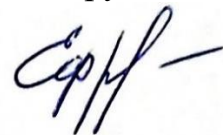


На правах рукописи



Ефремов Андрей Николаевич

**МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА  
КОМПЛЕКТУЮЩИХ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ  
ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Специальность 2.5.22 - Управление качеством продукции.  
Стандартизация. Организация производства

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в Автономной некоммерческой организации дополнительного профессионального образования «Научно – образовательный центр ВКО «Алмаз – Антей» им. академика В.П. Ефремова»

**Научный руководитель:** **Юдин Сергей Владимирович**  
доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Фролова Елена Александровна**  
доктор технических наук, доцент  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Санкт-Петербургский  
государственный университет аэрокосмического  
приборостроения», заведующий кафедрой  
инноватики и интегрированных систем качества

**Савич Екатерина Константиновна**  
кандидат технических наук, доцент  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Самарский национальный  
исследовательский университет имени академика  
С.П. Королева», доцент кафедры «Производство  
летательных аппаратов и управление качеством в  
машиностроении»

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «МИРЭА – Российский  
технологический университет»

Защита состоится \_\_\_\_\_ 2026 г. в \_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета 24.2.331.18 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.\_\_\_\_, ауд.\_\_\_\_\_

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим выслать по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru)

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2026 г.

И.о. ученого секретаря  
диссертационного совета,  
доктор экономических наук, доцент



Е.Н. Горлачева

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования:**

В современных условиях авиационная промышленность является одной из наукоемких отраслей экономики и способна оказать существенное влияние на темпы инновационного развития, достижение стабильного экономического роста нашей страны. Предприятия авиационной промышленности функционируют в условиях усиления конкуренции, что предполагает повышение требований к качеству применяемых при производстве материалов и изготовленных из них комплектующих. Особенно это проявляется в необходимости обеспечения износостойкости в процессе эксплуатации деталей двигателей, винтов, элементов обшивки корпуса самолета, топливных баков, различных нагреваемых элементов и др.

Комплектующие изделия при эксплуатации работают в различных средах (в том числе агрессивных), при различных температурах и давлениях. Анализ основных групп причин авиационных происшествий (по данным Межгосударственного авиационного комитета), произошедших из-за неисправности двигателя показал, что в 40% случаев причиной повреждения двигателя являются прочностные и функциональные отказы. Поэтому качество защитных покрытий наряду с прочностными характеристиками основного материала является определяющим для обеспечения работоспособности изделий в эксплуатации.

В настоящее время процесс контроля качества комплектующих изделий в авиационной промышленности осуществляется на финальном этапе изготовления. Такой метод контроля не улучшает их качество, а только позволяет выявить дефектные комплектующие. Существующая в производственном процессе система предупредительного контроля, включающая входной контроль, комплекс методов неразрушающего контроля и другие методы, является достаточно трудоемкой, позволяет контролировать параметры качества, определенные в технической документации, и не учитывает параметры, оказывающие влияние на работоспособность комплектующих финального изделия в процессе эксплуатации.

Данный аспект обуславливает актуальность создания научно-технических решений для повышения эффективности производственных процессов по изготовлению комплектующих изделий в авиационной промышленности на основе объединения основных параметров качества, регламентированных технической документацией и дополнительных параметров качества, оказывающих влияние на работоспособность финального изделия в процессе эксплуатации.

### **Степень разработанности темы:**

Проблемы управления, контроля и оценки качества применительно к различным видам продукции решались во многих научных исследованиях.

Разработкам методов оптимизации, математических и информационных моделей состояния и динамики качества различных объектов посвящены труды Омельченко И.Н., Дроговоза П.А., Бойцова Б.В., Васильева В.А., Васина С.А., Козловского В.Н., Червякова Л.М. и др.

На разработку и совершенствование научных инструментов оценки, мониторинга и прогнозирования качества продукции и процессов ориентированы исследования Г.Г. Азгальдова, В.П. Беспалько, А.Г. Варжапетяна, В.А. Васильева, А.В. Гличева, В.М. Кларина, Г.И. Коршунова, В.И. Круглова, В.М. Кутузова, В.А. Липатникова, Л.С. Лисицыной, Н.Н. Рожкова, С.А. Степанова, И.В. Степанова, В.С. Соболева, А.И. Субетто, М.Е. Ставровского, Е.Г. Семеновой, В.М. Соколова, В.Н. Тисенко, Ю.Г. Татура, В.К. Федюкина, А.А. Шехонина, и др., а также трудах зарубежных ученых Б. Блума, У.Э. Деминга, Дж. Харрингтона и др.

**Цель работы** заключается в повышении качества изделий на основе применения разработанных моделей прогнозирования качества комплектующих изделий авиационной промышленности.

**Объектом исследования** является производственный процесс нанесения анодно-окисных покрытий на комплектующие изделия авиационной промышленности.

**Предмет исследований** – процесс прогнозирования параметров качества комплектующих изделий авиационной промышленности.

**Область исследований диссертации** соответствует пунктам 1 и 9 паспорта специальности 2.5.22:

1. Методы анализа, синтеза и оптимизации, математические и информационные модели состояния и динамики качества объектов.

9. Разработка и совершенствование научных инструментов оценки, мониторинга и прогнозирования качества продукции и процессов.

**Задачи исследования:**

1. Провести анализ существующих моделей организации процессов контроля и методов оценки качества изделий авиационной промышленности.

2. Провести анализ отказов изделий авиационной промышленности в процессе эксплуатации.

3. Определить параметры качества комплектующих изделий авиационной промышленности, оказывающих влияние на работоспособность изделий в процессе эксплуатации.

4. Разработать модели прогнозирования параметров качества комплектующих изделий в авиационной промышленности.

5. Разработать и внедрить методику и алгоритм прогнозирования параметров качества комплектующих изделий в авиационной промышленности.

6. Разработать предложения и рекомендации по использованию модели прогнозирования параметров качества комплектующих изделий в авиационной промышленности.

**Научная новизна работы:**

1. Модель прогнозирования параметров качества комплектующих изделий авиационной промышленности, отличающаяся от существующих моделей тем, что включает дополнительные параметры качества: теплопроводность, пробивное напряжение, износостойкость.

2. Метод прогнозирования параметров качества комплектующих изделий авиационной промышленности, включающий модели, методику и алгоритм

прогнозирования параметров качества, учитывающие условия эксплуатации комплектующих изделий авиационной промышленности.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Модели прогнозирования параметров качества, учитывающие дополнительные параметры качества в зависимости от условий эксплуатации комплектующих изделий авиационной промышленности и не регламентированные нормативно-технической документацией, и позволяющие обеспечить требуемые характеристики работоспособности изделий в процессе эксплуатации.

2. Методика прогнозирования параметров качества комплектующих изделий, которая позволяет повысить качество финальных изделий авиационной промышленности.

3. Алгоритм прогнозирования параметров качества, позволяющий повысить эффективность процесса контроля качества за счет сокращения времени и числа контрольных операций в процессе производства комплектующих изделий авиационной промышленности.

**Теоретическая значимость** работы заключается в развитии методов прогнозирования параметров качества комплектующих изделий в авиационной промышленности, позволяющих обеспечить требуемые характеристики работоспособности комплектующих в процессе эксплуатации.

**Практическая значимость результатов работы** заключается в разработке методики и алгоритма прогнозирования качества комплектующих, определяющих работоспособность изделия в процессе эксплуатации и позволяющих повысить качество изделий авиационной промышленности.

#### **Методология и методы исследования:**

Теоретические исследования в диссертационной работе основаны на положениях теории организации производства, бережливого производства, сравнительного анализа и математического моделирования производственных процессов с использованием систем автоматизированного проектирования.

В работе использованы методы статистического анализа, модельно-ориентированного системного инжиниринга, теории вероятности и математической статистики и методы математического моделирования.

#### **Степень достоверности и апробация результатов:**

Обоснованность и достоверность положений диссертации подтверждается достаточным количеством наблюдений, применением современных методов исследования, которые соответствуют цели работы и поставленным задачам. Сформулированные в работе научные положения, выводы и практические рекомендации базируются на теоретических положениях и результатах комплекса теоретико-экспериментальных исследований в выбранной области. Статистический анализ и интерпретация полученных результатов проведены с использованием современных методов обработки информации и статистического анализа. Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций диссертации подтверждена апробацией и результатами практической реализации результатов работы, которые использованы ПАО «Машиностроительный завод имени М.И. Калинина, г. Екатеринбург» в организации производственного процесса.

Результаты, полученные в рамках работы над диссертацией, представлялись и обсуждались на следующих научно-практических конференциях: III Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении» (Тула, 2022); VII научно-техническая конференция «Математическое моделирование, инженерные расчеты и программное обеспечение для решения задач ВКО» (Москва, 2022); X Международная научно-практическая конференция «Fundamental Science and Technology» (Уфа, 2022); IV Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении» (Тула, 2023); Конференция «Радионавигация и время – 2023» (Санкт-Петербург, 2023); Всероссийская научно-техническая конференция «От качества инструментов к инструментам качества» (Тула, 2023); V Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении» (Тула, 2024).

#### **Публикации:**

Основное содержание работы отражено в 14 научных трудах, общим объемом автора 9,55 п.л., из них в журналах, рекомендованных ВАК РФ, – 5, а также 9 статей в материалах научных конференций.

#### **Структура и объем работы:**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 104 наименований. Диссертация содержит 120 страниц основного текста, 24 рисунка, 13 таблиц.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** показана актуальность темы диссертации, определены направления и объект исследования, сформулированы цели и задачи исследования, а также основные положения, составляющие научную новизну, теоретическую и практическую значимость работы.

**В ГЛАВЕ 1** диссертации проведен анализ существующих моделей организации процессов контроля качества в авиационной промышленности. Показано, что процесс контроля качества комплектующих финальных изделий по цели контроля разделяется на статистический приемочный контроль и статистическое регулирование производственного процесса. Процесс контроля качества покрытий осуществляется на финальном этапе изготовления.

Приведены известные решения в контексте применения статистических методов управления качеством, а также рассмотрены существующие подходы к построению математических моделей прогнозирования качества. Проведен анализ и сравнение данных решений и подходов. Проанализированы преимущества и недостатки существующих математических решений в данной области.

Проведен анализ неисправностей и отказов комплектующих финальных изделий авиационной промышленности в процессе эксплуатации, транспортирования и хранения. Проведенный анализ показал, что основная часть неисправностей обусловлена качеством поверхностных слоев, оказывающихся наиболее нагруженными в процессе эксплуатации.

**В ГЛАВЕ 2** проанализированы требования нормативно-технической документации к качеству анодно-окисных покрытий (далее – АОП) на алюминии и его сплавах, стандартизованными на предприятиях авиационной промышленности. В настоящее время при оценке качества АОП контролю подлежат такие параметры как: внешний вид, степень наполнения и защитные свойства. Касательно толшины и функциональных свойств АОП, таких как твердость, износостойкость, пробивное напряжение, теплопроводность и других, контроль проводится лишь в соответствии с требованиями конструкторской или нормативно-технической документации.

Рассмотрены различные способы защиты комплектующих финальных изделий авиационной промышленности из алюминиевых сплавов. Наиболее распространенным видом обработки алюминия и его сплавов является анодное оксидирование в сульфатном растворе.

На основе проведенного анализа неисправностей и отказов показано, что требования технической документации являются усредненными и недостаточными для обеспечения долговечности и работоспособности изделия в процессе эксплуатации, так как финальные изделия авиационной промышленности функционируют в различных условиях, которые должны быть учтены в процессе их производства.

На основе проведенного анализа неисправностей и отказов комплектующих финальных изделий определены дополнительные параметры качества АОП, оказывающие влияние на работоспособность изделия в процессе эксплуатации, не учитываемые в нормативно-технической документации (Рисунок 1).

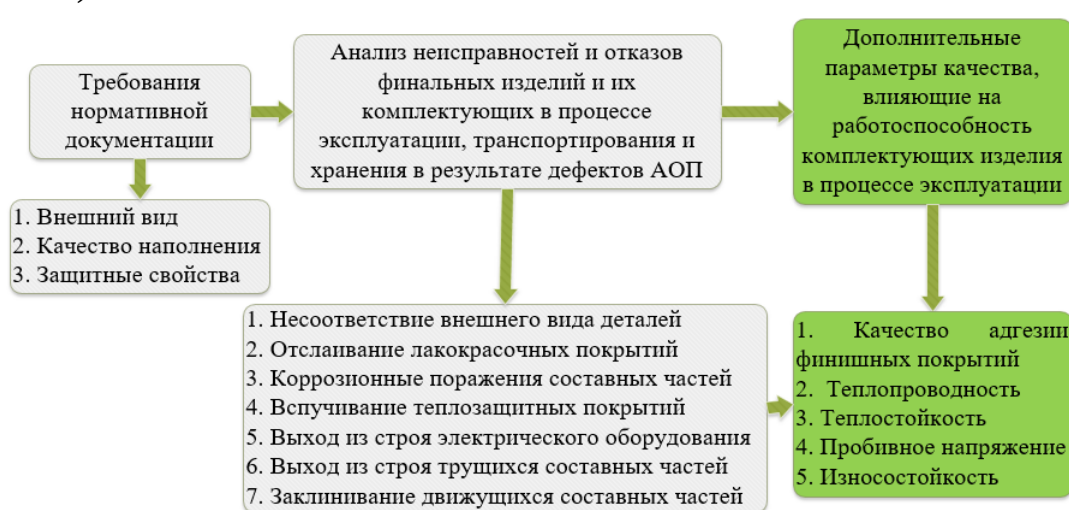


Рисунок 1 – Дополнительные параметры качества анодно-окисных покрытий, оказывающих влияние на работоспособность изделия в процессе эксплуатации

Таким образом, на основании анализа неисправностей и отказов комплектующих финальных изделий определены не учитываемые ранее параметры качества, оказывающие влияние на работоспособность комплектующих финальных изделий в процессе эксплуатации, транспортировки и хранения. Установлено, что стандарты качества не регламентируют ряд требований, оказывающих существенное влияние на эксплуатационные характеристики комплектующих финальных изделий. Существующие модели

прогнозирования качества учитывают отдельные параметры, определенные стандартами качества, не рассматривая их взаимное влияние и не учитывая параметры, не регламентированные данными стандартами.

Проведенный анализ позволяет утверждать, что создание моделей прогнозирования параметров качества комплектующих изделий авиационной промышленности, которые комплексно учитывают, как регламентированные стандартами основные показатели качества, так и дополнительные показатели в зависимости от условий их эксплуатации, позволит сократить внутренние потери на несоответствующую продукцию, а также повысить качество производимой продукции.

**В ГЛАВЕ 3** приведены результаты построения онтологии, архитектуры и параметризации модели прогнозирования параметров качества комплектующих изделий авиационной промышленности с использованием методологии модельно-ориентированного системного инжиниринга. На Рисунке 2 представлена диаграмма связей факторов, оказывающих наибольшее влияние на качественные характеристики покрытий, со свойствами получаемых покрытий и их параметрами качества.

Описана методика экспериментальных исследований и методы контроля свойств и параметров качества АОП, учитывающих условия эксплуатации финального изделия. Исследование выполнялось для процесса электрохимического оксидирования (анодирования) в сульфатном растворе неупрочняемых деформируемых сплавов АМг3, АМг6, АМц. Изучалось влияние таких факторов, как плотность тока  $i_a$ , время анодирования  $\tau$ , температура  $T$  и концентрация серной кислоты в электролите  $C_k$  на толщину, пористость и микротвердость АОП.

В качестве основополагающей модели выбрана модель множественной линейной регрессии в виде:

$$[\delta, \gamma, HV] = b_0 + b_1\tau + b_2i_a + b_3T + b_4C_k + \varepsilon, \quad (1)$$

где  $\delta$  – толщина АОП, мкм;  $\gamma$  – пористость АОП, %;  $HV$  – микротвердость АОП, ГПа;  $b_i$  – коэффициент регрессионного уравнения;  $\tau$  – время анодирования, мин;  $i_a$  – анодная плотность тока, А/дм<sup>2</sup>;  $T$  – температура раствора анодирования, °С;  $C_k$  – концентрация серной кислоты в ванне анодирования, г/л;  $\varepsilon$  – остатки.

Представлены результаты измерений силы тока, температуры, времени анодирования, концентрации серной кислоты в электролите, которые выступали в качестве факторов (независимых переменных). В качестве функции отклика (зависимой переменной) – толщина, пористость и микротвердость покрытия. На основе полученных экспериментальных данных построены модели свойств анодно-окисных покрытий, имеющие следующий вид:

$$\delta = -25,819 + 0,244\tau + 36,334i_a - 0,907T + 0,031C_k, \quad (2)$$

$$\gamma = -10,187 + 0,108\tau + 1,424i_a - 0,555T + 0,019C_k, \quad (3)$$

$$HV = -1256,69 - 33,32i_a + 33,48T + 12,13C_k, \quad (4)$$

где  $\delta$  – толщина покрытия, мкм;  $\gamma$  – пористость покрытия, %;  $HV$  – микротвердость, ГПа;  $i_a$  – анодная плотность тока, А/дм<sup>2</sup>;  $T$  – температура электролита, °С;  $\tau$  – время анодирования, мин;  $C_k$  – концентрация серной кислоты, г/л.

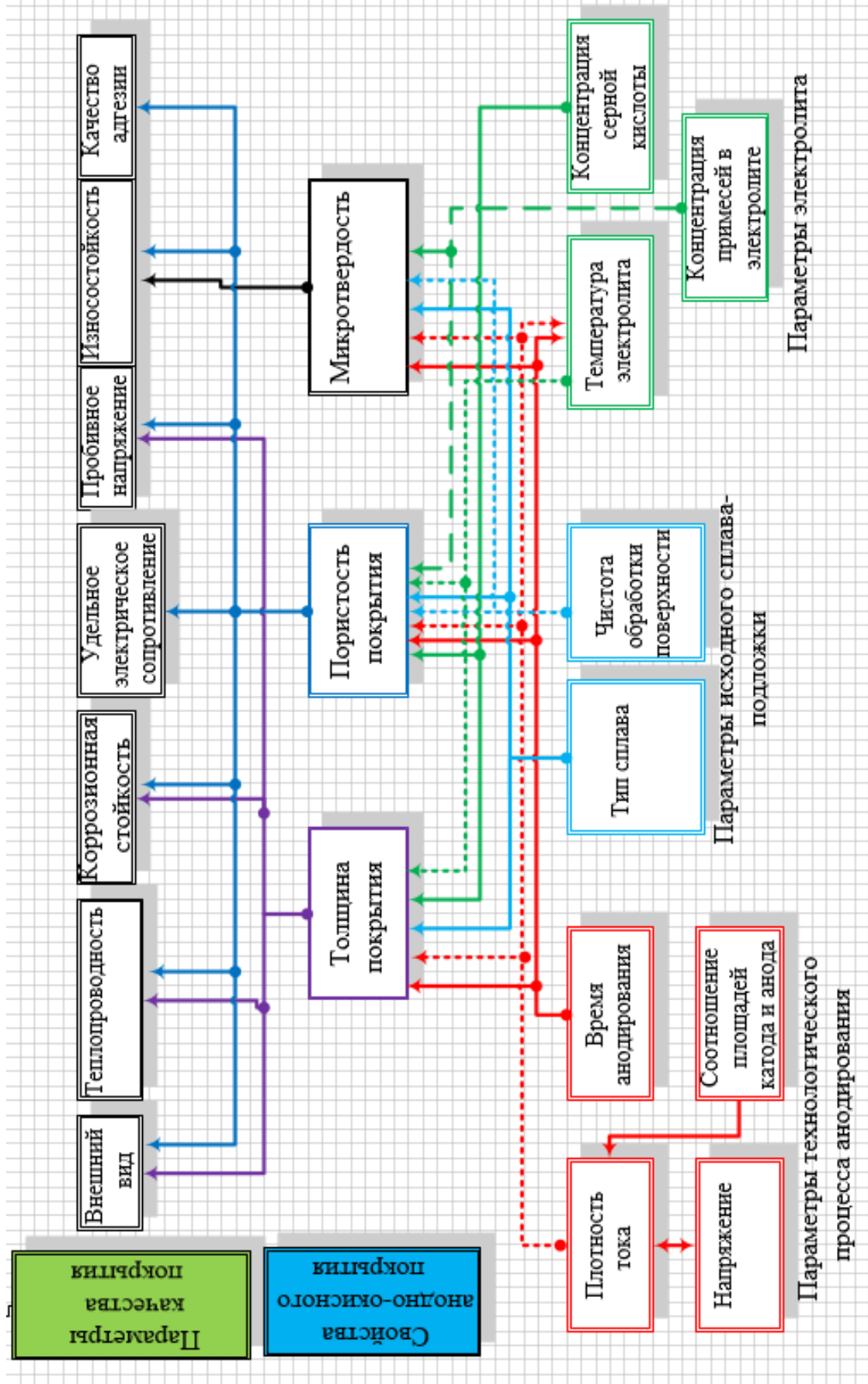


Рисунок 2 – Диаграмма связей определяющих факторов анодного оксидирования, свойств получаемых покрытий и их параметров качества

Приведены результаты анализа и проверки полученных моделей на адекватность по остаткам. Применение в моделировании метода наименьших квадратов подразумевает соблюдение следующих предпосылок:

1. Математическое ожидание случайного остатка равно нулю.
2. Дисперсия случайных остатков одинакова для различных  $i$ .
3. Случайные остатки не зависят друг от друга.
4. Случайные остатки не зависят от значений факторов, входящих в модель регрессии.
5. Остатки распределены по нормальному закону распределения. Первые четыре условия известны как условия Гаусса-Маркова.

Проверка постоянства математического ожидания остатков (условие 1) проводилась с помощью дисперсионного анализа. Для проверки постоянства дисперсии остатков (условие 2) применялся критерий Бартлетта. Проверка некоррелированности остатков (условие 3 и 4) проводилась с помощью критерия Льюнга-Бокса. При проверке согласия ошибок с нормальным распределением применялись критерий  $\chi^2$  или критерий Колмогорова (условие 5). Показано, что полученные модели можно считать адекватными.

Построены модели прогнозирования параметров качества комплектующих изделий авиационной промышленности, которые учитывают дополнительные параметры качества, оказывающие влияние на работоспособность финального изделия и его комплектующих в процессе эксплуатации, – теплопроводность, пробивное напряжение, износостойкость:

$$\begin{cases} \lambda = 62,92 - 0,22\delta \\ U_{\text{пр}} = -0,37\delta^2 + 39,98\delta - 18,86, \\ W_a = 2,41\delta - 0,042HV \end{cases} \quad (5)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К),  $U_{\text{пр}}$  – пробивное напряжение, В,  $W_a$  – абразивный износ, мг,  $\delta$  – толщина покрытия, мкм,  $HV$  – микротвердость покрытия по Виккерсу, ГПа.

Представлена классификация АОП в зависимости от функциональных свойств и условий эксплуатации комплектующих финальных изделий. На основе данной классификации и условий процесса анодного оксидирования определены граничные условия для каждого свойства и параметра качества АОП, позволяющих обеспечить работоспособность комплектующих в процессе эксплуатации, транспортирования и хранения (таблица ниже).

Граничные условия свойств и параметров качества АОП

| № п/п | Наименование свойства или параметра качества АОП, ед. изм. | Граничные условия        |
|-------|------------------------------------------------------------|--------------------------|
| 1     | Толщина, мкм                                               | $15 \leq \delta \leq 75$ |
| 2     | Пористость, %                                              | $5 \leq \gamma \leq 25$  |
| 3     | Микротвердость, ГПа                                        | $HV \geq 3$              |
| 4     | Абразивный износ, мг                                       | $W_a \leq 200$           |
| 5     | Пробивное напряжение, В                                    | $U_{\text{пр}} \geq 300$ |
| 6     | Коэффициент теплопроводности, Вт/(м×К)                     | $\lambda \geq 40$        |

**В ГЛАВЕ 4** приведены результаты апробации моделей прогнозирования параметров качества комплектующих изделий в реальных производственных условиях. Показана состоятельность и применимость разработанных моделей прогнозирования параметров качества комплектующих изделий.

Разработана методика прогнозирования параметров качества комплектующих изделий, которая включает модели прогнозирования параметров качества. Предлагаемая методика, графически представленная на Рисунке 3, определяет порядок действий производственного персонала, обслуживающего производственную линию анодирования, при изменении требований к параметрам качества комплектующих изделий.

На первом этапе методики оценивается целесообразность применения производственного процесса на комплектующие изделия, согласно требованиям заказчика, путем введения дополнительных параметров качества в модель прогнозирования. По результатам расчетов делается вывод о возможности нанесения покрытия на комплектующие на данной производственной линии.

На втором этапе методики проводится расчет необходимых параметров анодирования на производственной линии для обеспечения требований заказчика, а также определяется способ монтажа комплектующих для предупреждения образования дефектов в процессе нанесения покрытия. Основным критерием в расчетах является минимальная энергоемкость процесса.

На третьем этапе проводится нанесение анодно-окисного покрытия на комплектующие финальных изделий из неупрочняемых деформируемых сплавов алюминия по рассчитанным технологическим параметрам с помощью модели прогнозирования.

На заключительном этапе проводится контроль качества нанесенного покрытия. На первой партии деталей проводится контроль по всем параметрам качества. При удовлетворительных результатах дальнейший контроль параметров качества, регламентированных требованиями нормативной документации и требованиями заказчика, не требуется. Оценка качества комплектующих ограничивается лишь визуальным контролем внешнего вида.

Таким образом, методика прогнозирования параметров качества комплектующих изделий позволяет:

1. Оценить применимость производственного процесса в части нанесения анодно-окисного покрытия на комплектующие финальных изделий из неупрочняемых деформируемых сплавов алюминия, удовлетворяющего требованиям заказчика.

2. Определить необходимые действия производственного персонала для управления процессом нанесения анодно-окисного покрытия на комплектующие финальных изделий из неупрочняемых деформируемых сплавов алюминия, удовлетворяющего требованиям условий эксплуатации.

3. Прогнозировать параметры качества в зависимости от выбранных условий производственного процесса нанесения анодно-окисного покрытия на комплектующие изделий из неупрочняемых деформируемых сплавов алюминия.

4. Реорганизовать процесс контроля качества путем снижения числа контрольных операций.

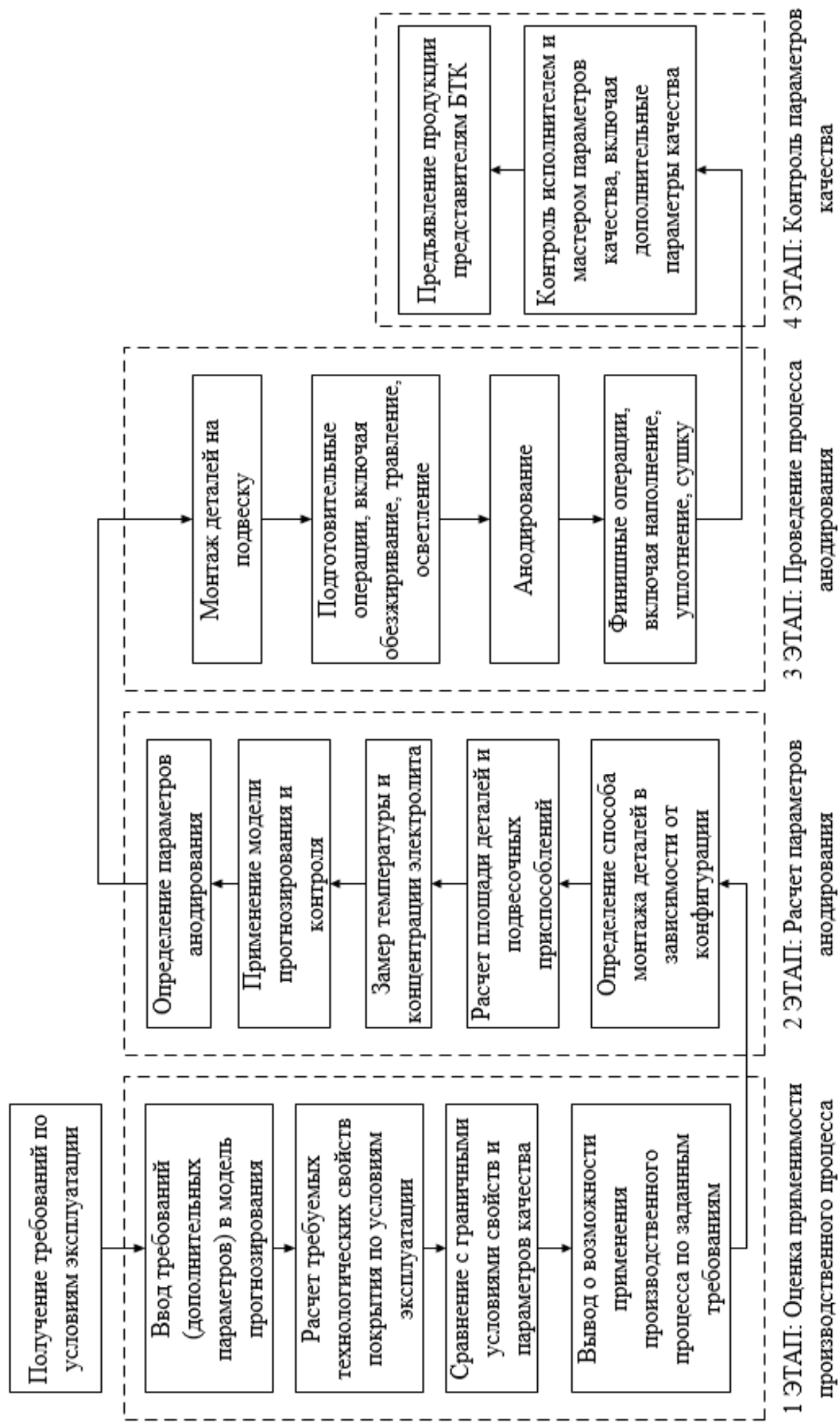


Рисунок 3 – Схематическое изображение методики прогнозирования параметров качества комплектующих изделий

Разработан алгоритм прогнозирования параметров качества комплектующих изделий авиационной промышленности, который позволяет повысить качество комплектующих изделий авиационной промышленности (Рисунок 4).

Выбор требований в зависимости от условий эксплуатации комплектующих изделия осуществляется конструктором или заказчиком. На основании классификации анодно-окисных покрытий по полученным требованиям технологом или мастером (старшим мастером) производственного участка оценивается применимость методики прогнозирования и контроля параметров качества комплектующих изделий авиационной промышленности.

При положительных результатах прогнозирования технолог или мастер выдает сменное задание гальванику и выполняется работа по методике прогнозирования параметров качества комплектующих изделий авиационной промышленности.

При отрицательных результатах производится корректировка требований на основании экспертного мнения заказчика. Если корректировка требований невозможна, то комплектующие передаются на изготовление сторонним организациям, производственные возможности которых позволяют обеспечить необходимые параметры качества в зависимости от требуемых условий эксплуатации. Поиск и выбор подходящей сторонней организации осуществляется специалистами Отдела Главного Химика.

После нанесения анодно-окисного покрытия на комплектующие изделий авиационной промышленности по методике прогнозирования проводится контроль по дополнительным параметрам качества или контроль внешнего вида.

Применение алгоритма прогнозирования параметров качества комплектующих изделий авиационной промышленности на линии анодирования гальванического участка ПАО «Машиностроительный завод имени М.И. Калинина, г. Екатеринбург» позволило:

1. Снизить число контрольных операций.
2. Сократить периодичность применения разрушающих методов контроля и сопряженных с ними дополнительных затрат.
3. Снизить длительность производственного процесса нанесения анодно-окисных покрытий, а именно снизить время контрольных операций с 20 до 3 мин.
4. Снизить количество продукции с дефектами в 2,5 раза за счет сведения к минимуму человеческого фактора.
5. Уменьшить затраты на устранение дефектов в 6 раз.

6.



Рисунок 4 – Алгоритм прогнозирования параметров качества комплектующих изделий авиационной промышленности

На основании разработанной методики прогнозирования параметров качества предложена схема реорганизации процесса контроля качества комплектующих изделий, позволяющая снизить время и число контрольных операций (Рисунок 5).

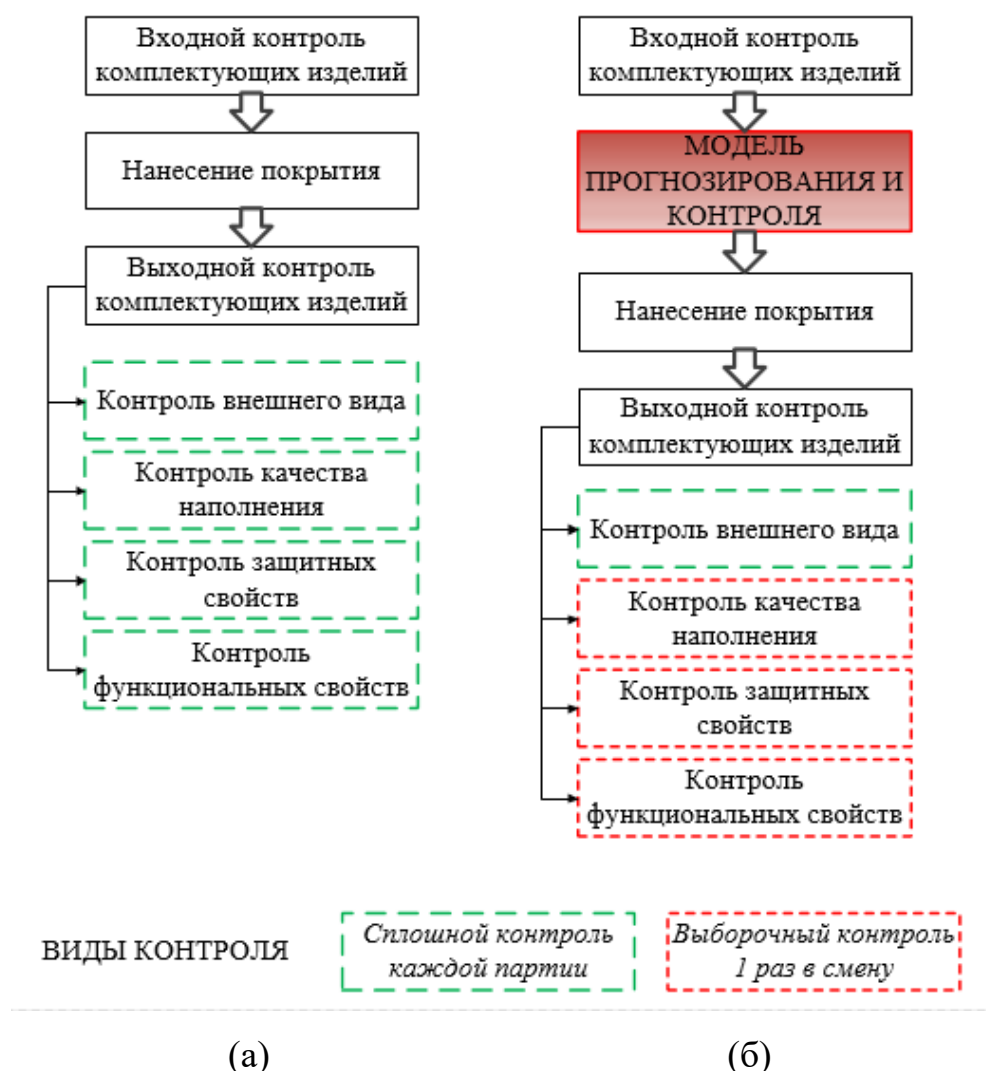


Рисунок 5 – Схема реорганизации процесса контроля качества комплектующих изделий на линии анодирования алюминия и его сплавов: (а) – существующая схема; (б) – предложенная схема

Выданы рекомендации по дальнейшему использованию и совершенствованию полученных моделей прогнозирования качества комплектующих изделий авиационной промышленности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Диссертация посвящена решению актуальной научно-технической задачи повышения качества изделий авиационной промышленности путем применения алгоритма и методики прогнозирования, разработанных на основе моделей прогнозирования параметров качества комплектующих изделий авиационной промышленности. В ходе диссертационного исследования получены результаты, которые позволили повысить качество комплектующих изделий, обеспечив

требуемые характеристики работоспособности комплектующих в процессе эксплуатации.

По работе сделаны следующие выводы:

1. Проанализированы существующие модели организации процессов контроля качества покрытий в авиационной промышленности и сделан вывод, что в настоящее время процесс контроля качества комплектующих финальных изделий осуществляется на финальном этапе изготовления и приводит к излишним затратам при устранении несоответствий. Анализ существующих методов оценки качества комплектующих изделий авиационной промышленности показал, что вопросы комплексной оценки параметров качества, учитывающих различные условия эксплуатации изделий авиационной промышленности отражены не в полной мере.

2. Проведен анализ неисправностей и отказов комплектующих финальных изделий, по результатам которого определены дополнительные показатели качества покрытий, оказывающих влияние на работоспособность изделия в процессе эксплуатации, и не регламентированные стандартами качества.

3. Созданы модели прогнозирования параметров качества комплектующих изделий авиационной промышленности, отличающиеся от существующих тем, что учитывают дополнительные параметры качества, оказывающие влияние на работоспособность финального изделия и его комплектующих в процессе эксплуатации, такие как теплопроводность, пробивное напряжение, износостойкость.

4. Разработана методика прогнозирования параметров качества комплектующих изделий авиационной промышленности, которая включает параметры, учитывающие условия эксплуатации, и позволяет реорганизовать процесс контроля качества при производстве комплектующих финальных изделий. Применение методики позволило снизить число дефектов комплектующих финальных изделий в процессе эксплуатации с 247 до 97 изделий/год, при этом затраты на устранение дефектов уменьшились в 2,5 раза.

5. Разработан алгоритм прогнозирования параметров качества, который позволяет повысить качество комплектующих изделий авиационной промышленности. Предложенный алгоритм позволил сократить число контрольных операций и сократить время контрольных операций с 20 мин до 3 мин.

6. Проведена апробация разработанных решений на ПАО МЗИК, в ходе которой реорганизован процесс контроля качества изделий на линии анодирования алюминия и его сплавов гальванического участка.

7. Разработаны предложения и рекомендации по дальнейшему применению моделей прогнозирования параметров качества комплектующих изделий в авиационной промышленности. В частности, полученные модели могут являться составными элементами имитационной модели производственной линии анодирования алюминиевых сплавов, и могут использоваться при проектировании новых производственных процессов в авиационной промышленности.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Научные статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России по специальности 2.5.22**

1. Ефремов А.Н., Юдин С.В. Применение статистических методов для анализа дефектов кадмиевого покрытия на стали // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. №12. С. 332-337 (0,98 п.л./0,8 п.л.).
2. Ефремов А.Н., Юдин С.В. Анализ практического применения инструментария контроля качества на машиностроительном предприятии // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. №12. С. 355-358. (0,65 п.л./0,5 п.л.)
3. Ефремов А.Н. Математическая модель прогнозирования пористости анодно-окисного покрытия на алюминиевом сплаве АМг6 // Русский инженер. 2024. №3 (84). С. 38-43. (0,7 п.л.).
4. Ефремов А.Н. Применение статистических методов для анализа дефектов анодно-окисных покрытий на деформируемых алюминиевых сплавах // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №1. С. 88-97. (1,12 п. л.)
5. Ефремов А.Н. Моделирование скорости травления деформируемых алюминиевых сплавов в растворах щелочей // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2024. Т. 26. №2. С. 31-39. (1 п.л.)

### **Другие публикации по теме диссертационной работы:**

6. Ефремов А.Н. Математическая модель прогнозирования толщины анодно-окисного покрытия на алюминиевом сплаве АМг 6 // «Вестник ВКО Алмаз-Антей». №2. 2023. С. 66-80. (1,88 п.л.)
7. Ефремов А.Н. Создание архитектуры математической модели прогнозирования качества анодно-окисного покрытия на алюминии и его сплавах // III Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении», 6-8 апреля 2022: Сборник докладов. Тула: Изд-во ТулГУ, 2022. 380 с. (0,24 п.л.)
8. Ефремов А.Н. Математическая модель прогнозирования толщины анодно-окисного покрытия на алюминиевом сплаве АМг 6 // Сборник тезисов докладов VII научно-технической конференции «Математическое моделирование, инженерные расчеты и программное обеспечение для решения задач ВКО». Москва, 2022. С. 28. (0,05 п.л.)
9. Ефремов А.Н. Выбор режимов электролитического осаждения кадмия в установках барабанного типа // Fundamental Science and Technology / В сборнике научных статей по материалам X Международной научно-практической конференции (20 декабря 2022 г., г. Уфа). В 4ч. Ч.1 / – Уфа: Изд. НИЦ Вестник науки, 2022. С. 81-89. (0,56 п.л.)

10. Ефремов А.Н. Архитектура математической модели прогнозирования качества анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах // Евразийский союз ученых. Серия: технические и физико-математические науки. Том 1. №10 (103). 2022. С. 6-13. (0,92 п.л.)

11. Ефремов А.Н. Моделирование толщины анодно-окисных покрытий на алюминиевых сплавах АМг6 и АК4-1 // IV Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении» 18–20 апреля 2023 г.: сборник докладов. Тула: Изд-во ТулГУ, 2023. С. 235-238. (0,33 п.л.)

12. Ефремов А.Н. Моделирование толщины анодно-окисных покрытий на неупрочняемых алюминиевых сплавах // Радионавигация и время: труды СЗРЦ Концерн ВКО «Алмаз – Антей». 2023. №12 (20). С. 66-72. (0,75 п.л.)

13. Ефремов А.Н. Моделирование технологических свойств анодно-окисного покрытия на алюминиевом сплаве АМг 6 // Сборник тезисов докладов VIII научно-технической конференции «Математическое моделирование, инженерные расчеты и программное обеспечение для решения задач ВКО». Москва, 2023. С. 12. (0,05 п.л.)

14. Ефремов А.Н. Моделирование скорости травления алюминиевого сплава АМц в растворе щелочи // Всероссийская научно-техническая конференция «От качества инструментов к инструментам качества». 19 – 20 сентября 2023 г.: сборник докладов. Тула: Изд-во ТулГУ, 2023. С. 71-78. (0,65 п.л.)