

На правах рукописи

Завозина Ольга Юрьевна

**ОРГАНИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА
ПРОИЗВОДСТВА ПОДШИПНИКОВ**

Специальность 2.5.22 – «Управление качеством продукции.
Стандартизация. Организация производства»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: **Захаров Михаил Николаевич**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Одиноков Сергей Анатольевич**
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»,
профессор кафедры 1105

Муранов Александр Николаевич
кандидат технических наук, доцент
ФГАУН «Институт конструкторско-технологической информатики Российской академии наук»,
заведующий лабораторией №3

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет»

Защита состоится «27» мая 2025 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета 24.2.331.18 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 7, ауд. 414 ИБМ.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1, ученому секретарю диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н. Э. Баумана и на официальном сайте МГТУ им. Н. Э. Баумана: www.bmstu.ru.

Автореферат разослан «___» 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент

Постникова Елена Сергеевна

Актуальность темы диссертации. В Советском Союзе к 80-м годам работало 40 заводов по изготовлению подшипников. Начиная с 90-х годов заводы стали закрываться, не выдерживая конкуренции с иностранными производителями. Количество заводов сократилось вдвое. Объективной причиной этого послужило то, что российским подшипниковым заводам не удалось определиться с соотношением цены и качества, обеспечивающим конкурентоспособность продукции. В результате предприятия потеряли экономическую устойчивость. В сфере продукции широкого потребления отечественные подшипники стали вытеснять подшипники китайских производителей, а в сфере продукции специального назначения – подшипники производителей из США и европейских стран.

В настоящее время в России есть политические и экономические предпосылки возродить подшипниковое производство в полном объёме. С одной стороны, существует государственная поддержка в рамках программы «Развитие промышленности и повышение её конкурентоспособности» и Указа Президента РФ о национальных целях развития. С другой стороны, наблюдается неуклонное увеличение объёма рынка подшипников. К 2030 году ожидается увеличение годовой потребности в отечественных подшипниковых узлах до 200 миллионов штук. Несмотря на эти благоприятные обстоятельства, возрождение отечественных подшипниковых предприятий возможно лишь при реализации производственных стратегий, ориентированных на выпуск качественной продукции по ценам, обеспечивающим её стабильный сбыт. В этой связи исследования на тему организации контроля качества производства подшипников, позволяющего достигнуть оптимального соотношения цены и качества, являются актуальными для развития производства подшипников в РФ.

Степень разработанности проблемы. Анализ методов эффективной организации производства проведен на основе работ А.Е. Бром, М.Н. Захарова, И.Н. Омельченко, А.И. Орлова, А.П. Карпенко, А.А. Колобова и др. Различные аспекты проблем управления системами контроля качества на предприятии рассмотрены в работах Э. Деминга, Дж. Джурана, П. Друкера, К. Исикавы, Н. Кано, Ф. Котлера, Ф. Кросби, Г. Тагути, Ф. Тейлора, А. Фейгенбаума, В.В. Бойцова, Б.В. Бойцова, В.А. Васильева, С.А. Васина, А.В. Гличева, П.А. Дроговоза, В.Н. Козловского, С.А. Одинокова, О.В. Пантиухина, Б.В. Скворцова, В.А. Трапезникова, Л.М. Червякова и др.

Цель работы – повышение эффективности производства подшипников качества путем организации системы контроля, позволяющей обеспечить оптимальное соотношение цены и качества готовой продукции.

Задачи исследования:

1. На основе анализа существующих подходов к оценке уровня качества разработать обобщенный критерий оценки качества подшипников и определить его взаимосвязь с показателями эффективности производства.

2. Разработать метод оптимизации системы контроля качества производства на основе обобщенного критерия путем стохастического моделирования и верифицировать результаты моделирования.

3. Организовать оптимальную систему организации контроля качества производства подшипников качения, состоящую из набора мероприятий и параметров

контроля, в соответствии с нормативными требованиями.

Объектом исследования являются системы контроля качества продукции машиностроения на производстве. **Предметом исследования** являются методы организации систем контроля качества предприятия.

Область исследования диссертации соответствует пунктам 1 и 5 паспорта научной специальности 2.5.22: «Методы анализа, синтеза и оптимизации, математические и информационные модели состояния и динамики процессов управления качеством и организации производства», «Методы оценки качества объектов, стандартизации и процессов управления качеством».

Научная новизна:

1. Разработан обобщённый критерий оценки качества подшипников, позволяющий ранжировать показатели качества продукции разных производителей, отличающийся возможностью учёта особенностей их производства и применения.

2. Разработан метод оптимизации системы контроля качества производства путём стохастического моделирования параметров контроля и мероприятий, отличающийся от существующих возможностью задания допустимых значений параметров дискретно и интервально, при котором обеспечивается заданный уровень качества продукции при минимальных производственных затратах, и доказана возможность достоверного решения задачи сравнением результатов моделирования с результатами, полученными методом перебора.

3. Организована система контроля качества производства подшипников качества, за счет определения набора основных характеристик изделий и допустимых интервалов изменения их значений, отличающаяся от существующей практики применением стохастического метода определения значений комплекса характеристик, при которых увеличивается эффективность производства.

Практическая значимость:

1. Использование критерия качества и эмпирической зависимости цены от качества, найденной на основе подробного анализа мирового рынка подшипников, позволяет производителям этих изделий определять реальную цену продаж в каждой отрасли машиностроения, а потребителям – определять приоритетных поставщиков.

2. Метод оптимизации системы контроля качества производства подшипников реализован в виде прикладной программы, с помощью которой руководство предприятия может оперативно определить набор контрольных мероприятий, максимально повышающий уровень качества изделий, при имеющихся ресурсных ограничениях.

Реализация результатов работы. Результаты работы используются в АО «ИЭМЗ «Купол» при доработке системы контроля качества при производстве теплообменного оборудования и холодильных систем, а также в АО «Мытищинский машиностроительный завод» для определения приоритетных поставщиков при закупке комплектующих подшипниковых узлов, что подтверждено соответствующими актами.

Положения, выносимые на защиту:

- метод оценки уровня качества изделий на основе обобщённого критерия;

- метод оптимизации системы контроля качества на машиностроительных предприятиях стохастическим моделированием;
- разработанная система контроля качества на подшипниковом производстве, обеспечивающая повышение показателей эффективности производства.

Обоснованность и достоверность полученных результатов подтверждается использованием актуальных стандартов и норм для подшипникового производства, применением апробированных методов математического моделирования и согласованностью результатов моделирования систем контроля качества производства подшипников с практикой их функционирования и экспертными оценками.

Апробация работы. В ходе выполнения диссертационной работы результаты исследований были представлены на 4 международных и всероссийских научно-практических конференциях, а также на научно-практических семинарах кафедры промышленной логистики МГТУ им. Н. Э. Баумана в 2022–2025 годах.

Публикации. Результаты диссертационной работы опубликованы в материалах 7 научных работ: 3 научные статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ, и 4 статьи в сборниках конференций. Общий объём публикаций – 1,9 п.л.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы из 116 наименований. Работа изложена на 126 страницах, содержит 26 рисунков, 25 таблиц и 2 приложения.

Данное исследование было проведено в рамках работы по Соглашению о предоставлении из федерального бюджета гранта на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технологического развития № 075–15–2024–527 от «23» апреля 2024 г.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлено обоснование актуальности темы диссертации, сформулированы цель работы и решаемые в ней задачи, обозначены научная новизна, практическая значимость и положения, выносимые на защиту.

В Главе 1 проведен анализ существующих подходов к управлению качеством продукции машиностроения. Выделены основные этапы, в ходе которых наука об управлении качеством планомерно охватывала весь жизненный цикл продукции: от контроля выходного уровня качества продукции посредством отбраковки, описанной в работах Ф. Тейлора, до создания комплексных подходов, например, в работах С.А. Васина и В.Н. Козловского, подразумевающих анализ взаимосвязи всех параметров производства с качеством готовой продукции. В ходе последнего этапа разрабатываются подходы к моделированию производства с возможностью численного анализа множества вариантов его организации. Возникает потребность в выборе оптимальной модели, которая позволит выявить лучший вариант с точки зрения оценки качества. Анализ существующих подходов к оценке системы качества в предприятии позволил выделить показатели качества, приведенные в Таблице 1, где X – характеристика оцениваемой продукции; X_0 – характеристика базовой продукции; Q_{oi} , Q_b – параметры качества оцениваемой и базовой продукции; q_i – вес параметра; n, m – число единичных показателей, учитываемых

Таблица 1.
Существующие показатели качества продукции

Показатель	Формула расчета
Единичный	$K_{\text{ед}} = \frac{X}{X_6}$
Дифференциальный	$K_d = \frac{X_i}{X_{i6}}$
Комплексный	$K_k = \frac{Q_{\text{оц}}}{Q_6} = \sum_{i=0}^n \frac{X_i q_i}{X_{i6}}$
Смешанный	$K_c = \sum_{i=0}^n \frac{X_i}{X_{i6}} : n + \frac{Q_{\text{оц}}}{Q_6}$
Интегральный	$K_i = \frac{\mathcal{E}}{C_k + C_{\text{эксп}}}$

вероятна реализация продукции на рынке. На Рисунке 1 представлена взаимосвязь между изменением качества K , рыночной ценой на продукцию P и издержками на обеспечение этого уровня качества C на основе анализа рынка машиностроительной продукции. Как видно на графике, приращение цены и издержек, в зависимости от качества, может быть нелинейным. Одно и то же приращение в цене и издержках может приводить к разной прибыли у предприятия. Зависимость между уровнем качества и суммарными затратами на него определяется с помощью метода калькулирования затрат по статьям: производственный процесс, сырье и материалы, оборудование, кадры, потребляемая энергия, контроль и стандартизация, и управлеченческий персонал. В современной практике анализа хозяйственной деятельности все большее предпочтение отдается не отдельным показателям, а их системам, связанным логически в смысловую цепочку, когда каждый последующий показатель вытекает из предыдущего. Систематизацию предлагается проводить с помощью диаграммы *Du Pont*, описанной М.Н. Захаровым в рамках контроля затрат на предприятии. Диаграмма демонстрирует влияние критерия качества на прибыль, издержки и объём производства при расчёте рентабельности производства. С её помощью можно оценить эффективность использования ресурсов предприятия на изменение качества. Получив взаимосвязь между издержками на изменение качества и экономическими показателями предприятия, предложено переходить к расчёту уровня качества продукции.

В Главе 2 разработан метод оценки уровня качества изделий с помощью обобщённого критерия, который основан на методе расчёта комплексного показат-

отдельно, и число показателей, учитываемых комплексно; \mathcal{E} – полезный эффект от эксплуатации, руб.; C_k – суммарные затраты на покупку и введение в эксплуатацию, руб.; $C_{\text{эксп}}$ – эксплуатационные затраты за весь срок службы изделия, руб. Эти показатели учитывают параметры производимой продукции, однако не позволяют наглядно выявить взаимосвязь между затратами на производство изделия данного уровня качества и прогнозируемой ценой, по которой

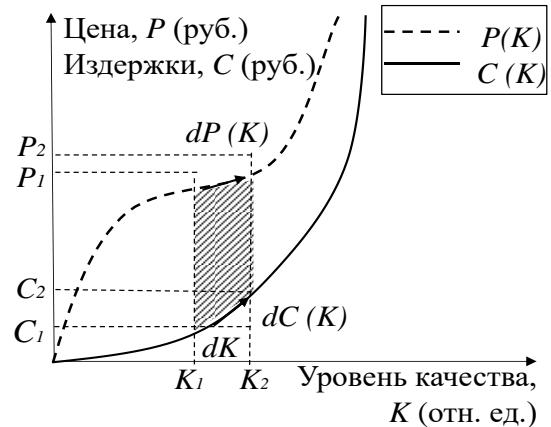


Рисунок 1. Зависимость между показателями качества, ценой и издержками

еля качества. Обобщённый критерий качества K рассматривается как сумма попарных произведений соответствующих элементов вектора характеристик изделия и вектора весовых коэффициентов:

$$K = (\vec{X}) \cdot (\vec{q})^T,$$

где $\vec{X} = (X_1, X_2, \dots, X_k)$ – вектор нормированных характеристик изделия машиностроения; $\vec{q} = (q_1, q_2, \dots, q_k)$ – вектор весовых коэффициентов важности характеристики для отрасли. Для вектора нормированных характеристик изделия машиностроения X необходимо определить параметры, влияющие на качество изделия. Для выборки подходят показатели назначения, надежности, технологичности, безопасности и прочие. Чтобы привести все параметры к общему виду, применимому для расчёта, предлагается нормировать элементы вектора X . Тогда его элементом будет являться отношение значения k -ой характеристики изделия к базовому значению:

$$\vec{X} = \left(\left(\frac{x_1}{x_{b1}} \right)^\alpha, \left(\frac{x_2}{x_{b2}} \right)^\alpha, \dots, \left(\frac{x_k}{x_{bk}} \right)^\alpha \right),$$

где x_{bk} – базовое значение характеристики, определяемое как среднее арифметическое характеристик аналогов, x_k – значение k -ой характеристики исследуемого продукта. Если увеличение значения характеристики ведёт к улучшению качества изделия, то $\alpha = 1$. В обратном случае, когда увеличение значения ведёт к ухудшению качества – $\alpha = -1$. С помощью комплексного показателя, на основе которого разрабатывается обобщённый критерий, нельзя определить значимость характеристик, интересующих конкретного потребителя в зависимости от отрасли применения, что делает его менее чувствительным к особенностям различных рынков сбыта. Поэтому предлагается ввести вектор весовых коэффициентов важности характеристики для отрасли q . Значение вектора весовых характеристик коэффициентов предлагается определить с помощью метода приписывания баллов на основе экспертной оценки. В результате расчётов весовых коэффициентов получено распределение важности характеристик по отраслям промышленности (Рисунок 2).

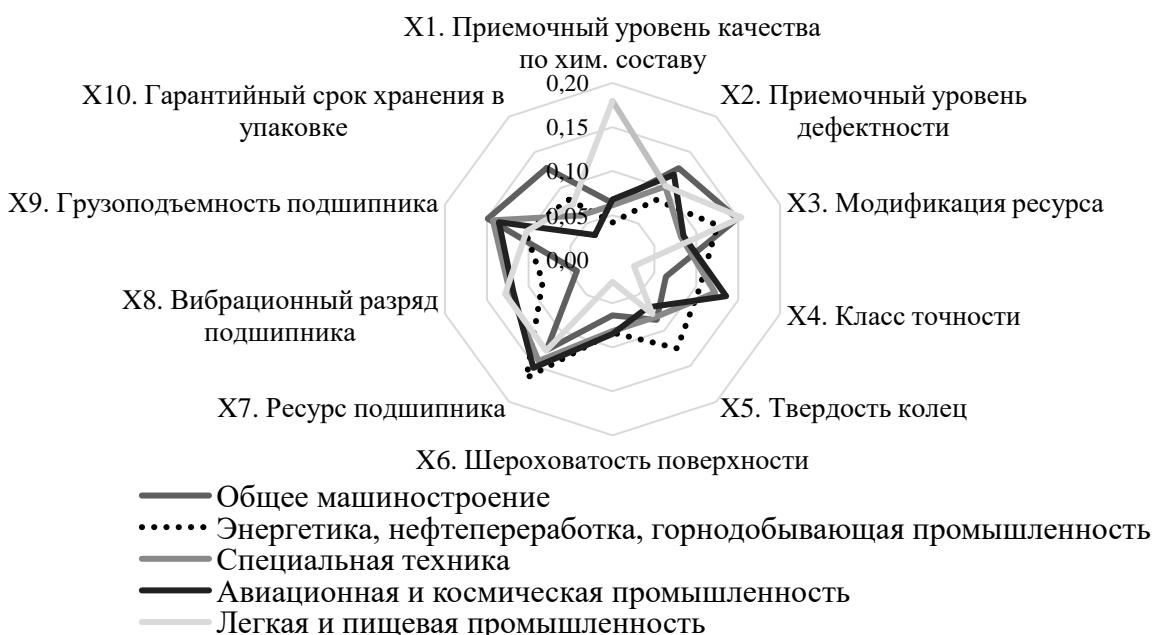


Рисунок 2. Взаимосвязь весовых коэффициентов и отрасли применения изделия

При оценке рынков сбыта выделены те характеристики подшипника, которые могут существенно повысить конкурентоспособность. На Рисунке 2 показано, что для всех отраслей промышленности важны грузоподъёмность и ресурс подшипника, поэтому значения их весовых коэффициентов стремятся к максимуму. Для оценки положения исследуемого продукта на рынке необходимо провести расчёт критерия качества для конкурирующих производителей на основе анализа отрасли. Для всех производителей определяется соответствующее значение обобщённого критерия качества по алгоритму, представленному на Рисунке 3. В результате расчёта выявлена закономерность, по которой устанавливается уровень качества на определённом рынке.

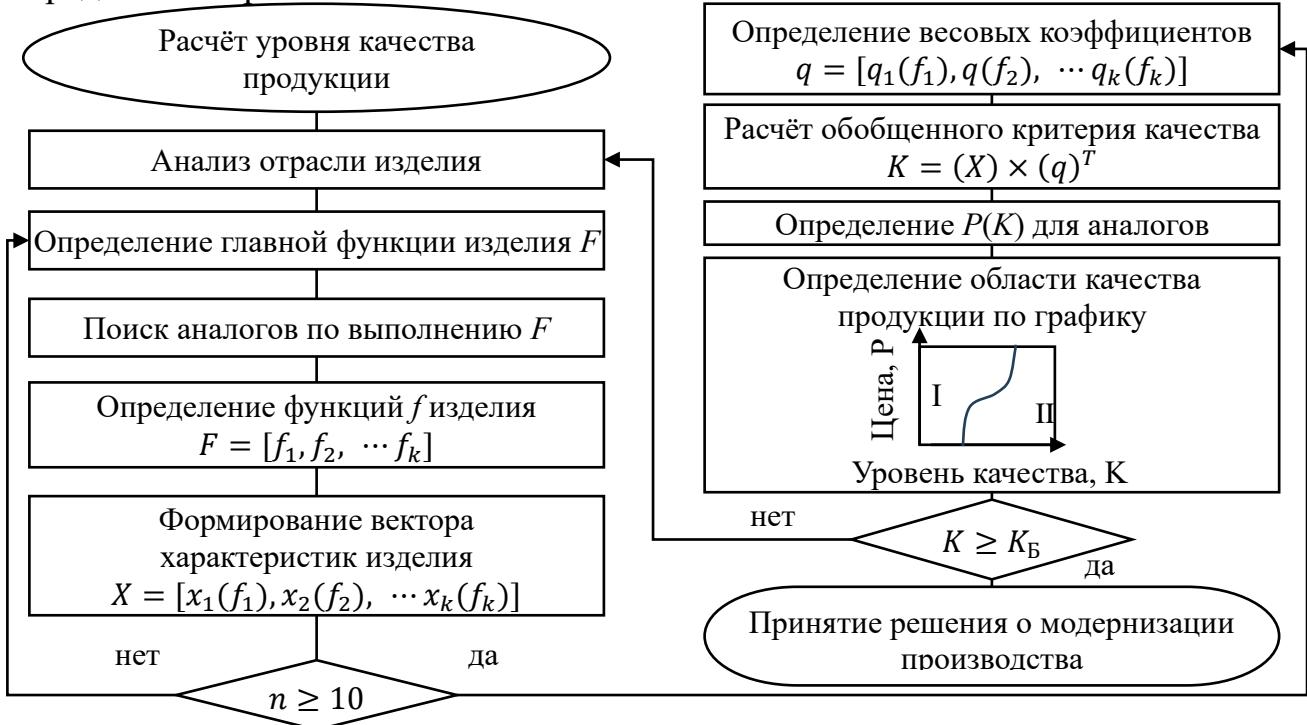


Рисунок 3. Алгоритм принятия решения о модернизации производства

Между ценой и критерием существует функциональная зависимость. Анализ рынков продукции машиностроения показал, что её можно определить логистической функцией вида:

$$K = \frac{K_{min} - K_{max}}{1 + (P/P_0)^m} + K_{max},$$

где K_{max} соответствует максимально возможному значению уровня качества для данного товара. Это значение будет одной из асимптот. Наличие асимптоты объясняется технологическим пределом, когда дополнительные затраты не будут влиять на определяющие характеристики изделия. А при K_{min} – минимальном уровне качества будет обеспечиваться приемлемое исполнение основных функций изделия. P_0 – цена, при которой на кривой отмечается перегиб. Степень m характеризует интенсивность возрастания качества от цены. Чем она выше, тем больше вложений потребует производство для выхода на новый уровень качества.

Для расчёта обобщённого критерия для подшипниковых производителей выбраны данные по продажам ступичного шарикового двухрядного подшипника. На

Рисунок 4 отмечены значения критерия качества по каждому производителю в зависимости от цены. Компании, которые попали в область над кривой качества, завышают цену относительно качества. Все российские подшипники находятся в ней с сильным отрывом от кривой. Например, для подшипников Второго государственного подшипникового завода (ГПЗ-2) рекомендуется повысить уровень качества от значения K_0 до K_1 для повышения спроса на продукцию.

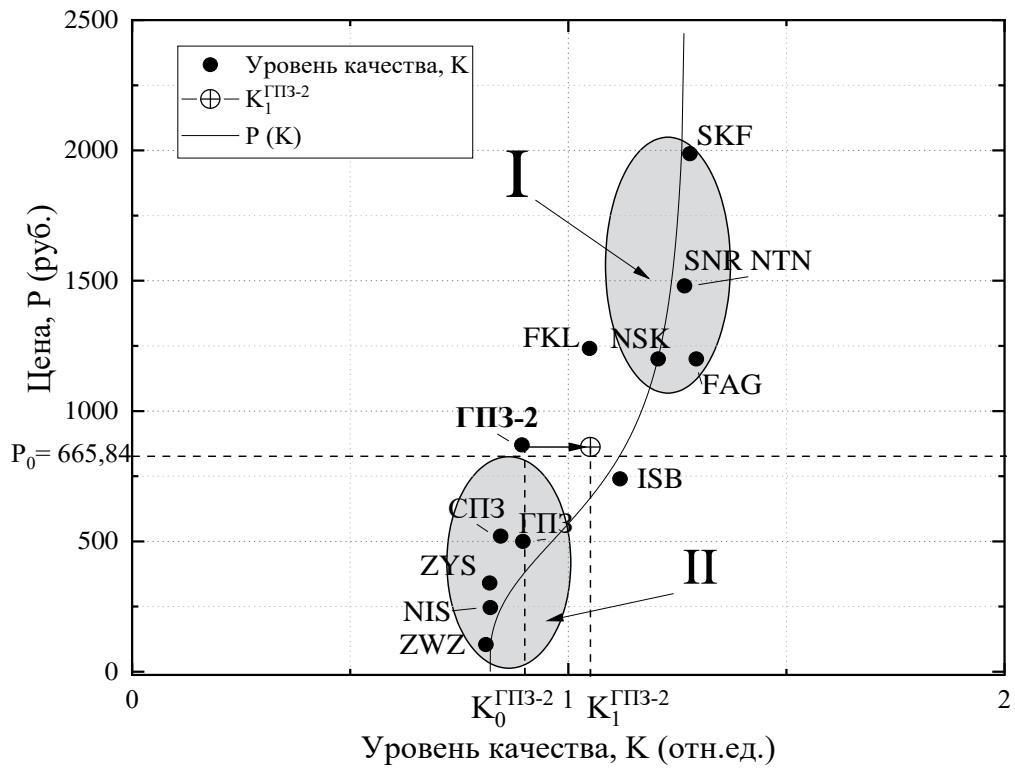


Рисунок 4. Ранжирование производителей подшипников по уровню качества и цене

На графике серым цветом отмечены две области. Первая относится к производителям продукции высокого качества, в неё попали передовые зарубежные производства, такие как *SKF* (Швеция). Большинство из них, находясь ниже кривой, имеют высокое качество по пропорционально меньшей цене. Эти производители могут повысить цену до приемлемого значения по кривой без потери спроса. Во второй области находятся производства продукции широкого потребления, например китайские производители *ZWZ* и *ZYS*. Производители, чьи показатели критериев располагаются на прямой выставили цену максимально соответствующей уровню качества. Далее предлагается найти зависимость между качеством, ценой и объемом сбыта. Существует объем товаров, который продается по цене P . Спрос на эти товары зависит от критерия качества K . При этом производство может обеспечивать объем выпуска Q , на который тратит некоторую сумму издержек C . Чтобы выпускать оптимальное количество продукции по наилучшей цене, необходимо соблюдать условие максимизации прибыли:

$$(P(K) \cdot Q - C(K) \cdot Q) \rightarrow \max.$$

По трехмерному графику на Рисунке 5 видно два пика объемов продаж. Они совпадают с разделением по качеству продукции на два типа: лидеры среди производств, выпускающих продукцию широкого потребления: *Harbin Bearing* и *ZYS*

(Китай); лидеры по выпуску продукции высокого качества: *Timken* (США) и *SKF* (Швеция).

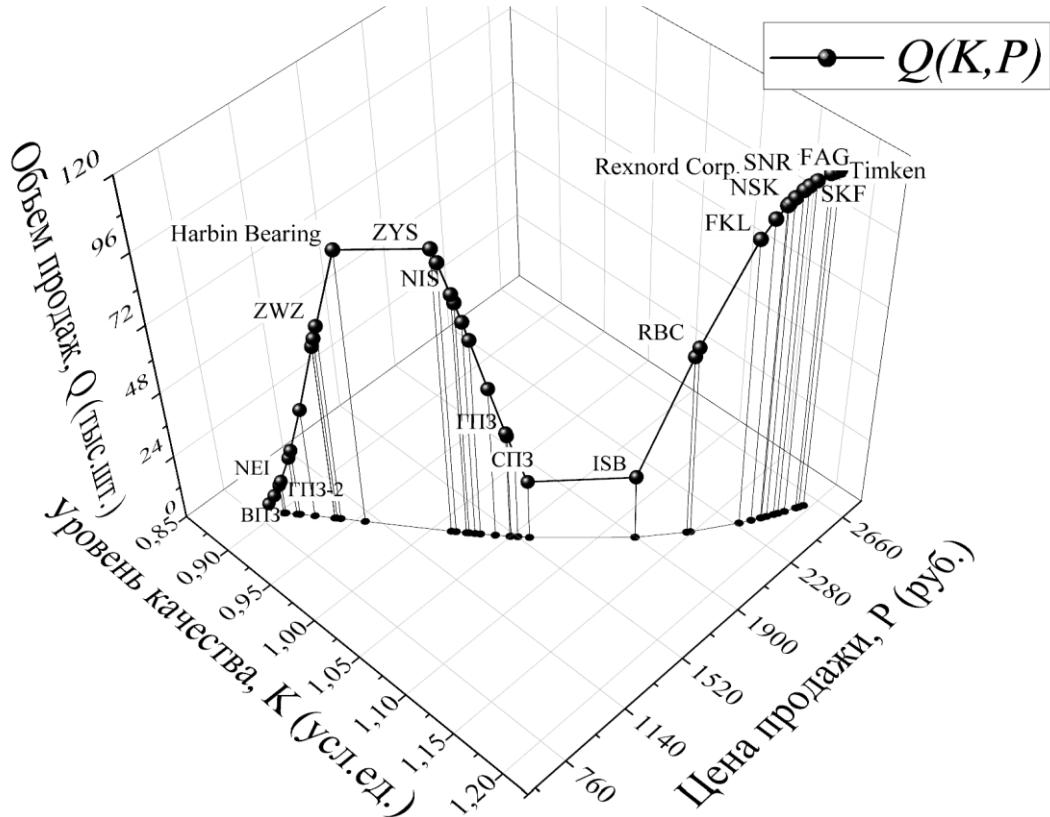


Рисунок 5. Связь параметров оптимизационной модели для рынка подшипников

Критериями оптимизации при выборе стратегии модернизации производства, помимо максимальной прибыли, могут быть: максимальное качество, максимальный объем продаж или максимальная отдача на инвестированный капитал.

В Главе 3 разработан метод оптимизации системы контроля качества производства на основе обобщенного критерия для выбора стратегии организации подшипникового производства. Разработка стратегии внедрения новых подходов к управлению качеством начинается с выбора варианта модернизации производства. Модернизация производства может проводиться в следующих направлениях: усиление входного контроля материалов и комплектующих, замена оборудования на более технологичное, оптимизация загрузки производственных мощностей, повышение контроля качества готовой продукции, повышение квалификации производственного персонала и изменение логистики и сбыта на предприятии.

Для возможности численного моделирования прогнозируемых результатов модернизации предлагается подход к формализации стратегии организации производства. Любая i -я стратегия модернизации производства будет характеризоваться вектором-строкой M_i длиной n . Элементами вектора будут являться значения параметров модернизации Y_m . Вектор-строка стратегии модернизации принимает вид:

$$M_i = [Y_1, \dots, Y_m, \dots, Y_n].$$

Каждый из параметров модернизации может принимать любое значение из заданных для него дискретно. Обозначим через k_m количество возможных значений. Тогда всего число вариантов модернизации:

$$N = \prod_{m=1}^n k_m.$$

Для дальнейшего моделирования необходимо определить, как влияет изменение модернизируемых параметров производства Y на характеристики продукции X . Для этого понадобятся сведения о технологии и процессах производства конкретного изделия. В общем виде зависимость можно выразить так:

$$X = \left\{ \left(\frac{f_1(Y_1)}{x_{b1}} \right)^\alpha, \dots, \left(\frac{f_m(Y_m)}{x_{bm}} \right)^\alpha, \dots, \left(\frac{f_n(Y_n)}{x_{bn}} \right)^\alpha \right\}.$$

Изменение производственных показателей стоит некоторых издержек C_i . Тогда издержки на проведение стратегии модернизации производства M_i составят:

$$C_i = \sum_{m=0}^n C_m.$$

Суммарные издержки C_Σ , связанные с модернизацией выпуска продукции рассчитываются как произведение объёма выпуска Q продукции на издержки C_i . Зададимся следующими лимитирующими факторами: ограничения по ресурсам (определяют минимально возможную цену P_0 и издержки C_0 на единицу продукции при минимально возможном объёме производства Q_0), минимально K_{min} и максимально K_{max} возможное качество, исходя из технологического уровня продукции. Объём продаж в общем случае оценивается по формуле:

$$Q = \alpha_1/P + \alpha_2,$$

где P – цена за единицу продукции, устанавливаемая по уровню качества, руб. Коэффициенты, определяющие особенности рынка, будут равны: $\alpha_1 = P_0$, $\alpha_2 = Q_0$.

Выбрать вариант модернизации можно методом перебора, вычисляя для каждого варианта прибыль, которую он принесёт. Следует отметить, что в общем случае для производства решать задачу методом перебора нерационально, так как в реальности число вариантов может достигать десятков миллионов. А в случае, если параметры заданы не дискретно, а непрерывно, то перебором задачу решить невозможно. Поэтому в работе предлагается оригинальный стохастический метод, основанный на методе Монте-Карло. Метод основан на генерации большого количества случайных величин, которые формируются таким образом, чтобы их вероятностные свойства согласовывались с аналогичными значениями параметров производства. Его реализация представлена на схеме (Рисунок 6).

В ходе подготовки к моделированию в программу вносятся входные данные, перечень которых приведён вначале схемы. Далее следует блок циклического расчёта по заданным параметрам Y , которые генерируются с помощью функции случайного выбора значений из исходных диапазонов. Сначала по параметрам контроля определяется показатель качества K и затраты на реализацию этих параметров C . По показателю качества рассчитывается цена продаж $P(K)$. Затем по цене продажи определяется возможный объём продаж $Q(P)$ на основе кривой спроса для данной продукции. На выходе из цикла записываются варианты, приводящие к максимальной прибыли предприятия. Заявленный метод апробируется на примере расчета оптимального варианта модернизации машиностроительного предприятия при возможности проведения мероприятия в трёх направлениях для 10 параметров. Значения параметров выбраны на основе анализа стандартов качества, предъявляемых к производству подшипников. Для возможности проведения расчёта перебором значения заданы дискретно.

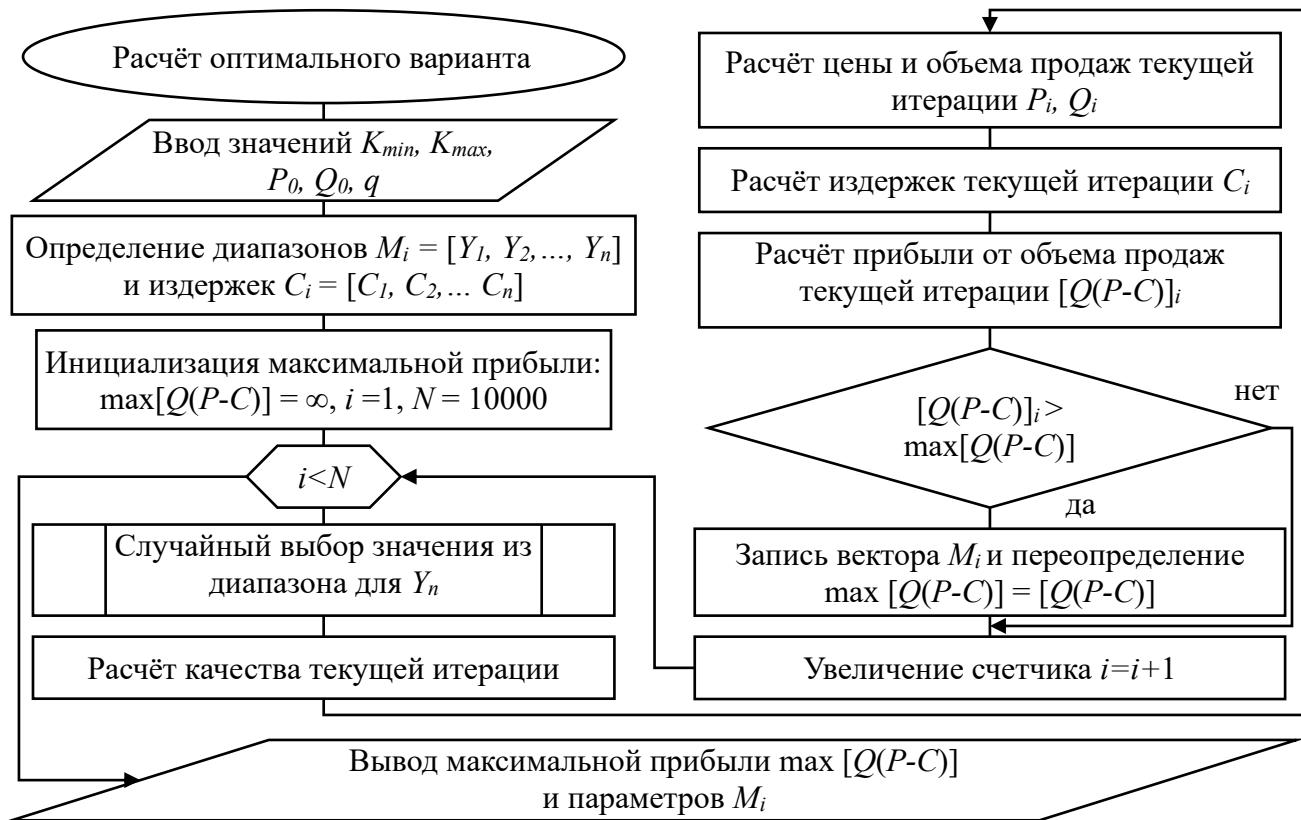


Рисунок 6. Блок-схема программы по выбору оптимального варианта модернизации

По выбранным для расчёта направлениям модернизации производства подшипников параметры разделены на следующие группы (Таблица 2).:

- *J₁ Входной контроль материалов и комплектующих*: Y₁. Приёмочный уровень дефектности химического состава, %-шт, Y₂. Приёмочный уровень дефектности сырья, %-шт, Y₃. Вязкость закладываемого масла, мм²/с.
- *J₂ Контроль производственного процесса*: Y₄. Максимальное отклонение по классу точности, мкм, Y₅. Твердость поверхности после термообработки, HRC, Y₆. Шероховатость поверхностей, мкм.
- *J₃ Выходной контроль качества готовых изделий*: Y₇. Модификация ресурса, усл. ед., Y₈. Допустимые вибрации, Гц, Y₉. Удельная грузоподъемность, Н/мм², Y₁₀. Браковочный уровень дефектности готовой продукции, %-шт.

Таблица 2.

Исходные данные для моделирования

Направления	Параметры	Значения параметров											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<i>J₁</i>	Y ₁	2,5·9	2,5·150	7,5·9	7,5·150								
	Y ₂	0,5·9	0,5·150	2,5·9	2,5·150								
	Y ₃	1,00	1,03	1,11	0,53	1,06	1,15	1,24	1,3	1,5	1,3	1,6	1,7
<i>J₂</i>	Y ₄	-100	-40	-35	-15	-9	-2						
	Y ₅	61,5	63	62	62,5	63,5	60,5	59					
	Y ₆	1,25	0,63	0,32									
<i>J₃</i>	Y ₇	1	0,253	0,92									
	Y ₈	27	24	21	18	15	12	9	6	3	1		
	Y ₉	14,553	45	59,523	54,924	43,875	38,025	35,12					
	Y ₁₀	0,5·9	0,5·150	2,5·9	2,5·150								

В расчёте $N=20\ 321\ 280$ комбинаций параметров, а следовательно, столько же вариантов стратегий по модернизации. В результате моделирования получены значения векторов-строк. На графиках (Рисунок 7) приведены результаты при генерации $N=100, 1000, 10\ 000$ и при расчёте методом перебора всех возможных вариантов. На координатной плоскости каждая точка соответствует значению прибыли от проведения M_i варианта модернизации. По графикам видно, что с увеличением числа итераций область распределения точек приближается к области, полученной перебором. И при значении в 10 000 итераций множество точек почти полностью повторяет область множества, полученного методом перебора.

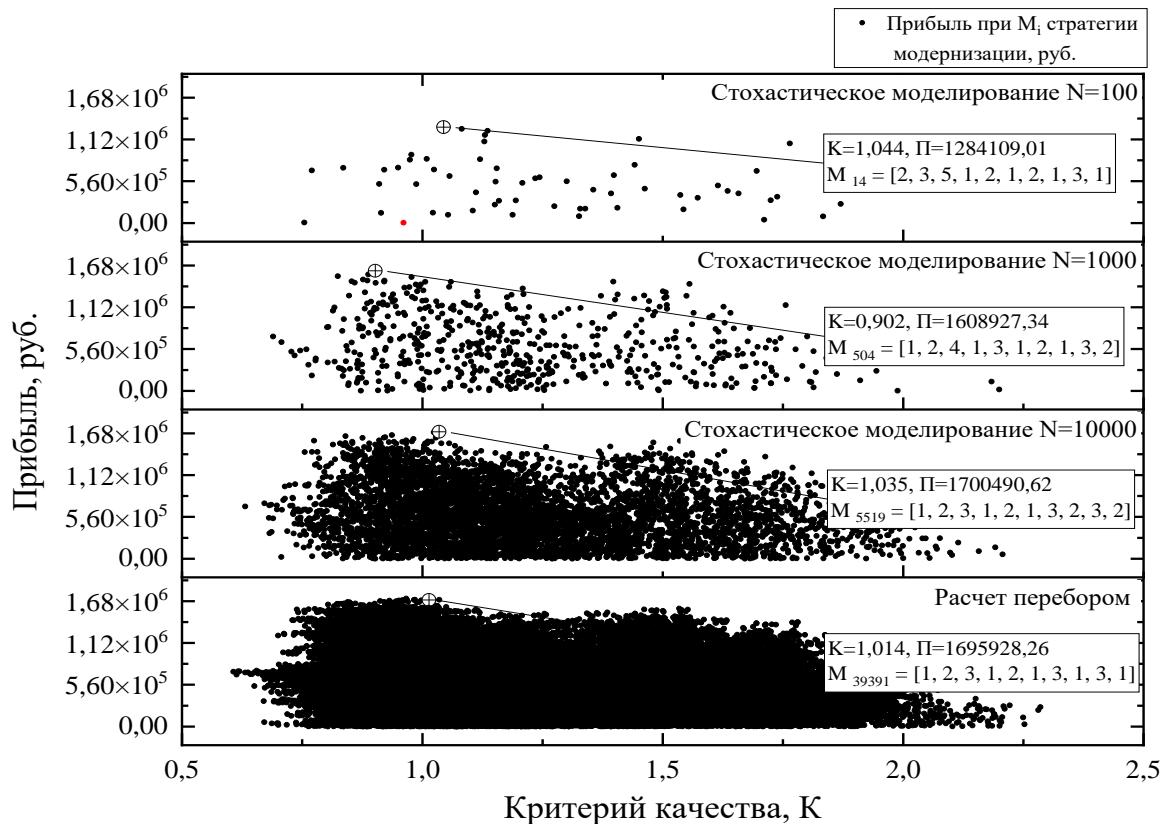


Рисунок 7. Результаты моделирования методом Монте-Карло и перебором

В результате, при 100 итерациях отклонение по критерию качества составило 12,96%, а по прибыли 25%. Это обусловлено тем, что половина полученных параметров отличаются от результатов решения методом перебора. При $N = 1000$ итераций различаются 4 параметра, и значение критерия качества и прибыли получается точнее – отклонение составляет 11,04% и 5,13%. После 5000 итераций в стратегиях отличаются 1–2 параметра, при этом их изменение не дает существенное отклонение по прибыли и критерию качества (прибыль – 0,289% и критерий качества – 2,07%). Следовательно, предприятие может применять стратегию, полученную в ходе стохастического моделирования. Параметры, отличающиеся после 5000 итераций, можно дополнительно выбирать исходя из других критериев, например сроков реализации или доступности внедрения. Моделирование показало, чем больше проводится итераций стохастическим методом, тем точнее получается результат. Приведена зависимость между отклонениями от расчётного уровня качества и числа повторов расчёта методом Монте-Карло (Рисунок 8).

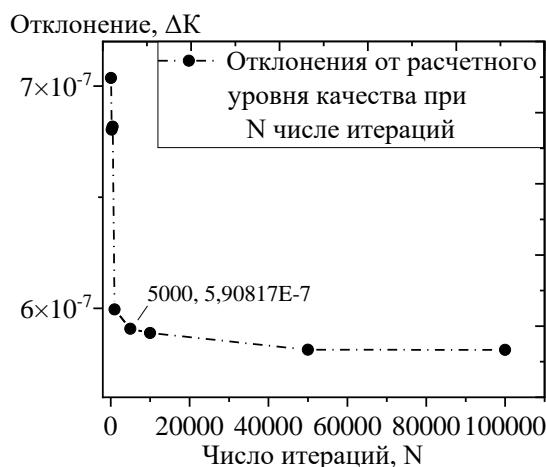


Рисунок 8. Подтверждение достоверности результатов моделирования

ственного процесса подшипников качения, в которой выделены 3 этапа (Таблица 3).

Отклонения от параметров качества и прибыли, начиная с 5000 итераций, не превышают 5 %, что говорит о высокой точности предлагаемого метода. Следовательно, для аналогичных задач достаточно моделировать 2,5% от числа N вариантов, что существенно ускоряет расчёты в случае увеличения числа входных параметров.

В Главе 4 описана разработка оптимальной организации системы контроля качества производства подшипников с помощью предложенного метода. На основе анализа производ-

Таблица 3.

Типовая система контроля качества для подшипникового производства

Этапы контроля	Мероприятие по контролю качества	Параметр контроля	Характеристика подшипника
Входной контроль материалов и комплектующих	1. Проверка хим. состава материалов	Y_1 . Приёмочный уровень дефектности хим. состава	X_1 . Вероятность отсутствия брака химического состава
	2. Проверка на наличие наружных повреждений и дефектов	Y_2 . Приёмочный уровень дефектности сырья	X_2 . Вероятность отсутствия наружных дефектов
	3. Выбор масла	Y_3 . Вязкость масла	X_3 . Коэффициент модификации ресурса
Контроль производственного процесса	4. Проверка размерной точности поверхностей	Y_4 . Точность обработки поверхностей	X_4 . Макс. отклонение по классу точности
	5. Проверка твердости поверхности	Y_5 . Твердость колец	X_5 . Макс. контактное напряжение
	6. Проверка шероховатости поверхности	Y_6 . Шероховатость посадочной поверхности	X_6 . Макс. допустимая шероховатость поверхности
Выходной контроль качества готовой продукции	7. Ресурсные испытания	Y_7 . Вероятность безотказной работы (ВБР)	X_7 . Коэффициент модификации ресурса по ВБР
	8. Вибродиагностика на испытательных стендах	Y_8 . Вибрационные частоты подшипника	X_8 . Вибрационный разряд по допустимым вибрациям
	9. Уточнение грузоподъёмности	Y_9 . Серия длин и ширин	X_9 . Удельная грузоподъёмность
	10. Контроль упаковки	Y_{10} . Браковочный уровень готовой продукции	X_{10} . Вероятность отсутствия дефектов

Параметры контроля задаются с учётом отраслевых стандартов, конструктивных особенностей продукции, возможностей производства и требований потребителей.

Основным стандартом для подшипников является ГОСТ 520–2011, по требованиям которого проверяется качество изделия. На каждом этапе определены производственные параметры, которые контролируются предприятием Y_i . Параметры контроля влияют на характеристики X_i подшипника, а их значения в дальнейшем определяют уровень качества всего изделия. Рассмотрим подробнее взаимосвязь предложенных параметров контроля и характеристик подшипника (Таблица 4). Параметры X_1, X_2, X_3, X_7, X_9 и X_{10} зависят от приведенных функций. Остальные являются дискретными, так как задаются исходя из материалов, допусков, точности и шероховатости из стандартов.

Таблица 4.

Определение характеристик подшипника по параметрам контроля

Характеристика подшипника	Формула для расчёта
X_1 , усл. ед.	$X_1 = (1 - Y_1)^n, \text{ где } n = \frac{\ln \Pi}{\ln(1 - Y_1)}$
X_2 , усл. ед.	$X_2 = (1 - Y_2)^n, \text{ где } n = \frac{\ln \Pi}{\ln(1 - Y_2)}$
X_3 , усл. ед.	$X_3 = a_{iso} = 0,1 \left[1 - \left(a - \frac{b}{Y_3^c} \right)^f \left(\frac{e_c C_u}{g P} \right)^r \right]^{-s}$
X_4 , мкм (класс точности)	-15 (0), -12 (6), -9 (5), -7 (4), -5 (T), -4 (2)
X_5 , МПа (марка стали)	700 (ШХ4), 1700 (ШХ15), 1730 (ШХ20СГ), 1080 (20Х2Н4А), 870 (15Г1)
X_6 , мкм (класс точности)	1,25 (0), 0,63 (6, 5), 0,32 (4, T, 2)
X_7 , усл. ед.	$X_7 = a_1 = 1 \text{ при } Y_7 = 0,9$ $X_7 = a_1 \approx \left(\frac{\ln Y_7}{\ln 0,9} \right)^{\frac{2}{3}} + 5,5(Y_7 - 0,9)^2 \text{ при } Y_7 \leq 0,99$ $X_7 = a_1 \approx 0,25 \left(\frac{\ln Y_7}{\ln 0,9} \right)^{\frac{3}{5}} + 400(Y_7 - 0,99)^2 \text{ при } 0,99 < Y_7 \leq 0,9995$
X_8 , дБ (вибрационный ряд подшипника)	27 (Ш0), 24 (Ш1), 21 (Ш2), 18 (Ш3), 15 (Ш4), 12 (Ш5), 9 (Ш6), 6 (Ш7), 3 (Ш8), 1 (Ш9)
X_9 , Н/мм ²	$X_9 = \frac{C_r}{Y_9}$
X_{10} , усл. ед.	$X_{10} = (1 - Y_{10})^n, \text{ где } n = \frac{\ln \Pi}{\ln(1 - Y_{10})}$

В соответствии с разработанным алгоритмом проведен расчёт параметров оптимальной системы качества подшипников. С помощью стохастического моделирования при 10 000 итерациях получен вектор M , значения которого приведены в Таблице 5. При предложенном варианте организации контроля качества на производстве ожидаемая прибыль составит $\Pi = 1 570$ тыс. руб. при уровне качества подшипника $K = 1,277$. Планируемый объем продаж составит $Q = 1000$ шт. при издержках производства $C = 771,7$ руб./шт. Рекомендуемая цена на подшипник $P = 2178,52$

руб. Этот вариант приведёт к повышению прибыли предприятия на 29,84 % относительного базового исполнения подшипника. По результатам проведённого анализа предприятие разрабатывает комплекс мероприятий, позволяющий достичь данных показателей.

Таблица 5.

Оптимальные значения параметров контроля подшипников

M	Значения Y	Значения X	Примечание
Y_1	3,5 %	0,926	Допускать партии с долей брака менее 3,5 %
Y_2	1 %	0,943	Допускать партии с долей брака менее 1 %
Y_3	118 $\text{мм}^2/\text{с}$	1,15	Использовать масло И-Г-С-100
Y_4	-13 $\mu\text{м}$	-15 $\mu\text{м}$	Выбрать класс 0 точности оборудования
Y_5	64 HRC	1730 МПа	Проводить закалку колец из стали ШХ20СГ
Y_6	1,25 $\mu\text{м}$	1,25	Выбрать класс 0 точности
Y_7	0,997	0,5	Усилить контроль по ВБР до особо повышенного
Y_8	150 Гц	24 дБ	Допускать вибрационный разряд Ш1
Y_9	105 мм^2	59,524 $\text{Н}/\text{мм}^2$	Выбрать сверхлёгкую нормальную серию
Y_{10}	1,5 %	0,941	Допускать партии с долей брака менее 1,5 %

На Рисунке 9 представлены диапазоны расчётных значений и полученные в них оптимальные значения характеристик подшипника.

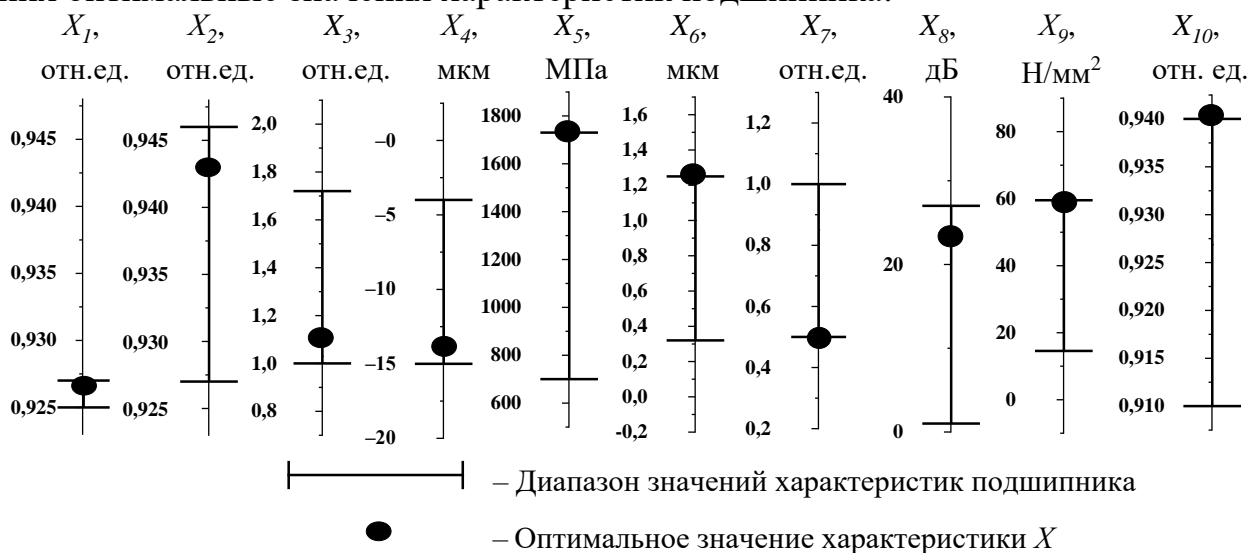


Рисунок 9. Анализ разработанной системы контроля качества производства подшипников

Характеристики вероятности отсутствия брака по химическому составу X_1 , отсутствия наружных дефектов X_2 и дефектов в готовой продукции X_{10} при оптимальном векторе принимают значения, близкие к максимальным границам диапазона. Следовательно, предприятию на входном и выходном контроле необходимо ужесточить мероприятия по обнаружению дефектов. Существенный разброс имеют характеристики отклонения по классу точности X_4 и шероховатости поверхности X_6 , которые тесно взаимосвязаны с подбором вариантов обработки поверхностей и зависят от оборудования и метода производства. При моделировании оптимальным оказался 0 класс точности, что соответствует действительности: подшипники этого класса самые распространённые. Характеристика модификации

ресурса по ВБР X_7 проверяется на этапе выходного контроля готового подшипника. Оптимальным по расчёту оказался особо повышенный контроль, который требует жесткой отбраковки готовых изделий. Характеристика по допустимым вибрациям X_8 , зависящая от вибрационного разряда, так же имеет широкий разброс. Расчет показал, что оптимальным, с точки зрения потребителя, будет вибрационный разряд Ш1, что согласуется с 0 (нормальным) классом точности. Характеристика максимального контактного напряжения X_5 зависит от марки стали. Моделирование показало, что сталь ШХ20СГ оптимальна по соотношению цены и качества, так как она имеет максимально возможное значение контактных напряжений среди приведённых в расчете марок сталей. Характеристика удельной грузоподъёмности подшипника X_9 показывает, что объём производства подшипника сверхлёгкой серии диаметра и нормальной серии ширины должен быть наиболее значительным среди всех вариантов исполнений, так как имеет большую удельную грузоподъёмность при наименьших из возможных габаритов. Полученные оптимальные характеристики подшипника увеличивают уровень качества относительно базового исполнения, характерного для отечественных производителей, что говорит о перспективе применения разработанной системы контроля качества производства подшипников для внедрения в производство и в дальнейших исследованиях.

Заключение:

1. Анализ современного рынка подшипников в России показал, что применение стратегии обеспечения качества производства, направленной на выпуск продукции с предиктивной аналитикой соотношения её цены и качества, является перспективным для отечественных производителей.
2. Предложенный обобщённый критерий для оценки качества подшипников позволяет производителям этой продукции определить допустимую цену и отрасль для стабильного сбыта изделий.
3. Разработанный метод оптимизации системы контроля качества, в основе которого проводится моделирование множества вариантов системы методом Монте-Карло, и оценка полученных вариантов по предложенному критерию качества, позволяют решить задачу организации системы контроля качества, обеспечивающую максимальную прибыль от выпуска продукции. Предложенный метод стохастического моделирования параметров контроля обладает универсальным характером и может быть использован в других областях.
4. Проведение расчётов по моделям производственных систем организации контроля качества показало, что преимуществами применения методов стохастического программирования являются возможность задания допустимых значений параметров качества дискретно и интервально, а также сокращение времени моделирования при сохранении точности количественной оценки (отклонение от метода перебора не превышало 5%).

5. На основе анализа требований нормативных документов по производству подшипников качения сформирована система контроля качества для их производств, включающая набор мероприятий и параметры контроля с допустимыми диапазонами для этапов входного контроля материалов и комплектующих, производства и выходного контроля готовой продукции.

6. Применение метода оптимизации систем контроля качества показало, что наиболее экономически эффективными для подшипниковых производств являются меры по ужесточению параметров входного контроля, связанных с допустимой дефектностью сплошности и химического состава металлических заготовок, а также параметров выходного контроля, в части расширения базы ресурсных испытаний и вибрационной диагностики, при этом усиление требований к параметрам контроля производственного процесса требует значительных затрат на модернизацию оборудования, поэтому нецелесообразно для действующих предприятий.

7. Анализ результатов моделирования организации контроля качества подшипникового производства позволил назначить мероприятия по контролю качества, проведение которых при установленных значениях параметров, позволит повысить эффективность производства за счет увеличения показателя качества подшипников на 27%, а прибыли предприятия на 30%, что подтверждает перспективность использования предложенной системы.

Основные результаты диссертации отражены в следующих работах:

1. Завозина О. Ю. Оценка эффективности организации машиностроительного производства на основе единого критерия качества // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2021. №1. С. 114-132. (1,12 п. л.).

2. Завозина О. Ю., Синицына Ю. В. Использование многопараметрического критерия качества для выбора стратегии модернизации производства // Контроль. Диагностика. 2024. Т.27, №12. С. 59-66. (0,5 п. л./0,25 п. л.).

3. Завозина О. Ю., Захаров М. Н., Синицына Ю. В. Организация системы контроля качества при производстве подшипников // Вестник машиностроения. 2025. Т. 104, № 3. С. 253–258. (0,3 п. л./0,1 п. л.).

4. Zavozina O. U. Assessment of the quality of machine-building products based on unified quality criteria // Science, Engineering and Business: Conference Proceedings and Papers III Interacademic Conference. 2022. Vol. 1. P. 103-107. (0,25 п.л.).

5. Завозина О. Ю., Захаров М. Н. Оценка целесообразности мероприятий по реорганизации машиностроительного производства по эффекту приращения единого критерия качества // Десятые Чарновские чтения: Сборник трудов X Всероссийской научной конференции по организации производства. М.: НОЦ «Контроллинг и управленические инновации» МГТУ им. Н.Э. Баумана. НП «Объединение контроллеров». 2021. С. 87-93. (0,37 п. л./0,18 п. л.).

6. Завозина О. Ю. Анализ влияния современных подходов модернизации производства на качество продукции // Устойчивое развитие и новая индустриализация: наука, экономика, образование: Сборник трудов международной научн.-практ. Конференции. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2021. С. 54-58. (0,25 п. л.).

7. Завозина О. Ю., Захаров М. Н. Организация системы контроля качества на машиностроительном производстве // Четырнадцатые Чарновские чтения: Сборник трудов XIV Всероссийской научной конференции по организации производства. М.: НОЦ «Контроллинг и управленические инновации» МГТУ им. Н.Э. Баумана. НП «Объединение контроллеров». 2024. С. 69-76. (0,43 п. л./0,21 п. л.).