	0

Полусборка	Монтаж	6	6	0
Полусборка	Сборка	3	3	0
Плата с навесными элементами	Монтаж	2	2	0
Кабели	Монтаж	1	1	0
Кабели	Монтаж	1	1	0
Полусборка	Сборка	8	8	0
Полусборка	Сборка	10	10	1
Кабели	Монтаж	1	1	0
Кабели	Монтаж	1	1	0
Полусборка	Сборка	2	2	0
Готовая продукция	ПСИ	1	1	0
Готовая продукция	ПСИ	1	1	0
Готовая продукция	ПСИ	1	1	0
Готовая продукция	ПСИ	1	1	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	4	4	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	4	4	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	4	4	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	515	515	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	736	736	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	8	0	8
Механические детали	Изготовление механических деталей	2	0	2
Механические детали	Изготовление механических деталей	2	0	2
Механические детали	Изготовление механических деталей	11	11	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	9	9	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	2	0	2
Механические детали	Изготовление механических деталей	15	15	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	5	5	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	5	5	0
Механические детали	Изготовление механических деталей		0	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	40	40	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	3	3	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	4	4	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	10	0	10
Механические детали	Изготовление механических деталей	7	7	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	4	4	0

Механические детали	Изготовление механических деталей	2	0	2
Механические детали	Изготовление механических деталей	69	69	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	32	0	32
Механические детали	Изготовление механических деталей	1	1	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	1	0	1
Плата с навесными элементами	Монтаж	1	1	0
Плата с навесными элементами	Монтаж	1	1	0
Кабели	Монтаж	15	15	0
Кабели	Монтаж	1	1	0
Кабели	Монтаж	2	2	0
Полусборка	Сборка	1	1	0
Кабели	Монтаж	8	8	0
Кабели	Монтаж	8	8	0
Кабели	Монтаж	1	1	0
Кабели	Монтаж	1	1	0
Полусборка	Сборка	1	1	0
Полусборка	Сборка	1	1	0
Кабели	Монтаж	2	2	0
Кабели	Монтаж	2	2	0
Кабели	Монтаж	2	2	0
Кабели	Монтаж	1	1	0
Кабели	Монтаж	2	2	0
Плата с навесными элементами	Монтаж	1	1	0
Кабели	Монтаж	2	2	0
Кабели	Монтаж	1	1	0
Кабели	Монтаж	1	1	0
Кабели	Монтаж	1	1	0
Кабели	Монтаж	1	1	0
Кабели	Монтаж	2	2	0
Полусборка	Сборка	1	1	0
Полусборка	Сборка	15	15	0
Полусборка	Сборка	50	50	0
Карта памяти	Сборка	8	8	0
Кабели	Монтаж	6	6	0
Кабели	Монтаж	9	9	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	1	1	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	4	4	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	10	10	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	30	30	0

[illegible]

Механические детали	Изготовление механических деталей	47,0	47	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	24,0	24	0
Кабели	Монтаж	1	1	0
Кабели	Монтаж	5	5	0
Полусборка	Сборка	1	1	0
Полусборка	Сборка	1	1	0
Полусборка	Сборка	2	2	0
Полусборка	Сборка	9	9	0
Полусборка	Сборка	2	2	0
Полусборка	Сборка	2	2	0
Полусборка	Сборка	2	2	0
Полусборка	Сборка	2	2	0
Полусборка	Сборка	8	8	0
Кабели	Монтаж	5	5	0
Кабели	Монтаж	10	10	0
Полусборка	Сборка	1	1	0
Полусборка	Сборка	1	1	0
Полусборка	Сборка	1	1	0
Полусборка	Сборка	1	1	0
Полусборка	Сборка	8	8	0
Плата с навесными элементами	Монтаж	8	8	0
Кабели	Монтаж	1	1	0
Плата с навесными элементами	Монтаж	7	7	0
Кабели	Монтаж	3	3	0
Кабели	Монтаж	3	3	0
Кабели	Монтаж	7	7	0
Кабели	Монтаж	5	5	0
Кабели	Монтаж	5	5	0
Кабели	Монтаж	15	15	0
Полусборка	Сборка	7	7	0
Полусборка	Сборка	6	6	0
Кабели	Монтаж	5	5	0
Полусборка	Сборка	4	4	0
Полусборка	Сборка	15	11	4
Полусборка	Сборка	3	3	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	43	43	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	22	22	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	20	20	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	58	58	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	51	51	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	21	21	0

Механические детали	Изготовление механических деталей	50	50	0
Полусборка	Сборка	4	2	2
Полусборка	Сборка	1	1	0
Полусборка	Сборка	1	1	0
Полусборка	Сборка	2	2	0
Карта памяти	Сборка	120	120	0
Полусборка	Сборка	1	1	0
Полусборка	Сборка	1	1	0
Плата с навесными элементами	Монтаж	5	5	0
Кабели	Монтаж	2	2	
Кабели	Монтаж	2	2	
Плата с навесными элементами	Монтаж	2	2	
Полусборка	Монтаж	12	12	
Полусборка	Сборка	50	50	0
Карта памяти	Сборка	11	11	
Полусборка	Монтаж	9	9	
Плата с навесными элементами	Монтаж	5	5	
Полусборка	Монтаж	1	1	
Плата с навесными элементами	Монтаж	5	5	
Кабели	Монтаж	6	6	
Кабели	Монтаж	5	5	
Плата с навесными элементами	Монтаж	1	1	
Полусборка	Монтаж	13	13	
Механические детали	Изготовление механических деталей	9	0	9
Механические детали	Изготовление механических деталей	12	0	12
Механические детали	Изготовление механических деталей	8	0	8
Механические детали	Изготовление механических деталей	11	0	11
Механические детали	Изготовление механических деталей	40	0	40
Механические детали	Изготовление механических деталей	207	207	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	20	20	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	20	20	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	20	20	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	1	1	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	1	1	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	1	1	0
Механические детали	Изготовление механических деталей	1	1	0

Механические детали	Изготовление механических деталей	2	2	
Механические детали	Изготовление механических деталей	2	2	
Механические детали	Изготовление механических деталей	2	2	
Механические детали	Изготовление механических деталей	2	2	
Механические детали	Изготовление механических деталей	1	1	
Механические детали	Изготовление механических деталей	2	2	
Механические детали	Изготовление механических деталей	5	5	
Механические детали	Изготовление механических деталей	3	3	
Механические детали	Изготовление механических деталей	9	9	
Механические детали	Изготовление механических деталей	1	1	
Механические детали	Изготовление механических деталей	1	1	
Механические детали	Изготовление механических деталей	4	4	
Механические детали	Изготовление механических деталей	7	7	
Механические детали	Изготовление механических деталей	8	8	
Механические детали	Изготовление механических деталей	5	5	
Механические детали	Изготовление механических деталей	5	5	
Механические детали	Изготовление механических деталей	2	2	
Механические детали	Изготовление механических деталей	2	2	
Механические детали	Изготовление механических деталей	2	2	
Механические детали	Изготовление механических деталей	2	2	
Плата с навесными элементами	Монтаж	5	5	
Плата с навесными элементами	Сборка	7	7	
Полусборка	Сборка	4	4	
Плата с навесными элементами	Сборка	5	5	
Карта памяти	Сборка	39	39	
Плата с навесными элементами	Сборка	1	1	
Плата с навесными элементами	Монтаж	1	1	
Полусборка	Сборка	7	7	
Полусборка	Сборка	7	7	
Полусборка	Сборка	23	23	0
Плата с навесными элементами	Монтаж	1	1	
Полусборка	Монтаж	15	15	

Кабели	Монтаж	35	35	
Плата с навесными элементами	Монтаж	5	5	
Карта памяти	Сборка	15	15	
Кабели	Монтаж	22	22	
Плата с навесными элементами	Монтаж	5	5	
Полусборка	Сборка	27	27	0
Плата с навесными элементами	Монтаж	15	15	
Плата с навесными элементами	Монтаж	1	1	
Карта памяти	Сборка	11	11	
Полусборка	Монтаж	4	4	
Полусборка	Сборка	13	13	0
Карта памяти	Сборка	11	11	

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Код программы

```
install.packages("readxl")
install.packages("ggplot2")
install.packages("dplyr")
install.packages("factoextra")
install.packages("ggpubr")
install.packages("fossil")

library(readxl)
library(ggplot2)
library(dplyr)
library(factoextra)
library(ggpubr)
library(fossil)

#названия столбцов
colnames<-readLines("C:/Users/nazar/OneDrive/Документы/диплом_материалы/статья/names.csv")

#считываем таблицу
obj<-read.csv("C:/Users/nazar/OneDrive/Документы/диплом_материалы/статья/stat2.csv", sep = ";",
dec=",",
          col.names = colnames,na.strings = "NaN", header = F)

#tolower(obj)
#str(obj)
#количество строк
#nrow(obj)
#первые 6 строк
#head(obj, 20)
```

```

#tail(obj, 6)
#коэффициент дефектности
obj$defCoef<-obj$DefectQuantity/obj$ProductionQuantity

#выведем номера строк некорректных значений
nullProdQuan<-which(is.na(obj$ProductionQuantity))
nullTested<-which(is.na(obj$TestedProductionQuantity))
nullDefect<-which(is.na(obj$DefectQuantity))

nullProdQuan
nullTested
nullDefect

#заменяем пропущенные значения атрибутов на 0
obj_copy<-obj
obj_copy$ProductionQuantity[nullProdQuan]<-0
obj_copy$TestedProductionQuantity[nullTested]<-0
obj_copy$DefectQuantity[nullDefect]<-0

#выведем номера строк некорректных значений
nullProdQuan<-which(is.na(obj_copy$ProductionQuantity))
nullTested<-which(is.na(obj_copy$TestedProductionQuantity))
nullDefect<-which(is.na(obj_copy$DefectQuantity))

nullProdQuan
nullTested
nullDefect

nullDefCoef<-which(is.na(obj_copy$defCoef))
nullDefCoef

```

```
obj_copy$defCoef[nullDefCoef]<-0
nullDefCoef<-which(is.na(obj_copy$defCoef))
nullDefCoef
```

```
str(obj_copy)
head(obj_copy, 20)
```

```
qualFactors<-read.csv2("C:/Us-
ers/nazar/OneDrive/Документы/диплом_материалы/статья/qualityfactors3.csv")
str(qualFactors)
```

```
obj_copy<-inner_join(obj_copy, qualFactors,by=c("ItemGroup"="Вид.детали"))
obj_qual<-obj_copy
obj_qual<-obj_qual[,c(3,6,8:17)]
obj_copy<-obj_copy[,c(3,6,8:17)]
head(obj_qual,10)
str(obj_qual)
```

```
#копия для ч.2
obj_2<-obj_copy
```

```
#удаляем строки где количество дефектов 0
obj_nozero<-obj_qual[-(which(obj_qual$DefectQuantity==0)),]
str(obj_nozero)
which(obj_nozero$DefectQuantity==0)
```

```
#коэф дефектности для видов продукции
defGroupCount<-by(obj_copy$DefectQuantity, obj_copy$ItemGroup, sum)
testGroupCount<-by(obj_copy$ProductionQuantity, obj_copy$ItemGroup, sum)
defCoefGroupSum<-defGroupCount/testGroupCount
```

```
#коэф дефектности для операций
```

```
defPhaseCount<-by(obj_copy$DefectQuantity, obj_copy$ProductionPhase, sum)
```

```
testPhaseCount<-by(obj_copy$ProductionQuantity, obj_copy$ProductionPhase, sum)
```

```
defCoefPhaseSum<-defPhaseCount/testPhaseCount
```

```
#коэф дефектности для показателей
```

```
obj_qual$Конструктивные<-obj_qual$defCoef*obj_qual$Конструктивные
```

```
obj_qual$Эргономические<-obj_qual$defCoef*obj_qual$Эргономические
```

```
obj_qual$Эстетические<-obj_qual$defCoef*obj_qual$Эстетические
```

```
obj_qual$Технологичности<-obj_qual$defCoef*obj_qual$Технологичности
```

```
obj_qual$Функциональные<-obj_qual$defCoef*obj_qual$Функциональные
```

```
obj_qual$Надежности<-obj_qual$defCoef*obj_qual$Надежности
```

```
#средние значения
```

```
qualMean<-colMeans(obj_qual[,7:12])
```

```
qualMean<-data.frame(row.names =levels(obj_qual$ItemGroup))
```

```
qualMean$Конструктивные<-by(obj_qual$Конструктивные, obj_qual$ItemGroup,  
mean)
```

```
qualMean$Эргономические<-by(obj_qual$Эргономические,  
obj_qual$ItemGroup,mean)
```

```
qualMean$Эстетические<-by(obj_qual$Эстетические, obj_qual$ItemGroup,mean)
```

```
qualMean$Технологичности<-by(obj_qual$Технологичности,  
obj_qual$ItemGroup,mean)
```

```
qualMean$Функциональные<-by(obj_qual$Функциональные,  
obj_qual$ItemGroup,mean)
```

```
qualMean$Надежности<-by(obj_qual$Надежности, obj_qual$ItemGroup,mean)
```

```
qualMean<-as.matrix(qualMean)
```

```
str(qualMean)
```

#графики

```
barplot(qualMean, xlab = "Показатели", ylab = "Коэффициент дефектности",
ylim=c(0,0.04),
```

```
col = topo.colors(6),
```

```
main = "Средний коэффициент дефектности для разных видов продукции и
показателей")
```

```
legend(5, 0.04, rownames(qualMean), fill=topo.colors(6))
```

```
barplot(defCoefGroupSum, xlab = "Виды продукции", ylab = "Коэффициент де-
фектности",
```

```
#col = topo.colors(6),
```

```
main = "Коэффициент дефектности для разных видов продукции")
```

```
barplot(defCoefPhaseSum, xlab = "Этапы производства", ylab = "Коэффициент де-
фектности",
```

```
main = "Коэффициент дефектности для этапов производства")
```

```
tab<-data.frame(obj_copy$ItemGroup, obj_copy$ProductionPhase)
```

```
barplot(tab, xlab = "Виды продукции", ylab = "Кол-во дефектов",
```

```
col = ItemGroup,
```

```
main = "Количество дефектов по видам продукции и этапам производства")
```

```
legend("topright",c(levels(obj_copy$ItemGroup)))
```

```
ggplot(data = obj_copy, aes(x = defCoef , fill = ItemGroup)) + geom_histogram(bins
= 6, col = "black") + facet_grid(~ProductionPhase)+
```

```
labs(x="Коэффициент дефектности", y="Количество продукции",fill="Вид про-
дукции")
```

```
corCoef<-qualFactors[1,(2:7)]
```

```

corCoef$ProductionQuantity<-(cor.test(obj_copy$ProductionQuantity,obj_qual$def-
Coef))$estimate
corCoef$Конструктивные<-(cor.test(obj_copy$Конструктивные,obj_qual$def-
Coef))$estimate
corCoef$Эргономические<-(cor.test(obj_copy$Эргономические,obj_qual$def-
Coef))$estimate
corCoef$Эстетические<-(cor.test(obj_copy$Эстетические,obj_qual$defCoef))$esti-
mate
corCoef$Технологичности<-(cor.test(obj_copy$Технологичности,obj_qual$def-
Coef))$estimate
corCoef$Функциональные<-(cor.test(obj_copy$Функциональные,obj_qual$def-
Coef))$estimate
corCoef$Надежности<-(cor.test(obj_copy$Надежности,obj_qual$defCoef))$esti-
mate
corCoef<-data.matrix(corCoef)
corCoef<-t(corCoef)
colnames(corCoef)<-c("defCoef")
corCoef<-as.data.frame(corCoef)
corCoef$Factors<-c(rownames(corCoef))

barplot(corCoef[,1:6], xlab = "Показатели качества", ylab = "Коэффициент корреляции", ylim=c(-0.1,0.15),
        main = "Коэффициент корреляции между весами показателей качества и ко-
эффициентом дефектности")

ggplot(data=corCoef[1:6,], aes(x=Factors, y=defCoef)) +
  geom_bar(stat="identity")+labs(x="Показатели", y="Коэффициент корреляции",
title="Коэффициент корреляции между весами показателей качества и коэффи-
циентом дефектности")

```

```

print(cor(obj_copy[3:12]))
str(obj_qual)
str(obj_copy)
#иерархический кластерный анализ
to_clust<-obj_copy[,6:12]
str(to_clust)
head(to_clust,10)
fviz_nbclust(na.omit(to_clust), kmeans, method = "wss") +
  labs(subtitle = "Elbow method")
m <- dist(scale(to_clust))
hc <- hclust(m, method = "ward.D")
plot(hc, cex = 0.9)
rect.hclust(hc, k = 3)
groups <- cutree(hc, k = 3)
obj_qual$groups <- factor(groups)

obj_copy$groups<-factor(groups)
obj_copy%>% filter(groups == 1) %>% View
obj_copy%>% filter(groups == 2) %>% View
obj_copy%>% filter(groups == 3) %>% View

obj_qual%>% filter(groups == 1) %>% View
obj_qual%>% filter(groups == 2) %>% View
obj_qual%>% filter(groups == 3) %>% View
obj_qual%>% filter(groups == 4) %>% View

ggplot(data = obj_copy, aes(x = defCoef , fill = ItemGroup)) + geom_histogram(bins
= 6, col = "black") + facet_grid(~groups)+
  labs(x="Коэффициент дефектности", y="Количество продукции",fill="Вид про-
дукции")

```

```
kc <- kmeans(to_clust, 3)
```

```
obj_copy$skmeans <- kc$cluster
```

```
View(obj_copy)
```

```
groups <- cutree(hc, k = 3)
```

```
rand.index(groups, kc$cluster)
```

```
barplot(obj_copy[,6], xlab = "Показатели качества", ylab = "Коэффициент дефект-  
ности",
```

```
    main = "Коэффициент дефектности по показателям качества",
```

```
    col=colors[obj_copy$groups])
```

```
tab<-table(obj_qual$group, obj_qual$Эргономические)
```

```
barplot(tab, xlab = "0 - не влияют, 1 - влияют", ylab = "Кол-во дефек-  
тов",ylim=c(0,1200),
```

```
    col = topo.colors(2),
```

```
    main = "Количество продукции по группам и влиянию на констр., эрг., эст. и  
тех. показатели")
```

```
legend("topleft",c("1","2","3","4"), fill=topo.colors(4))
```

```
tab<-table(obj_qual$group, obj_qual$Функциональные)
```

```
barplot(tab, xlab = "0 - не влияют, 1 - влияют", ylab = "Кол-во продук-  
ции",ylim=c(0,1000),
```

```
    col = topo.colors(4),
```

```
    main = "Количество продукции по группам и влиянию на показатель надеж-  
ности и функциональный показатель")
```

```
legend("topright",c("1","2","3","4"), fill=topo.colors(4))
```



```

qualMeanGr<-colMeans(obj_qual[,7:12])
qualMeanGr<-data.frame(row.names =levels(obj_qual$groups))
qualMeanGr$Конструктивные<-by(obj_qual$Конструктивные,  obj_qual$groups,
mean)
qualMeanGr$Эргономические<-by(obj_qual$Эргономические,
obj_qual$groups,mean)
qualMeanGr$Эстетические<-by(obj_qual$Эстетические, obj_qual$groups,mean)
qualMeanGr$Технологичности<-by(obj_qual$Технологичности,
obj_qual$groups,mean)
qualMeanGr$Функциональные<-by(obj_qual$Функциональные,
obj_qual$groups,mean)
qualMeanGr$Надежности<-by(obj_qual$Надежности, obj_qual$groups,mean)
qualMeanGr<-as.matrix(qualMeanGr)

barplot(qualMeanGr, xlab = "Показатели", ylab = "Коэффициент дефектности",
ylim=(c(0,0.1)),
      col = topo.colors(3),
      main = "Средний коэффициент дефектности для кластеров и показателей")
legend("topright",rownames(qualMeanGr), fill=topo.colors(3))

str(obj_2)

#общее количество дефектов
sumdefq<-sum(obj_2$DefectQuantity)

#колво готовой продукции
prodq<-obj_2[(which(obj_2$ItemGroup=="Готовая продукция")),]
sumprodq<-sum(prodq$ProductionQuantity)

```