

На правах рукописи



Саксонов Александр Сергеевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТАРИЯ  
ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА АВТОМОБИЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА  
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И В ПРОИЗВОДСТВЕ**

Специальность 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Самара – 2023

Работа выполнена на кафедре «Теоретическая и общая электротехника»  
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Самарский государственный технический университет»

Научный руководитель:

**Козловский Владимир Николаевич,**

доктор технических наук, ведущий научный  
сотрудник, профессор, заведующий кафедрой  
«Теоретическая и общая электротехника»  
Самарского государственного технического  
университета

Официальные оппоненты:

**Артюхов Иван Иванович,**

доктор технических наук, профессор кафедры  
«Электроэнергетика и электротехника»  
ФГБОУ ВО «Саратовский государственный  
технический университет им. Гагарина Ю.А.»

**Малеев Руслан Алексеевич,**

кандидат технических наук, профессор кафедры  
«Электрооборудование и промышленная  
электроника» ФГАОУ ВО «Московский  
политехнический университет»

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный  
технический университет» (г. Ульяновск)

Защита диссертации состоится «21» марта 2023 г. в 11 часов на заседании  
диссертационного совета 24.2.377.06 по адресу: 443100, г. Самара, ул.  
Молодогвардейская, 244, Самарский государственный технический университет  
Главный корпус, ауд. 200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского  
государственного технического университета (ул. Первомайская, 18), и на сайте  
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»  
<http://d24237706.samgtu.ru/>

Отзывы по данной работе в двух экземплярах, заверенных печатью, просим  
направлять по адресу: Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244,  
Главный корпус, Самарский государственный технический университет, ученому  
секретарю диссертационного совета 24.2.377.06; факс: (846) 278-44-00, e-mail: a-  
ezhova@yandex.ru

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета 24.2.377.06  
кандидат технических наук



Е.В. Стрижакова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы.**

В последние десятилетия развитие автомобильной промышленности напрямую связано с насыщением бортового электротехнического комплекса новыми системами, обеспечивающими повышение безопасности, комфорта, экологичности автотранспортных средств. Повышается значимость электротехнических и электронных систем с точки зрения качества и надежности функционирования автотранспортных средств.

При этом, анализ данных по дефектам автомобилей в эксплуатации показывает, что бортовой электротехнический комплекс занимает ведущую позицию по уровню дефектности. Так, проведенный анализ по продукции крупнейшего производителя легковых автомобилей России, находившейся в гарантийной эксплуатации в период с 2017 по 2020 гг., показывает, что уровень дефектности бортового электротехнического комплекса составляет более 30 % от общего уровня дефектности по автомобилям в целом. Причем наиболее существенный уровень дефектности (более 80 % по бортовому электротехническому комплексу) наблюдается по группе электрокомпонентов, имеющих в составе электромеханические преобразователи. Наибольшим уровнем дефектности (54 %) по группе электрокомпонентов с электромеханическими преобразователями обладает автомобильный генератор, который является основным источником электроэнергии и во многом определяет качество работы потребителей бортовой сети. В структуре затрат на устранение дефектов, система электрооборудования занимает первое место (28 % от стоимости устранения дефектов по всем функциональным системам автомобилей). В свою очередь группа электрокомпонентов с электромеханическими преобразователями находится на первом месте в структуре затрат по бортовому электротехническому комплексу (45 % от затрат на устранение дефектов в целом по бортовому электротехническому комплексу). И, соответственно, автомобильный генератор занимает первую позицию в структуре затрат на устранение дефектов по группе устройств с электромеханическими преобразователями (61 % от уровня затрат на устранение дефектов по группе электрокомпонентов с электромеханическими преобразователями).

Статистический анализ дефектов автомобильных генераторов показывает, что их основной причиной является выход из строя подшипниковых узлов (33 % дефектов) как следствие воздействия электромагнитной силы одностороннего притяжения ротора к статору, возникающей из-за несоосности между статором и ротором, на формирование которой влияет недостаточное обеспечение качества посадочных мест под подшипники и сборки подшипниковых щитов в условиях массового производства.

Таким образом, решение научно-технической задачи, направленной на решение проблемы несоосности статора и ротора электромеханического преобразователя автомобильного генератора на этапах жизненного цикла, в значительной мере позволяет обеспечить повышение качества бортового электротехнического комплекса и автомобилей в целом, а также существенное сокращение затрат на устранение дефектов автомобилей в эксплуатации.

## **Степень разработанности темы.**

Значительный вклад в развитие темы автомобильного электрооборудования и электромеханики внесли российские ученые: А.В Лоос, А.И. Вольдек, В.В. Болотин, В.В. Ермаков, В.Е. Ютт, В.П. Шуйский, М.Н. Фесенко, С.В. Акимов, С.Я. Дунаевский, Ю.П. Чижов и другие.

При разработке научно-прикладных аспектов диссертации использовались результаты работы отечественных ученых: А.В. Пузакова, В.А. Балагурова, В. Н. Козловского, И.П. Копылова, Ю.А. Макаричева, Ю.В. Зубкова и многих других российских ученых.

**Объектом исследования** является автомобильный генератор при наличии неравномерности воздушного зазора, обусловленной несоосностью статора и ротора.

**Предмет исследования** – научно-практический инструментарий оценки влияния размерных параметров, определяющих несоосность статора и ротора на формирование основных электротехнических и электромеханических характеристик автомобильного генератора.

**Цель работы** состоит в развитии научно-технического инструментария обеспечения качества трехфазного синхронного автомобильного генератора с клювообразным ротором, с учетом влияния несоосности статора и ротора электромеханического преобразователя на основные электротехнические и электромеханические характеристики.

Для достижения поставленной цели в диссертации решаются следующие **научно-практические задачи**:

1. Статистический анализ дефектов легковых автомобилей российского производства в период гарантийной эксплуатации с 2017 по 2020гг., с определением уровня дефектности бортового электротехнического комплекса и автомобильных генераторов и вскрытием основных причин дефектности.

2. Обзор теории и практики решения задач в области повышения качества автомобильных генераторов.

3. Разработка математической модели по определению взаимосвязи между параметрами, определяющими несоосность статора и ротора трехфазного автомобильного генератора с клювообразным ротором, и основными электротехническими и электромеханическими характеристиками, с созданием соответствующего комплексной программы для установления взаимосвязи между параметрами несоосности статора и ротора и основными электротехническими и электромеханическими характеристиками.

4. Разработка расчетно-статистического, вероятностного инструментария по методу Монте-Карло, а также количественного критерия оценки весомости влияния несоосности статора и ротора, реализующих комплексную многофакторную оценку влияния стабильности размерных параметров, определяющих несоосность статора и ротора на стабильность основных электротехнических и электромеханических характеристик автомобильного генератора.

5. Экспериментальное исследование процессов, определяющих несоосность статора и ротора на реальном автомобильном генераторе для обоснования адекватности предложенных научно-технических инструментов.

6. Разработка методики, направленной на обеспечение качества

автомобильного генератора по размерным параметрам, определяющим несоосность статора и ротора.

**Научная новизна работы заключается** в разработке комплексного научно-технического инструментария обеспечения качества трехфазного синхронного автомобильного генератора с клювообразным ротором по параметрам, определяющим несоосность статора и ротора, и включает в себя:

1. Результаты углубленного статистического исследования основных причин дефектности автомобильных генераторов в гарантийный период эксплуатации, определяющие значительное влияние несоосности статора и ротора на отказоустойчивость автомобильного генератора;

2. Математическую модель, позволяющую определять основные электротехнические и электромеханические характеристики автомобильного генератора, отличающуюся от известных учетом конструктивных особенностей клювообразного ротора и параметров несоосности статора и ротора;

3. Расчетно-статистический инструментарий по определению влияния стабильности параметров, определяющих несоосность статора и ротора, на стабильность основных электротехнических и электромеханических характеристик автомобильного генератора, основанный на методе Монте-Карло, отличающийся от известных вероятностной оценкой влияния изменения входных размерных параметров на выходные электротехнические и электромеханические характеристики;

4. Методику обеспечения качества автомобильного генератора по параметрам несоосности статора и ротора и количественный критерий определяющий весомость влияния стабильности параметров несоосности статора и ротора на стабильность выходных характеристик автомобильного генератора.

**Практическая значимость** диссертационной работы состоит, в разработке комплекса научно-практического инструментария по обеспечению качества трехфазного синхронного автомобильного генератора с клювообразным ротором по параметрам, определяющим несоосность статора и ротора.

Предложенные научно-технические решения вошли в устойчивую практику ПАО «КАМАЗ». При внедрении результатов научной работы в практику Департамента технического контроля ПАО «КАМАЗ» получен экономический эффект в размере 2,4 млн. руб.

#### **Методы исследований.**

При решении поставленных задач использованы основные положения теоретической электротехники, теории электрических машин, теории вероятностей и математической статистики, методы численного и физического моделирования.

Решение отдельных задач выполнялось с использованием аналитических и численных методов решения алгебраических уравнений и систем дифференциально-интегрального исчисления. Разработанный инструментарий реализован в виде программных модулей для прикладного математического пакета SIMULINK математического пакета MATLAB 15.

Исследования проводились на основе анализа статистических данных по эксплуатационным дефектам бортового электротехнического комплекса автомобилей в гарантии, крупнейшего российского производителя в период с 2017 по 2020 гг.

**На защиту выносятся** научно-практический комплекс инструментов обеспечения качества трехфазного автомобильного генератора с клювообразным ротором по параметрам, определяющим несоосность статора и ротора:

1. Результаты углубленного статистического исследования основных причин дефектности автомобильных генераторов в гарантийный период эксплуатации;

2. Математическая модель, позволяющая определять основные электротехнические и электромеханические характеристики автомобильного генератора;

3. Расчетно-статистический инструментарий по определению влияния стабильности размерных параметров, определяющих несоосность статора и ротора, на стабильность основных электротехнических и электромеханических характеристик автомобильного генератора;

4. Методика обеспечения качества автомобильного генератора по параметрам несоосности статора и ротора и количественный критерий определяющий весомость влияния стабильности ключевых размерных параметров электромеханического преобразователя на стабильность выходных характеристик автомобильного генератора;

5. Результаты экспериментальных исследований и апробации предложенных технических решений.

**Научная квалификационная работа на соискание степени кандидата технических наук** выполнена в соответствии с паспортом специальности 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы» и соответствует направлениям исследований: п. 1 «...анализ системных... связей... и компьютерное моделирование электротехнических комплексов и систем, включая... электромеханические... преобразователи энергии...», п. 4 «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов... и их компонентов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях...».

**Достоверность** полученных результатов обусловлена использованием обоснованных допущений, строгих математических методов, адекватность которых подтверждена результатами теоретических, компьютерно-имитационных и экспериментальных исследований, а также обсуждением результатов диссертации на российских и международных конференциях, форумах и семинарах. При выполнении экспериментальной части исследования использовалось сертифицированное лабораторное оборудование.

#### **Апробация работы.**

Результаты работы обсуждались на научно-технических семинарах ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», профильных совещаниях департамента технического контроля ПАО «КАМАЗ».

Предложенный в диссертации научно-технический проект является финалистом регионального конкурса по программе «УМНИК».

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных научно-технических конференциях: «Приоритетные направления развития науки и технологий», Тула, 2022; «Управление качеством», Москва, 2022, «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении», Тула 2022; национальная научно-техническая конференция

«Инженеры будущего», Тула 2022, The International Ural Conference on «Electrical Power Engineering», Магнитогорск, 2022.

### **Публикации.**

По теме диссертации опубликовано 11 работ, в том числе 7 в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 2 цитируемых в базе Scopus. Общий объем опубликованных работ 5,83 п.л.

### **Личный вклад автора в диссертационное исследование.**

Постановка задач осуществлялась совместно с научным руководителем. Теоретические и практические исследования автором выполнены самостоятельно.

Автором выполнен основной объем исследований, изложенных в диссертации, разработаны: математическая модель и комплексная программа по определению взаимосвязи между параметрами, определяющими несоосность статора и ротора и основными электротехническими и электромеханическими характеристиками автомобильного генератора; расчетно-статистический инструментарий по определению влияния стабильности размерных параметров, определяющих несоосность статора и ротора, на стабильность основных электротехнических и электромеханических характеристик автомобильного генератора; методика обеспечения качества автомобильного генератора по параметрам несоосности статора и ротора и количественный критерий определяющий весомость влияния стабильности параметров несоосности статора и ротора на стабильность выходных характеристик автомобильного генератора.

### **Структура и объем работы.**

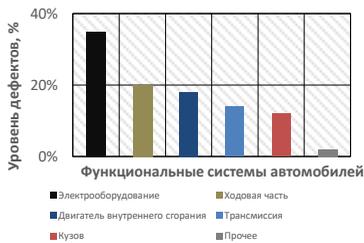
Диссертационная работа состоит из: введения, четырех глав, заключения, библиографического списка и 3 приложений. Общий объем работы – 144 страницы, включая 48 рисунков и 4 таблицы. Библиографический список содержит 81 наименование.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

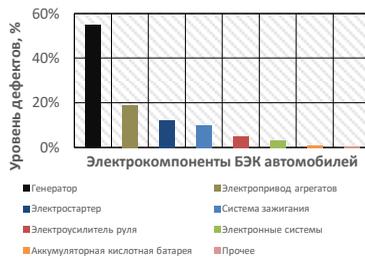
**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен научно-технический обзор и анализ работ, в которых решается задача обеспечения качества автомобильных электрокомпонентов, имеющих в составе электромеханические преобразователи (ЭМП). Также в главе проведено статистическое исследование дефектности бортового электротехнического комплекса (БЭК) и автомобильных генераторов (АГ) легковых автомобилей производства крупнейшего национального автосборочного предприятия, находящихся в гарантийной эксплуатации в период 2017-2020 гг. Для этого использовалась электронная база актов гарантийного обслуживания (АГО) за соответствующий период. В ходе работы, проводилась интерпретация информации, заносимой в АГО в качественной (текстовой) форме, на предмет углубленного выявления причин дефектности рассматриваемых электрокомпонентов.

Результаты исследования показывают, что БЭК автомобиля является наиболее дефектоносной функциональной системой автомобиля (рисунок 1 а). Рассматривая статистику дефектов БЭК, установлено, что наибольшим уровнем дефектности в сравнении с другими электрокомпонентами обладает АГ (рисунок 1 б).



а)



б)

Рисунок 1 – Распределение дефектов по функциональным системам и электрокомпонентам БЭК легковых автомобилей, находящихся в гарантийной эксплуатации в России в период с 2017 по 2020 гг.

Далее, в ходе исследования установлено, что одной из основных причин значительного уровня дефектности АГ в эксплуатации является проблема несоосности статора и ротора. Анализ АГО показывает, что в 49 % случаев дефектов АГ, предшествует повышенный шум и колебания напряжения, что является следствием несоосности статора и ротора.

Таким образом, путем углубленного статистического исследования дефектов автомобильного электрооборудования выявлена актуальная научно-техническая задача, связанная необходимостью обеспечения качества АГ по параметрам, определяющим несоосность статора и ротора.

Во второй главе разработана математическая модель, устанавливающая взаимосвязи между размерными параметрами, определяющими несоосность статора и ротора и основными электротехническими и электромеханическими характеристиками АГ.

Обзор существующих методов и методик определения взаимосвязи между размерными параметрами, и основными электротехническими и электромеханическими характеристиками показывает, что вопросам влияния несоосности статора и ротора на основные (выходные) электротехнические и электромеханические характеристики АГ в них уделяется недостаточно внимания.

Главным размерным параметром, определяющим несоосность статора и ротора, является смещение геометрической оси ротора относительно оси статора, это смещение является следствием недостаточного уровня качества деталей и узлов АГ: вала ротора, подшипниковых узлов, самих подшипников.

Под влиянием несоосности статора и ротора воздушный зазор (ВЗ) становится неравномерным. С учетом геометрических особенностей ротора, рассматриваемой конструкции АГ, текущее значение ВЗ под центром отдельно взятого полюса следует записать следующим образом (1):

$$\delta_{\varphi} = \delta_{\text{ном}} - \varepsilon \cdot \cos \frac{2\pi}{p} i \quad (1)$$

где  $\delta_{\varphi}$  – значение неравномерного ВЗ под центром полюса, м;  $p$  – число полюсов;  $i$  – порядковый номер полюса.

Магнитная индукция в неравномерном ВЗ в функции угла поворота ротора и времени будет описываться выражением (2):

$$B_{\delta}(\varphi, t) = \frac{F_{\Sigma}}{1,6 \cdot 10^6 k_{\delta} k_{\mu} \left( \delta_{\text{ном}} - \varepsilon \cdot \cos \frac{2\pi}{p} i \right)} \cdot \sin \left[ \frac{p}{60} (2\pi n t + \gamma_{\text{эл}}) \right] \quad (2)$$

где  $F_{\Sigma}$  – МДС обмотки возбуждения, А;  $k_{\delta}$  – коэффициент ВЗ;  $k_{\mu}$  – коэффициент насыщения магнитной цепи;  $n$  – частота вращения ротора, об/сек;  $\gamma_{эл}$  – угол поворота ротора, эл. град.

Для установления взаимосвязи между несоосностью статора и ротора и формированием равнодействующей электромагнитной силы одностороннего притяжения ротора к статору в функции времени и угла поворота ротора следует использовать выражение (3):

$$f(\varphi, t) = C \int_0^{t_1} \int_0^{2\pi} A^2 \frac{\sin^2[p(2\pi mt + \gamma)]}{(\delta_{ном} - \varepsilon \cdot \cos \frac{2\pi}{p} i)^2} \cos \varphi d\varphi dt \quad (3)$$

где  $C = \frac{lD}{4\mu_0}$  – постоянный коэффициент, определяемый геометрическими параметрами ВЗ, м;  $A = \frac{F_{\Sigma}}{1,6 \cdot 10^6 k_{\delta} k_{\mu}}$  – магнитная индукция в неравномерном ВЗ, Тл;  $l$  – длина ВЗ, м;  $D$  – средний диаметр ВЗ, м;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость воздуха Гн/м.

Таким образом, выражение (1) выступает связующим звеном между размерными параметрами, определяющими несоосность статора и ротора и основными электротехническими и электромеханическими характеристиками.

АГ является продуктом массового производства, для которого характерны факторы изменчивости технологической стабильности производства. Полученные в первой главе результаты статистического исследования доказывают существенное влияние такой изменчивости на качество и надежность АГ в эксплуатации. Для установления взаимосвязи между стабильностью технологического процесса и качеством АГ требуется решить задачу по созданию адекватного инструмента с использованием теории вероятности и математической статистики, который обеспечит связь и оценку весомости влияния несоосности статора и ротора на выходные характеристики АГ, с учетом массовости производства. Для этого в диссертации разработан расчетно-статистический, вероятностный инструментарий, основанный на положениях метода Монте-Карло.

Суть разработки заключается в оценке возможного влияния стабильности изменения входного параметра (величины смещения геометрической оси ротора относительно геометрической оси статора АГ) на стабильность изменения значений выходных параметров (основные электротехнические и электромеханические характеристики). Инструментарий разработан с учетом установленного в технических условиях (ТУ) качества, которым определяются поля допусков на соответствующие размерные параметры АГ, определяющие несоосность статора и ротора (4), (5):

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n f(x_i) \quad (4)$$

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n f(y_i) \quad (5)$$

где  $N$  – размер выборки АГ;  $f(x_i)$  – плотность распределения входного параметра с  $i$ -ой относительной частотой;  $f(y_i)$  – плотность распределения выходного параметра с  $i$ -ой относительной частотой.

Оценивая плотности распределения входных и выходных параметров выборок АГ, можно прогнозировать стабильность основных электротехнических и электромеханических характеристик АГ в зависимости от стабильности технологического процесса изготовления АГ.

Критерием оценки влияния стабильности размерных параметров, определяющих несоосность статора и ротора АГ на стабильность основных электротехнических и электромеханических характеристик, выступает коэффициент влияния, показывающий весомость влияния входного параметра на выходной (6):

$$c_{ij} = \frac{\Delta f(x_1 \dots x_j)}{\Delta x_j} \cdot \frac{x_j}{f(x_1 \dots x_j)} \quad (6)$$

где  $c_{ij}$  – коэффициент влияния;  $\Delta f(x_1 \dots x_j)$  – приращение выходного параметра (основные электротехнические и электромеханические характеристики АГ), %;  $\Delta x_j$  – приращение входного параметра (несоосность статора и ротора АГ), %;  $x_j$  – номинальное значение входного параметра (номинальное значение ВЗ);  $f(x_1 \dots x_j)$  – номинальное значение выходного параметра (номинальные значения основных электротехнических и электромеханических характеристик АГ).

**В третьей главе** на основе предложенных математической модели, устанавливающей взаимосвязь между параметрами, определяющими несоосность статора и ротора и основными электротехническими и электромеханическими характеристиками, а также расчетно-статистического, вероятностного инструментария по методу Монте-Карло, разработана комплексная программа для установления взаимосвязи между несоосностью статора и ротора с основными электротехническими и электромеханическими характеристиками.

На первом этапе разработан алгоритм программы, с помощью которого реализуется функция автоматизации связи между параметрами, определяющими несоосность статора и ротора и основными электротехническими и электромеханическими характеристиками АГ. В основе алгоритма подпрограммы лежит стандартная методика расчета характеристик трехфазного синхронного АГ переменного тока с клювообразным ротором. В программу интегрирована разработанная математическая модель учитывающая конструктивные особенности клювообразного ротора и несоосности статора и ротора. Использование разработанной подпрограммы обеспечивает возможность для определения влияния изменения параметров несоосности статора и ротора на электротехнические и электромеханические характеристики АГ. В качестве примера на рисунках 3 а и 3 б представлены осциллограммы участков кривых фазного статорного напряжения под центрами условных первого полюса (рисунок 3 а) и шестого полюса (рисунок 3 б).

Анализ рисунков 3 а и 3 б, показывает, что под влиянием несоосности статора и ротора значение амплитуды фазного статорного напряжения под центром каждого полюса меняется синусоидально. Так, при несоосности 2,0 мкм под центром условного первого полюса в точке с минимальным значением ВЗ, амплитудное значение фазного статорного напряжения составляет 5,11 В, а под центром условного шестого полюса в точке с номинальным значением ВЗ это значение составляет -5,07 В. Более полную картину влияния несоосности статора и ротора на кривую фазного статорного напряжения дает анализ огибающих (рисунок 3 в). Так, по мере поворота ротора от точки с минимальным значением ВЗ (точка максимума значения фазного статорного напряжения) кривая фазного статорного напряжения плавно снижает свою амплитуду, доходя до минимума в точке с максимальным значением ВЗ, при дальнейшем движении ротора к точке с минимальным значением ВЗ, кривая фазного статорного напряжения плавно наращивает свое значение.

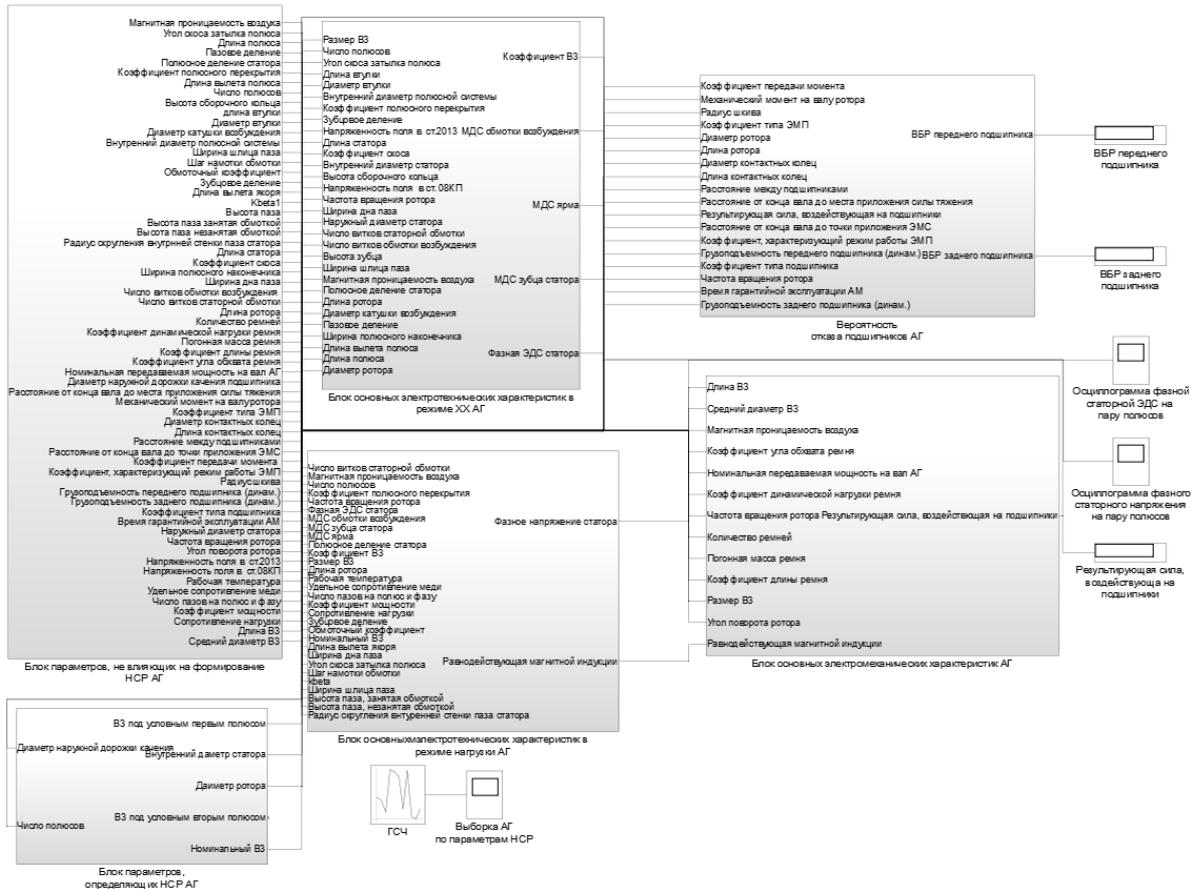


Рисунок 2 – Интерфейс программы расчета взаимосвязи между несоосностью статора и ротора и основными электротехническими и электромеханическими характеристиками АГ

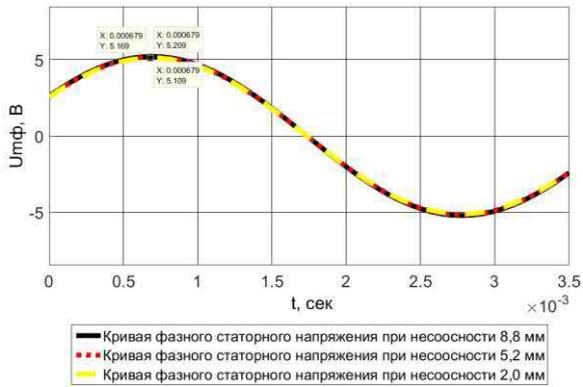


Рисунок 3 а – Осциллограмма участка кривой фазного статорного напряжения под центром условного первого полюса

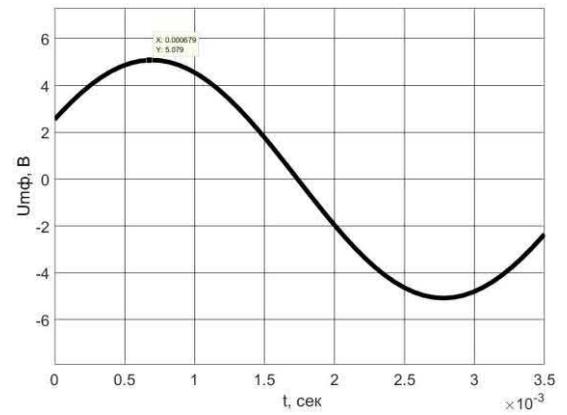


Рисунок 3 б – Осциллограмма участка кривой фазного статорного напряжения под центром условного шестого полюса

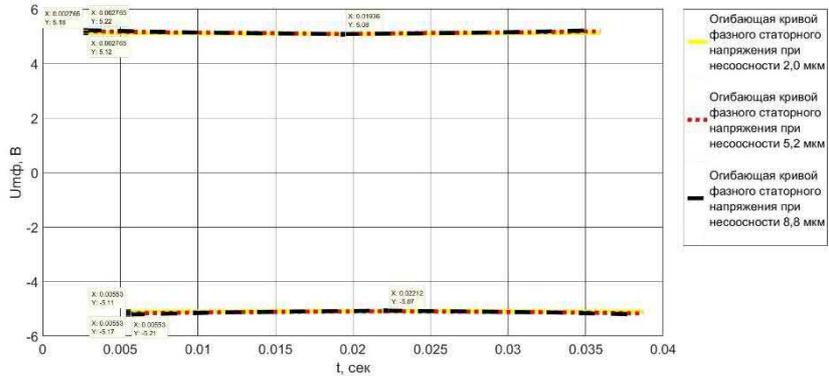


Рисунок 3 в – Осциллограмма огибающих кривых фазного статорного напряжения

На основе статистических данных по дефектам АГ в эксплуатации, установлена связь между несоосностью статора и ротора и уровнем дефектности АГ. Установлено, что основной причиной дефектности при наличии несоосности статора и ротора является значительная электромагнитная сила одностороннего притяжения ротора к статору (рисунок 4). В разработанной программе учтена сила натяжения приводного ремня АГ, при оценке результирующей силы, воздействующей на подшипниковые узлы в сборе.

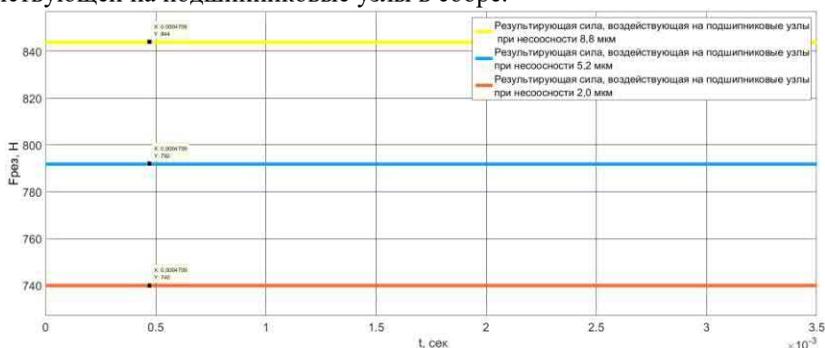
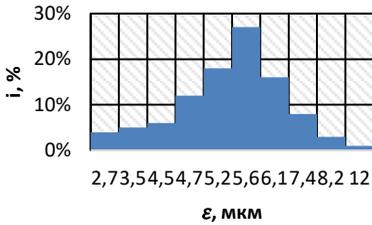


Рисунок 4 – Оциллограмма результирующей силы, воздействующей на подшипниковые узлы АГ

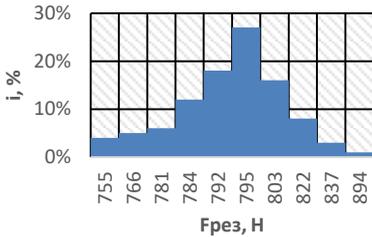
Таким образом, с использованием программы, установлено, что несоосность статора и ротора значительно влияет на формирование электромагнитной силы одностороннего притяжения ротора к статору АГ. Так при смещении геометрической оси в 2,0 мкм значение электромагнитной силы составляет 740 Н, а при смещении геометрической оси ротора 8,8 мкм – 844 Н, что более чем в 8 раз превышает силу натяжения приводного ремня АГ.

На втором этапе, для определения влияния стабильности параметров определяющих несоосность статора и ротора на стабильность основных электротехнических и электромеханических характеристик АГ, в условиях массового производства, в разработанный на первом этапе алгоритм программы, интегрирован вероятностный расчетно-статистический инструментарий построенный по методу Монте-Карло, который обеспечивает прогнозную оценку влияния технологической стабильности параметров несоосности статора и ротора на стабильность основных электротехнических и электромеханических характеристик АГ, в соответствии с действующими ТУ.

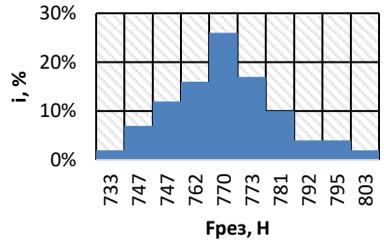
Для реализации функции прогноза в программу внедрен блок генератора случайных чисел, реализующий нормальный закон распределения. Это обосновывается тем, что в процессе массового производства конструктивно сложной продукции действует множество случайных факторов, при этом ни один из них не вносит решающего вклада в формирование технологических погрешностей, что как раз характерно для закона нормального распределения. На рисунке 5 в качестве примера представлены результаты работы с предложенным инструментарием.



а)



б)



в)

г)

Рисунок 5 – Гисторгаммы, отражающие влияние стабильности технологического процесса на формирование несоосности статора и ротора АГ

Анализ рисунков 5 а, 5 б, 5 в и 5 г, показывает, что при повышении стабильности технологического процесса стабильность основных электротехнических и электромеханических характеристик возрастает, об этом свидетельствует диапазон распределения величин результирующей силы, воздействующей на подшипниковые узлы.

На третьем этапе для реализации автоматизации расчета количественного критерия оценки весомости влияния несоосности статора и ротора на основные электротехнические и электромеханические характеристики АГ, с использованием результатов, полученных с применением вероятностного расчетно-статистического инструмента разработана подпрограмма, обеспечивающая расчет соответствующего количественного критерия оценки. В качестве примера, на рисунке 6 представлен результат применения разработанной подпрограммы.

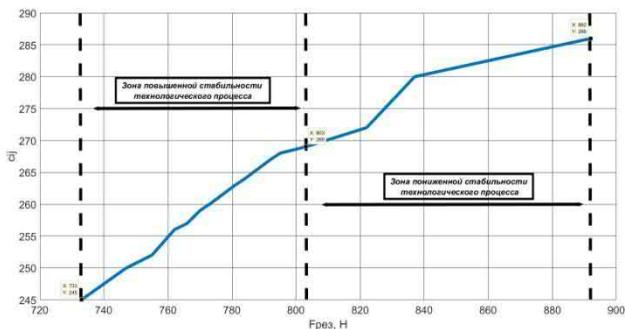


Рисунок 6 – График зависимости коэффициента влияния от значений результирующей силы, действующей на подшипниковые узлы АГ

Анализ рисунка 6 показывает, что поведение количественного критерия зависит от стабильности процесса изготовления АГ по параметрам, определяющим формирование несоосности статора и ротора. Так, при недостаточно высокой стабильности технологического процесса, значения критерия для результирующей силы, действующей на подшипниковые узлы, лежат в диапазоне 269-286, а при более высокой стабильности технологического процесса, критерий для результирующей силы, действующей на подшипниковые узлы, лежат в диапазоне 245-269, что свидетельствует о более высокой стабильности технологического процесса.

На четвертом этапе устанавливается взаимосвязь технологической стабильности производства АГ по параметрам, определяющим формирование несоосности статора и ротора с вероятностью безотказной работы (ВБР) подшипниковых узлов в сборе (рисунок 7).

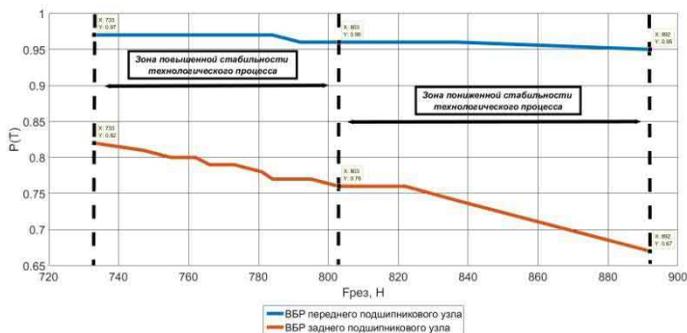


Рисунок 7 – График зависимости ВБР подшипниковых узлов от значений результирующей силы

Анализируя рисунок 7, видно, что повышение стабильности технологического процесса обеспечивает повышение ВБР подшипниковых узлов АГ с 0,95 до 0,97 для переднего узла, и с 0,67 до 0,82 для заднего.

**Четвертая глава** посвящена экспериментальному исследованию взаимосвязи несоосности статора и ротора АГ с его основными электротехническими и электромеханическими характеристиками. Для реализации эксперимента разработан исследовательский стенд, представленный на рисунке 8.

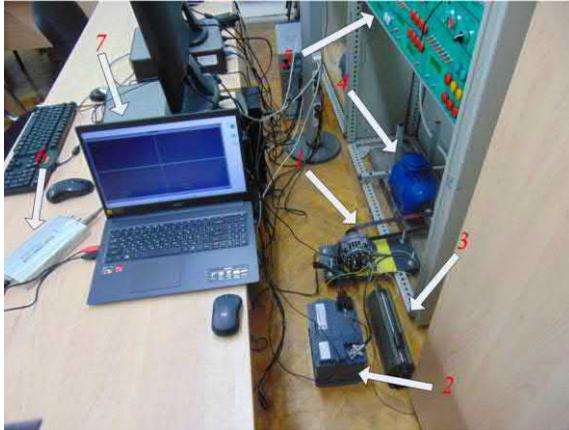


Рисунок 8 – Исследовательский стенд

Стенд включает в свой состав АГ (1), возбуждаемый постоянным током от аккумуляторной кислотной батареи (2), к клеммам этой батареи подключена нагрузка в виде реостата (3). Для привода АГ используется асинхронный двигатель (4), питаемый от частотного преобразователя (5). К выводам статорной обмотки АГ подключен цифровой осциллограф (6), передающий сигнал на персональный компьютер, где он обрабатывается программным обеспечением осциллографа. Для имитации смещения геометрической оси ротора в подшипниковые узлы испытуемого АГ устанавливались подкладки, изготовленные из алюминиевой фольги. Толщина каждой подкладки – 8,0 мкм.

В результате экспериментального исследования получена серия осциллограмм фазного статорного напряжения, пример такой осциллограммы представлен на рисунке 9.

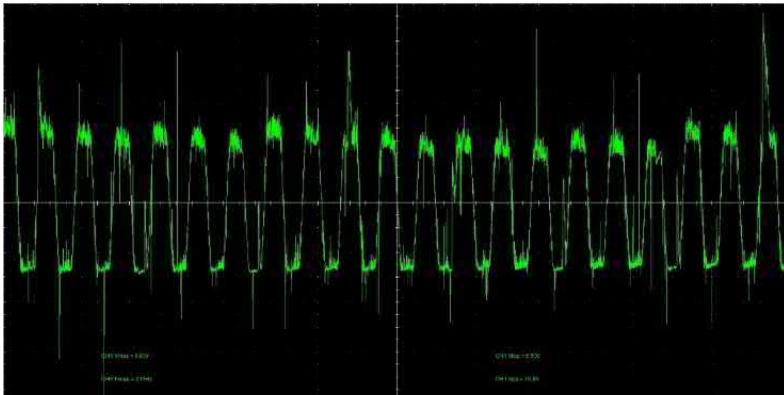


Рисунок 9 – Осциллограмма фазного статорного напряжения АГ в эксперименте

В ходе анализа полученных осциллограмм, установлено, что под центром каждого условного полюса амплитудное значение фазного статорного напряжения отличается от значений под центрами других полюсов. Так, например, под центром условного первого полюса амплитудное значение фазного статорного напряжения равно 5,31 В, а под центром условного шестого полюса – -5,11 В.

Для проверки сходимости результатов, полученных с применением

комплексной программы и в эксперименте построены огибающие кривых фазного статорного напряжения при наличии смещения геометрической оси ротора АГ в 8,0 мкм (рисунок 10).

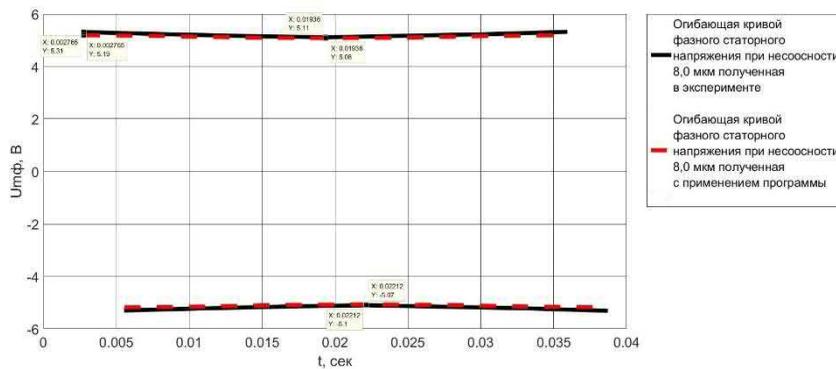


Рисунок 10 – Оциллограмма огибающих фазного статорного напряжения АГ в эксперименте и в программе

По результатам проверки сходимости установлено, что расхождение между результатами, полученными в ходе эксперимента и с применением комплексной программы составляет не более 5 %, из чего сделано заключение об адекватности разработанной комплексной программы.

На основе результатов, полученных в диссертации, разработана методика обеспечения качества АГ по параметрам, определяющим формирование несоосности статора и ротора (рисунок 11).

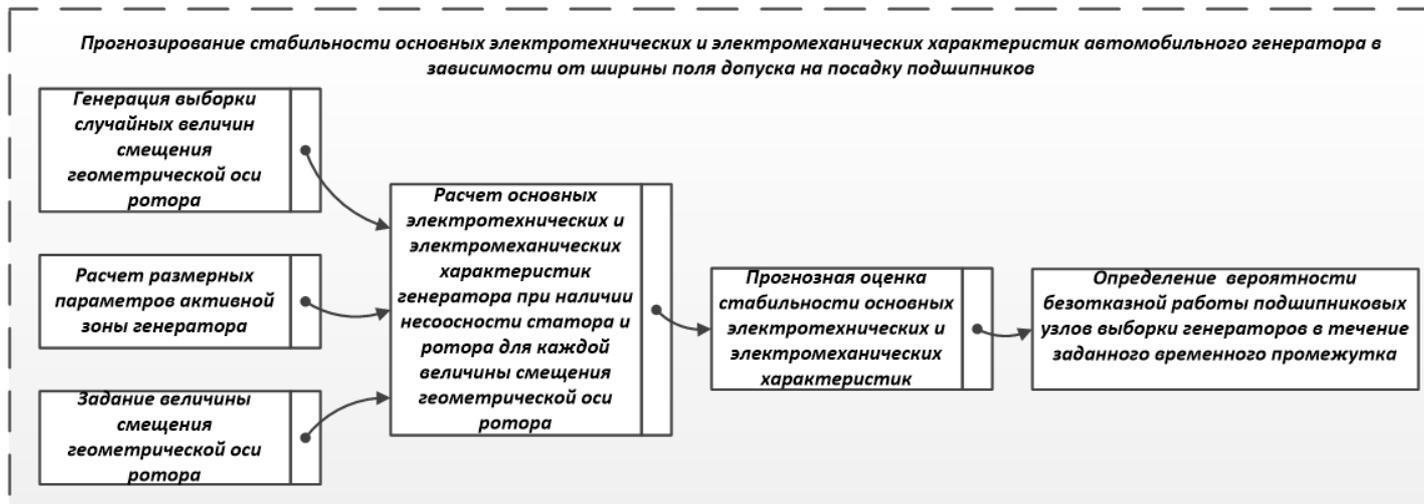
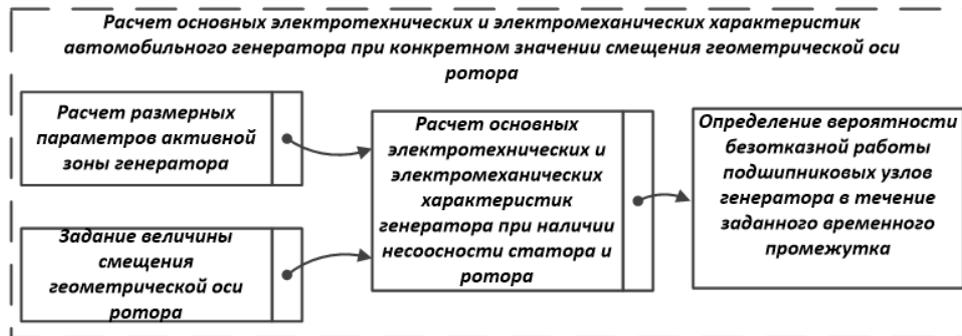


Рисунок 11 – Структура методики обеспечения качества АГ по параметрам несоосности статора и ротора

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена важная научно-техническая задача по обеспечению качества трехфазного синхронного автомобильного генератора переменного тока с клювообразным ротором по геометрическим параметрам, определяющим формирование несоосности статора и ротора.

В работе получены следующие научные и практические результаты:

1. Путем статистического анализа дефектов бортового электротехнического комплекса автомобиля выявлено, что наиболее дефектоносным его элементом выступает автомобильный генератор, а главными причинами его выхода из строя являются дефекты подшипниковых узлов (33 % случаев) и несоосность статора и ротора генератора (22 % случаев) между которыми выявлена четкая взаимосвязь, обусловленная колебаниями статорного напряжения и повышенным шумом автомобильного генератора, предшествующим выходу из строя подшипниковых узлов. Таким образом, доказано, что несоосность статора и ротора является наиболее существенным дефектом, оказывающим воздействие на отказоустойчивость автомобильного генератора.

2. Разработана математическая модель, позволяющая решить задачу, по определению связи размерных параметров, определяющих несоосность статора и ротора и основных электротехнических и электромеханических характеристик с учетом конструктивных особенностей ротора, рассматриваемого автомобильного генератора. Разработанная математическая модель позволяет в практике автомобилестроения учитывать влияние несоосности статора и ротора на основные электротехнические и электромеханические характеристики автомобильного генератора.

3. Разработана комплексная программа, которая реализует автоматизацию связи между параметрами несоосности статора и ротора и основными электротехническими и электромеханическими характеристиками. Применение комплексной программы дает возможность для оперативной оценки влияния конкретного значения смещения геометрической оси ротора на основные электротехнические и электромеханические характеристики. Полученные результаты показали, что наличие несоосности статора и ротора приводит к изменению формы кривой фазного статорного напряжения автомобильного генератора, так, при смещении геометрической оси ротора относительно статора 2,0 мкм амплитуда фазного статорного напряжения под центром условного первого полуса в точке с минимальным значением  $V_3$  составляет 5,11 В (при номинальном значении  $V_3$  амплитудное значение, полученное в программе равно 5,08 В). Несоосность статора и ротора также влияет на формирование электромагнитной силы одностороннего притяжения ротора к статору, которая оказывает влияние на вероятность безотказной работы подшипниковых узлов автомобильного генератора в течение его срока службы. При повышении стабильности технологического процесса, например при смещении геометрической оси ротора в 2,0 мкм, значение электромагнитной силы одностороннего притяжения ротора к статору с учетом силы натяжения ремня привода автомобильного генератора составляет 733 Н, а вероятность безотказной работы переднего и заднего подшипниковых узлов в течение периода гарантийной эксплуатации автомобиля – 0,97 и 0,82, что выше

соответствующих значений при текущем уровне стабильности технологического процесса (например, при смещении геометрической оси ротора в 12 мкм) на 0,02 и 0,15.

4. Предложен вероятностный расчетно-статистический инструментарий, основанный на положениях метода Монте-Карло, который внедрен в разработанную программу. Инструментарий обеспечивает возможность для формирования прогнозной оценки стабильности изготовления автомобильного генератора по действующим нормативам (техническим условиям). Результаты применения инструментария показывают, что стабильность технологического процесса влияет на формирование несоосности статора и ротора, а значит и на стабильность основных электротехнических и электромеханических характеристик автомобильного генератора.

5. Разработан количественный критерий оценки влияния и соответствующая подпрограмма. Применение количественного критерия позволяет определить степень влияния стабильности процесса изготовления автомобильного генератора, по параметрам, определяющим формирование несоосности статора и ротора, на стабильность его основных электротехнических и электромеханических характеристик. Так, при недостаточной стабильности технологического процесса, значения критерия для результирующей силы, воздействующей на подшипниковые узлы, лежат в диапазоне 269-286, а при более высокой стабильности технологического процесса, критерий для результирующей силы, воздействующей на подшипниковые узлы лежат в диапазоне 245-269, что свидетельствует о более высокой стабильности технологического процесса.

6. Предложена методика обеспечения качества автомобильного генератора по параметрам, определяющим формирование несоосности статора и ротора, позволяющая в практике автомобилестроения учитывать связь несоосности статора и ротора с основными электротехническими и электромеханическими характеристиками.

7. Проведенное экспериментальное исследование показало адекватность и эффективность предложенных технических решений в практике промышленного производства на примере ПАО «КАМАЗ» в части организации системы приемочного контроля качества автомобильных генераторов, с экономическим эффектом равным 2,4 млн. руб. в ценах 2021 г.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### В периодических изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Козловский, В.Н. Компьютерное моделирование электромагнитной силы, возникающей вследствие неравномерности воздушного зазора электромеханического преобразователя / В.Н. Козловский, А.С. Саксонов, Е.В. Стрижакова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 3. – С. 165-168.

2. Козловский, В.Н. Компьютерное моделирование влияния технологических особенностей формирования эллипсности статора на электромеханические характеристики автомобильной синхронной генераторной установки / В.Н. Козловский, А.С. Саксонов // Вопросы электротехнологии. – 2021. – № 3(32). – С. 74-80.

3. Козловский, В.Н. Математический аппарат для задания несоосности статора и ротора синхронного автомобильного генератора / В. Н. Козловский, **А.С. Саксонов**, Е.В. Стрижакова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 3. – С. 181-183.

4. Козловский, В.Н. Электромагнитная сила одностороннего притяжения ротора к статору автомобильного генератора как фактор, определяющий его эксплуатационную надежность / В.Н. Козловский, **А.С. Саксонов** // Вопросы электротехнологии. – 2022. – № 2(35). – С. 39-44.

5. Математическая имитационная модель оценки зарядного баланса автомобиля / В. Н. Козловский, У. В. Брачунова, А. В. Крицкий, **А. С. Саксонов** // Грузовик. – 2021. – № 7. – С. 17-26.

6. **Саксонов, А.С.** Расчетно-статистический эксперимент по методу Монте-Карло как основа инструмента управления качеством транспортных электромеханических преобразователей / А.С. Саксонов, В.Н. Козловский, А.В. Крицкий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 6. – С. 286-292.

7. Экспериментальные исследования помехоустойчивости канала управления скоростью, сап-шины современного автомобиля и электронного реле указателей поворота / В.Н. Козловский, П.А. Николаев, А.С. Подгорный, **А.С. Саксонов** [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 2. – С. 569-575.

#### **В научных изданиях, индексируемых в Scopus/Web of Science:**

8. Algorithm development for finding the minimum level of noise immunity of an onboard electrical complex during control tests / V.N. Kozlovsky, A.S. Podgorny, **A.S. Saksonov** [et al.] // E3S Web of Conferences, Saint-Petersburg, 23–26 November 2020 year. – Saint-Petersburg, 2020. – P. 1-5.

9. Testing of Electromagnetic Interference Level by Means of On board Intelligent Measuring System as a Tool for Assessing Operating Quality of Passenger Car Electrical Systems / V.N. Kozlovskiy, **A.S. Saksonov**, S.V. Petrovskiy, [et al.] // 2021 Intelligent technologies and electronic devices in vehicle and road transport complex, Moscow, 11–12 November 2021 year. – Moscow, 2021. – P. 1-5.

#### **Статьи, опубликованные в других научных изданиях:**

10. Компьютерное моделирование как инструмент обеспечения качества проектирования транспортных генераторных установок / **А.С. Саксонов**, В.Н. Козловский, У.В. Брачунова, В.А. Губанов // Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении: III Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием, Тула, 06–08 апреля 2022 года. – Тула: Тульский государственный университет, 2022. – С. 253-255.

11. **Саксонов, А.С.** Концепция комплекса цифрового проектирования и диагностики транспортных электромеханических преобразователей / **А.С. Саксонов**, Д.Р. Уразметова, В.Н. Козловский // Приоритетные направления развития науки и технологий: доклады XXX международной науч.-практич. конф., Тула, 29 марта 2022 года / Под общ. ред. В.М. Панарина. – Тула: Издательство "Инновационные технологии", 2022. – С. 195-199.

#### **Другие наиболее значимые статьи:**

12. **Саксонов, А.С.** Разработка математического аппарата для оценки влияния

эллипсности статора на выходные характеристики автомобильной генераторной установки / А.С. Саксонов, А.В. Крицкий, В.Н. Козловский // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 6. – С. 338-341.

13. Козловский, В.Н. Компьютерное моделирование влияния технологических особенностей формирования эллипсности статора на электромеханические характеристики автомобильной синхронной генераторной установки / В.Н. Козловский, **А.С. Саксонов** // Вопросы электротехнологии. – 2021. – № 3(32). – С. 74-80.

14. Многофакторная оценка влияния дорожной обстановки на помехоустойчивость бортового электротехнического комплекса автомобилей / П.А. Николаев, В.Н. Козловский, А.С. Подгорный, **А.С. Саксонов** // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2022. – № 1. – С. 36-41.

15. **Саксонов, А.С.** Влияние эллипсности активной зоны синхронной автомобильной генераторной установки на характеристику холостого хода. Часть 1 / **А.С. Саксонов**, В.Н. Козловский, В.И. Строганов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 9. – С. 526-534.

16. **Саксонов, А.С.** Влияние эллипсности активной зоны синхронной автомобильной генераторной установки на характеристику холостого хода. Часть 2 / **А.С. Саксонов**, В.Н. Козловский, В.И. Строганов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 9. – С. 556-563.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета 24.2.377.06 ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»  
(протокол № 2 от 10.01.2023 г.)

Заказ № \_\_\_\_\_. Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» Отдел  
типографии и оперативной полиграфии  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.