

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

*На правах рукописи*

*Подпись аспиранта*

**Пипия Георгий Тенгизович**

*ФИО аспиранта*

**УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ  
ПРИБОРОСТРОЕНИЯ НА ОСНОВЕ  
МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДВУХУРОВНЕВОЙ  
ОПТИМИЗАЦИИ И ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ**

*наименование темы научно-квалификационной работы (заглавными буквами)*

**Технические. 2.5.22 Управление качеством продукции.**

**Стандартизация. Организация производства**

*отрасль науки (шифр и наименование научной специальности)*

**27.06.01\_01 Стандартизация и управление качеством продукции  
(27.06.01 Управление в технических системах)**

*наименование направленности (шифр и наименование направления)*

Академическая степень **Исследователь. Преподаватель-исследователь**

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД**

Научный руководитель: д.т.н., ст. науч. сотр., проф. Черненькая Людмила Васильевна  
*ученая степень, ученое звание, должность, ФИО полностью*

Санкт-Петербург, 2022

Научный доклад выполнен в высшей школе киберфизических систем управления Института компьютерных наук и технологий федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель: д.т.н., ст. науч. сотр., проф. Черненькая Людмила Васильевна

*ученая степень, ученое звание, должность, ФИО полностью*

Рецензент: д.т.н., проф., проф. БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова Смирнова Мария Сергеевна

*ученая степень, ученое звание, должность, ФИО полностью*

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>.

## I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Актуальность темы исследования обосновывается необходимостью развития методов оценки и мониторинга качества продукции при управлении производством приборостроения в условиях всеобщей информатизации и автоматизации процессов производства. Новые условия приводят к увеличению объема информационных потоков, в связи с чем необходимо разработать новые подходы к обработке, анализу и принятию решений при управлении качеством продукции. Полученные результаты позволяют расширить существующий методики управления качеством продукции в условиях больших объемов данных.

**Цель и задачи исследования.** Целью исследования является расширение существующих методов оценки мониторинга качества продукции и повышение качества приборостроительной продукции путем внедрения математических методов оптимизации и принятия решений.

Для реализации цели были поставлены следующие задачи:

1. Разработать уточненную номенклатуру показателей качества приборостроительной продукции.
2. Определить требования к базовому образцу продукции.
3. Исследовать существующие методы оценки и повышений качества продукции.
4. Разработать улучшенную методику оценки уровня качества приборостроительной продукции.
5. Апробировать разработанную методику.

**Научная новизна.** Научная новизна состоит в том, что впервые разработана методика формирования уточненного перечня показателей качества приборостроительной продукции на основе линейной регрессии и оптимальности Парето и методика двухуровневой оптимизации оценки качества продукции. Полученные результаты позволяют сократить время принятия решений при управлении качеством продукции, увеличить объективность полученной оценки качества продукции за счет учета большого объема разнородной информации, а

также автоматизировать процесс оценки и мониторинга качества продукции приборостроения.

**Теоретическая и практическая значимость.** Выполненная работа обладает высокой теоретической значимостью, поскольку содержит новый математический аппарат и методики поиска оптимальной оценки качества продукции и принятия решений при управлении качеством, а также высокой практической значимостью, поскольку ее результаты позволяют оценить и повысить качество продукции приборостроения.

**Внедрение результатов диссертационного исследования.** Результаты исследования, основные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в научной работе, использованы в АО «КБ завода «Россия», АО «Микротехника», ПАО «Техприбор», а также при выполнении договора с РФФИ. Фундаментальные и теоретические исследования в диссертационной работе выполнялись при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90012.

**Апробация работы.** Основные результаты исследования докладывались и обсуждались на следующих конференциях и форумах:

- Конференция «Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем» (СПбГУАП, Санкт-Петербург 2015, 2021 гг.).
- МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «FAREASTCON» (ISCFEC 2020) Владивосток, 01–04 октября 2019 года.
- 6-ая международная научно-техническая конференция "Пром-Инжиниринг" (ICIE 2020), Сочи, Россия, 18-22 мая 2020 г.
- 12-й, 13-й и 15-й международная научно-практическая конференции «Системный анализ в проектировании и управлении» (СПбПУ, Санкт-Петербург, 2018, 2019, 2021 гг.).
- 2021 IEEE Конференция российских молодых исследователей в области электротехники и электроники (2021 ElConRus), СПбГЭТУ, Санкт-Петербург, 26-28 января 2021 г.
- I международный форум «Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве», СПбГУАП, Санкт-Петербург, 10-11 ноября

2021 г.

- Международная Российская конференция по автоматизации, (RusAutoCon 2021, 2022), 5-11 сентября 2021, 8-11 сентября 2022, Сочи, Россия.

**Публикации.** Основные результаты проведенных исследований докладывались на 8 международных и 2 всероссийских научных конференциях. Опубликовано 21 работ, из них: 3 – без соавторов, в том числе 10 статей в ведущих рецензируемых научных журналах, 5 статьи в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования и 7 статей в других изданиях, одно свидетельство о государственной регистрации.

**Представление научного доклада.** Основные положения:

1. Описание методики оценки и мониторинга качества на примере приборостроительного предприятия.
2. Математическая модель формирования уточненного перечня показателей качества.
3. Методика поиска оптимальной оценки качества приборостроительной продукции.

## **II. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** проведен анализ существующих подходов к оценке и мониторингу качества продукции. На основании проблемы учета большого объема информации поставлена цель разработать методику обработки, анализа и оценки качества приборостроительной продукции.

Так же во введении определены объект исследования, предмет исследования, описана научная новизна, теоретическая и практическая значимость, цель и задачи исследования.

**В первой главе** описаны методики мониторинга и оценки качества продукции приборостроения, требования, которые предъявляются к продукции, проанализирован процесс изготовления продукции приборостроения по модели IDEF0, на основе проведенного анализа сделано заключение о состоянии существующей методики мониторинга и оценки качества продукции применительно к способности мониторинга и оценки качества производства

продукции и выполнения технологических операций.

### **Обзор и анализ существующих методов оценки качества продукции.**

Для определения методики оценки и мониторинга качества продукции проведен анализ существующих математических методов оценки и мониторинга качества продукции, классификация которых приведена в таблице 1.

Таблица 1- Классификация методов оценки качества технической продукции

Модель оценки качества продукции	Объект управления	Орган управления	Входная информация	Выходная информация
Экспертные модели	Управляющие процессы. Основные процессы Вспомогательные процессы	Топ-менеджмента Заместители генерального директора	Качественная и количественная	Качественная
Статистические модели		Отделы качества, конструкторские отделы, технологические отделы и т. Д.	Количественная	Количественная
Аналитические модели			Количественная	Качественная и количественная
Нечеткие модели		Топ-менеджмента Заместители генерального директора	Качественная и количественная	Качественная и количественная
	Отделы качества, конструкторские отделы, технологические отделы и т.д.			

К экспертным моделям оценки качества продукции относятся:

- метод анализа иерархий;
- метод на основе рангового или балльного ранжирования;
- метод на основе N-модели;
- метод на основе количественной оценки компромисса;
- FMEA-анализ.

К статистическим моделям оценки качества продукции относятся:

- кластерный анализ;
- регрессионный анализ;

- контрольные карты.

К аналитическим моделям оценки качества продукции относятся:

- однокритериальная оптимизация;
- многокритериальная оптимизация;
- многоуровневая оптимизация.

Исходя из проведенного анализа можно заключить, что для расширения существующего перечня методов оценки качества продукции и достижения цели исследования необходимо адаптировать модели оптимизации к решению проблем оценки качества продукции, что позволит автоматизировать процесс оценки качества продукции и учитывать большой объем входной информации.

### **Описание модели мониторинга качества продукции приборостроения.**

Для адаптации и внедрения методов многокритериальной оптимизации для решения задач управления качеством продукции необходимо описать существующую модель мониторинга качества продукции приборостроения. Ниже описана модель мониторинга качества продукции ОАО «Радиоавионика».

Целями мониторинга и контроля качества процессов производства приборостроительной продукции являются:

- предотвращение выпуска несоответствующей продукции;
- обеспечение качества выпускаемой продукции путем обнаружения слабых участков в технологии производства или в конструкции продукции;
- предоставление гарантий поставщику в отношении качества выпускаемой продукции.

Инструментами мониторинга и измерений процессов служат:

- внутренние проверки качества;
- контроль технологической дисциплины;
- контроли ОТК и/или заказчика (представителя заказчика);
- статистический контроль и управление качеством.

Методы мониторинга и измерения процессов системы менеджмента качества (СМК) определены в соответствующих процедурах, регламентирующих

процессы СМК ОАО «Радиоавионика».

В ОАО « Радиоавионика» применяются следующие виды контроля продукции на этапе изготовления:

- входной контроль;
- контроль качества в процессе производства;
- приемочный контроль.

Категории испытаний:

- предъявительские;
- приемо-сдаточные;
- периодические;
- типовые.

В качестве примера продукции приборостроительной компании ОАО « Радиоавионика» рассматривается модуль навигационной системы (МНС).

Алгоритм мониторинга и оценки качества МНС на этапе производства представлен на рисунке 1.

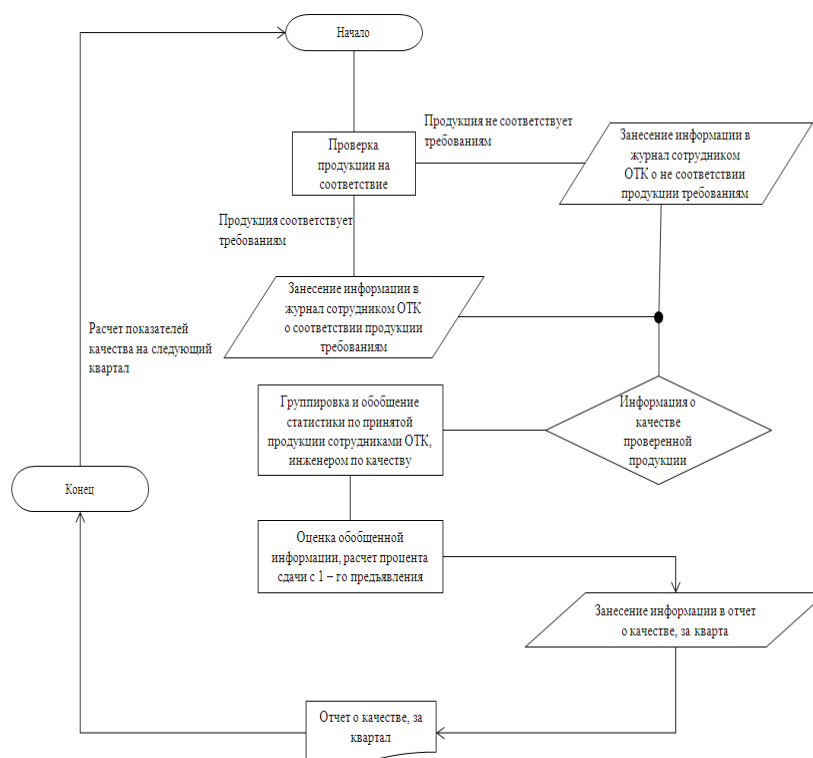


Рисунок 1 - Алгоритм сбора, обработки и оценки качества МНС

Оценка качества состоит из следующих последовательных этапов:

1. Сбор информации по количеству предъявленных и забракованных ОТК на технологических операциях деталей, блоков и узлов.
2. Группировка информации по принадлежности к блокам.
3. Группировка информации по операциям, цехам.
4. Расчет процента сдачи продукции с 1-го предъявления.
5. Расчет процента разрешений на использование и процента отданных на исправление изделий по цехам.
6. Расчет процента сдачи с 1-го предъявления блоков МНС.
7. Расчет процента разрешений на использование и процента отданных на исправление изделий по блокам.
8. Анализ и определение наиболее слабых участков в процессе производства МНС.

Данный метод имеет следующие недостатки:

1. Учитывается только информация, собираемая отделом технического контроля.
2. Данный показатель не учитывает влияние определенных причин на возникновение дефектов в процессе производства изделия;
3. Данный показатель не учитывает технические требования к единичным показателям качества.

Исходя из перечисленных недостатков, а также с целью повышения качества принимаемых решений, рекомендуется разработать улучшенную методику оценки уровня качества модуля навигационной системы в процессе его производства, которая будет учитывать:

1. Всю совокупность характеристик и свойств МНС.
2. Требования к единичным показателям качества.
3. Влияние различных причин на возникновение дефектов в процессе производства.

Для улучшения методики оценки уровня качества необходимо определить требования к качеству модуля навигационной системы, так как в соответствии с техническими условиями качество определяется требованиями к номенклатуре

единичных показателей качества, предъявляемых к модулю навигационной системы на этапе производства и эксплуатации, а также на этапах типовых и квалификационных испытаний.

**Идентификация требований к МНС и описание процесса производства МНС.** В соответствии с ГОСТ РВ 20.39.303-98 модуль навигационной системы относится к аппаратуре конкретного назначения, вида I, режима многократного циклического применения, восстанавливаемой, неремонтируемой, обслуживаемой в процессе эксплуатации.

Требования к МНС распространяются на следующие группы показателей качества:

1. Показатели функционирования (технические требования);
2. Конструкторские показатели (требования к конструкции);
3. Показатель устойчивости к внешним воздействиям;
4. Показатель надежности.

Модель IDEF0 описания процесса производства представлена на рисунке 2, описание модели – в таблице 2.

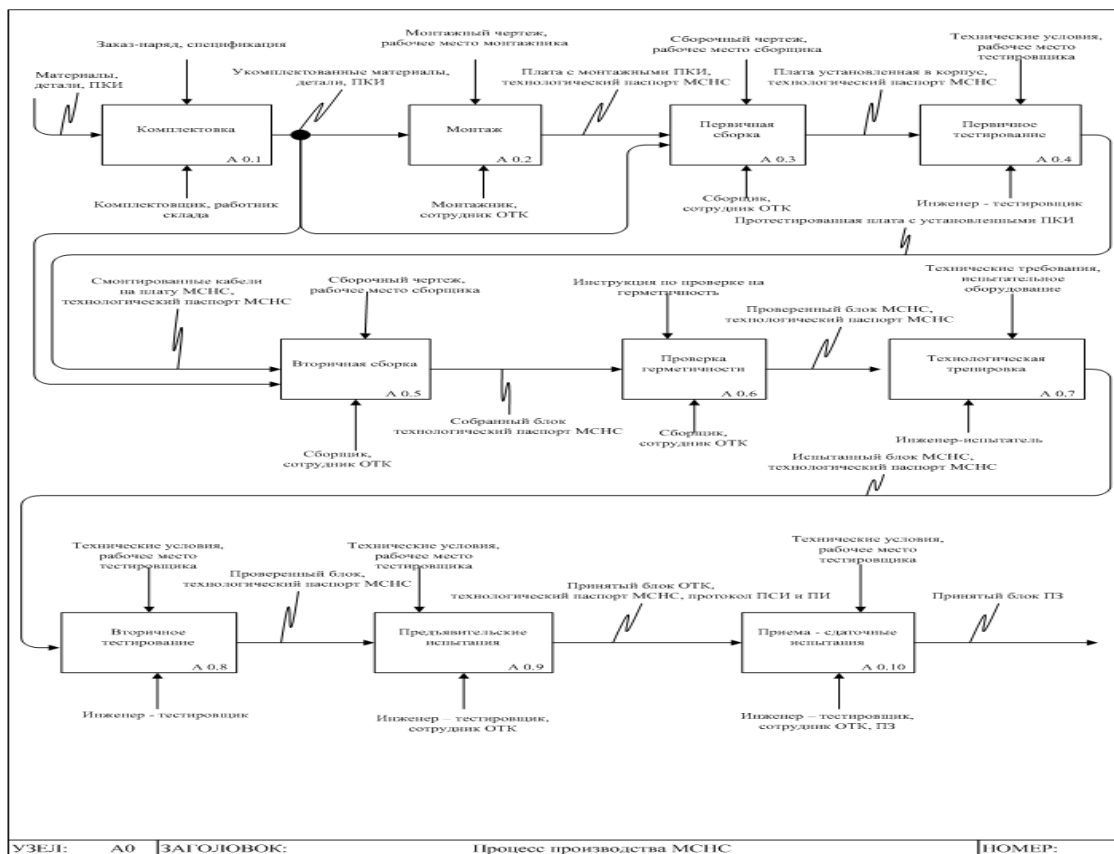


Рисунок 2 - Модель IDEF0

Таблица 2 - Описание модели IDEF0

Наименование операции	Описание технологической операции	Формируемые показатели качества МНС согласно требованиям к МНС
Комплектовочная	Получение со склада сборочных единиц, деталей и материалов согласно спецификации на изделие	Соответствие комплектующих входным требованиям
Первичная сборка	Установка платы с монтажными элементами на корпус МНС, фиксация соединительного кабеля на корпус МНС	Соответствие установочных размеров КД.
Монтаж	Монтаж соединительного кабеля на плату с монтажными ПКИ	Выполнение МНС основных функций
Первичное тестирование	Проверка установленных в МНС параметров начальной инициализации.	Соответствие вибрационной и ударной прочности
Вторичная сборка	Установка крышки на корпус МНС	Соответствие габаритных размеров КД.
Проверка герметичности	Проверка на герметичность МНС	Герметичность корпуса МНС
Технологическая	Испытание МНС на тепловые и вибрационные воздействия	Соответствие требованиям к показателям

ая тренировка		устойчивости к внешней среде
Вторичное тестирование	Проверка установленных в МНС параметров начальной инициализации Проверка функции определения местоположения Проверка соответствия местоположения требованиям среднее квадратического отклонения (СКО).	Выполнение МНС основных функций
Предъявительские испытания	Проверка габаритных, установочных и присоединительных размеров.	Соответствие МНС требованиям ТУ
Приема – сдаточные испытания	Проверка кондиционности применяемых изделий и материалов. Проверка комплектности. Проверка основных параметров и характеристик МНС.	

В результате проведенных исследований в рамках раздела 1 были выявлены основные недостатки существующей модели и методов оценки и мониторинга качества продукции приборостроения. Таким образом, необходимо устранить недостатки в процессе мониторинга и измерения, необходимо разработать улучшенную методику оценки мониторинга качества МНС в процессе его производства.

**Вторая глава** посвящена определению требований к приборостроительной продукции, формированию уточненного перечня показателей качества МНС и определению вида целевых функций для оценки качества МНС.

Как правило, при обосновании и разработке собственного перечня показателей качества опираются на классическую классификацию показателей качества. При этом учитываются особенности производимой продукции, ее тип или вид, которые определяются по группе принадлежности. Модуль навигационной системы (МНС) относится к группе продукции, расходующей свой ресурс и ремонтируемой в процессе эксплуатации.

**Математическая модель формирования уточненного перечня показателей качества МНС.** Для формирования уточненного перечня

показателей качества с целью дальнейшей оценки качества МНС необходимо отобрать выборку, включающую показатели, характеризующие уровень качества МНС на этапе его производства. Состав и структурная схема показателей качества представлена на рисунке 3.

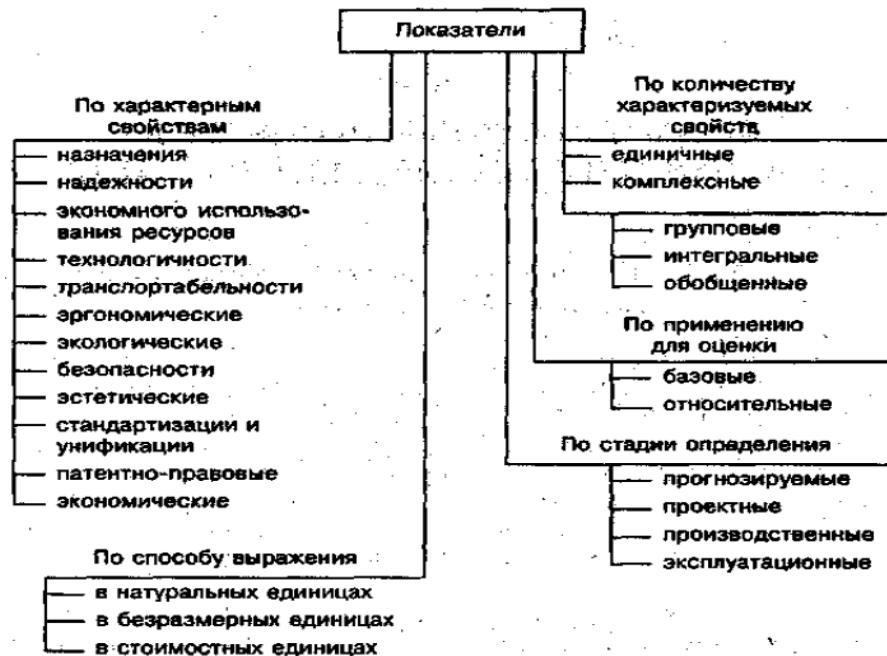


Рисунок 3 - Состав и структура показателей качества

Суть оптимальности по Парето заключается в следующем. Пусть при формировании альтернатив лицо, принимающее решение (ЛПР) выделило  $X$  – множество альтернатив. Обозначим данное множество  $X = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]$ .

После чего для выбора лучшей альтернативы или нескольких альтернатив ЛПР формирует критерии, данные критерии образуют множество числовых функций  $F(x)$ , которые образуют векторный критерий  $f = (f_1, f_2, \dots, f_m)$ , то есть каждой альтернативе соответствует свой векторный критерий, состоящий из  $m$  – критериев определенных на  $m$ -мерном числовом множестве  $R^m$ . Это множество называют критериальным пространством, или пространством оценок, а всякое значение  $f(x) = (f_1(x), \dots, f_m(x)) \in R^m$  векторного критерия  $f$ , при определенном решении  $x \in X$  именуют (возможной) векторной оценкой решения  $x$ . Все векторные оценки образуют множество возможных оценок  $Y = f(x) = \{y \in R^m \mid y = f(x)\}$  при некотором  $x \in X$ .

У каждой группы есть свои признаки, по которым можно определить, какие

показатели качества могут изменяться в процессе производства, а какие нет. Для более точной обработки данных необходимо данные показатели классифицировать следующим образом:

- $X'$  – функциональные показатели, где  $X'=[x_1, \dots, x_4]$ ;
- $X''$  – конструкторские показатели, где  $X''=[x_1, \dots, x_4]$ ;
- $X'''$  – эстетические показатели, где  $X'''=[x_1, \dots, x_3]$ .

Разделенный перечень показателей качества представлен в таблице 3.

Таблица 3 - Перечень показателей качества МНС

Множество	Элемент множества	Наименование элемента множества
$X'$	$X_1$	Захват координат X и Y
	$X_2$	Захват высоты Z
	$X_3$	Захват рабочего созвездия
	$X_4$	Восстановление координат
$X''$	$X_1$	Масса МНС
	$X_2$	Массогабаритные параметры.
	$X_3$	Установочные размеры соответствуют КД
	$X_4$	Соответствие комплектующих конструкторской документации
$X'''$	$X_1$	Отсутствие повреждений внешнего вида
	$X_2$	Хромированный купол изделия
	$X_3$	Наличие маркировки

Для формирования уточненного перечня на основе анализа источников информации необходимо определить показатели, которые подвергаются изменению на этапе производства МНС.

Проанализируем операции процесса изготовления МНС и дефекты, которые возникают на этих операциях. Процесс производства состоит из 10 технологических операций, на каждой из которых может возникать дефект с определенной частотой и периодичностью.

В таблице 4 приведена форма анализа технологических операций по критерию частоты дефектов.

Для сокращения названия критериев будем их обозначать как номер технологической операции в соответствии с диаграммой IDEF0. Все множество альтернатив представлено в таблице 4.

Таблица 4 - Матрица альтернатив

Множество	Элемент множества	Обозначение технологической операции в соответствии с диаграммой IDEF0									
		A0.1	A0.2	A0.3	A0.4	A0.5	A0.6	A0.7	A0.8	A0.9	A0.10
X'	X <sub>1</sub>										
	X <sub>2</sub>										
	X <sub>3</sub>										
	X <sub>4</sub>										
X''	X <sub>1</sub>										
	X <sub>2</sub>										
	X <sub>3</sub>										
	X <sub>4</sub>										
X'''	X <sub>1</sub>										
	X <sub>2</sub>										
	X <sub>3</sub>										

В качестве метода прогнозирования выбран метод проецирования тренда.

Основной идеей этого метода является построение прямой, которая «в среднем» наименее уклоняется от массива точек  $(t, x)$  заданного временного ряда, описываемого уравнением

$$x = a + b \times t, \quad (1)$$

где  $x$  – это прогнозируемое значение,  $t$  – временной участок,  $b$  – величина, характеризующая приращение  $x$  при изменении временного участка  $t$ ,  $a$  – допустимая величина погрешности.

Константы  $a$  и  $b$  рассчитываются по методу наименьших квадратов.

При определении лучшего решения из множества допустимых решений по правилу Парето ЛПР сравнивает две или более альтернатив (решений) по логике «хуже – лучше» по следующей схеме. Имеются две векторные оценки  $f(x)$  и  $f(x')$  при их сравнении возможны следующие исходы:  $x > x' \rightarrow f(x) \geq f(x')$ ,  $x < x' \rightarrow f(x) \leq f(x')$ ,  $x = x' \rightarrow f(x) = f(x')$ . Введем для каждой векторной оценки следующие критерии:  $x = [k_1, k_2]$ ,  $x' = [k_1, k_2]$ . Как известно из правила Парето, множество оптимальных решений (несравнимых между собой решений) формируется путем удаления из первоначального множества решений худших решений. Решение принадлежит множеству Парето, если оно не уступает ни по

одному из своих векторных критериев другим решениям и хотя бы по одному из критериев превосходит их. Если  $x = [k_1 = 5, k_2 = 3]$ ,  $x' = [k_1 = 5, k_2 = 1]$ , то по правилу Парето лучшим решением является решение  $x$ , так как оно лучше решения  $x'$  по векторному критерию  $k_2$ .

Правило Парето является одним из этапов принятия решения в отношении выбора лучшей альтернативы, так как при сравнении множеств альтернатив может оказаться, что лучшей альтернативой является не одно решение, а несколько решений. Одним из методов сужения множества Парето является введение коэффициентов важности векторных критериев.

Введем для определения количественной важности критериев математическую модель со следующими элементами:

- $E_1, \dots, E_m$ , где  $m$  - число критериев,  $E_i$  - пространство значений  $i$ -го критерия (индивидуальная шкала), произведение всех пространств оценок при нормировке каждого критерия будет равно 1;
- $P_1, \dots, P_m$ ,  $P_i \subset E_i \times E_i$  - асимметричное отношение строгого предпочтения;
- $w_1, \dots, w_m$ , где  $w_i: P_i \rightarrow P_+$  - числовая функция, с помощью которой учитывается количественный характер информации о важности критериев;
- $Y \subset E$  - множества допустимых возможных оценок.

Наиболее простой способ задания  $w_i$  в случае  $E_i = R$ ,  $P_i = (>)$  состоит в следующем:  $w_i(y_i, y'_i) = y_i - y'_i$ , из которого следует, что  $y_i > y'_i$ .

Пусть  $A, B \subset I$ ,  $A \neq \emptyset$ ,  $B \neq \emptyset$ ,  $A \cap B = \emptyset$ . Группа критериев  $A$  важнее группы критериев  $B$  с двумя наборами положительных параметров  $w_i$  для всех  $i \in A$  и  $w_j$  для всех  $j \in B$ , если для  $x, x' \in X$  выполнено соотношение:

$$\left( \begin{array}{l} f_i(x) > f_i(x') \forall i \in A \\ f_j(x') > f_j(x) \forall j \in B \\ f_s(x) = f_s(x') \forall s \in I \setminus (A \cup B) \end{array} \right.$$

вместе с формулами  $f_i(x) - f_i(x') = w_i \Rightarrow f_i(x) > f_i(x') \forall i \in A$ , и

$$f_j(x') - f_j(x) = w_j \Rightarrow f_j(x') > f_j(x) \forall j \in B.$$

Нормализованный коэффициент относительной важности группы критериев  $A$  по сравнению с группой критериев  $B$  в этом случае рассчитывается по формуле:

$$\lambda_{ij} = \frac{w_j}{w_i + w_j}. \quad (2)$$

Данное соотношение означает, что решение  $x$  предпочтительнее  $x'$  по всем критериям  $f_i$ , для которых  $i \in A$ , и в то же время оно менее предпочтительно, чем  $x'$  по всем критериям  $f_j$ , для которых  $j \in B$ . Остальные критерии (номера которых не входят ни в  $A$ , ни в  $B$ ) в расчет можно не принимать, поскольку они имеют одинаковые значения как для  $x$ , так и для  $x'$ .

Сужение множества Парето с учетом введения относительных коэффициентов важности осуществляется путем включения в критериальное пространство функции вида:

$$q_{ij} = \lambda_{ij} f_i + (1 - \lambda_{ij}) f_j. \quad (3)$$

Данная функция применяется для тех векторных критериев, разность которых минимальна. В данном определении относительных коэффициентов важности применяется стратегия компенсации.

**Определение метода свертки для формирования целевых функций качества МНС.** В настоящее время существует несколько методов свертки единичных показателей качества изучаемого объекта в один общий показатель:

- комплексный;
- смешанный;
- интегральный;
- экспертный.

Приведенные методы свертки единичных показателей качества наиболее часто рекомендуются в литературе по квалиметрии и менеджменту качества, по этой причине далее рассмотрены именно эти методы свертки.

Определим чувствительность методов свертки путем изменения наиболее

важных показателей качества на расчетное значение, равное 0. Перерасчет с учетом изменения расчетных значений единичных показателей представлен в таблице 5.

Таблица 5 - Перерасчет комплексного уровня качества

Наименование метода свертки	Расчетное значение
Среднеарифметическое взвешенное	0,20997466
Среднегеометрическое взвешенное	0
Среднеквадратическое взвешенное	0,38444171
Среднегармоническое взвешенное	0

Как видно из таблицы 5, численное значение среднегеометрической взвешенной и среднегармонической взвешенной равно 0, а по остальным методам свертки численное значение соответственно 0,21 и 0,38. Из этого следует, что наибольшая чувствительность комплексного уровня качества при изменении его единичных значений достигается при использовании среднегеометрической взвешенной и среднегармонической взвешенной.

При использовании приведенного подхода трудно обнаружить причины возникновения дефектов, так как применяемые в методе свертки единичные показатели качества не будут связаны с причинами возникновения дефектов.

Для устранения несовершенства методов свертки необходимо применение констант, которые будут характеризовать те или иные причины возникновения дефектов. Весовые значения этих констант определяем с помощью системы линейных уравнений, которые включают единичные показатели качества МНС. В качестве функции уровня качества необходимо взять линейную форму метода свертки, по причине линейной зависимости с единичными показателями качества, включенными в систему линейных уравнений.

При разработке улучшенной методики расчета уровня качества МНС на этапе производства выбрано правило Парето для формирования уточненного перечня показателей качества и модели расчета коэффициента относительной важности критериев для сужения множества Парето-оптимальных решений. В качестве множества альтернатив выбрано множество единичных показателей качества, поделенных на группы. В качестве векторных критериев выбрано

прогнозируемое количество дефектов. Для оценки уровня качества МНС в качестве базового выбран метод шести сигм.

**В третьей главе** на основе найденных методов свертки (целевые функции) и уточненного перечня показателей качества разработана методика поиска оптимальной оценки качества МНС.

**Разработка аналитической модели поиска оптимального значения качества МНС на этапе производства.** Улучшенная модель оценки уровня качества должна учитывать значения критериев по единичным показателям качества и основные причины возникновения дефектов.

Так как все единичные показатели качества не должны сворачиваться в один комплексный показатель по принципу средневзвешенного, и причины возникновения дефектов должны быть связаны с единичными показателями, то необходимо разработать модель, удовлетворяющую следующим условиям:

- целевая функция должна содержать причины возникновения дефектов;
- численные значения единичных показателей качества должны влиять на целевую функцию.

Адекватной моделью для расчета уровня качества с учетом приведенных условий является модель на основе многокритериальной оптимизации.

Многокритериальная задача линейной оптимизации имеет вид

$$\max\{Fx = z \mid x \in Y\}.$$

Для решения задачи оценки качества технической продукции необходимо определить множество факторов, влияющих на качество продукции, определить совокупность показателей качества продукции, выразить через показатели качества целевые функции, характеризующие качество продукции, и определить ограничения, накладываемые на качество продукции.

Технические изделия характеризуются многими показателями качества, которые можно разделить на группы, такие как: функциональные показатели, показатели дизайна, экономические показатели, показатели надежности, эстетические показатели и эргономические показатели.

Исходя из перечисленных групп показателей качества, целевую функцию (

функция качества) задаем как  $F = f(C(Y), Y(X))$ , где  $C$  – затраты на качество,  $X$  – множество воздействующих факторов на показатели качества в процессе производства изделий,  $Y$  – множество показателей качества производимой продукции. Перечисленные группы показателей качества, т.е. множество показателей качества, формируют многогранник качества  $Y^n$ , где  $n$  – задает размерность многогранника и зависит от учитываемых групп показателей качества, при этом на каждую группу показателей качества будут воздействовать свои факторы  $X$ .

В настоящее время в промышленности основным критерием качества продукции является соответствие полученных показателей качества установленным требованиям. При этом признаками несоответствия продукции являются дефекты, которые могут появиться на этапе производства. Таким образом, качество продукции напрямую зависит от количества и значимости дефектов (влияние на функционирование), что подтверждается концепцией 6 сигм и бережливого производства. Исходя из сказанного, степень влияния множества воздействующих факторов  $X$  на многограннике качества  $Y^n$  будет определяться через функцию бездефектности. Функция бездефектности имеет следующий вид:

$$f_1 = \sum_{j=1}^m c_j \times x_j,$$

где  $x_j : Y^n = (x_{ij})$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $j = \overline{1, m}$ , где индексу  $i$  соответствуют показатели качества продукции,  $n$  – количество учитываемых групп показателей качества продукции, индексу  $j$  соответствуют относительные частоты возникновения дефекта по  $j$ -ой причине, где  $m$  – количество учитываемых причин,  $c_j$  – константа, которая определяется по обратному значению относительной частоты возникновения  $j$ -ой причины дефекта в  $i$ -ом показателе качества,  $x_j$  – коэффициент значимости константы ( $c_j$ ).

На многограннике качества  $Y^n = (x_{ij})$  для определения количественных

показателей дефектности зададим вектор констант  $y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ , элементы которого обозначают возникновение дефектов в  $i$ -ом показателе качества по  $j$ -ой причине (чем выше дефектность, тем хуже показатель качества). Таким образом, задача линейной оптимизации функции бездефектности примет вид  $\max\{f_1\}$ ,  $x \in Y^n$ . Численные значения вектора ограничений  $b = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ , наложенные на многогранник качества  $Y^n$ , задает служба качества. Более детально правила задания ограничений описаны ниже.

Так как все мероприятия в отношении качества связаны с определенными затратами, необходимо в функции качества учесть также затраты в отношении качества продукции. Затраты в отношении качества выражаем через функцию «Затраты на качество», вида  $f_2 = \sum_{j=1}^m z_j (z_1 + z_2 + z_3) \times x_j$ .

Коэффициенты значимости  $x_j$  на многограннике  $Y^n$  определяем через показатель количества дефектов на единицу продукции  $DPU$  (Defect Per Unit) ( $DPU$ ) через уравнение:

$$y_{ij} = 1 - d, \quad (4)$$

где  $d = DPU_j / DPU_M$ ,  $DPU_j = m/n$  (где  $m$  - количество найденных дефектов,  $n$  - количество проверенных единиц),  $DPU_M$  - максимально допустимое значение показателя  $DPU$ , индекс  $j$  обозначает, что учет дефектов происходит по определенной единичной причине, при  $DPU_j = DPU_M \rightarrow d = 1$ .

Коэффициенты значимости  $x_j$  находим для каждого единичного показателя качества производимой продукции с учетом накладываемых ограничений  $\sum_{j=1}^n y_{ij} \times x_j \leq b_i$ ,  $i = \overline{1, m}$ ,  $x_j \geq 0$ . Задачу оптимизации функции качества решаем как задачу двухкритериальной оптимизации вида  $\min\{F\} = f_1 \times m_1 + f_2 \times m_2$ , где  $m_1$  - относительный коэффициент значимости для целевой функции  $f_1$ ,  $m_2$  - относительный коэффициент значимости для целевой функции  $f_2$ .

Двухкритериальную задачу оптимизации решаем с применением целевого программирования. Расстояние в критериальном пространстве при двухцелевом программировании находим по уравнению  $p = (\sum_{i=1}^n |y_i^1 - y_i^t|)^{1/t}$  где  $t \geq 1$ . При добавлении коэффициентов значимости к целевой функции получаем:

$$p = (\sum_{i=1}^n m_i |f_i^1 - f_i^t|)^{1/t} \quad (5)$$

Пример решения задачи двухкритериальной оптимизации качества продукции при  $m_1, m_2 = [0,6; 0,4]$  приведен в таблице 6.

Таблица 6 - Решение задачи оценки качества

Константы						Найденное значение	Ограничение
$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$	$f_1$	$b_i$
0,79	0,71	0,79	0,93	0,86	0,93	0,812	-
$z_1$	$z_2$	$z_3$	$z_4$	$z_5$	$z_6$	$f_2$	-
0,33	0,125	0,077	0,166	0	0,1	0,073	-
$y_1$	$y_1$	$y_1$	$y_1$	$y_1$	$y_1$	-	-
0,7	0,9	0	1	0	0	0,4333	$\geq 0,433$
$y_2$	$y^2$	$y^2$	$y^2$	$y^2$	$y^2$	-	-
0,6	0,8	1	1	0,9	1	0,883	$\geq 0,883$
$y_3$	$y_3$	$y_3$	$y_3$	$y_3$	$y_3$	-	-
0,9	0,5	0,7	0	1	1	0,683	$\geq 0,683$
$y_4$	$y_4$	$y_4$	$y_4$	$y_4$	$y_4$	-	-
1	1	1	1	1	1	1	$\leq 1$
$y_5$	$y_5$	$y_5$	$y_5$	$y_5$	$y_5$	-	-
1	1	0,9	0	0,9	1	0,822	$\geq 0,8$
$y_6$	$y_6$	$y_6$	$y_6$	$y_6$	$y_6$	-	-
1	0,8	1	1	1	0,8	0,933	$\geq 0,933$
Найденные весовые значения						-	-
$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	-	-
0,01	0,33	0,1	0,12	0,44	0	-	-

В третьем разделе данной работы были получены следующие результаты:

1. Разработана модель целевой функции в виде линейной модели.
2. Сформированы константы целевой функции как причины возникновения дефектов. Причины дефектов определены экспертной комиссией.

3. Разработана модель системы линейных уравнений единичных показателей качества и определены ограничения на систему.

4. Найден уточненный перечень единичных показателей качества модуля навигационной системы путем применения правила Парето.

5. Применен симплекс–метод для решения задачи оценки уровня качества модуля навигационной системы на этапе производства.

В ходе апробации разработанной методики рассчитан уровень качества модуля навигационной системы на этапе производства. По результатам расчета предложены мероприятия по обеспечению качества модуля навигационной системы на этапе производства.

### **III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

По результатам проведенных исследований с целью улучшения системы мониторинга и оценки качества продукции определены подходящие модели и методы получения численных значений показателей качества, целевых функций и уточненного перечня показателей качества приборостроительной продукции. На основании найденных моделей и методов удалось разработать аналитическую модель поиска оптимальной оценки качества продукции, что позволило учитывать большой объем разнородной объективной информации и принимать оперативные решения при управлении качеством продукции приборостроения.

### **IV. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ**

#### **Публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях**

1. **Пипия Г.Т.** Методы оптимизации и принятия решений в отношении качества продукции при наличии нескольких целевых функций / Г.Т. Пипия, Л.В. Черненко // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2022. – № 1. – С. 24-38. – DOI 10.52261/02346206\_2022\_1\_24. – EDN OXLNQT (**РИНЦ, ВАК**).

2. **Пипия Г.Т.** Повышение эффективности и результативности принятия решений при управлении качеством продукции / Г.Т. Пипия, Л.В. Черненко // Экономика и управление: проблемы, решения. – 2021. – Т. 4. – № 11(119). – С. 65-

73. – DOI 10.36871/ek.up.p.r.2021.11.04.006. – EDN ХОВМСР (РИНЦ, ВАК).

3. **Пипия Г.Т.** Методика формализации единичных критериев качества продукции приборостроения для двухуровневой модели. Ч. 1. Единичные критерии целевых функций качества / Г.Т. Пипия, Л.В. Черненькая // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2020. – Т. 63. – № 7. – С. 650-656. – DOI 10.17586/0021-3454-2020-63-7-650-656. – EDN PLWWEJ (РИНЦ, ВАК).

4. **Пипия Г.Т.** Методика формализации единичных критериев качества продукции приборостроения для двухуровневой модели. Ч. II. Формализация единичных критериев верхнего и нижнего уровней / Г.Т. Пипия, Л.В. Черненькая // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2020. – Т. 63. – № 8. – С. 749-755. – DOI 10.17586/0021-3454-2020-63-8-749-755. – EDN IAHYWX (РИНЦ, ВАК).

5. **Пипия Г.Т.** Модель мониторинга показателей качества в многокритериальной среде / Г.Т. Пипия // Стандарты и качество. – 2019. – № 3. – С. 108. – EDN YYSOKD (РИНЦ, ВАК).

6. **Пипия Г.Т.** Оценка уровня качества многопараметрической продукции с помощью методов условной оптимизации / Г.Т. Пипия // Контроль. Диагностика. – 2018. – № 5. – С. 20-25. – DOI 10.14489/td.2018.05.pp.020-025. – EDN YWZKGE (РИНЦ, ВАК).

7. **Пипия Г.Т.** Мероприятия повышения надежности дефектоскопа на основе FMEA-анализа / Г.Т. Пипия, А.А. Шашмуринов // Наука и бизнес: пути развития. – 2018. – № 6(84). – С. 121-125. – EDN ХWTPBV (РИНЦ, ВАК).

8. **Пипия Г.Т.** Оценка уровня качества при производстве электронной продукции с учетом ухудшения значений единичных показателей / Г.Т. Пипия, Г.И. Коршунов // Вопросы радиоэлектроники. – 2017. – № 10. – С. 89-93. – EDN ZHJNDH (РИНЦ, ВАК).

9. **Пипия Г.Т.** Мероприятия повышения надежности дефектоскопа на основе FMEA-анализа / Г.Т. Пипия, А.А. Шашмуринов // Наука и бизнес: пути развития. – 2018. – № 6(84). – С. 121-125. – EDN ХWTPBV (РИНЦ, ВАК).

10. **Пипия Г.Т.** Методика оценки уровня качества технической продукции на основе математической модели с учетом множества единичных показателей качества / Г.Т. Пипия, А.М. Струев // Глобальный научный потенциал. – 2017. – № 11(80). – С. 76-78. – EDN YMYLFL (**РИНЦ, ВАК**).

**Статьи в рецензируемых журналах, входящих в системы цитирования  
Web of Science и Scopus**

11. **Pipiy G.** et al. Fuzzy inference system for a bilevel quality assessment optimization model //International Journal of Productivity and Quality Management. – 2021. – Т. 1. – №. 1 (**РИНЦ, SCOUPS**).

12. **Pipiy G.T.** Method of Forming an Updated List of Technical Products Fuzzy Quality Indicators Based on Fuzzy Clustering / G.T. Pipiy, L.V. Chernenkaya, V.E. Mager // Lecture Notes in Electrical Engineering. – 2022. – Vol. 857 LNEE. – P. 324-336. – DOI 10.1007/978-3-030-94202-1\_31. – EDN WIDZXD (**РИНЦ, SCOUPS**).

13. **Pipiy G.T.** Quality Indicators of Instrumentation Products According to the "quality 4.0" Concept / G.T. Pipiy, L.V. Chernenkaya, V.E. Mager // Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2021, Moscow, 26–28 января 2021 года. – Moscow, 2021. – P. 1032-1036. – DOI 10.1109/ElConRus51938.2021.9396535. – EDN DPNEBR (**РИНЦ, SCOUPS**).

14. **Pipiy G.** Fuzzy Formalization of Individual Quality Criteria for Quality Level Evaluation by Using Two-Level Optimization Model / G. Pipiy, L. Chernenkaya, V. Mager // 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020) : Серия Lecture Notes in Mechanical Engineering, Sochi, Russia, 18–22 мая 2020 года. – Sochi, Russia: Springer International Publishing, 2021. – P. 557-565. – DOI 10.1007/978-3-030-54817-9\_65. – EDN YDOYUI (**РИНЦ, SCOUPS**).

15. **Pipiy G.T.** Solution of the Decentralized Task of Evaluating and Improving Product Quality / G.T. Pipiy, L.V. Chernenkaya, V.E. Mager // Proceedings of the International Scientific Conference "FarEastCon" (ISCFEC 2020): Серия: Advances in Economics, Business and Management Research, Vladivostok, 01–04 октября 2019 года. – Vladivostok: Atlantis Press, 2020. – DOI 10.2991/aebmr.k.200312.405. – EDN

VUEMLP (РИНЦ, WOS).

### Статьи и материалы конференций

16. **Пипия Г.Т.** Алгоритм работы системы мониторинга качества продукции при децентрализованном управлении / Г.Т. Пипия, Л.В. Черненко // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: Сборник докладов Третьей Всероссийской научной конференции, Санкт-Петербург, 18–22 апреля 2022 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2022. – С. 178-182. – EDN OMMEZF (РИНЦ).
17. **Пипия Г.Т.** Методы двухуровневой оптимизации в задачах управления качеством продукции / Г.Т. Пипия, Л.В. Черненко // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве: Тезисы докладов I Международного форума, Санкт-Петербург, 10–11 ноября 2021 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2021. – С. 251-253. – EDN EWIUNF (РИНЦ).
18. **Пипия Г.Т.** Двухуровневая оптимизация оценки качества продукции приборостроения / Г.Т. Пипия, Л.В. Черненко // Системный анализ в проектировании и управлении: сборник научных трудов XXV Международной научной и учебно-практической конференции : в 3 ч., Санкт-Петербург, 13–14 октября 2021 года. – Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2021. – С. 357-363. – DOI 10.18720/SPBPU/2/id21-389. – EDN FQCZHL (РИНЦ).
19. **Пипия Г.Т.** Целевые критерии для многокритериальной модели условной оптимизации оценки качества продукции / Г.Т. Пипия // Системный анализ в проектировании и управлении : сборник научных трудов XXII Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 22–24 мая 2018 года. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2018. – С. 184-190. – EDN ХТРVWH (РИНЦ).
20. **Пипия Г.Т.** Определение векторных критериев для оценки уровня качества продукции на этапе производства / Г.Т. Пипия, А.А. Шашмури // Вестник современных исследований. – 2018. – № 8.1(23). – С. 290-293. – EDN YKZEXZ

**(РИНЦ).**

**Свидетельство о государственной регистрации**

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