

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Самарский государственный технический университет»

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

**Диссертация на соискание
ученой степени кандидата технических наук**

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Козловский В.Н.

Самара 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1 Актуализация проблемы обеспечения качества и надежности автомобильного генератора.....	18
1.1 Анализ и перспективы развития бортового электротехнического комплекса современных автомобилей.....	18
1.2 Анализ проблемы качества и надежности бортового электротехнического комплекса современных легковых автомобилей.....	22
1.3 Конструктивные особенности и оценка качества автомобильных генераторов современных автомобилей.....	27
1.4 Научно-технический обзор по проблеме обеспечения качества автомобильных генераторов	31
1.5 Выводы к главе 1	34
2 Математическая модель влияния несоосности статора и ротора на основные электротехнические и электромеханические характеристики автомобильного генератора.....	35
2.1 Обзор существующих методов и методик определения взаимосвязей между несоосностью статора и ротора электромеханических преобразователей с их электротехническими и электромеханическими характеристиками.....	35
2.2 Обоснование и основные допущения, принятые в математической модели влияния несоосности статора и ротора автомобильного генератора на его основные электротехнические и электромеханические характеристики.....	41
2.3 Математическая модель влияния несоосности статора и ротора автомобильного генератора на его основные электротехнические и электромеханические характеристики.....	42
2.4 Вероятностный расчетно-статистический инструмент для оценки влияния стабильности технологического процесса на стабильность основных	

электротехнических и электромеханических характеристик автомобильного генератора	52
2.5 Выводы к главе 2	55
3 Разработка комплексной программы для установления влияния несоосности статора и ротора автомобильного генератора на его основные электротехнические и электромеханические характеристики.....	57
3.1 Концепция комплексной программы	57
3.2 Разработка комплексной программы для установления влияния несоосности статора и ротора автомобильного генератора на его основные электротехнические и электромеханические характеристиками	63
3.3 Реализация вероятностного расчетно-статистического инструмента для оценки влияния стабильности технологического процесса на стабильность основных электротехнических и электромеханических характеристик автомобильного генератора	88
3.4 Выводы к главе 3	98
4 Экспериментальное исследование влияния несоосности статора и ротора автомобильного генератора на его основные электротехнические и электромеханические характеристики.....	101
4.1 Обоснование, основные допущения и постановка эксперимента.....	101
4.2 Разработка рекомендаций по совершенствованию инструментария обеспечения качества автомобильных генераторов по параметрам, определяющим несоосность статора и ротора	110
4.3 Выводы к главе 4	113
Заключение	114
Библиографический список.....	117
Приложения	128
Приложение 1	129
Приложение 2	130
Приложение 3	131

ВВЕДЕНИЕ

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.

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. Рассматривая статистику дефектов БЭК, установлено, что наибольшим уровнем дефектности в сравнении с другими электрокомпонентами обладает АГ.

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 % случаях дефектов АГ, им 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 с 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. Таким образом, выведено выражение, описывающее неравномерный ВЗ с учетом геометрических особенностей ротора, рассматриваемой конструкции АГ, а также магнитную индукцию в неравномерном ВЗ в функции угла и времени.

Выведено выражение 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.

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.

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.

В третьей главе на основе предложенной 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.

Анализ полученных результатов, в ходе работы с подпрограммой, 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. 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 свои показатели.

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. В разработанной программе учтена сила натяжения приводного ремня АГ, при оценке результирующей силы, воздействующей на подшипниковые узлы в сборе.

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.

Анализ результатов, полученных в ходе работы с инструментарием, 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.

Анализ полученных результатов 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, 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.

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.

Анализ полученных результатов, показал, 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.

Стенд включает в свой состав АГ, возбуждаемый постоянным током от аккумуляторной кислотной батареи, к клеммам этой батареи подключена нагрузка в виде реостата. Для привода АГ используется асинхронный двигатель, питаемый от частотного преобразователя. К выводам статорной обмотки АГ подключен цифровой осциллограф, 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.

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.

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

1 Актуализация проблемы обеспечения качества и надежности автомобильного генератора

1.1 Анализ и перспективы развития бортового электротехнического комплекса современных автомобилей

Современный легковой автомобиль состоит из целого ряда функциональных систем: двигатель внутреннего сгорания, трансмиссия, коробка переключения передач, электрооборудование [1, 78, 80]. Система электрооборудования, часто именуемая БЭК, в настоящее время занимает одно из центральных мест среди других функциональных систем современного легкового автомобиля [59, 69]. Например, работа двигателя внутреннего сгорания невозможна без системы зажигания, а его запуск без электростартерной системы пуска затруднителен. БЭК современного автомобиля представляет собой довольно сложную систему, включающую в себя множество элементов и подсистем: источники электроэнергии (генератор, аккумуляторная кислотная батарея) электронные системы управления (электронная система управления двигателем, антиблокировочная система и т.д.) [1, 69, 78], мультимедийная система и множество других элементов и подсистем [81]. Подробно БЭК современного автомобиля представлен на структурной схеме (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Структура БЭК современного автомобиля

Доля БЭК относительно других функциональных систем постоянно насыщается (рисунок 1.2).

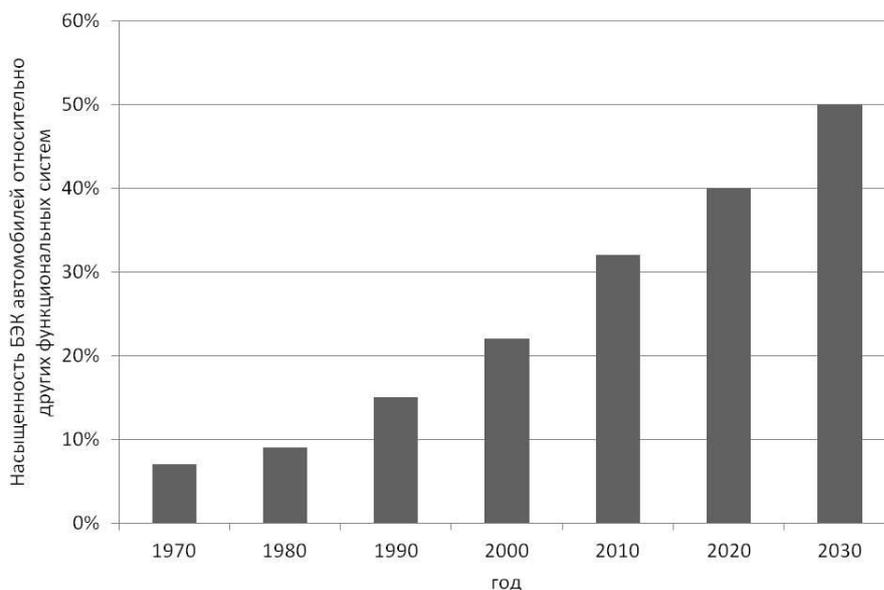


Рисунок 1.2 – Насыщение БЭК автомобилей относительно других функциональных систем в период 1970-2030 гг.

Если в 2000 г. процент насыщения БЭК относительно других функциональных систем автомобиля составлял 22 %, то к 2020 г. этот показатель возрос до 40 %, а к 2030 г. прогнозируется его рост до 50 % [80]. Это говорит о том, что БЭК автомобиля одна из наиболее динамично развивающихся функциональных систем. Такое динамичное насыщение БЭК обусловлено развитием электронных и электромеханических систем, обеспечивающих комфорт и безопасность управления, а также рациональное управление силовым агрегатом автомобиля [81]. К таким системам можно отнести, например, электроусилитель руля, облегчающий рулевое управление, антиблокировочная система, позволяющая сохранять управляемость автомобилем при торможении, электронная система управления двигателем, определяющая параметры работы двигателя внутреннего сгорания в зависимости от внешних условий (температура наружного воздуха, уклон трассы, скорость движения и т.д.) [1]. К новейшим электронным и электромеханическим системам современных автомобилей можно отнести систему автоматического экстренного торможения, предотвращающую

столкновение с препятствиями на дороге, система мониторинга усталости водителя, двери с электромеханическими замками, не позволяющие выйти из автомобиля при опасном приближении другого автомобиля и многие другие [52].

Электронные и электромеханические системы имеют множество функциональных преимуществ, в сравнении с механическими и гидравлическими системами, которые активно использовались на легковых автомобилях предыдущих поколений. К примеру, гидроусилитель руля имеет сложное устройство, нуждается в регулярной замене масла, к тому же, при поломке гидроусилителя руля эксплуатация автомобиля невозможна. Этих недостатков лишен электроусилитель руля, имеющий более простое устройство, практически не нуждающийся в обслуживании, а при его поломке эксплуатация автомобиля допустима. Таким же образом, электронная система управления двигателем, закладываемая практически в любой современный автомобиль реализованная как группа датчиков, находящихся под управлением микропроцессора значительно эффективнее и информативнее механической системы управления двигателем [52].

Стоит заметить, что современный автомобиль, в силу насыщенности различными электронными и электромеханическими системами отличается повышенной зависимостью от источников электроэнергии в сравнении с автомобилями прошлых поколений, где многие функциональные системы автомобиля имеют механический и гидравлический принцип действия. Соответственно, роль источников электроэнергии в современном автомобиле становится все более и более значительной.

Источниками электроэнергии БЭК современного автомобиля по-прежнему остаются АГ, основанный на базе ЭМП, представленного синхронной машиной с электромагнитным возбуждением, работающий в паре с аккумуляторной кислотной батареей (АКБ) [1, 67]. На сегодняшний день большинство современных автомобилей оснащены именно АГ основанном на синхронной машине с электромагнитным возбуждением, лишь некоторые производители комплектуют свои автомобили АГ, основанными на синхронной машине с

магнитоэлектрическим возбуждением [67]. Такие АГ лишены главного недостатка синхронных машин традиционного исполнения – щеточного узла, который наравне с подшипниковыми узлами является одним из самых ненадежных конструктивных узлов ЭМП [10, 71]. Тем не менее, у магнитоэлектрических синхронных машин есть недостаток, которого нет у синхронных машин с электромагнитным возбуждением. При коротком замыкании в обмотке статора такой машины происходит потеря свойств постоянных магнитов, находящихся на роторе, соответственно магнитоэлектрический генератор после короткого замыкания не работоспособен, чего нельзя сказать о традиционной синхронной машине с электромагнитным возбуждением.

Одним из новейших ЭМП для автомобилей, над которым активно ведется работа, способный работать как в двигательном, так и в генераторном режимах работы выступает стартер-генераторная установка [60]. Такой ЭМП выполняет сразу две задачи: во-первых, создает пусковой момент на коленчатом валу двигателя внутреннего сгорания, а во-вторых, после перехода двигателя внутреннего сгорания в номинальный режим, работает как источник электроэнергии, отдавая последнюю в бортовую сеть.

Стоит отметить, что в ближайшем будущем в эксплуатацию поступят беспилотные автомобили, а это говорит о том, что роль БЭК в таких автомобилях будет существенно выше, чем в автомобилях, находящихся под управлением человека. Это обусловлено более сложными электронными системами управления двигателем, системами обеспечения безопасности автомобиля, а также внедрением систем автоматического управления [1, 47].

Таким образом, роль БЭК в современном автомобиле становится все более и более значительной: число электронных и электромеханических систем автомобилей растет с каждым годом, что позволяет говорить о повышении степени комфорта управления, обеспечении безопасности движения и рациональных режимов работы силового агрегата автомобиля [1, 57, 49].

1.2 Анализ проблемы качества и надежности бортового электротехнического комплекса современных легковых автомобилей

В настоящее время в России наблюдается повышенный интерес к вопросам качества и надежности автомобилестроительной продукции [76, 78]. Такой интерес обусловлен тем, что от качества автомобиля напрямую зависит его конкурентоспособность на рынке, а значит и прибыль автомобилестроительных предприятий, что особенно актуально в нынешней ситуации, сложившейся в стране, когда приоритет отдается продукции отечественного производства [56, 73]. Качество автомобиля влияет на размер денежных убытков автомобилестроительного предприятия, связанных с покрытием расходов на устранение дефектов, возникших у автомобилей, находящихся в гарантийной эксплуатации [55, 75].

Качество и надежность – два взаимосвязанных понятия. Согласно ГОСТ 15467-79 качество – это совокупность свойств продукции определяющих степень ее пригодности для использования по назначению [14], а надежность согласно ГОСТ 27.002-2015 – свойство продукции сохранять в установленном промежутке времени значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных условиях [16]. Таким образом, качество автомобиля один из ключевых факторов, оказывающих воздействие на его надежность [11, 33, 37].

На само качество автомобиля и его функциональных систем влияет множество факторов: проработанность проекта, степень технологической подготовки производства, квалификация рабочего персонала, степень точности технологического оборудования, количество операций ручной обработки деталей, сборки узлов и агрегатов автомобиля и многие другие факторы [23, 58]. Когда уровень обеспечения качества автомобиля недостаточный, то надежность его функционирования снижается, что приводит к возникновению дефектов

элементов функциональных систем автомобиля [34, 35].

В виду того, что автомобиль является массовым продуктом, для анализа проблемы качества и надежности его БЭК необходимо использовать методы статистического анализа, в частности метод статистического наблюдения и корреляционный анализ [50, 70]. Используя методы статистического анализа, можно установить закономерность в возникновении дефектов элементов БЭК, а также связать дефекты, с причинами, которые их повлекли [24, 51, 55].

Для решения этой задачи, на основе полученной от официального сервисного центра крупнейшего российского автопроизводителя базы актов гарантийного обслуживания легковых автомобилей, находящихся в гарантийной эксплуатации в период 2017-2020 гг. (рисунки 1.3-1.4), сформирована выборка легковых автомобилей, объем выборки – более 1 млн. единиц.

Дата устранения	Модель	ДатПокуп	ДатПрод	Проб	Деталь	Дефект	Наименование
1006	21970	0604	0605	9350	0040441	0040441086000	
1006	21970	0607	0608	15000	0040441	0040441086000	
0906	21970	0608	0608	3124	0040441	0040441086000	
1006	21970	0606	0607	4961	0040442	0040442086000	
0906	21970	0411	0412	31300	0040442	0040442086000	
1006	21970	0608	0609	2100	0040442	0040442086000	
1106	21970	0607	0607	7500	0040442	0040442086000	
1006	21970	0602	0602	24500	0040442	0040442086000	
1006	21970	0508	0508	5800	0040442	0040442086000	
1006	21970	0505	0506	13000	0040442	0040442086000	
0706	21970	0410	0412	10963	0040442	0040442086000	
1006	21970	0608	0609	2900	0040442	0040442086000	
1006	21970	0505	0505	30198	0040442	0040442086000	
0806	21970	0512	0512	15487	0040442	0040442086000	
0906	21970	0512	0512	12500	0040442	0040442086000	
1106	21970	0512	0501	6000	0040442	0040442086000	
0806	21970	0512	0512	7321	0040442	0040442086000	
1006	21970	0602	0603	5886	0040442	0040442086000	
1006	21970	0601	0602	20500	0040442	0040442086000	
0806	21970	0512	0512	23100	0040442	0040442086000	
0906	21970	0603	0603	14800	0040442	0040442086000	
0906	21970	0512	0601	15250	0040442	0040442086000	
1006	21970	0602	0603	11767	0040442	0040442086000	
0906	21970	0604	0605	5367	0040442	0040442086000	
0806	21970	0607	0607	2900	0040442	0040442086000	
0706	21970	0606	0606	5900	0040442	0040442086000	
1006	21970	0607	0608	2662	0040442	0040442086000	

Рисунок 1.3 – База данных по дефектам легковых автомобилей, находившихся в гарантийной эксплуатации в 2017-2020 гг.

Год	Регион	Модель	Деталь	Номер	Номер	Номер	ДатПр	ДатУст	ДатВы	ДатПро	Проф	Га	Труд	И	Уст	ЗапЧ	М	Объ	Дефект	Наимен	Вид
2017	САМАРА	САМАРА	2915004	0000002	0000236	724743	06/01	06/01	0411	0505	15208	10	1.42	310	440	814	0	1254	2915004024000	ТЕЧЬ АМОТИЗА	510K
2018	САМАРА	САМАРА	6106082	0000002	0000236	724743	06/01	06/01	0411	0505	15208	15	0.20	310	82	1	0	63	6106082000000	УСТАНОВКА ШАЙ	300K
2019	САМАРА	САМАРА	5402334	0000002	0000236	724743	06/01	06/01	0411	0505	15208	15	0.80	310	248	0	0	248	5402334000000	ДЕФЕКТ ОМАНТО	000K
2020	САМАРА	САМАРА	1001157	0000002	0000236	724743	06/01	06/01	0411	0505	15208	15	0.68	310	211	2	0	213	1001157008000	НЕ ЗАПРЕГЛЕН	300K

Рисунок 1.4 – Сводная база данных по дефектам легковых автомобилей, находившихся в гарантийной эксплуатации в 2017-2020 гг.

В ходе анализа дефектов по функциональным системам автомобилей установлено, что наиболее дефектоносными функциональными системами легковых автомобилей выступают его БЭК, уровень дефектов которого превышает 30 % от общего уровня дефектов, ходовая часть (20 % дефектов) и двигатель внутреннего сгорания (16 % дефектов) (рисунок 1.5).

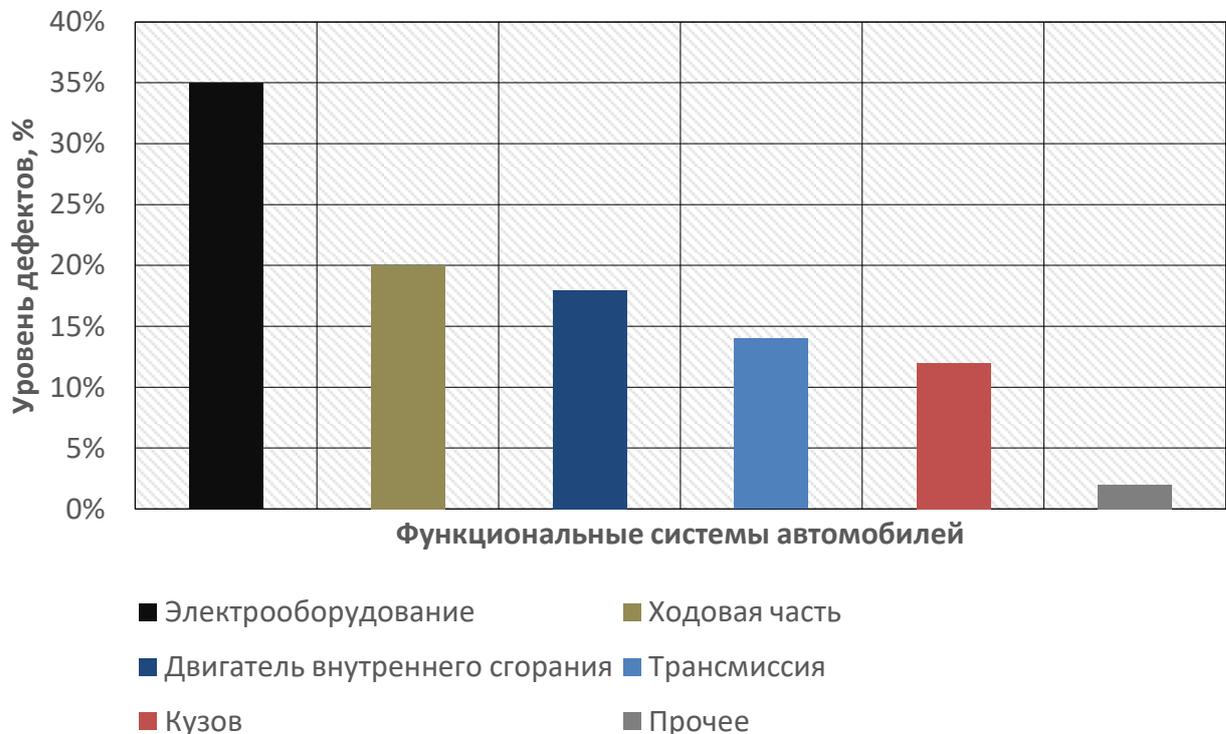


Рисунок 1.5 – Уровень дефектности по функциональным системам легковых автомобилей, находящихся в гарантийной эксплуатации в России в период 2017-2020 гг.

По БЭК наиболее существенный уровень дефектности (более 80 %) наблюдается в группе электрокомпонентов, имеющих в своем составе ЭМП, а в самой группе электрокомпонентов с ЭМП первую позицию занимает АГ, на него приходится более 50 % дефектов по группе устройств с ЭМП (рисунок 1.6).

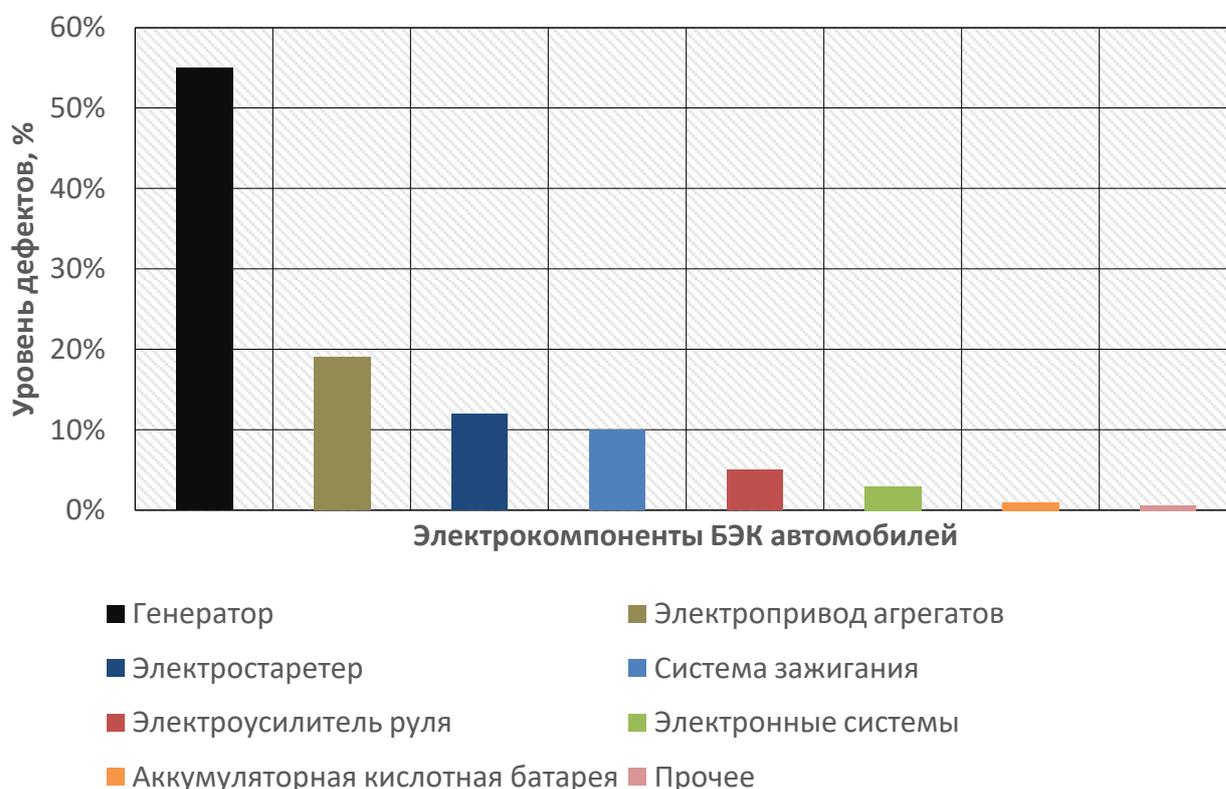


Рисунок 1.6 – Уровень дефектности по системе БЭК легковых автомобилей, находящихся в гарантийной эксплуатации в России в период 2017-2020 гг.

Статистический анализ видов дефектов АГ исследуемой выборки легковых автомобилей, показал, что наиболее распространенными дефектами выступают излом подшипниковых узлов (33 % дефектов) и несоосность статора и ротора ЭМП (22 % дефектов) (рисунок 1.7).

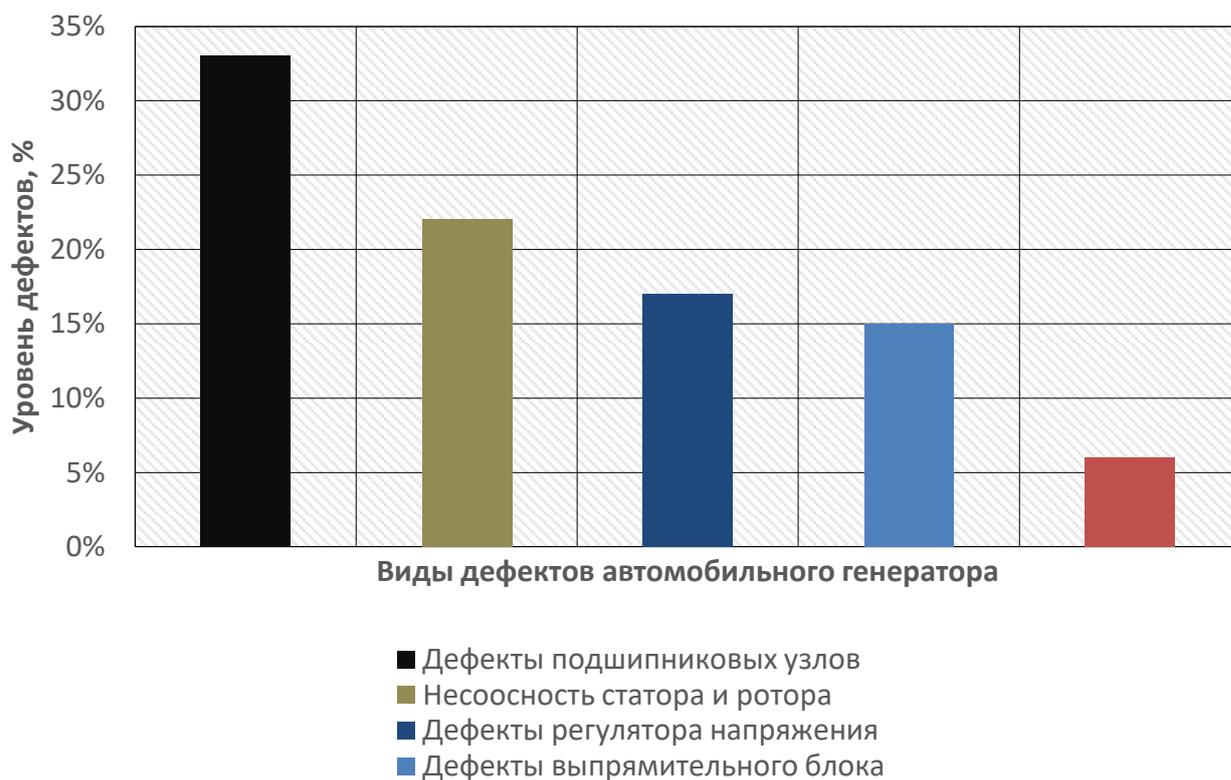


Рисунок 1.7 – Уровень дефектов по узлам АГ автомобилей, находящихся в гарантийной эксплуатации в России в период 2017-2020 гг.

В ходе статистического анализа выявлена взаимосвязь между выходом из строя подшипниковых узлов и несоосностью статора и ротора, для которой в 49 % случаев характерны скачки статорного напряжения, а также завышенный шум АГ, выделяющийся на фоне общего шума моторного отсека автомобиля.

Как отмечалось ранее, при возникновении дефектов автомобиля, связанных с их некачественным изготовлением, ответственность за их устранение ложится на плечи автопроизводителя. Таким образом, затраты на устранение дефектов по всем функциональным системам легковых автомобилей, производства крупнейшего российского автопроизводителя находившихся в гарантийной эксплуатации в России в период 2017-2020 гг. составили 2,434 млрд. руб., из них 712 млн. руб. израсходованы на устранение дефектов по БЭК. В свою очередь, первую позицию по затратам на устранение дефектов по БЭК занимает группа устройств, содержащих в своем составе ЭМП (323 млн. руб.), а в этой группе первую позицию по затратам на устранение дефектов занимает АГ (198 млн.

руб.).

Таким образом, путем статистического анализа установлено, что наибольшей дефектностью обладает БЭК автомобиля, в свою очередь в БЭК наибольшей дефектностью характеризуется АГ, который чаще всего выходит из строя из-за дефектов подшипниковых узлов. С использованием результатов статистического анализа вынесено предположение о взаимосвязи между выходом из строя подшипниковых узлов и несоосностью статора и ротора, для которой характерны повышенный шум АГ, выделяющийся из общего фона, а также скачки статорного напряжения, во многих случаях предшествующие выходу из строя подшипниковых узлов [28, 61]. Из этого следует, важность выявления причин, из-за которых возникает несоосность статора и ротора АГ.

1.3 Конструктивные особенности и оценка качества автомобильных генераторов современных автомобилей

На большинстве современных автомобилей применяются АГ, в конструкцию которых входят: ЭМП, представляющий собой двенадцатиполюсную синхронную электрическую машину с электромагнитным возбуждением [42, 45, 74]; интегральный регулятор напряжения со щеткодержателем, а также выпрямительный блок, основанный на кремниевых полупроводниковых диодах [74, 81].

Сам ЭМП АГ включает в себя две принципиально важные конструктивные части – клювообразный ротор, на котором располагается обмотка возбуждения, создающая магнитное поле, и статор, с обмоткой которого сцепляется магнитный поток поля возбуждения, наводя в ней ЭДС [12, 24, 45]. Между этими конструктивными частями расположен ВЗ, который оказывает сопротивление

магнитному потоку, сцепляющемуся со статорной обмоткой, это видно из нижеприведенной формулы (1.1) [9]:

$$\Phi_f = \frac{\mu_0 \tau l_\delta}{\pi k_\delta k_{\mu d} \delta} \cdot \frac{\omega_f k_f}{p} i_f, \quad (1.1)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость воздуха, Гн/м; τ – полюсное деление статора, м; l_δ – длина воздушного зазора, м; k_δ – коэффициент ВЗ; $k_{\mu d}$ – коэффициент насыщения магнитной цепи по продольной оси ЭМП; δ – размер ВЗ, м; ω_f – число витков обмотки возбуждения; k_f – коэффициент формы поля возбуждения; p – число полюсов ротора; i_f – ток возбуждения, А.

Магнитный поток сцепляется со статорной обмоткой, потокосцепление с фазной статорной обмоткой описывается выражением (1.2) [9]:

$$\Psi_f = \omega_{ст} k_{об} \Phi_f, \quad (1.2)$$

где $\omega_{ст}$ – число витков статорной обмотки; $k_{об}$ – обмоточный коэффициент.

При изменении угла поворота ротора потокосцепление изменяется по синусоидальному закону, тем самым изменяется амплитуда взаимоиндуктивности между обмотками ротора и статора (1.3) [9]:

$$M_{fad} = \frac{\Psi_f}{i_f}. \quad (1.3)$$

Амплитудное значение фазной статорной ЭДС, наводимой магнитным потоком поля возбуждения описывается выражением (1.4) [9]:

$$E_m = \omega_1 M_{fad} i_f, \quad (1.4)$$

где ω_1 – угловая частота вращения поля возбуждения, рад/с.

При подключении нагрузки к выводам статорной обмотки АГ на ней появляется напряжение, амплитудное значение которого в комплексной форме выражается так (1.5) [5, 9]:

$$\dot{U}_m = \dot{E}_m - jx_d \dot{I}_d - jx_q \dot{I}_q - r_a \dot{I}, \quad (1.5)$$

где x_d – индуктивное сопротивление статорной обмотки по продольной оси полюсов, Ом; I_d – ток статорной обмотки по продольной оси полюсов, А; x_q – индуктивное сопротивление статорной обмотки по поперечной оси полюсов, Ом;

I_q – ток статорной обмотки по поперечной оси полюсов, А; r_a – активное сопротивление статорной обмотки, Ом; I – полный ток статорной обмотки, А.

При наличии несоосности статора и ротора ВЗ становится неравномерным. В случае, если ВЗ неравномерный, магнитное поле в его пространстве будет распределяться также неравномерно, асимметрично. Из этого следует, что и амплитуда потокосцепления изменит свое значение: в точке с максимальным значением ВЗ потокосцепление будет минимальным, а в точке с минимальным значением ВЗ потокосцепление максимально. Значит, амплитудное значение наводимого в статорной обмотке напряжения также изменит свое значение [28].

Согласно ряду источников [44, 45], одним из следствий несоосности статора и ротора АГ выступает электромагнитная сила одностороннего притяжения ротора к статору. Вследствие асимметрии магнитного поля оно имеет максимум, в точке с минимальным значением ВЗ, и соответственно, в этой точке ротор притягивается к статору [44]. Для прояснения этого момента следует обратиться к формуле Максвелла, записанной в дифференциальной форме для двух соосных ферромагнитных цилиндров, разделенных воздушным зазором (1.6) [43]:

$$df_{\text{эм}} = \frac{B^2 l D ds}{4\mu_0} \quad (1.6)$$

где B – индукция между цилиндрами, Тл; l – длина ВЗ, м; D – средний диаметр ВЗ, м; s – площадь ВЗ, м².

При анализе формулы (1.6), становится понятно, что электромагнитная сила одностороннего притяжения ротора к статору зависит от квадрата магнитной индукции, которая неравномерно распределяется в пространстве ВЗ, а также эта сила зависит от изменения площади ВЗ. Значит, в точке с минимальным значением ВЗ, под действием этой силы, ротор будет притягиваться к статору, воздействуя на подшипниковые узлы. Таким образом, можно сделать предположение о том, что основной причиной выхода из строя подшипниковых узлов АГ выступает электромагнитная сила одностороннего притяжения ротора к статору, формируемая под влиянием несоосности статора и ротора.

Далее встает задача по выяснению причин возникновения самой несоосности статора и ротора. Для обеспечения условий вращения ротора любой электрической машины, в частности и АГ, используются подшипниковые узлы, конструктивно состоящие из подшипниковых щитов с фрезерованными посадочными местами, в которые вложены подшипники качения, запрессованные на вал ротора. При осуществлении этапов технологического процесса, например, расточки посадочных мест подшипников в щитах или при изготовлении валов, неминуемо возникают погрешности, на возникновение которых оказывают влияние множество случайных факторов, таких как неточность инструментов, технологической оснастки, квалификация персонала, задействованного в технологическом процессе.

Из теории качества и надежности [11, 13], и из технологии машиностроения известны такие термины как квалитет и поле допуска [22]. Размерные параметры каждой детали любого конструктивного узла изделия должны лежать в пределах обозначенного поля допуска [14, 22]. Ширина поля допуска определяется квалитетом, который согласно источникам [12, 22] для таких изделий как автомобильный генератор должен быть равен 8. Таким образом, согласно ТУ на АГ одного из самых распространенных производителей в России [72] в настоящее время посадка подшипников АГ определяется полем допуска $\varnothing 117 \frac{H8}{h8}$. Логично, что от ширины поля допуска зависит стабильность процесса изготовления АГ, при широком поле допуска на посадку подшипников вероятность возникновения несоосности статора и ротора высока, значит в процессе эксплуатации АГ вероятность его безотказной работы в течение гарантийного периода будет низка. Таким образом, сделано предположение, что, перейдя с 8 квалитета на 7, можно добиться повышения стабильности процесса изготовления АГ по параметрам посадки подшипников в щиты, а значит и добиться повышения стабильности основных электротехнических (фазное напряжение, фазная ЭДС) и электромеханических характеристик (электромагнитная сила одностороннего притяжения ротора к статору). Таким образом, сделано следующее

предположение – параметры посадки подшипника в щиты — это одни из ключевых параметров, влияющих на формирование несоосности статора и ротора. Таким образом, следует заключить, что применяющийся в настоящее время квалитет для АГ не обеспечивает качественного функционирования АГ.

1.4 Научно-технический обзор по проблеме обеспечения качества автомобильных генераторов

Несмотря на то, что проблема обеспечения качества как АГ, так и БЭК современных автомобилей в целом, является актуальной задачей, в этом направлении технической науки работает не так много ученых. Главным образом, это связано с тем, что большая часть исследований ведется вблизи центров автомобильной промышленности, таких как Москва, Тольятти и Набережные Челны, а значит проблема обеспечения качества электрокомпонентов БЭК автомобиля остается недостаточно изученной.

Для того чтобы понять, насколько проработана тема по исследованию проблем обеспечения качества АГ, проведен анализ ряда работ, затрагивающих эту тематику. Всего проанализировано 6 диссертационных работ за последние 20 лет, так или иначе связанных с проблемой обеспечения качества АГ автомобилей. Ниже приведены научные работы, тематика которых близка к теме диссертационного исследования.

В первую очередь стоит обратить внимание на работу [31]. В этой работе автором предлагается метод, применяя который при проектировании и производстве АГ, возможно учитывать влияние разброса стабильности ключевых геометрических параметров на основные электротехнические и электромеханические характеристики. Главные выводы этого исследования изложены в виде разработанной программы расчета коэффициентов влияния для определения влияния разброса геометрических параметров активной зоны АГ на

основные электротехнические и электромеханические характеристики, а также обобщенный критерий качества АГ, который представляет собой эквивалентное значение вероятностной оценки изготовления в соответствии с требованиями ТУ единичных и групповых контролируемых размерных параметров.

Далее изучена работа [32]. В этой работе автором решается задача по разработке системного комплекса научно-программных средств, позволяющих повысить качество элементов БЭК автомобилей. К главным выводам этой работы можно отнести математическую модель надежности БЭК автомобиля, которая позволяет устанавливать взаимосвязи между показателями безотказности, ремонтпригодности элементов БЭК и эксплуатационным пробегом автомобиля. Применение этой модели позволяет вскрыть наименее отказоустойчивые элементы БЭК. Еще одним важным выводом этой работы можно обозначить разработанные программы расчета количественной оценки весомости влияния размерных параметров активной зоны АГ, электростартера и других устройств БЭК имеющих в своем составе ЭМП на их технические характеристики. Программы позволяют определять наиболее важные размерные параметры с точки зрения качества и надежности.

Также изучена работа [56]. В этой работе автором предложена методика диагностирования АГ по параметрам выходного напряжения. К главным выводам этого исследования можно отнести определение наиболее информативного диагностического параметра, показывающего техническое состояние АГ – выходное выпрямленное напряжение. Так, при наличии определенных дефектов, форма импульсов выходного напряжения изменяет свою форму, что говорит о наличии дефектов АГ. Также в исследовании разработан экспресс-метод определения технического состояния АГ по размаху пульсации выходного напряжения, что позволяет диагностировать неисправности АГ на ранней стадии развития.

Уделено внимание работе [66]. В этой работе автор предлагает электрорезистивный метод диагностики подшипников АГ. Главным выводом этого исследования следует обозначить математическую модель, двухпорного

подшипникового узла АГ, с помощью которой можно определять электрическое сопротивление подшипника в зависимости от условий работы. Также по результатам исследования разработана методика диагностирования подшипников АГ по параметру нормированного интегрального времени микроконтактирования, по этому параметру рассчитываются параметры смазочной пленки, исходя из значений этих параметров определяется ресурс подшипников АГ.

Следующей изучена работа [77]. В работе решается задача повышения надежности узлов электромеханической системы узлов АГ за счет контроля и корректировки параметров по результатам теоретического и экспериментального исследования статических и динамических режимов. К главному выводу этой работы можно отнести разработанную математическую модель АГ в виде передаточной функции узлов в виде колебательного звена второго порядка для динамических режимов работы при ресурсных испытаниях АГ.

Также изучена работа [2], которая посвящена разработке электромеханических стартер-генераторных систем автомобилей. К главным выводам этой работы можно отнести разработанную методику определения основных параметров безредукторного стартер-генератора на базе асинхронной машины. Также сюда стоит отнести разработанный алгоритм проектирования стартер-генератора на базе асинхронной машины, основанный на сочетании оптимизационных и поверочных расчетов.

Таким образом, в ходе анализа работ, затрагивающих тематику автомобильного электрооборудования не выявлено работ, затрагивающих вопрос обеспечения ее качества по параметрам, определяющим формирование несоосности статора и ротора АГ, а значит, эта тема актуальна.

1.5 Выводы к главе 1

В главе с использованием методов статистического анализа выявлено, что наиболее дефектоносным элементом БЭК современных автомобилей выступает АГ, а наиболее распространенной причиной его выхода из строя являются дефекты подшипниковых узлов. Выявлена взаимосвязь между дефектами подшипниковых узлов и несоосностью статора и ротора (согласно результатам статистического анализа, также отмечено, что во многих случаях, выходу из строя подшипниковых узлов предшествуют повышенный шум и скачки статорного напряжения, характерные для несоосности статора и ротора). Путем теоретического обоснования вынесено предположение, что к дефектам подшипниковых узлов приводит воздействие на них электромагнитной силы одностороннего притяжения ротора к статору, на формирование которой в свою очередь оказывает влияние несоосность статора и ротора, которая является следствием некачественной посадки подшипников в щиты. Было сделано второе предположение – некачественная посадка подшипников в щиты связана с недостаточной стабильностью процесса изготовления АГ, а возможным решением этой проблемы может стать сужение поля допуска на посадку подшипников в щиты. Исходя из вышеизложенного, сделано следующее предположение – параметры посадки подшипников в щиты являются одними из ключевых параметров, влияющих на формирование несоосности статора и ротора.

Проведенный обзор доступной научно-технической информации по данной теме показал, что по проблеме, поставленной в диссертации, активных исследований не проводилось, тогда как на практике ее решение является актуальной задачей в современном автомобилестроении.

2 Математическая модель влияния несоосности статора и ротора на основные электротехнические и электромеханические характеристики автомобильного генератора

2.1 Обзор существующих методов и методик определения взаимосвязей между несоосностью статора и ротора электромеханических преобразователей с их электротехническими и электромеханическими характеристиками

Перед разработкой математической модели необходимо выполнить обзор существующих методик учета взаимосвязи технологических погрешностей, и основных электротехнических и электромеханических характеристик синхронных электрических машин, работающих в генераторном режиме.

В работе [17] авторами разработан математический аппарат, описывающий влияние неравномерности воздушного зазора между ротором и статором синхронных генераторов с постоянными магнитами.

Как известно, причинами неравномерности воздушного зазора между ротором и статором электрических машин являются эксцентриситет ротора, осевой сдвиг ротора и т.д. Исходя из этого, авторы отмечают, что суммарная неравномерность ВЗ между ротором и статором электрической машины будет определяться выражением (2.1):

$$x = x_c + x_d + x_k, \quad (2.1)$$

где x_c – статический эксцентриситет, мм; x_d – динамический эксцентриситет, мм; x_k – виброперемещения ротора, мм.

Затем авторы отмечают, что неравномерность ВЗ, вызванная динамическим эксцентриситетом является функцией частоты вращения ротора, а следовательно выражается следующим образом (2.2):

$$x_d = x_{ds} \sin(\omega t), \quad (2.2)$$

где x_{ds} – величина динамического эксцентриситета при неподвижном роторе, мм.

В свою очередь, виброперемещения ротора зависят от частоты его колебания и их амплитуды (2.3):

$$x_k = A_k \cos(\omega_1 t), \quad (2.3)$$

где A_k – амплитуда колебаний ротора мм; ω_1 – частота колебаний ротора, рад/с.

Затем авторы приводят известное выражение, которое определяет максимальную амплитуду ЭДС проводника расположенного в пазе обмотки статора рассматриваемого синхронного генератора (2.4):

$$E = 2B_\delta f l \tau, \quad (2.4)$$

где B_δ – магнитная индукция в зазоре, Тл; f – частота тока, Гц; l – активная длина мм; τ – полюсное деление статора синхронного генератора с полюсами из постоянных магнитов.

Индукция при холостом ходе определяется по выражению (2.5):

$$B_\delta = \frac{B_r}{\left(1 + \frac{\delta_p B_r k_\delta}{2\mu_0 h_m \sigma_0 H_c}\right) \sigma_0}, \quad (2.5)$$

где B_r – остаточная магнитная индукция постоянных магнитов, Тл; δ_p – рабочий зазор, мм; k_δ – коэффициент учитывающий зубчатость статора; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, Гн/м; h_m – толщина постоянных магнитов, мм; σ_0 – коэффициент учитывающий рассеяние магнитов; H_c – коэрцитивная сила, А/м;

Авторы дополняют указанное выше выражение. Они заменяют значение рабочего зазора синхронного генератора выражением, в котором суммируются неравномерности ВЗ электрической машины (2.6):

$$B_{\delta n} = \frac{B_r}{\left(1 + \frac{\{\delta_n - (x_s + x_{ds} \sin(\omega t) + A_k \cos(\omega_1 t)) \cos[(n-1)\pi\beta]\} B_r k_\delta}{2\mu_0 h_m \sigma_0 H_c}\right) \sigma_0}. \quad (2.6)$$

При помощи выражения (2.6) Авторы заключают, что из-за неравномерности ВЗ магнитная индукция под каждой фазной обмоткой неравномерна. Следствием становится то, что ЭДС также является неравномерной. Из этого авторы делают следующий вывод: ввиду неравенства фазных ЭДС результирующая ЭДС определяется не по теореме Пифагора, а по теореме косинусов (2.7):

$$E_B = \omega \sqrt{E_{1B}^2 + E_{2B}^2 + E_{1B}^2 E_{2B}^2 \cos \beta \pi}, \quad (2.7)$$

где E_{1B} , E_{2B} , – ЭДС начала и конца витка обмотки, B ω – число витков в обмотке.

Далее авторы подставляют в выражение (2.6) выражение (2.7):

$$E_k = \omega \sqrt{\left(\frac{2B_r f l \tau}{(1+b\{\delta_H - (x_s + x_{ds} \sin(\omega t) + A_k \cos(\omega_1 t)) \cos[(n_{1\omega} - 1)\pi\beta]\})\sigma_0} \right)^2 + \left(\frac{2B_r f l \tau}{(1+b\{\delta_H - (x_s + x_{ds} \sin(\omega t) + A_k \cos(\omega_1 t)) \cos[(n_{2\omega} - 1)\pi\beta]\})\sigma_0} \right)^2 + \left(\frac{2B_r f l \tau}{(1+b\{\delta_H - (x_s + x_{ds} \sin(\omega t) + A_k \cos(\omega_1 t)) \cos[(n_{1\omega} - 1)\pi\beta]\})\sigma_0} \right)^2 + \left(\frac{2B_r f l \tau}{(1+b\{\delta_H - (x_s + x_{ds} \sin(\omega t) + A_k \cos(\omega_1 t)) \cos[(n_{2\omega} - 1)\pi\beta]\})\sigma_0} \right)^2} \cos \beta \pi} \quad (2.8)$$

где k – порядковый номер катушки;

Таким образом, в этой работе авторы учитывают влияние параметров неравномерности ВЗ на статорную ЭДС магнитоэлектрического генератора. Полученный математический аппарат довольно прост для понимания принципов формирования неравномерности, но в то же время в этой работе нет учета многофакторного влияния технологических погрешностей, определяющих неравномерность ВЗ ЭМП.

В работе [8] авторы рассматривают влияние эксцентриситета ротора на выходные параметры быстроходного магнитоэлектрического генератора. Более конкретно – исследование влияния эксцентриситета ротора на магнитную индукцию в средней линии воздушного зазора рассматриваемой электрической машины.

Авторы сообщают, что при ранее проведенном моделировании ими установлено, что при относительном эксцентриситете значением 5 % магнитная индукция в воздушном зазоре снижается на 8,9 %, возникает асимметрия магнитного поля в воздушном зазоре генератора, и при увеличении значения относительного эксцентриситета ротора асимметрия магнитного поля также увеличивается. Авторы отмечают, что при искажении симметрии магнитного поля в воздушном зазоре искажается и среднее значение индукции магнитного поля в воздушном зазоре электрической машины. Среднее арифметическое значение индукции магнитного поля авторы определяют выражением (2.9):

$$\overline{B_{\delta_{cp}}} = \frac{\sum_1^n B_{\delta_{cp}}}{n}, \quad (2.9)$$

где n – число членов ряда; $\overline{B_{\delta_{cp}}}$ – значение магнитной индукции по средней линии воздушного зазора электрической машины, Тл.

Затем авторы отмечают, что изменение $\overline{B_{\delta_{cp}}}$ вызванное эксцентриситетом ротора электрической машины влияет на коэффициент полюсного перекрытия (2.10):

$$\alpha_i = \frac{B_{\delta_{cp}}}{B_{\delta_{max}}}. \quad (2.10)$$

Этот коэффициент, как говорят авторы, входит в состав формулы, по которой рассчитывается мощность быстроходного магнитоэлектрического генератора (2.11):

$$P = \frac{\alpha_i A B_{\delta} n D_1^2 l}{6,1}. \quad (2.11)$$

Работа имеет сходство с предыдущей работой в части определения выходных параметров генераторной установки с учетом влияния на них неравномерного ВЗ, недостатком работы опять же является отсутствие взаимосвязи между технологическими погрешностями и выходными характеристиками ЭМП.

В работе [48] описывается метод расчета нелинейных искажений ЭДС явнополюсного генератора.

Сначала авторы показывают формулу описывающую степень отклонения линейного напряжения генератора от синусоидальной формы (2.12):

$$K_{dist} = \sqrt{\left| \frac{E_{n1}}{E_{n2}} \right|^2 + \dots + \left| \frac{E_{n3}}{E_{n2}} \right|^2 + \dots + \left| \frac{E_{n4}}{E_{n2}} \right|^2 + \dots}, \quad (2.12)$$

где E_{n1} , E_{n3} , E_{n4} – средние из модулей трех значений линейных ЭДС генератора, В.

Авторы отмечают: сильное влияние на амплитуды и фазы гармоник оказывают такие факторы как: форма полюсного наконечника, величина ВЗ между ротором и статором генератора, степень насыщения магнитной цепи машины.

Авторы приводят формулу, описывающую величину радиуса полюсного наконечника (2.13):

$$R_p = \frac{D_{IN}}{2 + \frac{8D_{IN}(\delta_{max} - \delta_{min})}{b_p^2}}, \quad (2.13)$$

где D_{IN} – диаметр расточки статора мм; δ_{max} , δ_{min} – максимальный и минимальный зазор под полюсом ротора, мм; b_p – ширина полюса.

Авторы записывают формулу эквивалентного ВЗ между ротором и статором генератора (2.14):

$$\delta_{EQ} = \delta_{min} + \frac{\delta_{max} - \delta_{min}}{3}. \quad (2.14)$$

Затем авторы представляют формулу расчета несимметрии линейных ЭДС (2.15):

$$E_{EMF} = \frac{E_{лин max}^* - E_{лин min}^*}{E_{лин ср}^*} \leq 0,03. \quad (2.15)$$

где $E_{лин max}^*$, $E_{лин min}^*$ – максимальное и минимальное значение модуля трех ЭДС, В; $E_{лин ср}^*$ – среднее значение трех линейных ЭДС, В.

Далее авторы приводят формулу периода разложения магнитного потока индукции при наличии несимметрии ЭДС и эксцентриситета ротора (2.16):

$$T_{GL} = \pi(D_{IN} - 2\delta_{EQ}). \quad (2.16)$$

В результате разложения радиальной составляющей $b_r(\theta)$ авторы получают (2.17):

$$b_r(\theta) = \sum B_N \exp(j\psi_N), \quad (2.17)$$

где B_N – комплексная амплитуда гармоники порядка N радиальной составляющей индукции; ψ_N – фазовый угол гармоники, рад/с.

Таким образом, рассмотренная выше работа четко показывает влияние конструктивных параметров активной зоны ЭМП на его выходные электротехнические характеристики, но недостатком этой работы выступает отсутствие учета взаимосвязи между технологическими погрешностями и основными характеристиками ЭМП.

В работе [31] приводится методика учета влияния разброса геометрических параметров активной зоны АГ, показывающая взаимосвязь размерных параметров

активной зоны с ее выходными электротехническими и электромеханическими характеристиками. В работе определены конструктивные параметры, разброс которых наибольшим образом влияет на формирование основных электротехнических и электромеханических характеристик посредством использования формул коэффициентов влияния (2.18):

$$c_{ij} = \frac{\partial(x_1 \dots x_j)}{\partial x_j} \cdot \frac{x_j}{f_i(x_1 \dots x_j)}. \quad (2.18)$$

В итоге установлено, что наибольшее влияние на основные электротехнические и электромеханические характеристики АГ оказывает разброс параметров внутреннего диаметра статора, длина расточки статора, диаметр втулки, диаметр ротора, длина полюса и несколько других конструктивных параметров активной зоны.

В работе разработана компьютерная модель, реализующая расчетно-статистический эксперимент по методу Монте-Карло. Входным параметром в данной модели выступает разброс конструктивных параметров активной зоны, выходным – разброс статорного напряжения и статорного тока АГ. Таким образом, в модели реализована взаимосвязь между технологическими погрешностями параметров активной зоны и основными электротехническими и электромеханическими характеристиками АГ, показывающая влияние разброса конструктивных параметров на стабильность этих характеристик.

Главным недостатком работы выступает отсутствие учета влияния параметров несоосности статора и ротора на основные электротехнические и электромеханические характеристики АГ.

2.2 Обоснование и основные допущения, принятые в математической модели влияния несоосности статора и ротора автомобильного генератора на его основные электротехнические и электромеханические характеристики

Математическая модель определения взаимосвязи между геометрическими параметрами несоосности статора и ротора и основными электротехническими и электромеханическими характеристиками АГ выступает связующим звеном между конфигурацией ВЗ, обусловленной несоосностью статора и ротора ЭМП и такими параметрами, как статорная ЭДС, статорное напряжение, электромагнитная сила одностороннего притяжения ротора к статору [27, 29, 40].

Из вышесказанного следует, что входными данными в математической модели должны выступать геометрические размерные параметры, определяющие несоосность статора и ротора АГ, а выходными – выражения, отражающие поведение ВЗ под влиянием параметров, определяющих формирование несоосности статора и ротора [64].

При разработке математической модели для определения взаимосвязи между размерными параметрами несоосности статора и ротора и основными электротехническими и электромеханическими характеристиками приняты следующие допущения:

- 1) поверхность статора гладкая, зубчатость не учитывается;
- 2) ротор и статор расположены абсолютно симметрично, за исключением возможного смещения геометрической оси ротора относительно геометрической оси расточки статора;
- 3) смещение геометрической оси ротора происходит без перекоса, геометрические оси ротора и статора параллельны;

- 4) осевыми усилиями, которые могут возникнуть из-за асимметрии клювообразных полюсов ротора следует пренебречь, т.к. они значительно меньше радиальных усилий;
- 5) отклонения размерных параметров, влияющих на формирование несоосности статора и ротора, имеют линейный характер.

Учитывая обозначенные выше допущения, задачу разработки математической модели можно решить в двумерной постановке.

2.3 Математическая модель влияния несоосности статора и ротора автомобильного генератора на его основные электротехнические и электромеханические характеристики

Из теории электрических машин известно, что ВЗ является одним из важнейших размерных параметров, оказывающих влияние на формирование магнитной индукции и всех зависимых от нее параметров вплоть до статорного напряжения [3, 9]. При абсолютной симметрии геометрических осей ротора и статора размер ВЗ определяется формулой (2.19) [3]:

$$\delta_{\text{ном}} = \frac{D_i - D_p}{2} \quad (2.19)$$

где D_i – внутренний диаметр статора, м.

В качестве расчетного сечения следует выбрать сечение по центру осевой симметрии ротора. В этом сечении северные и южные полюса ротора будут иметь одинаковое значение активной ширины полюса.

У ЭМП, имеющего абсолютную симметрию осей ротора и статора, а также гладкую поверхность статора, кривая нормальной составляющей магнитной индукции в нормальном сечении ВЗ без учета реакции якоря (режим холостого хода) имеет форму близкую к синусоидальной (рисунок 2.1) [9, 21]. Здесь и далее по тексту диссертации следует пренебречь действием высших гармоник поля и

рассматривать только первую гармонику кривой магнитной индукции. Осевая составляющая магнитной индукции у ЭМП, геометрические оси ротора и статора которого симметричны, должна быть уравновешена для обеих пар полюсов, а равнодействующая электромагнитная сила, провоцируемая ее действием должна быть равна нулю.

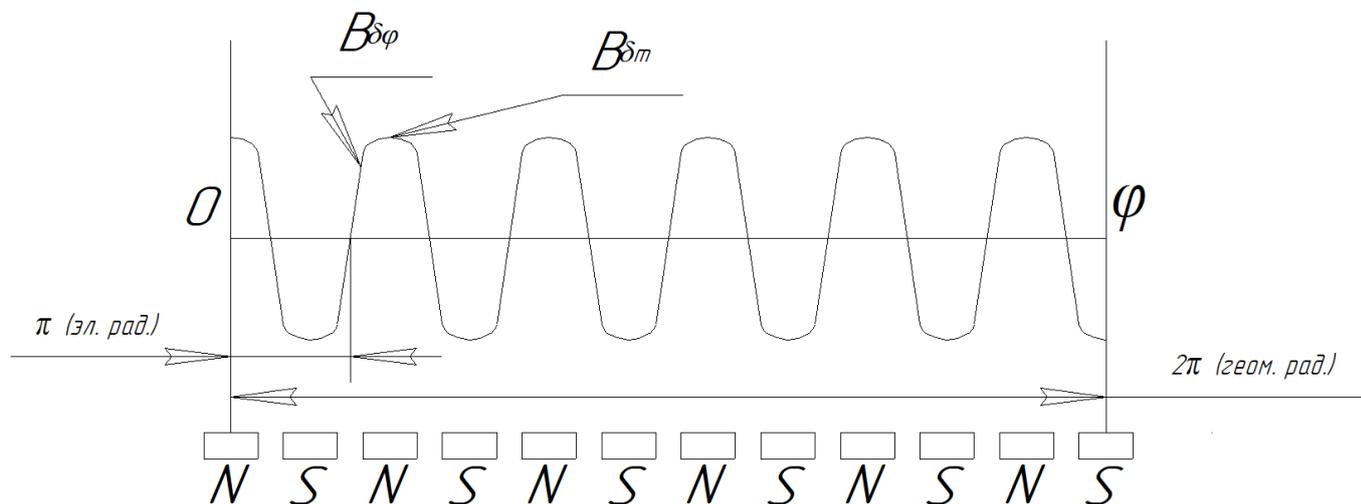


Рисунок 2.1 – Кривая магнитной индукции по первой гармонике в 12-ти полюсном генераторе

Анализируя рисунок 2.1, видно, что при отсутствии смещения оси ротора относительно геометрической оси статора с учетом принятых ранее допущений о симметричности ЭМП сила одностороннего притяжения ротора к статору должна быть равна нулю [44, 45]. Теперь нужно рассмотреть случай, когда геометрическая ось ротора смещена относительно геометрической оси статора (рисунок 2.2).

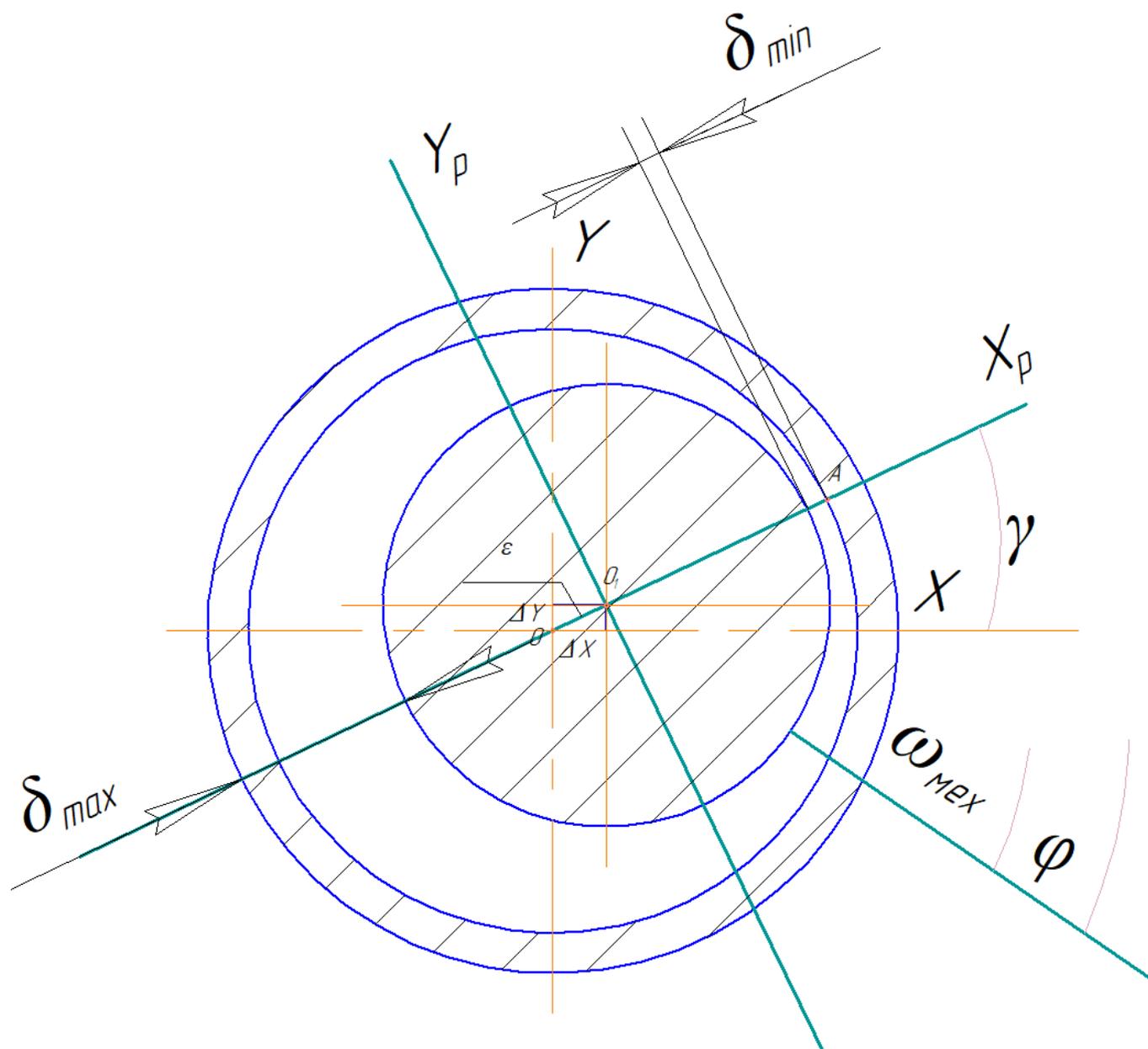


Рисунок 2.2 – Схема систем координат при смещении геометрической оси ротора

Кривая магнитной индукции в этом случае изменит свой вид (рисунок 2.3).

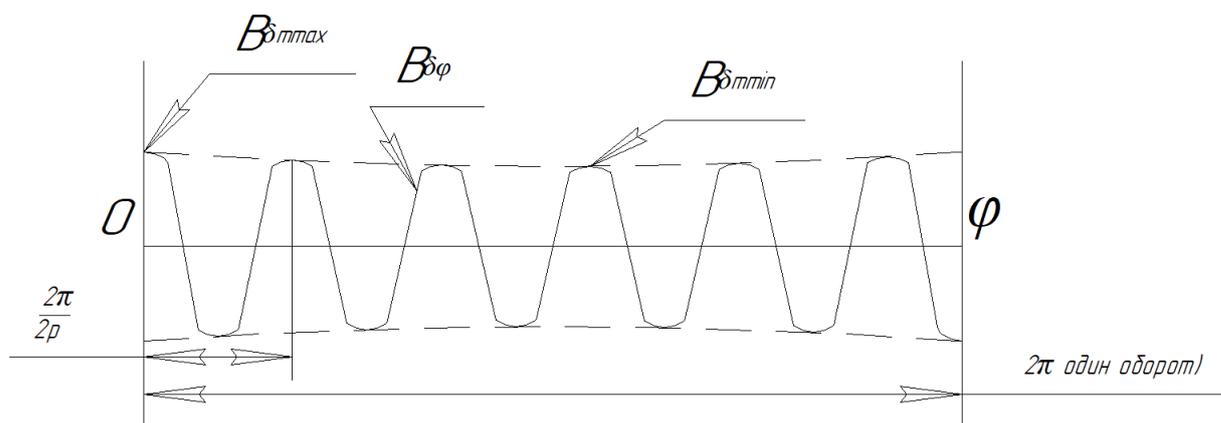


Рисунок 2.3 – Качественный вид кривой магнитной индукции в ВЗ при смещении геометрической оси ротора

Теперь следует предположить, что ось ротора O_1 смещена на величины Δx и Δy по соответствующим осям или в полярных координатах на угол γ со смещением [4, 53] (2.20):

$$\varepsilon = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad (2.20)$$

где Δx – смещение оси ротора по оси абсцисс, м; Δy – смещение оси ротора по оси ординат, м.

Для удобства перейдем к новой системе координат $X_p O_1 Y_p$, неподвижной относительно ротора. Ось X_p совпадает с направлением смещения (повернута относительно оси X на угол γ). Если к принятым ранее допущениям добавить условие, что магнитная цепь ЭМП не насыщена, то амплитуду магнитной индукции в ВЗ в функции угла ϕ следует определять выражением (2.21):

$$B_{\delta_{m,\phi}} = \frac{F_{\Sigma}}{R_{\mu}} = \frac{F_{\Sigma}}{1,6 \cdot 10^6 k_{\delta} k_{\mu} \delta_{\phi}} \quad (2.21)$$

где F_{Σ} – МДС обмотки возбуждения, А; R_{μ} – магнитное сопротивление ВЗ, Ом; k_{δ} – коэффициент ВЗ; k_{μ} – коэффициент насыщения магнитной цепи; δ_{ϕ} – величина ВЗ в функции угла ϕ .

В формуле (2.21) все величины и коэффициенты кроме δ_{ϕ} постоянны, с учетом принятых ранее допущений. Из этого следует, что величина магнитной индукции по окружности расточки статора будет функцией ВЗ, который в свою очередь зависит от несоосности геометрических осей. Из геометрических

соображений, учитывая, что ВЗ много меньше диаметра ротора, а смещение оси ротора много меньше размера ВЗ, следует, что текущее значение ВЗ под центрами полюсов будет определяться следующей формулой (2.22):

$$\delta_{\varphi} = \delta_{\text{ном}} - \varepsilon \cdot \cos \varphi_i \quad (2.22)$$

где $\delta_{\text{ном}}$ – номинальный ВЗ, м; $\varphi_i = \frac{2\pi}{p}i$, где $i = 1, 2, \dots, n$ – порядковый номер полюса.

Смещение оси полюса с величиной максимального и минимального ВЗ связано соотношением (2.23):

$$\varepsilon = \frac{\delta_{\text{max}} - \delta_{\text{min}}}{2} \quad (2.23)$$

С учетом выражения (2.23) значение индукции над полюсами определяется формулой (2.24):

$$B_{\delta_{m,\varphi}} = \frac{F_{\Sigma}}{1,6 \cdot 10^6 k_{\delta} k_{\mu} (\delta_{\text{ном}} - \varepsilon \cdot \cos \varphi_i)} \quad (2.24)$$

Переходя к неподвижной относительно статора системе координат X, Y, получим, что индукция в функции угла и времени описывается выражением (2.25):

$$B_{\delta}(\varphi, t) = B_{\delta_{m,\varphi}} \sin(\omega t + Y_{\text{эл}}) = \frac{F_{\Sigma}}{1,6 \cdot 10^6 k_{\delta} k_{\mu} (\delta_{\text{ном}} - \varepsilon \cdot \cos \varphi_i)} \cdot \sin \left[\frac{p}{60} (2\pi n t + Y_{\text{эл}}) \right] \quad (2.25)$$

где n – механическая частота вращения ротора, об/сек.

Стоит отметить, что несоосность статора и ротора является следствием неточности изготовления подшипников, вала ротора, неточной расточки посадочных мест подшипников и некачественной посадки подшипников в щиты. Для определения величины смещения геометрической оси ротора относительно статора следует составить размерную цепь, в которой фигурируют параметры, влияющие на формирование несоосности статора и ротора (рисунок 2.4).

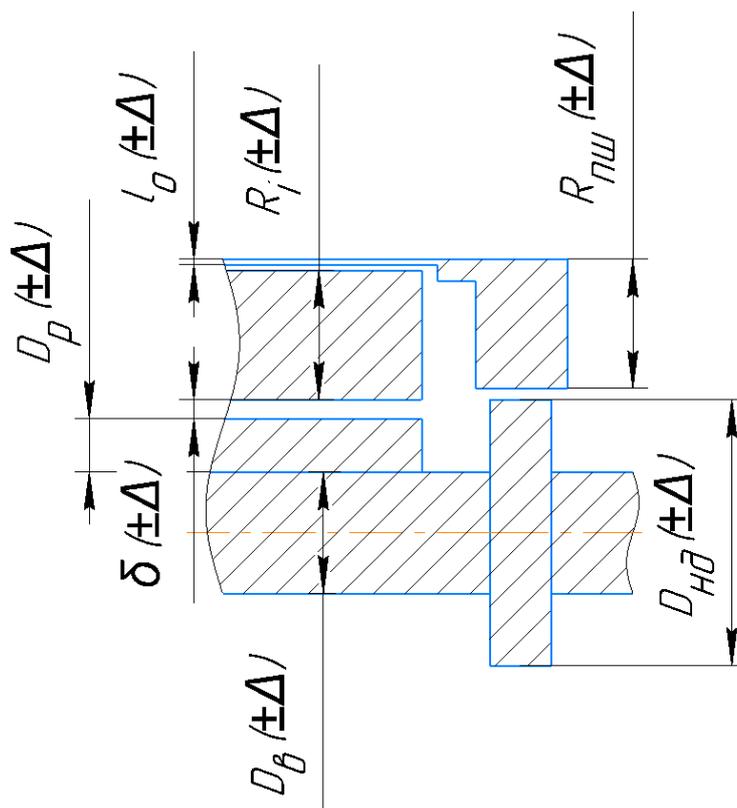


Рисунок 2.4 – Схематичное представление размерной цепи для определения размерных параметров, ключевым образом влияющих на формирование несоосности статора и ротора

Из рисунка 2.4 становится понятно, какие размерные параметры ключевым образом влияют на формирование несоосности статора и ротора (2.26):

$$\varepsilon = D_{\text{в}}(\pm\Delta) + D_{\text{н.д.}}(\pm\Delta) + R_{\text{п.ш.}}(\pm\Delta) - l_o(\pm\Delta) - R_i(\pm\Delta) - R_p(\pm\Delta) \quad (2.26)$$

где $D_{\text{в}}(\pm\Delta)$ – диаметр вала с учетом допуска, м; $R_{\text{н.д.}}(\pm\Delta)$ – радиус наружной дорожки качения подшипника, м; $R_{\text{п.ш.}}(\pm\Delta)$ – радиус подшипникового щита, м; $l_o(\pm\Delta)$ – высота обоймы, м; $R_i(\pm\Delta)$ – внутренний радиус статора, м; $R_p(\pm\Delta)$ – радиус ротора, м.

Таким образом, из формулы (2.26) видно, что на формирование несоосности статора и ротора оказывает влияние целая группа размерных параметров АГ.

В главе 1 диссертации было вынесено предположение о влиянии несоосности статора и ротора на отказоустойчивость АГ посредством влияния несоосности статора и ротора на формирование электромагнитной силы одностороннего притяжения ротора к статору. Таким образом, в разрабатываемой

математической модели следует вывести выражение, устанавливающее взаимосвязь между несоосностью статора и ротора и электромагнитной силой одностороннего притяжения ротора к статору.

В дифференциальной форме электромагнитную силу, действующую на два ферромагнитных тела разделенных ВЗ следует описывать формулой Максвелла [43] (2.27):

$$d\vec{f}_{\text{ЭМ}} = \frac{B^2 ds}{2\mu_0} \quad (2.27)$$

Для двух соосных цилиндров выражение электромагнитной силы записывается так (2.28) [47]:

$$d\vec{f}_{\text{ЭМ}} = \frac{B^2 l D ds}{4\mu_0} \quad (2.28)$$

где l – осевая длина ВЗ, м; D – средний диаметр ВЗ, м.

Поставленную задачу целесообразно решать, прибегнув к полярной системе координат (рисунок 2.5).

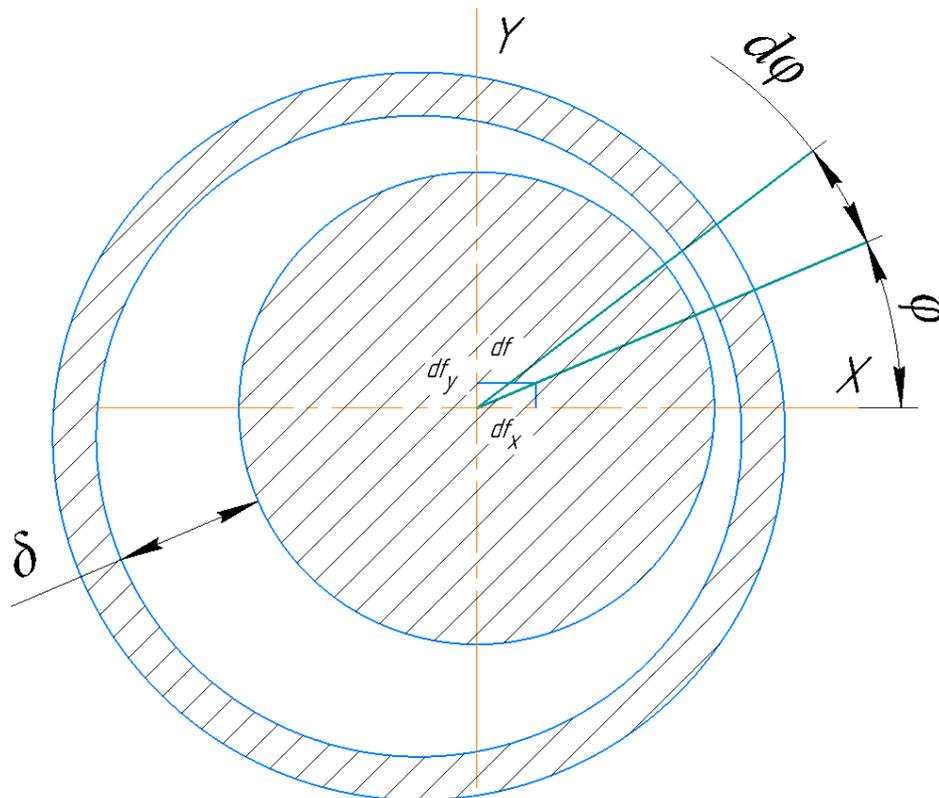


Рисунок 2.5 – Схематичное представление проекций электромагнитной силы по ортогональным осям

Проекции электромагнитной силы на ортогональные оси можно описать выражениями (2.29), (2.30), (2.31) [43]:

$$df_x = df_{ЭМ} \cos \varphi \quad (2.29)$$

$$df_y = df_{ЭМ} \sin \varphi \quad (2.30)$$

$$df = \sqrt{df_x^2 + df_y^2} \quad (2.31)$$

Для дуги статора, ограниченной углами φ_1 и φ_2 проекции силы на ортогональные оси следует записать так (2.32), (2.33):

$$\vec{f}_x = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{B^2 l D}{4\mu_0} \cos \varphi d\vec{f} = \frac{l D}{4\mu_0} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} B^2 \cos \varphi d\vec{f} \quad (2.32)$$

$$\vec{f}_y = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{B^2 l D}{4\mu_0} \sin \varphi d\vec{f} = \frac{l D}{4\mu_0} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} B^2 \sin \varphi d\vec{f} \quad (2.33)$$

В приложении к рассматриваемой задаче, с учетом того, что за начало отсчета был принят центр условного первого полюса ($\varphi_1=0$), суммарная электромагнитная сила выразится суммой интегралов, определяющих эту силу, действующую на каждый полюс (2.34):

$$\vec{f} = \frac{l D}{4\mu_0} \left[\int \frac{\alpha_i}{\frac{\alpha_i}{2p}} B^2 \sin \varphi d\vec{f} + \int \frac{2\alpha_i}{\frac{\alpha_i}{2p}} B^2 \sin \varphi d\vec{f} + \int \frac{3\alpha_i}{\frac{\alpha_i}{2p}} B^2 \sin \varphi d\vec{f} + \dots \right. \\ \left. + \int \frac{n\alpha_i}{\frac{\alpha_i}{2p}} B^2 \sin \varphi d\vec{f} \right] \quad (2.34)$$

При симметричном ВЗ ЭМП половина членов суммы выражения (2.34) будет положительной, а вторая половина – отрицательной. Магнитная индукция под всеми полюсами одинаковая, значит, равнодействующая электромагнитной силы будет равна нулю. При смещении геометрической оси ротора, в выражение (2.34) необходимо подставить значения индукции, определяемые выражением (2.24). В таком случае, первая половина интегралов в сумме будет не равна второй половине интегралов и появится равнодействующая электромагнитной силы, направленная в сторону смещения геометрической оси ротора (в сторону минимального ВЗ).

При вращении ротора с частотой n , электромагнитная сила кроме постоянной составляющей будет иметь еще и переменную, изменяющуюся с

двойной частотой во времени, т.к. $f \sim B^2$, магнитная индукция изменяется во времени согласно формуле (2.25).

Для удобства выведения формулы электромагнитной силы, обусловленной несоосностью статора и ротора, следует ввести следующие обозначения (2.35), (2.36):

$$A = \frac{F_{\Sigma}}{1,6 \cdot 10^6 k_{\delta} k_{\mu}} \quad (2.35)$$

$$C = \frac{lD}{4\mu_0} \quad (2.36)$$

Если пренебречь дискретностью полюсов в выражении (2.34), то в упрощенном виде можно записать выражение для равнодействующей электромагнитной силы в функции времени и угла поворота ротора (2.37):

$$\vec{f}(\varphi, t) = C \int_0^{t_1} \int_0^{2\pi} A^2 \frac{\sin^2[p(2\pi nt + \gamma)]}{(\delta_{\text{ном}} - \varepsilon \cdot \cos \varphi)^2} \cos \varphi d\varphi dt \quad (2.37)$$

АГ приводится во вращение ременной передачей, причем, сила натяжения ремня привода АГ может как противодействовать, так содействовать равнодействующей электромагнитной силы. Если рассматривать случай, когда геометрическая ось ротора смещена в сторону приводного ремня, то сила его натяжения будет противодействовать равнодействующей электромагнитной силы (рисунок 2.6).

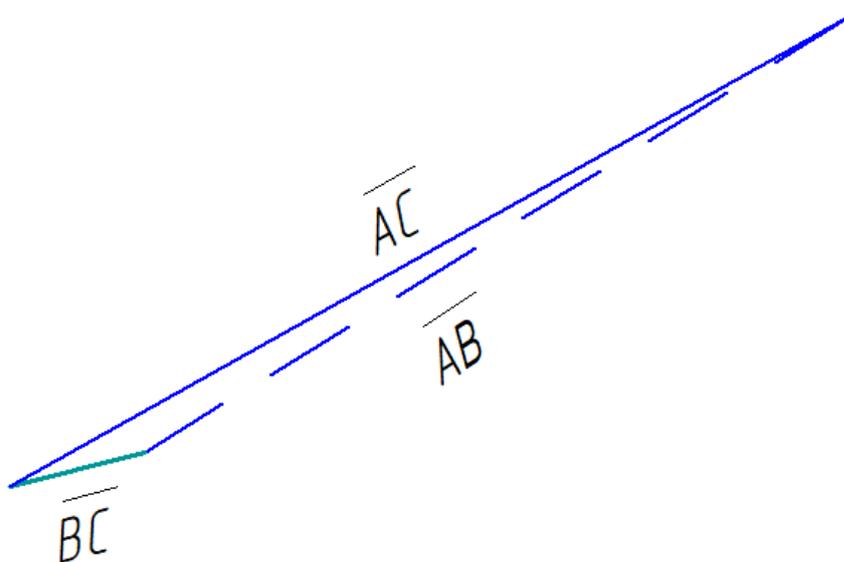


Рисунок 2.6 – Схематическое представление взаимодействия равнодействующей электромагнитной силы и силы натяжения приводного ремня АГ

Как видно из рисунка 2.6, вектор электромагнитной силы \overrightarrow{AC} направлен в сторону меньшего ВЗ, а вектор силы натяжения приводного ремня генератора \overrightarrow{BC} направлен под углом 45° к вертикальной оси ротора. Проведя между концами векторов равнодействующий вектор, который выступает в качестве результирующей силы, воздействующей на подшипниковые узлы \overrightarrow{AB} , получается треугольник со сторонами AC-AB-BC. Величины векторов \overrightarrow{AC} и \overrightarrow{BC} являются известными величинами, а вектор \overrightarrow{AB} неизвестен. Используя правило треугольника можно определить вектор \overrightarrow{AC} (2.38):

$$\overrightarrow{AB} + \overrightarrow{BC} = \overrightarrow{AC} \quad (2.38)$$

Для того, что бы найти вектор результирующей силы, из формулы (2.38) нужно выразить вектор \overrightarrow{BC} (2.39):

$$\overrightarrow{AC} - \overrightarrow{BC} = \overrightarrow{AB} \quad (2.39)$$

Значит, $AB = \vec{f}_{\text{рез}}$.

Таким образом, в случае приведенном на рисунке 2.2, равнодействующей электромагнитной силы противодействует сила натяжения приводного ремня АГ (2.40):

$$\vec{f}_{\text{рез}} = \vec{f}(\varphi, t) - \vec{f}_p \quad (2.40)$$

где f_p – сила натяжения ремня привода АГ, Н.

Таким образом, выражение (2.22) выступает в качестве связующего звена между несоосностью статора и ротора АГ и основными электротехническими и электромеханическими характеристиками. Подставляя выражение (2.22) в формулу для определения амплитудного значения магнитной индукции над полюсами, а затем, подставляя ее в формулу амплитудного значения магнитной индукции в функции угла и времени (с переходом к неподвижной относительно статора системе координат) можно определять взаимосвязи между параметрами определяющими несоосность статора и ротора и основными электротехническими и электромеханическими характеристиками.

2.4 Вероятностный расчетно-статистический инструмент для оценки влияния стабильности технологического процесса на стабильность основных электротехнических и электромеханических характеристик автомобильного генератора

АГ продукт, выпускающийся массово, на который во время осуществления технологического процесса оказывает влияние группа случайных факторов, под действием которых возникают технологические погрешности геометрических размерных параметров, определяющих формирование несоосности статора и ротора. [33]. Важным является то, что ни один из влияющих на технологический процесс факторов не вносит решающего вклада в формирование несоосности статора и ротора [19].

На возникновение технологических погрешностей геометрических размерных параметров, определяющих формирование несоосности статора и ротора, оказывает влияние стабильность технологического процесса [20, 22]. Из этого следует, что с учетом массовости производства для прогнозирования стабильности основных электротехнических и электромеханических характеристик АГ в зависимости от стабильности технологического процесса, необходимо использовать методы математической статистики [20, 70]. Одним из наиболее удобных методов оценки случайных процессов выступает метод Монте-Карло в силу его простоты и универсальности [17]. Метод Монте-Карло сводится к оцениванию плотности распределения некоторой случайной величины, определенной на вероятностном пространстве с использованием интеграла типа Лебега-Стилтьеса (2.41):

$$I = \int f(x)\mu dx \quad (2.41)$$

где $f(x)$ – плотность распределения оцениваемого параметра; μ – сигма-конечная мера.

В рамках диссертационного исследования следует прибегнуть к использованию метода Монте-Карло в его упрощенном виде, когда

вышеописанный интеграл оценивается средним арифметическим плотностей распределения (2.42), (2.43) [17]:

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(x_i), \quad (2.42)$$

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(y_i), \quad (2.43)$$

где N – размер выборки; $f(x_i)$ – плотность распределения входной случайной величины с i -ой относительной частотой; x_i – входная случайная оцениваемая величина; $f(y_i)$ – плотность распределения выходной случайной величины с i -ой относительной частотой; y_i – выходная случайная оцениваемая величина.

Для того, чтобы выполнять оценку распределения случайных величин, необходимо знать, какому закону распределения подчиняется разброс этих случайных величин [20, 19]. В рамках диссертационного исследования предполагается отталкиваться от нормального закона распределения, в силу ряда причин: во-первых, на процесс изготовления АГ воздействует группа случайных факторов, во-вторых, ни один из них не вносит решающего вклада [19, 37], значит, плотности распределения параметров несоосности статора и ротора и основных электротехнических и электромеханических характеристик оцениваются формулами (2.44), (2.45), (2.46):

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{\sigma_\varepsilon \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\varepsilon - \varepsilon_{\text{ср}})^2}{2\sigma_\varepsilon^2}}, \quad (2.44)$$

$$f(U_{m\phi}) = \frac{1}{\sigma_{U_{m\phi}} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(U_{m\phi} - U_{m\phi_{\text{ср}}})^2}{2\sigma_{U_{m\phi}}^2}}, \quad (2.45)$$

$$f(\vec{f}_{\text{рез}}) = \frac{1}{\sigma_{\vec{f}_{\text{рез}}} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\vec{f}_{\text{рез}} - \vec{f}_{\text{рез}_{\text{ср}}})^2}{2\sigma_{\vec{f}_{\text{рез}}}^2}}, \quad (2.46)$$

где σ_ε – среднеквадратичное отклонение величины смещения геометрической оси ротора, м; $\varepsilon_{\text{ср}}$ – среднее значение величины смещения геометрической оси ротора по выборке АГ, м; $\sigma_{U_{m\phi}}$ – среднеквадратичное отклонение величины амплитудного значения фазного статорного напряжения, В; $U_{m\phi_{\text{ср}}}$ – среднее значение величины амплитудного значения фазного статорного напряжения, В;

$\sigma_{\vec{f}_{рез}}$ – среднеквадратичное отклонение величины амплитудного значения результирующей силы, воздействующей на подшипниковые узлы АГ, Н; $\vec{f}_{рез_{cp}}$ – среднее значение величины амплитудного значения результирующей силы, воздействующей на подшипниковые узлы АГ, Н.

Для установления взаимосвязи стабильности технологического процесса и стабильности основных электротехнических и электромеханических характеристик АГ следует оценивать плотности распределения величин смещения геометрической оси ротора и основных электротехнических и электромеханических характеристик (2.47), (2.48), (2.49):

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(\varepsilon), \quad (2.47)$$

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(U_{m\phi}), \quad (2.48)$$

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(\vec{f}_{рез}), \quad (2.49)$$

где $f(U_{m\phi})$ – плотность распределения величин амплитудного значения фазного статорного напряжения выборки АГ; $f(\vec{f}_{рез})$ – плотность распределения величин значений результирующей силы, воздействующей на подшипниковые узлы АГ.

Управлять стабильностью процесса изготовления АГ возможно путем изменения ширины поля допуска на посадку подшипников в щиты [54, 59]. Для оценки влияния стабильности технологического процесса на стабильность основных электротехнических и электромеханических характеристик АГ следует ввести количественный критерий, показывающий степень влияния входного параметра на выходные параметры [26]. В качестве инструмента оценки следует использовать коэффициент влияния, который в общем виде выражается формулой (2.50):

$$c_{ij} = \frac{\Delta f(x_1 \dots x_j)}{\Delta x_j} \cdot \frac{x_j}{f(x_1 \dots x_j)} \quad (2.50)$$

где $\Delta f(x_1 \dots x_j)$ – приращение выходного параметра; Δx_j – приращение входного параметра; x_j – номинальное значение входного параметра; $f(x_1 \dots x_j)$ – номинальное значение выходного параметра.

В контексте диссертационного исследования входным параметром выступает смещение геометрической оси ротора, а выходными параметрами – основные электротехнические и электромеханические характеристики АГ (2.51), (2.52):

$$c_{ij1} = \frac{\Delta U_{m\phi}}{\varepsilon} \cdot \frac{\delta_{ном}}{U_{m\phi}} \quad (2.51)$$

$$c_{ij2} = \frac{\Delta f_{рез}}{\varepsilon} \cdot \frac{\delta_{ном}}{f_p} \quad (2.52)$$

где $\Delta U_{m\phi}$ – приращение амплитудного значения фазного статорного напряжения, В; ε – смещение геометрической оси ротора, м; $\Delta f_{рез}$ – приращение результирующей силы, воздействующей на подшипниковые узлы АГ, Н.

Коэффициент влияния выступает в качестве универсального инструмента оценки весомости влияния входного параметра на формирование выходных параметров. Анализируя формулу коэффициента влияния для общего случая (2.50) видно, что малое приращение выходного параметра к малому приращению входного параметра даст малое значение коэффициента. Таким же образом, большое приращение выходного параметра к большому приращению входного параметра даст большое значение коэффициента, а значит, оценка весомости влияния параметров несоосности статора и ротора на основные электротехнические и электромеханические характеристики будет иметь однозначный характер.

2.5 Выводы к главе 2

В главе проведен анализ работ, затрагивающих проблему взаимосвязи геометрических размерных параметров трехфазных синхронных электрических машин, работающих в генераторном режиме, с их основными электротехническими и электромеханическими характеристиками, в итоге выявлены недостатки этих работ, главными из которых выступают отсутствие

учета влияния несоосности статора и ротора на формирование основных электротехнических и электромеханических характеристик, а также отсутствие учета многофакторного влияния на формирование несоосности статора и ротора при осуществлении технологического процесса.

Разработана математическая модель, позволяющая устанавливать взаимосвязи между размерными параметрами, определяющими несоосность статора и ротора и основными электротехническими и электромеханическими характеристиками АГ. Связующим звеном между несоосностью статора и ротора и основными электротехническими и электромеханическими характеристиками выступает выражение (2.22), учитывающее геометрические особенности конструкции ротора АГ.

С использованием основных положений метода Монте-Карло разработан вероятностный расчетно-статистический инструмент для прогнозирования стабильности основных электротехнических и электромеханических характеристик АГ в зависимости от стабильности технологического процесса.

Таким образом, результаты работы, полученные в этой главе, следует заложить в основу разрабатываемой в главе 3 диссертации комплексной программы для установления взаимосвязи несоосности статора и ротора с основными электротехническими и электромеханическими характеристиками АГ.

3 Разработка комплексной программы для установления влияния несоосности статора и ротора автомобильного генератора на его основные электротехнические и электромеханические характеристики

3.1 Концепция комплексной программы

Перед созданием комплексной программы для установления взаимосвязи параметра, определяющего несоосность статора и ротора АГ с его основными электротехническими и электромеханическими характеристиками, (далее – программа) необходимо определиться с методом, в соответствии с которой она будет реализована [16, 55, 75].

При построении алгоритмов программы следует использовать стандартную методику расчета основных характеристик АГ [3, 7, 40, 46], с интегрированной в нее математической моделью, разработанной в главе 2 диссертации. Для установления влияния параметра несоосности статора и ротора генератора в программу следует внедрить стандартную методику расчета вероятности безотказной работы подшипниковых узлов АГ. Значит, при построении алгоритма программы следует прибегнуть к методу численного моделирования с использованием пакета прикладных программ [16], например, пакета MATLAB/Simulink. [16, 55, 75].

Реализовать программу следует в виде блочной структуры (рисунок 3.1) [6, 10, 36].

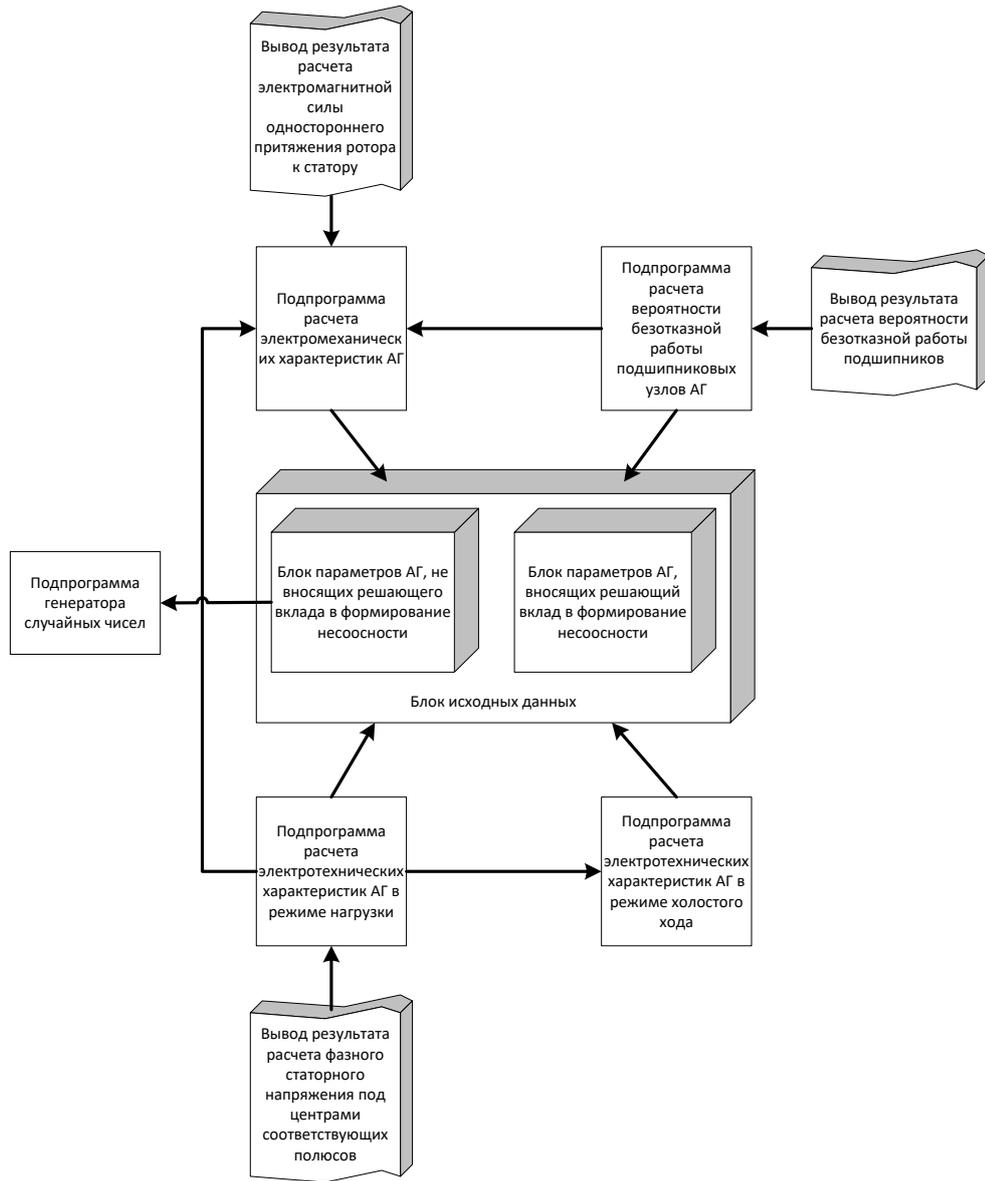


Рисунок 3.1 – Структура программы

Программа должна включать блок исходных данных, в котором содержится информация, необходимая для установления взаимосвязи параметра, определяющего несоосность статора и ротора АГ с его основными электротехническими и электромеханическими характеристиками (наименования и значения исходных данных приведены в таблице 3.1), а также пять подпрограмм, последовательно выполняющих расчеты. При запуске программы подпрограмма для расчета основных электротехнических характеристик АГ в режиме холостого хода отправляет запрос в блок исходных данных, с использованием запрошенной информации рассчитываются МДС обмотки

возбуждения, магнитный поток и индукция поля возбуждения, а также фазное статорное напряжение. Далее подпрограмма для расчета основных электротехнических характеристик АГ в режиме нагрузки отправляет запросы в блок исходных данных и в подпрограмму для расчета основных электротехнических характеристик АГ в режиме холостого хода для получения информации, необходимой для определения нужных параметров. После получения нужной информации подпрограмма определяет: фазное статорное напряжение АГ и равнодействующую магнитной индукции. Результаты, рассчитанные подпрограммой основных электротехнических характеристик АГ в режиме нагрузки, запрашиваются подпрограммой для расчета основной электромеханической характеристики АГ, существенно влияющей на вероятность безотказной работы подшипниковых узлов АГ – электромагнитной силы одностороннего притяжения ротора к статору с учетом силы натяжения приводного ремня генератора. Затем подпрограмма для расчета вероятности безотказной работы подшипниковых узлов АГ запрашивает результаты расчета электромагнитной силы одностороннего притяжения ротора к статору, используя которые она выполняет расчет. В программу интегрирована подпрограмма генератора случайных чисел, в которую посылается запрос блоком параметров АГ, вносящих решающий вклад в формирование несоосности статора и ротора, таким образом, в программе реализуется вероятностный расчетно-статистический эксперимент по методу Монте-Карло. Для вывода результатов расчета в программу включены соответствующие блоки.

Таблица 3.1 – Параметры, учитываемые в комплексной программе для установления взаимосвязи между параметром, определяющим несоосность статора и ротора АГ и его основными электротехническими и электромеханическими характеристиками

№	Наименование параметра	Буквенное обозначение	Значение, м
Размерные параметры, не влияющие на формирование несоосности статора и ротора			
1	Наружный диаметр статора	D_n	0,124
2	Длина статора	l_i	0,0078
3	Длина вылета якоря	l_{ia}	0,056
4	Высота паза	h_{sh}	$1,5 \cdot 10^{-3}$
5	Высота паза занятая обмоткой	h_1	0,0095
6	Высота паза незанятая обмоткой	h_2	0,004
7	Радиус скругления внутренней стенки паза	a_1	0,0042
8	Ширина дна паза	b_{dp}	0,05 м
9	Ширина шлица паза	b_{sh}	0,0027 м
10	Высота зубца статора	h_z	0,012 м
11	Полюсное деление статора	τ	0,024 м
12	Зубцовое деление статора	t_z	0,0078 м
13	Шаг в долях от полюсного деления	β	0,08865
14	Номинальный ВЗ	δ	0,00365 м
15	Диаметр катушки возбуждения	D_k	$65 \cdot 10^{-3}$ м
16	Число витков статорной обмотки	$\omega_{ст}$	54
17	Число витков обмотки возбуждения	$\omega_{ОВ}$	400
18	Максимальная ширина полюсного наконечника ротора	b_{pmax}	0,024 м
19	Внутренний диаметр полюсной системы ротора	D_m	0,068391 м
20	Число полюсов ротора	p	12
21	Число пазов на полюс и фазу	q_a	1
22	Длина полюса ротора	$l_{п}$	0,02541 м
23	Высота сборочного кольца	h_k	0,011 м

Продолжение таблицы 3.1

24	Длина втулки	L_{vt}	0,02895 м
25	Диаметр втулки	D_{vt}	0,04287 м
26	Расстояние от конца вала до точки приложения электромагнитной силы одностороннего притяжения ротора к статору	b	0,065 м
27	Расстояние от конца вала до точки приложения силы тяжения подшипника	c	0,025 м
28	Расстояние между подшипниками	l	0,1 м
29	Длина контактных колец	$l_{кк}$	0,017 м
30	Диаметр контактных колец	$D_{кк}$	0,015 м
31	Радиус шкива	r	0,055 м
32	Погонная масса ремня	$m_{п}$	0,60
33	Количество ремней	K	1
Размерные параметры, влияющие на формирование несоосности статора и ротора			
34	Внутренний диаметр статора	D_i	0,08933 м
35	Диаметр ротора	D_p	0,08865 м
36	Смещение геометрической оси ротора относительно геометрической оси статора	ε	1,5-12,0 мкм
Коэффициенты			
37	Коэффициент полюсного перекрытия	α_i	0,7
38	Коэффициент типа подшипника	k	3
39	Коэффициент, характеризующий режим работы ЭМП	k_{σ}	1,2
40	Коэффициент скоса	$k_{ск}$	0,95
41	Коэффициент типа ЭМП	a_2	61
42	Коэффициент передачи момента	$k_{п}$	1,8
43	Коэффициент угла обхвата ремня	C_a	0,83
44	Коэффициент длины ремня	C_c	0,85

Продолжение таблицы 3.1

45	Коэффициент динамической нагрузки ремня	C_p	0,8
46	Обмоточный коэффициент	$k_{об}$	1,0
47	Коэффициент мощности	$\cos \varphi$	0,95
Параметры отказоустойчивости			
48	Время гарантийной эксплуатации автомобиля	T	27220 ч.
49	Грузоподъемность переднего подшипника, Н	$C_{пп}$	7500 Н
50	Грузоподъемность переднего подшипника, Н	$C_{зп}$	4300
Параметры материалов и окружающей среды			
51	Рабочая установившаяся температура	t	90 °С
52	Магнитная проницаемость воздуха	μ_0	$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м
53	Активное сопротивление статорной обмотки	r_0	0,017 Ом
Прочие параметры			
54	Угол поворота ротора	φ	2π
55	Частота вращения ротора	n	5000 об/мин
56	Номинальная передаваемая от ДВС на вал АГ механическая мощность	$P_{мех.ном}$	2,2 кВт
57	Механический момент на валу ротора	M_2	1,6 Н·м
58	Электрическая активная нагрузка	r_H	0,35 Ом

Следует оговорить основные допущения при разработке программы:

- 1) частота вращения ротора не изменяется во времени;
- 2) подключенная к АГ нагрузка не изменяется по величине;
- 3) рабочая температура АГ постоянна;
- 4) размерные параметры активной зоны АГ не имеют отклонений.

3.2 Разработка комплексной программы для установления влияния несоосности статора и ротора автомобильного генератора на его основные электротехнические и электромеханические характеристики

На основе предложенной в п. 3.1 концепции с использованием пакета прикладных программ MATLAB/Simulink, разработана программа для установления взаимосвязи между параметром, определяющим несоосность статора и ротора АГ с его основными электротехническими и электромеханическими характеристиками с учетом оговоренных в предыдущем параграфе допущений. Интерфейс программы представлен на рисунке 3.2.

Далее следует дать описание алгоритмов, при помощи которых функционируют подпрограммы.

Первой является подпрограмма для расчета основных электротехнических характеристик АГ в режиме холостого хода, ее интерфейс приведен на рисунке 3.3.

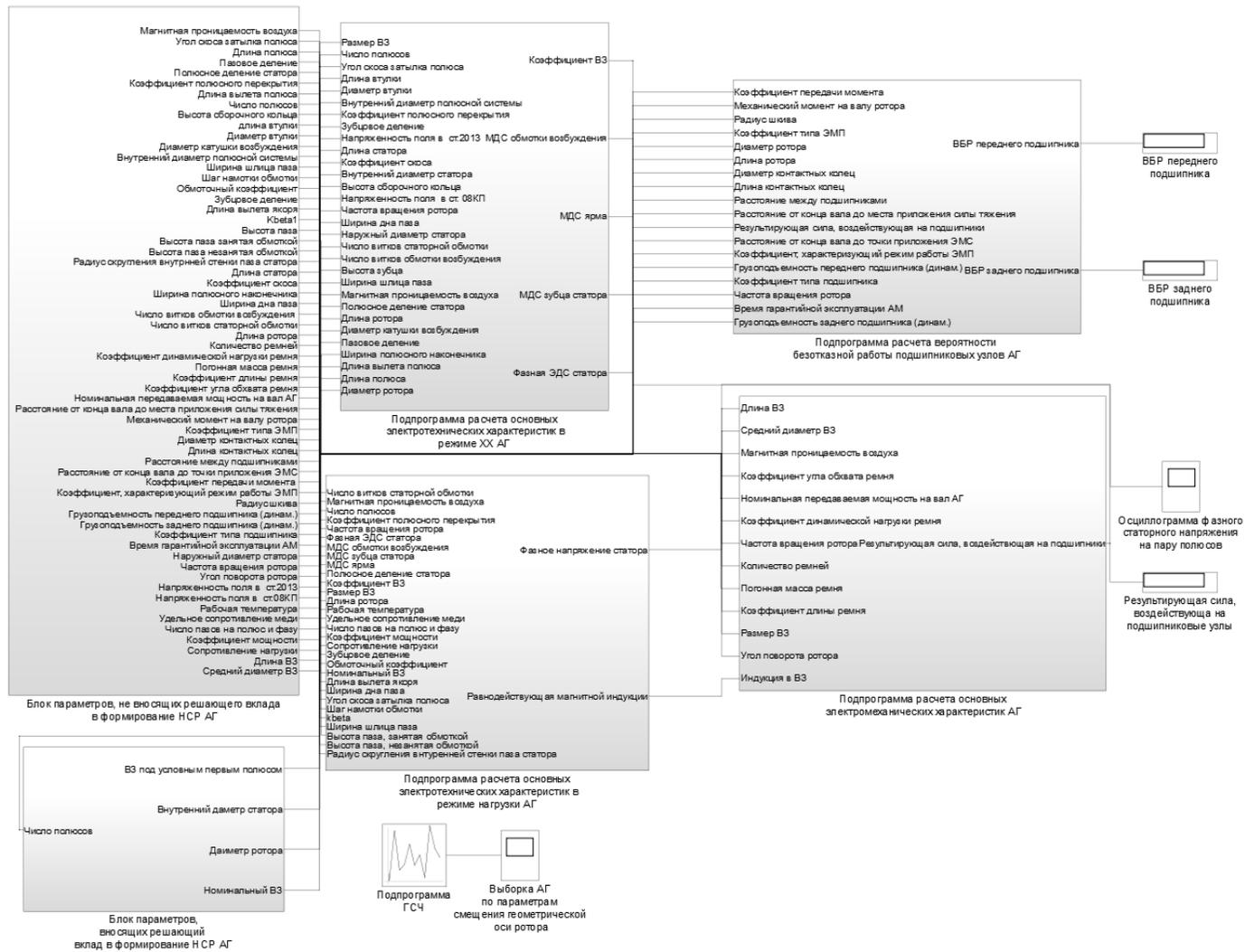


Рисунок 3.2 – Интерфейс программы для установления взаимосвязи между несоосностью статора и ротора и основными электротехническими и электромеханическими характеристиками АГ

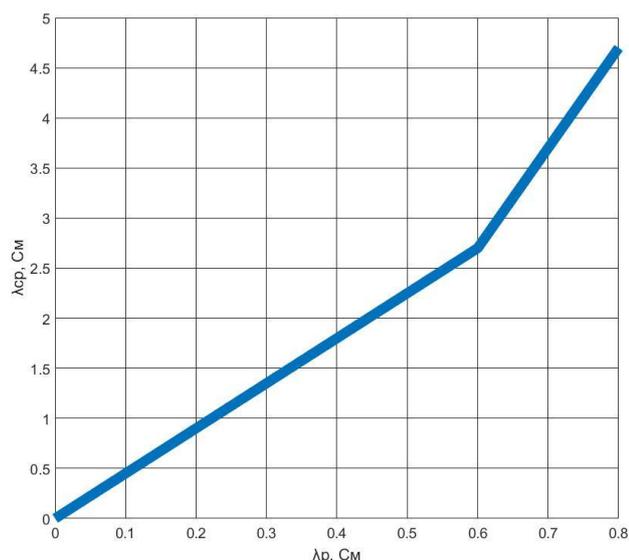


Рисунок 3.4 – К определению коэффициента удельной магнитной проводимости

Проводимость поля рассеяния поперек листов статора определяется выражением (3.2) [31]:

$$G_{\sigma\pi} = \mu_0 D_p \lambda_{\sigma\pi}, \quad (3.2)$$

где $\lambda_{\sigma\pi}$ – коэффициент удельной магнитной проводимости поля рассеяния поперек листов статора.

Коэффициент удельной магнитной проводимости поля рассеяния поперек листов статора записывается формулами (3.3), (3.4), (3.5), (3.6) [31]:

$$\lambda_{\sigma\pi} = \frac{1}{p} \cdot Q_0 \cdot (W_0, \alpha_m) - \frac{2 \cdot \beta_1}{\pi + 2 \cdot \beta_1} \cdot Q_0 \cdot (W_S, \alpha_m) - \frac{2 \cdot \beta_1}{\pi + 2 \cdot \beta_1} \cdot Q_0 \cdot (W_m, \alpha_m). \quad (3.3)$$

Для каждой Q_0 определяется своя W (3.4), (3.5), (3.6) [35]:

$$W_0 = \frac{\pi \cdot (2 \cdot \alpha_m)}{4 \cdot p \cdot \delta_D} \quad (3.4)$$

$$W_S = \frac{W_0}{\left(\frac{\pi \cdot \lambda_p}{2 \cdot \delta_D} - 1\right)} \quad (3.5)$$

$$W_m = \frac{W_0}{\frac{(\pi + 2 \cdot \beta_1) \cdot \lambda_{\text{пц}} + \pi \cdot \lambda_p}{2 \cdot \delta_D \cdot \cos \beta_1} + 1} \quad (3.6)$$

где $\lambda_{\text{пц}}$ – относительная длина скоса затылка полюса; δ_D – относительная величина воздушного зазора.

Относительная длина скоса затылка полюса определяется как отношение длины скоса затылка к диаметру ротора (3.7) [31]:

$$\lambda_{\text{пц}} = \frac{l_{\text{пц}}}{D_p}. \quad (3.7)$$

Относительная величина воздушного зазора определяется как отношение размера ВЗ к диаметру ротора (3.8) [31]:

$$\delta_D = \frac{\delta}{D_p}. \quad (3.8)$$

Магнитная проводимость рассеяния вокруг электромеханического преобразователя определяется выражением (3.9) [31]:

$$G_{\sigma_{\text{вн}}} = \frac{1}{p} \cdot \mu_0 \cdot D_p \cdot \lambda_{\sigma_{\text{вн}}}, \quad (3.9)$$

где $G_{\sigma_{\text{вн}}}$ – магнитная проводимость рассеяния вокруг электромеханического преобразователя, Гн; $\lambda_{\sigma_{\text{вн}}}$ – коэффициент удельной магнитной проводимости внешнего рассеяния.

Коэффициент удельной магнитной проводимости внешнего рассеяния определяется выражением (3.10) [31]:

$$\lambda_{\sigma_{\text{вн}}} = \ln \frac{\frac{\pi}{\lambda_{\text{и}}}}{2 \cdot \left(1 - \frac{\pi}{\lambda_{\text{и}}}\right)}. \quad (3.10)$$

где $\lambda_{\text{и}}$ – относительная длина индуктора.

Относительная длина ротора определяется соотношением (3.11) [31]:

$$\lambda_{\text{и}} = \frac{l_{\text{и}}}{D_p}. \quad (3.11)$$

где $l_{\text{и}}$ – длина индуктора, м.

Длина индуктора складывается из длины втулки и удвоенной высоты сборочного кольца (3.12) [31]:

$$l_{\text{и}} = l_{vt} + 2 \cdot h_k. \quad (3.12)$$

Магнитная проводимость катушки возбуждения определяется выражением (3.13) [31]:

$$G_{\sigma_k} = \frac{1}{p} \cdot \mu_0 \cdot \lambda_{\sigma_k}, \quad (3.13)$$

где λ_{σ_k} – коэффициент удельной магнитной проводимости катушки возбуждения.

Вышеуказанный коэффициент определяется выражением (3.14) [31]:

$$\lambda_{\sigma_k} = \frac{\pi \cdot (2 \cdot D_k^2 - D_k \cdot D_{vt} - D_{vt}^2)}{D_p \cdot l_{vt}}. \quad (3.14)$$

Магнитная проводимость аксиального рассеяния определяется выражением (3.15) [31]:

$$G_{\sigma a} = \frac{1}{p} \cdot \mu_0 \cdot \lambda_{\sigma a} \quad (3.15)$$

где $\lambda_{\sigma a}$ – коэффициент удельной магнитной проводимости аксиального рассеяния.

Коэффициент удельной магнитной проводимости аксиального рассеяния определяется выражением (3.16) [31]:

$$\lambda_{\sigma a} = \frac{\pi \cdot (D_m^2 - D_k^2)}{4 \cdot D_p \cdot l_{vt}}. \quad (3.16)$$

Выражение коэффициента удельной магнитной проводимости рассеяния от высших гармонических составляющих записывается в виде формулы (3.17) [31]:

$$\lambda_z = \frac{t_z}{9,5 \cdot \delta \cdot k_\delta} \cdot \frac{2 \cdot \alpha_i}{1 + k_q} \cdot \xi_{1M}. \quad (3.17)$$

Коэффициент ξ_{1M} определяется выражением (3.18) [31]:

$$\xi_{1M} = k_{\beta 1} \cdot (1 + 2 \cdot \Delta_z) - k_0^2. \quad (3.18)$$

Коэффициент k_q определяется выражением (3.19) [31]:

$$k_q = (k_{q0} + k_{q1}) \cdot \frac{1 + k_\delta}{2}. \quad (3.19)$$

Коэффициент удельной магнитной проводимости лобового рассеяния определяется выражением (3.20) [31]:

$$\lambda_l = \frac{0,84 \cdot (l_{al} - 0,64 \cdot \tau)}{l_i}. \quad (3.20)$$

Коэффициент удельной магнитной проводимости пазового рассеяния определяется выражением (3.21) [31]:

$$\lambda_{\pi} = \frac{h_1}{2 \cdot \beta_1} \cdot k_\beta + (0,758 \cdot \frac{h_{sk}}{2 \cdot a_1} + \frac{h_2}{a_1} + \frac{h_{sh}}{b_{sh}}). \quad (3.21)$$

Описав алгоритм для учета параметров рассеяния активной зоны АГ, можно переходить к описанию алгоритма для расчета параметров характеристики холостого хода АГ.

МДС воздушного зазора определяется выражением (3.22) [7]:

$$F_\delta = 1,6 k_\delta \delta B_\delta, \quad (3.22)$$

где F_δ – магнитное напряжение воздушного зазора, А; k_δ – коэффициент воздушного зазора.

Для определения МДС воздушного зазора необходим коэффициент воздушного зазора, определяющийся выражением (3.23) [7]:

$$k_\delta = \frac{t_z + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_z}{b_{sh}}}{t_z + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_z}{b_{sh}} - b_{sh}}. \quad (3.23)$$

Следует определить индукцию в зубце статора по выражению (3.23) [7]:

$$B_z = \frac{B_\delta \cdot t_z}{k_c \cdot b_z}. \quad (3.23)$$

Магнитное напряжение зубца статора определяется выражением (3.24) [7]:

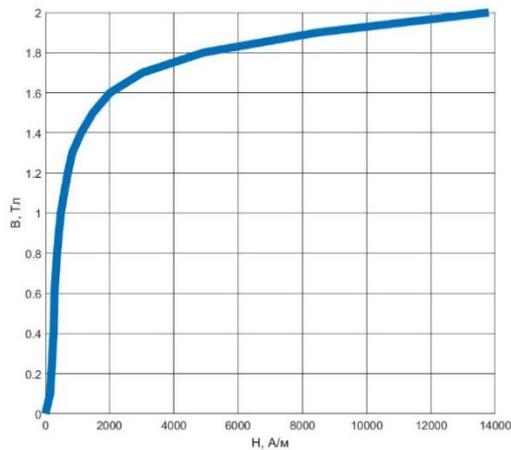
$$F_z = 2h_z H_z. \quad (3.24)$$

где H_z – напряженность поля зубцов якоря, А/м.

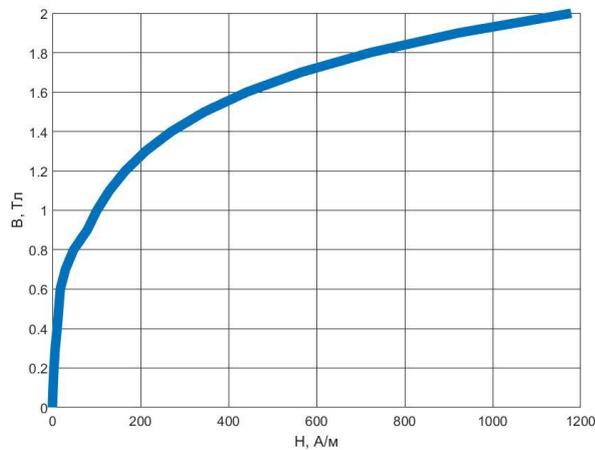
Для определения напряженности поля в стальных элементах конструкции активной зоны следует использовать кривые намагничивания для сталей 2013 и 08КП, из которых изготовлены элементы конструкции активной зоны генератора [6, 15, 68]. Кривые намагничивания для этих сталей приведенные на рисунке 3.4 (рисунок 3.5 а – кривая намагничивания стали 2013, рисунок 3.5 б – кривая намагничивания стали 08КП), а в таблице 3.2 приведено сопоставление элементов конструкции активной зоны АГ с марками стали, из которой они изготовлены.

Таблица 3.2 – Сопоставление элементов конструкции активной зоны АГ с марками стали

Элемент конструкции	Марка стали
Ярмо	2013
Полюсный наконечник	08КП
Зубец	2013
Втулка	08КП
Сборочное кольцо	08КП



а)



б)

Рисунок 3.5 – Кривые намагничивания сталей 2013 и 08КП

Далее следует записать выражение индукции в ярме статора (3.25) [7]:

$$B_{\text{я}} = \frac{\Phi_{\delta}}{2 \cdot S_j}, \quad (3.25)$$

где S_j – площадь ярма, мм^2 .

Площадь ярма статора вычисляется при помощи выражения (3.26) [7]:

$$S_j = [0,5 \cdot (D_{\text{н}} - D_i) - h_z] \cdot l_i k_c. \quad (3.26)$$

МДС ярма статора определяется выражением (3.27) [7]:

$$F_j = l_j H_j, \quad (3.27)$$

где l_j – средняя длина магнитной силовой линии в ярме статора, м.

Средняя длина магнитной силовой линии в ярме статора определяется соотношением (3.28) [7]:

$$l_j = \frac{\pi \cdot (D_H - h_j)}{2 \cdot p}, \quad (3.28)$$

где h_j – высота ярма, мм;

МДС ВЗ определяется выражением (3.29) [3]:

$$F_\delta = 1,6 \cdot k_\delta \cdot \delta \cdot B_\delta \quad (3.29)$$

Коэффициент ВЗ определяется выражением (3.30) [31]:

$$k_\delta = \frac{t_z + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_z}{b_{sh}}}{t_z + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_z}{b_{sh}} - b_{sh}} \quad (3.30)$$

С использованием МДС ВЗ, зубцов статора и ярма статора определяется МДС стали статора (3.31) [31]:

$$u_{11} = F_\delta + F_z + F_j. \quad (3.31)$$

Используя формулу (3.29) и формулу (3.1) следует определить магнитный поток рассеяния полюсных наконечников ротора АГ (3.32) [31]:

$$\Phi_{\sigma\pi} = u_{11} G_{\sigma\pi}. \quad (3.32)$$

Зная поток рассеяния полюсных наконечников ротора, следует определить магнитный поток в расчетном сечении полюса по выражению (3.33) [31]:

$$\Phi_\pi = \Phi_\delta + \Phi_{\sigma\pi}. \quad (3.33)$$

Индукция в расчетном сечении полюса определяется выражением (3.34) [31]:

$$B_\pi = \frac{\Phi_\pi}{S_p}. \quad (3.34)$$

где S_p – площадь расчетного сечения полюсного наконечника ротора, мм².

Расчетное сечение полюса определяется выражением (3.35) [31]:

$$S_p = 0,5 \cdot (D_p - D_m) \cdot b_{\pi max}. \quad (3.35)$$

Наконец, МДС полюса ротора определяется выражением (3.36) [31]:

$$F_\pi = 2l_\pi H_\pi, \quad (3.36)$$

где l_π – средняя длина магнитной силовой линии в полюсе, м.

Средняя длина магнитной силовой линии полюса ротора определяется выражением (3.37) [31]:

$$l_{\Pi} = \frac{0,5 \cdot l_{vt}}{\cos \beta}. \quad (3.37)$$

Зная магнитное напряжение стали статора и магнитное напряжение полюсов ротора следует определить магнитное напряжение рассеивающих поверхностей (3.38) [31]:

$$u_{22} = u_{11} + F_{\Pi}. \quad (3.38)$$

Используя значения проводимости рассеяния поперек листов статора и МДС рассеивающих поверхностей, следует определить магнитный поток рассеяния изгиба полюсного наконечника по выражению (3.39) [31]:

$$\Phi_{\sigma\pi} = u_{22} G_{\sigma\pi}, \quad (3.39)$$

где $\Phi_{\sigma\pi}$ – магнитный поток рассеяния изгиба полюсного наконечника, Вб.

Зная поток рассеяния изгиба полюсного наконечника можно определить магнитный поток полюсного наконечника (3.40) [31]:

$$\Phi_{\text{изг.п}} = \Phi_{\Pi} + \Phi_{\sigma\pi}. \quad (3.41)$$

Индукция в расчетном сечении изгиба полюсного наконечника определяется по выражению магнитного потока в изгибе полюсного наконечника (3.42) [31]:

$$\Phi_{\text{изг.п}} = \frac{\Phi_{\text{изг.п}}}{S_{\text{изг.п}}}. \quad (3.42)$$

Для определения индукции в расчетном сечении изгиба полюсного наконечника предварительно необходимо определить площадь расчетного сечения полюсного наконечника (3.43) [7]:

$$S_{\text{изг.п}} = b_{p.max} \cdot \sqrt{\frac{(D_p - D_m)^2}{2} + h_k^2}. \quad (3.43)$$

Наконец, можно определить МДС полюсного наконечника по выражению (3.44) [7]:

$$F_{\text{изг.п}} = 2l_{\text{изг.п}} H_{\text{изг.п}}, \quad (3.44)$$

где $l_{\text{изг.п}}$ – средняя длина магнитной силовой линии изгиба полюсного наконечника, м.

Средняя длина магнитной силовой линии в изгибе полюсного наконечника определяется выражением (3.45) [7]:

$$l_{\text{изг.п}} = \frac{\pi \cdot h_k}{4}. \quad (3.45)$$

Используя МДС рассеивающих поверхностей и МДС изгиба полюсного наконечника следует определить МДС рассеивающих поверхностей u_{33} по выражению (3.46) [31]:

$$u_{33} = u_{22} + F_{\text{изг.п}}. \quad (3.46)$$

По значениям МДС рассеивающих поверхностей u_{33} и проводимости внешнего рассеяния определяется магнитный поток внешнего рассеяния с использованием выражения (3.47) [31]:

$$\Phi_{\sigma\text{вн}} = u_{33} G_{\sigma\text{вн}}. \quad (3.47)$$

Далее следует определить магнитный поток в сборочном кольце по формуле (3.48) [7]:

$$\Phi_k = B_k S_k. \quad (3.48)$$

где S_k – расчетное сечение сборочного кольца, мм^2 .

Расчетное сечение сборочного кольца определяется выражением (3.49) [7]:

$$S_k = \frac{\pi \cdot D_{vt} \cdot h_k}{p}. \quad (3.49)$$

МДС сборочного кольца определяется выражением (3.50) [7]:

$$F_k = 2l_k H_k, \quad (3.50)$$

где l_k – средняя длина магнитной силовой линии сборочного кольца, м.

Средняя длина магнитной силовой линии сборочного кольца определяется выражением (3.51) [7]:

$$l_k = 0,5 \cdot (D_m - D_{vt}). \quad (3.51)$$

Далее следует определить МДС рассеивающих поверхностей u_{44} по выражению (3.52) [31]:

$$u_{44} = u_{33} + F_k. \quad (3.52)$$

Следует определить магнитный поток рассеяния и аксиальный магнитный поток катушки возбуждения, пользуясь выражением (3.53) [31]:

$$\Phi_{\sigma k} + \Phi_{\sigma a} = u_{44} \cdot (G_{\sigma k} + G_{\sigma a}). \quad (3.53)$$

Зная магнитный поток рассеяния, аксиальный магнитный поток рассеяния катушки возбуждения и магнитный поток сборочного кольца, можно определить магнитный поток втулки по выражению (3.54) [31]:

$$\Phi_{vt} = \Phi_k + \Phi_{\sigma k} + \Phi_{\sigma a}. \quad (3.54)$$

Используя значение магнитного потока втулки, следует определить индукцию изгиба втулки по выражению (3.55) [31]:

$$B_{\text{изг.}vt} = \frac{\Phi_{vt}}{S_{\text{изг}vt}}, \quad (3.55)$$

где $S_{\text{изг}vt}$ – расчетное сечение изгиба втулки, мм^2 .

Расчетное сечение изгиба втулки определяется выражением (3.56) [6]:

$$S_{\text{изг}vt} = \pi \cdot D_{vt} \cdot \frac{\sqrt{D_{vt}^2 + 4 \cdot h_k^2}}{4}. \quad (3.56)$$

Магнитное напряжение изгиба втулки определяется выражением (3.57) [6]:

$$F_{\text{изг.}vt} = 2l_{\text{изг.}vt}H_{\text{изг.}vt}. \quad (3.57)$$

где $l_{\text{изг.}vt}$ – средняя длина магнитной силовой линии в изгибе втулки, м.

Средняя длина магнитной силовой линии в изгибе втулки определяется выражением (3.58) [6]:

$$l_{\text{изг.}vt} = \frac{\sqrt{4 \cdot h_k^2 + D_{vt}^2}}{4}. \quad (3.58)$$

Индукция в стыке втулки с полюсной системой определяется выражением (3.59) [31]:

$$B_{st} = \frac{\Phi_{vt}}{S_{st}}. \quad (3.59)$$

где S_{st} – площадь стыка, мм^2 .

Площадь стыка определяется формулой (3.60) [6]:

$$S_{st} = \frac{\pi \cdot D_{vt}^2}{4 \cdot p}. \quad (3.60)$$

МДС втулки определяется выражением (3.61) [31]:

$$F_{vt} = l_{vt}H_{vt}. \quad (3.61)$$

Наконец, зная МДС всех участков магнитной цепи АГ, можно определить МДС обмотки возбуждения, используя выражение (3.62) [31]:

$$F_B = u_{44} + F_{изг.vt} + F_{st} + F_{vt}. \quad (3.62)$$

Используя значение МДС обмотки возбуждения, определяется ток возбуждения по выражению (3.63) [3]:

$$i_B = \frac{F_B}{2 \cdot \omega_{\Pi}}. \quad (3.63)$$

Для определения индукции поля возбуждения с учетом несоосности статора и ротора АГ следует использовать выражение (2.25), приведенное в главе 2 диссертации.

Теперь следует дать описание алгоритма подпрограммы для расчета основных электротехнических характеристик АГ в режиме нагрузки. Подпрограмма приведена на рисунке 3.6.

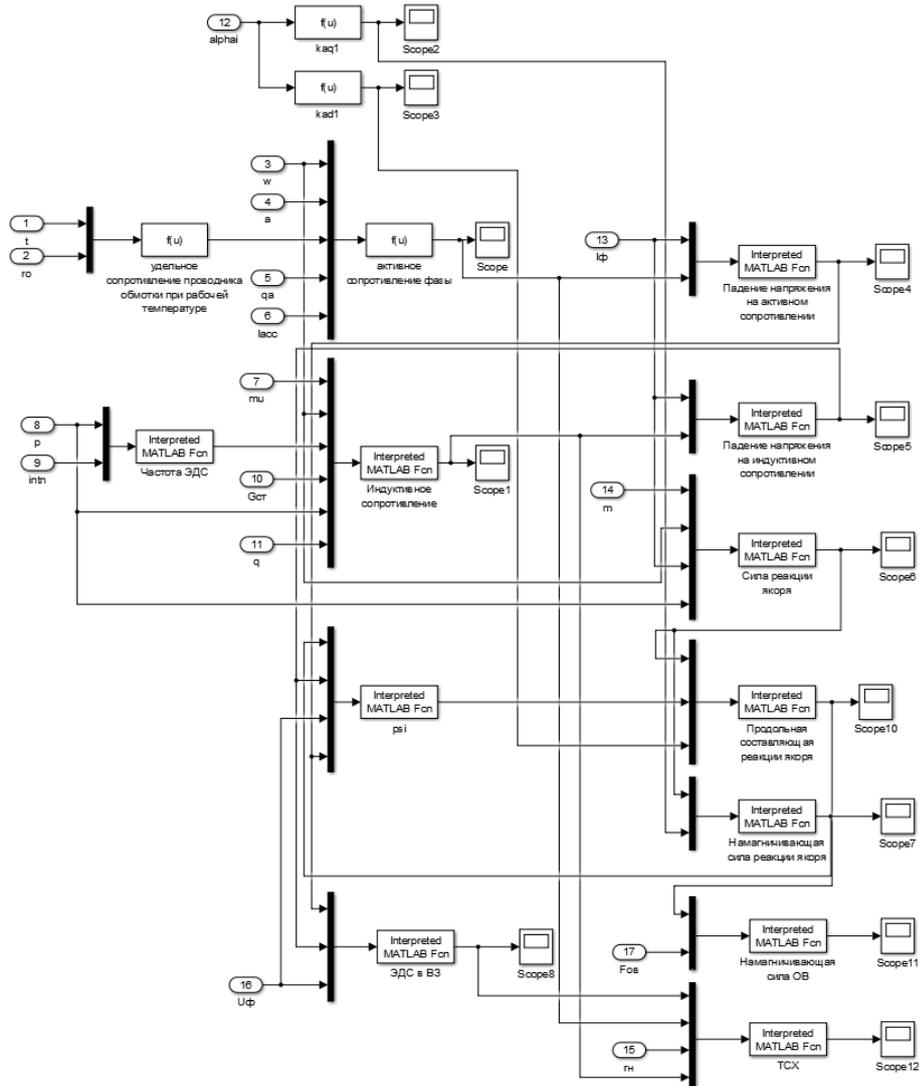


Рисунок 3.6 – Подпрограмма для расчета основных электротехнических характеристик АГ в режиме нагрузки

Следует определить активное сопротивление фазы статорной обмотки, которое определяется формулой (3.64) [31]:

$$r_{at} = \frac{\rho_{at} \cdot l_{acc} \cdot \omega_{\phi}}{q_a + a}, \quad (3.64)$$

где ρ_{at} – удельное сопротивление эффективного проводника обмотки статора, при рабочей температуре АГ, Ом·м.

Удельное сопротивление эффективного проводника обмотки статора определяется выражением (3.65) [31]:

$$\rho_{at} = \rho \cdot (1 + 0,004 \cdot (t - 20)), \quad (3.65)$$

где ρ – удельное сопротивление материала статорной обмотки, Ом·м²/м.

Далее следует определить индуктивное сопротивление рассеяния статорной обмотки с применением формулы (3.66) [9]:

$$x_s = \frac{4 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot f \cdot \omega_{\phi}^2 \cdot \Sigma \lambda_{ст}}{p \cdot q} \quad (3.66)$$

Зная активное сопротивление статорной обмотки, можно определить падение напряжения на нем, которое определяется формулой (3.67) [31]:

$$U_r = I_{\phi} \cdot r_{at}, \quad (3.67)$$

где I_{ϕ} – фазный ток АГ, А.

Зная индуктивное сопротивление рассеяния статорной обмотки, можно определить падение напряжения на нем, которое определяется формулой (3.68) [31]:

$$U_x = I_{\phi} \cdot x_s. \quad (3.68)$$

Составляющая ЭДС поперечной реакции якоря, совпадающая по направлению с вектором U_r определяется формулой (3.69) [31]:

$$\frac{E_{aq}}{\cos \psi} = \phi \left(\frac{F_{aq}}{\cos \psi} \right). \quad (3.69)$$

где E_{aq} - ЭДС поперечной реакции якоря, В; ψ – угол сдвига фаз; F_{aq} - МДС поперечной реакции якоря.

Выражение $\frac{F_{aq}}{\cos \psi}$ эквивалентно формуле (3.70) [31]:

$$\frac{F_{aq}}{\cos \psi} = F_a \cdot k_{aq}. \quad (3.70)$$

где k_{aq} – коэффициент формы поля поперечной реакции якоря.

Коэффициент формы поля поперечной реакции якоря следует определять по кривым, приведенным в [9].

Полная МДС реакции якоря определяется выражением (3.71) [35]:

$$F_a = \frac{m \cdot \sqrt{2} \cdot k_{06} \cdot \omega_{\phi} \cdot I_{\phi}}{p \cdot n}, \quad (3.71)$$

где m – число фаз статорной обмотки.

Следует записать выражение продольной реакции якоря (3.72) [9]:

$$F_{ad} = \frac{m \cdot \sqrt{2} \cdot k_{06} \cdot \omega_{\phi} \cdot I_d}{p \cdot n}, \quad (3.72)$$

где I_d – ток продольной реакции якоря, А.

Ток продольной реакции якоря определяется выражением (3.73) [9]:

$$I_d = I_{\phi} \cdot \cos \psi, \quad (3.73)$$

где ψ – угол сдвига фаз.

Далее следует записать выражение поперечной реакции якоря (3.74) [9]:

$$F_{aq} = \frac{m \cdot \sqrt{2} \cdot k_{06} \cdot \omega_{\phi} \cdot I_q}{p \cdot n}, \quad (3.74)$$

Ток поперечной реакции якоря определяется выражением (3.75) [9]:

$$I_q = I_{\phi} \cdot \sin \psi, \quad (3.75)$$

Теперь следует записать выражение для определения индукции поля продольной реакции якоря с учетом несоосности в функции угла и времени (3.76):

$$B_{ad}(\varphi, t) = \frac{F_{ad}}{1,6 \cdot 10^6 k_{\delta} k_{\mu} (\delta_{\text{НОМ}} - \varepsilon \cdot \cos \varphi_i)} \cdot \sin \left[\frac{p}{60} (2\pi n t + \Upsilon_{\text{эл}}) \right] \quad (3.76)$$

Далее следует записать выражение для определения индукции поля поперечной реакции якоря с учетом несоосности в функции угла и времени (3.77):

$$B_{aq}(\varphi, t) = \frac{F_{aq}}{1,6 \cdot 10^6 k_{\delta} k_{\mu} (\delta_{\text{НОМ}} - \varepsilon \cdot \cos \varphi_i)} \cdot \sin \left[\frac{p}{60} (2\pi n t + \Upsilon_{\text{эл}}) \right] \quad (3.77)$$

Используя выражение полной МДС якоря индукцию поля реакции якоря можно записать в виде (3.76):

$$B_a(\varphi, t) = \frac{F_a}{1,6 \cdot 10^6 k_{\delta} k_{\mu} (\delta_{\text{НОМ}} - \varepsilon \cdot \cos \varphi_i)} \cdot \sin \left[\frac{p}{60} (2\pi n t + \Upsilon_{\text{эл}}) \right] \quad (3.78)$$

Для определения равнодействующей магнитной индукции следует использовать выражение (3.79):

$$B_{\Sigma}(\varphi, t) = B_a(\varphi, t) + B_{\delta}(\varphi, t) \quad (3.79)$$

Для расчета фазной статорной ЭДС следует использовать выражение (1.5).

Компонентами этого выражения являются сопротивления продольной x_{ad} и поперечной x_{aq} реакции якоря, которые следует определять по формулам (3.80) и (3.81) [9]:

$$x_{ad} = 4mf \frac{\mu_0 \tau l_{\delta}}{\pi k_{\delta} k_{\mu a} \delta} \cdot \frac{\omega_{\text{ст}}^2 k_{0\delta}^2}{p} k_{ad}. \quad (3.80)$$

$$x_{aq} = 4mf \frac{\mu_0 \tau l_{\delta}}{\pi k_{\delta} k_{\mu a} \delta} \cdot \frac{\omega_{\text{ст}}^2 k_{0\delta}^2}{p} k_{aq}. \quad (3.81)$$

где k_{ad} – коэффициент формы поля продольной реакции якоря, определяется по кривым, приведенным в [9].

Алгоритм подпрограммы для расчета основной электромеханической характеристики АГ базируется на выражении (2.37), приведенного в гл. 2 диссертации. Подпрограмма показана на рисунке 3.7.

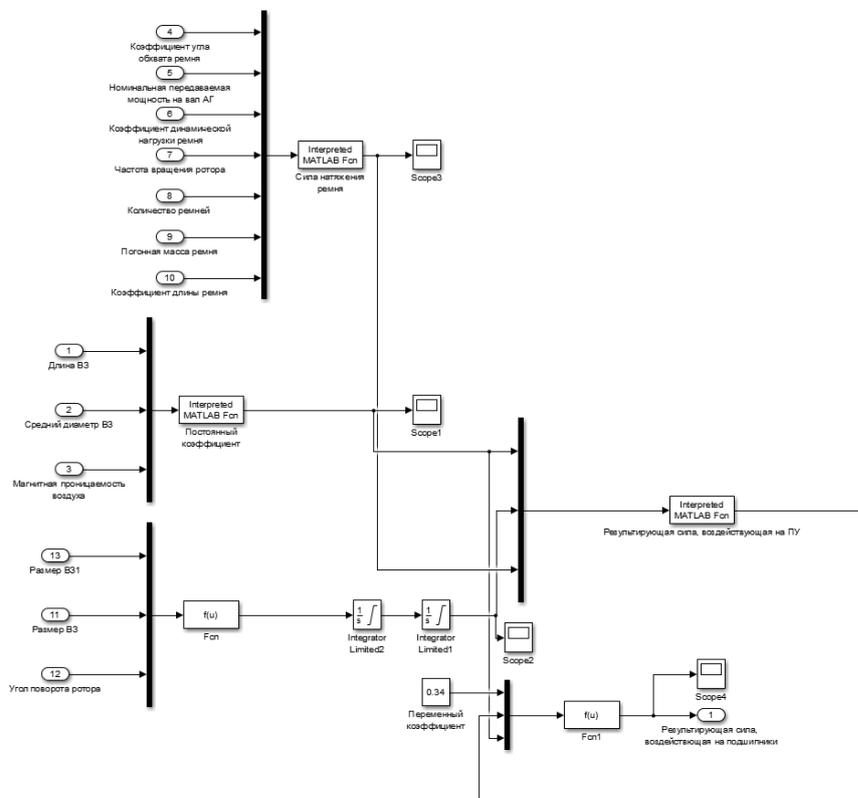


Рисунок 3.7 – Подпрограмма для расчета основной электромеханической характеристики АГ

Для учета силы натяжения приводного ремня генератора в алгоритм введено выражение (3.82) [38]:

$$F_0 = 500 \cdot \frac{(2,5 - C_\alpha) \cdot P_{\text{ном}} \cdot C_p}{C_\alpha \cdot v \cdot K} + m_p \cdot v^2 \quad (3.82)$$

где C_α – угол обхвата ремня, град; $P_{\text{ном}}$ – номинальная передаваемая механическая мощность, Вт; C_p – коэффициент, учитывающий режим работы приводимого механизма; v – скорость ремня, м/с; K – число ремней; m_p – погонная масса ремня, кг/м.

Теперь следует привести алгоритм подпрограммы, для расчета вероятности безотказной работы подшипниковых узлов АГ. Подпрограмма показана на рисунке 3.8.

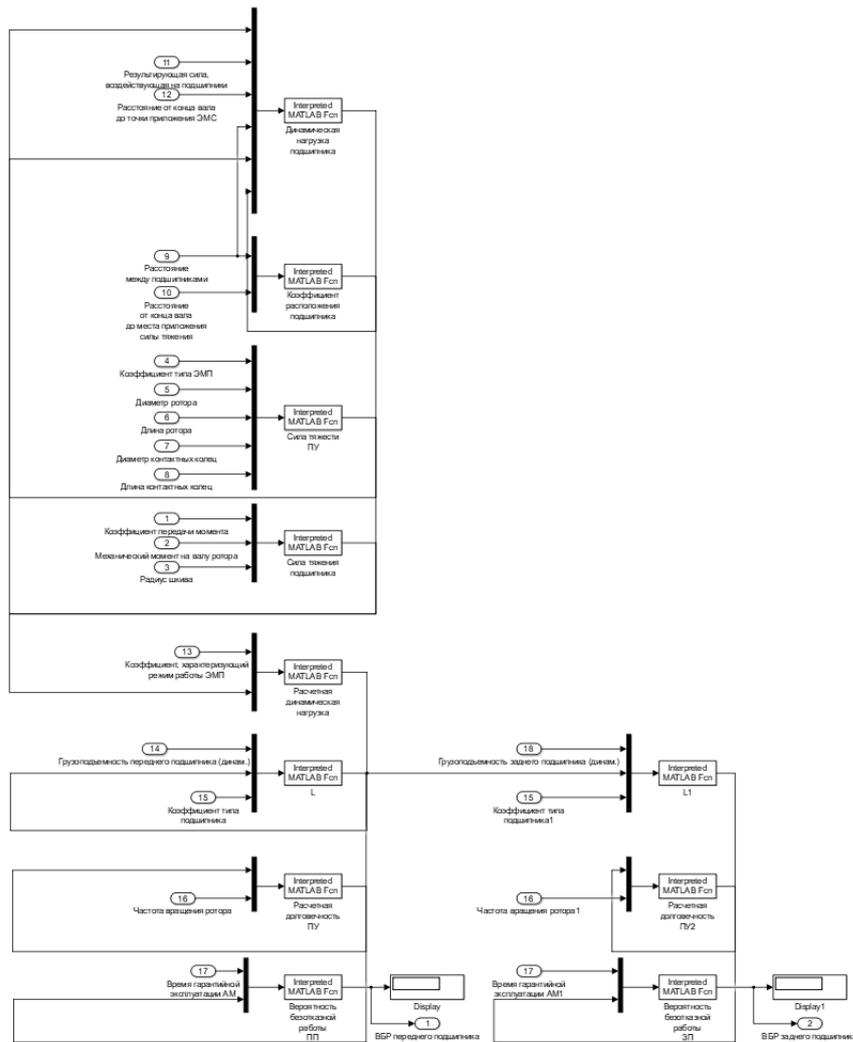


Рисунок 3.8 – Подпрограмма для расчета вероятности безотказной работы подшипниковых узлов АГ

Вероятность отказа подшипникового узла можно оценить при помощи распределения Вейбулла (3.83) [41]:

$$P(T) = e^{\left(-\frac{T}{6,84L_h}\right)^{1,17}}, \quad (3.83)$$

где T – время наработки подшипникового узла АГ, ч; L_h – номинальная долговечность подшипника, ч.

Вероятность отказа подшипникового узла зависит от расчетной долговечности, которая определяется рядом формул (3.84), (3.85) [41]:

$$L_h = \frac{10^6 L}{60n}, \quad (3.84)$$

где n – номинальное число оборотов АГ, об/мин; L – номинальная 90 %-ная долговечность.

$$L = \left(\frac{C}{Q_{\Pi}}\right)^k, \quad (3.85)$$

где C – номинальная динамическая грузоподъемность подшипника, Н; Q_{Π} – эквивалентная динамическая нагрузка подшипника, Н; k – коэффициент, учитывающий тип и качество изготовления подшипника.

Наиболее влиятельным фактором долговечности подшипниковых узлов выступает расчетная динамическая нагрузка (3.86) [41]:

$$Q_{\Pi} = k_{\sigma} R, \quad (3.86)$$

где k_{σ} – коэффициент, учитывающий характер работы ЭМП; R – наибольшая радиальная нагрузка на подшипниковый узел, Н.

В свою очередь, динамическая нагрузка зависит от радиальной нагрузки на подшипниковый узел (3.87) [41]:

$$R = (G + \vec{f}_{\text{ЭМ}}) \frac{b}{l} + F_{\Pi} k_0, \quad (3.87)$$

где G – сила тяжести, действующая на подшипниковый узел, Н; b – расстояние от точки приложения силы тяжести до точки воздействия равнодействующей электромагнитной силы одностороннего притяжения ротора к статору, м; l – расстояние между подшипниковыми узлами, м.

Радиальная нагрузка на подшипниковый узел складывается из силы тяжести, действующей на подшипниковый узел, равнодействующей электромагнитной силы одностороннего притяжения ротора к статору и силы тяжения подшипникового узла.

Коэффициент k_0 учитывает расположение подшипника на валу. Коэффициент записанный в виде формулы (3.88) для переднего подшипника, а коэффициент записанный формулой (3.89) для заднего [41]:

$$k_0 = (l + c)l, \quad (3.88)$$

$$k_0 = \frac{c}{l}. \quad (3.89)$$

Сила тяжести, воздействующая на подшипниковый узел определяется формулой (3.90) [41]:

$$G = (a_2 D_p^2 l_p + 60 D_{\text{кол}} l_{\text{кол}}) \cdot 10^{-6}, \quad (3.90)$$

где a_2 – коэффициент, учитывающий тип ЭМП; $D_{\text{кол}}$ – наружный диаметр коллектора ЭМП, м; $l_{\text{кол}}$ – длина коллектора, м.

Сила тяжения подшипника описывается формулой (3.91) [41]:

$$F_{\text{п}} = \frac{k_{\text{п}} M_2}{r} \cdot 10^{-3} \quad (3.91)$$

где $k_{\text{п}}$ – коэффициент, зависящий от вида механической передачи момента; M_2 – номинальный момент вращения ЭМП, Н·м; r – радиус шкива, м.

С использованием программы получены результаты расчета основных электротехнических и электромеханических характеристик АГ с учетом влияния на них несоосности статора и ротора. Сначала следует проанализировать результаты, полученные с использованием подпрограммы для расчета основных электротехнических характеристик в режиме холостого хода (рисунки 3.9-3.11)

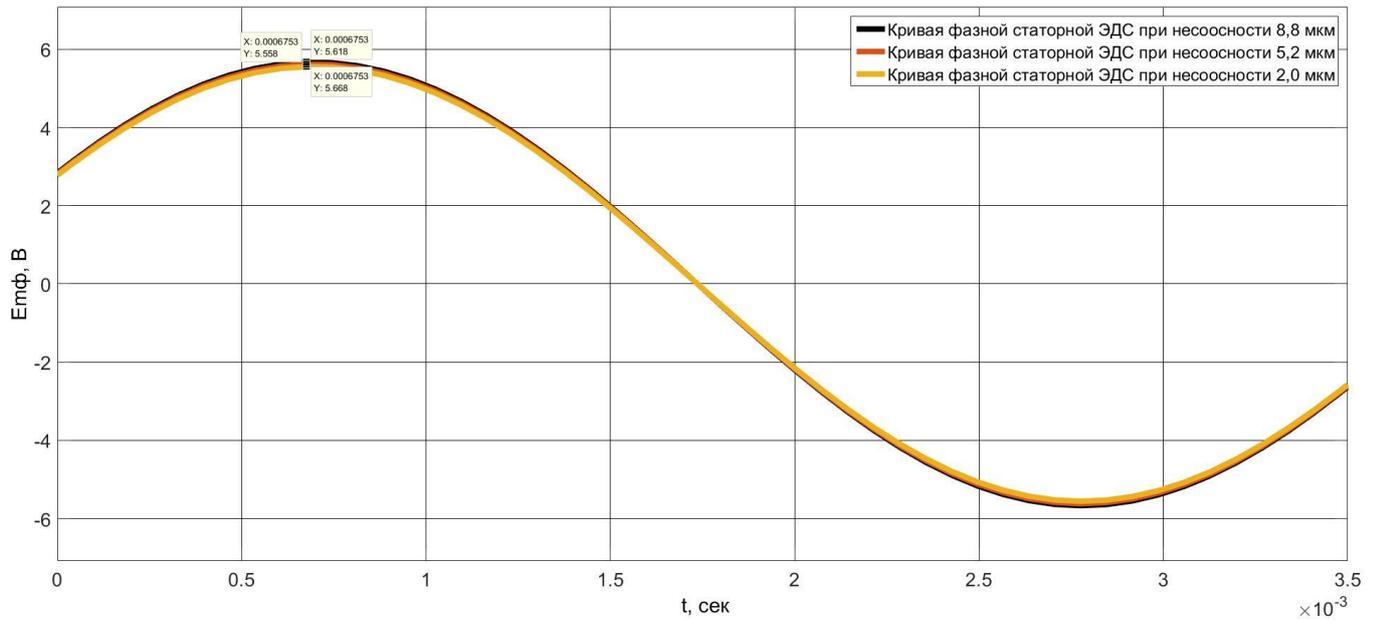


Рисунок 3.9 – Осциллограмма участка кривой фазной статорной ЭДС АГ под центром условного первого полюса с учетом влияния на нее несоосности статора и ротора в точке с минимальным значением ВЗ

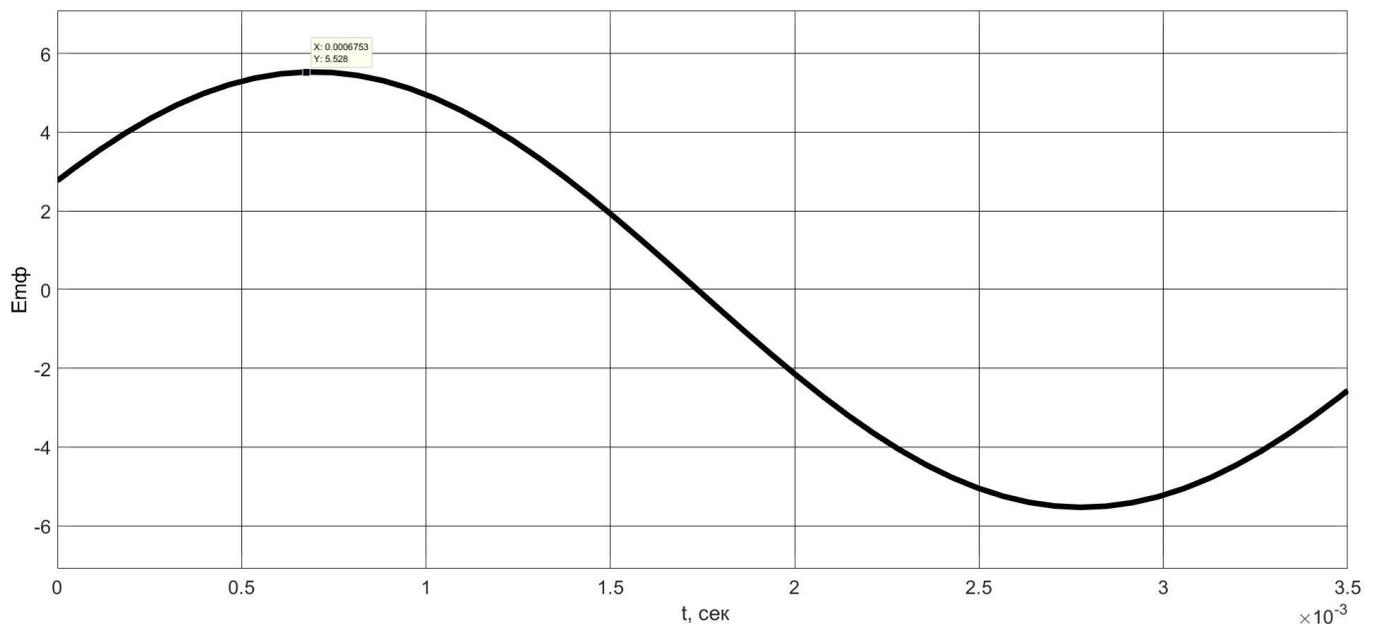


Рисунок 3.10 – Осциллограмма участка кривой фазной статорной ЭДС АГ под центром условного шестого полюса с учетом влияния на нее несоосности статора и ротора в точке с номинальным значением ВЗ

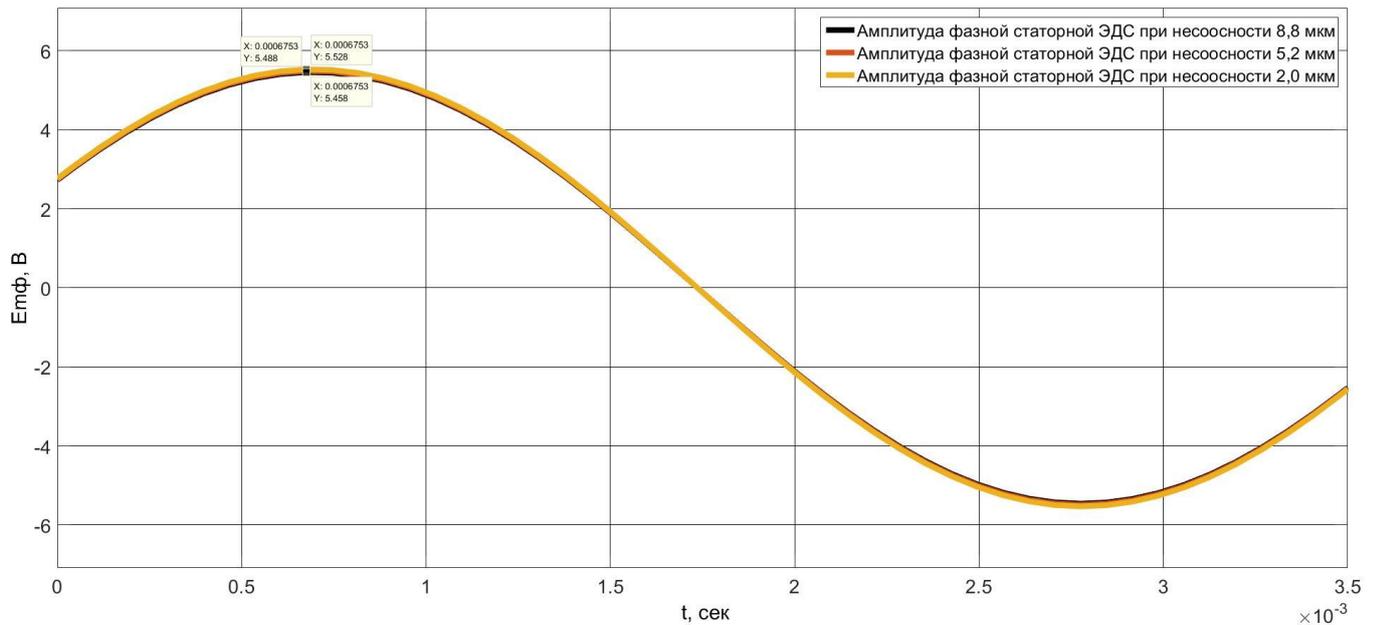


Рисунок 3.11 – Осциллограмма участка кривой фазной статорной ЭДС АГ под центром условного восьмого полюса с учетом влияния на нее несоосности статора и ротора в точке с максимальным значением ВЗ

В ходе анализа трех представленных осциллограмм, установлено, что при наличии несоосности статора и ротора АГ амплитудные значения фазной статорной ЭДС под центром каждого полюса отличаются от амплитудных значений фазной статорной ЭДС под центрами других полюсов [28, 61]. Так, в промежуток времени $0-3,5 \cdot 10^{-3}$ с, под центром условного первого полюса в точке с минимальным значением ВЗ (значение ВЗ с учетом смещения геометрической оси ротора составляет 0,3631 мм) амплитудное значение фазной статорной ЭДС при смещении геометрической оси ротора в 2,0 мкм равно 5,55 В (номинальное значение фазной статорной ЭДС полученное в программе составляет 5,53 В). В этот же промежуток времени под центром условного шестого полюса в точке с номинальным значением ВЗ (значение ВЗ с учетом смещения геометрической оси ротора составляет 0,365 мм) амплитудное значение фазной статорной ЭДС при любом смещении геометрической оси ротора равно номинальному значению, полученному в программе. В этот же промежуток времени под центром условного восьмого полюса в точке с максимальным значением ВЗ (значение ВЗ с учетом смещения геометрической оси ротора составляет 0,366 мм) амплитудное значение

фазной статорной ЭДС при смещении геометрической оси ротора в 2,0 мкм равно 5,52 В. Таким образом, по мере движения ротора от точки с минимальным значением ВЗ к точке с максимальным значением ВЗ амплитудные значения фазного статорного напряжения под центрами условных полюсов плавно снижают свои значения, доходя до минимума в точке с максимальным значением ВЗ. После прохода ротором точки с максимальным значением ВЗ амплитудные значения фазной статорной ЭДС под центрами условных полюсов плавно наращивают свои значения, доходя до максимума в точке с минимальным значением ВЗ.

Далее следует проанализировать результаты, полученные с помощью подпрограммы для расчета основных электротехнических характеристик в режиме нагрузки (рисунки 3.12-3.14).

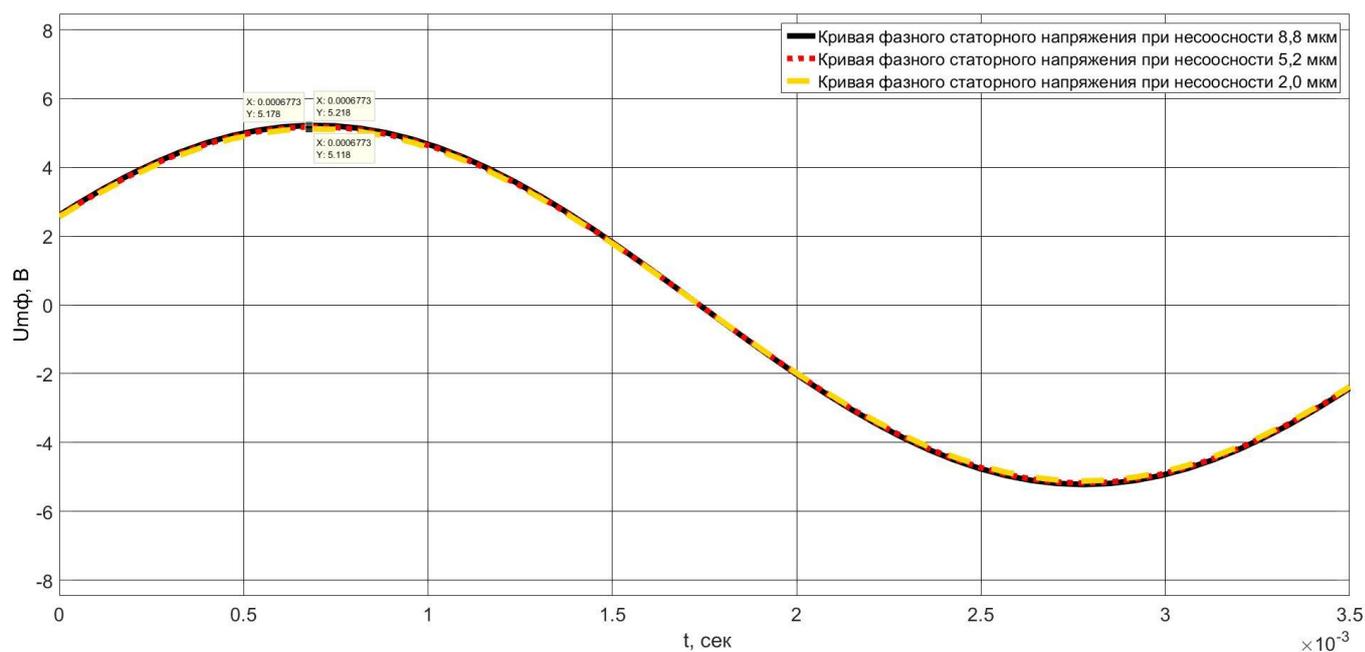


Рисунок 3.12 – Оциллограмма участка кривой фазного статорного напряжения АГ под центром условного первого полюса в точке с минимальным значением ВЗ

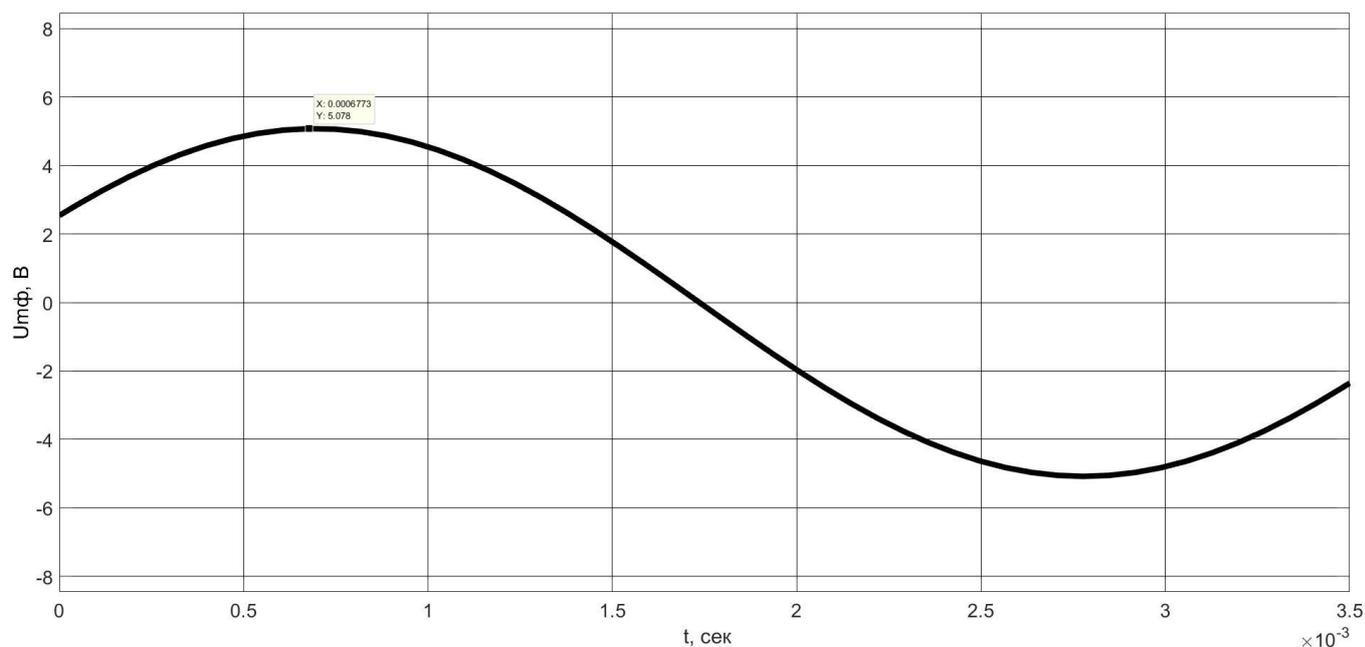


Рисунок 3.13 – Осциллограмма участка кривой фазного статорного напряжения АГ под центром условного шестого полюса в точке с номинальным значением ВЗ

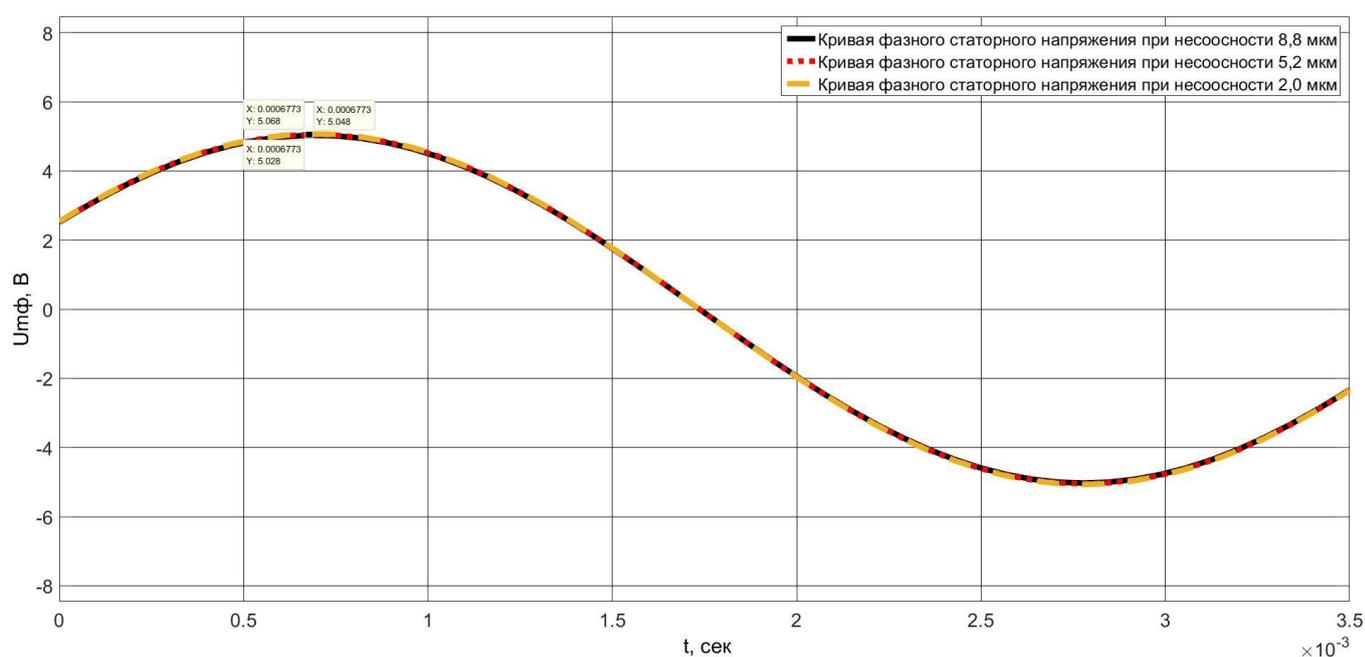


Рисунок 3.14 – Осциллограмма участка кривой фазного статорного напряжения АГ под центром условного восьмого полюса в точке с максимальным значением ВЗ

В ходе анализа трех вышеприведенных осциллограмм, установлено, что при наличии несоосности статора и ротора АГ амплитудные значения фазного

статорного напряжения под центрами условных полюсов имеют такую же тенденцию к плавному снижению значений по мере движения ротора от точки с минимальным значением ВЗ к точке с максимальным значением ВЗ, а затем к плавному наращиванию значений по мере движения ротора от точки с максимальным значением ВЗ к точке с минимальным значением ВЗ.

С целью наглядного представления кривых фазного статорного напряжения АГ, с учетом влияния на их формирование несоосности статора и ротора, построены огибающие, представленные на рисунке 3.15.

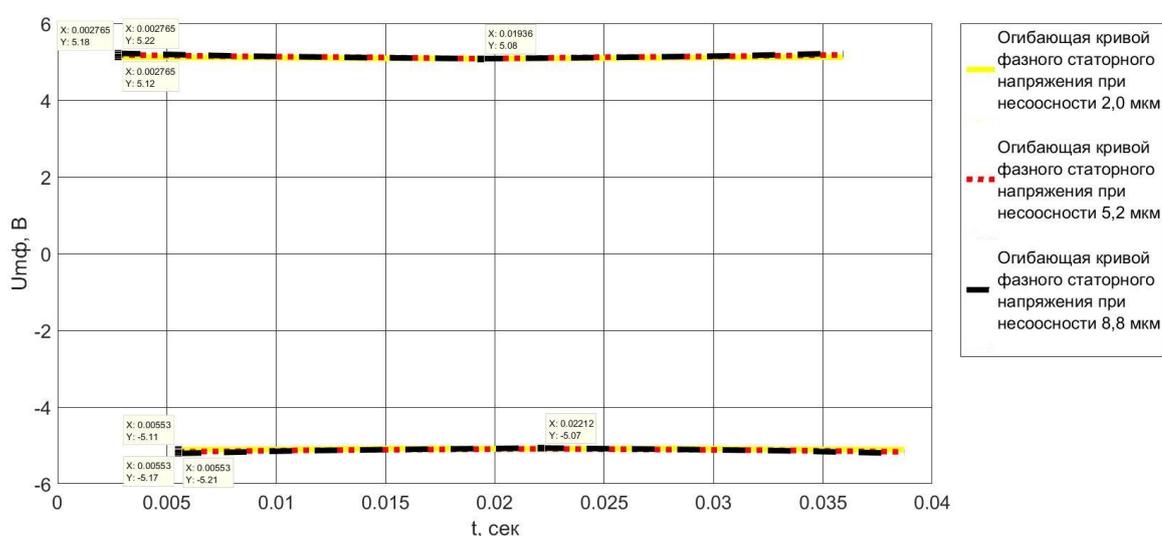


Рисунок 3.15 – Оциллограмма огибающих фазного статорного напряжения за один оборот ротора

Огибающие кривых фазного статорного напряжения при различных значениях смещения геометрической оси ротора, представленные на рисунке 3.14, наглядно подтверждают взаимосвязь между несоосностью статора и ротора АГ с основными электротехническими характеристиками. Так, при смещении геометрической оси ротора в 5,2 мкм под центром условного первого полюса в точке с минимальным значением ВЗ амплитудное значение фазного статорного напряжения равно 5,18 В, под центром условного шестого полюса в точке с номинальным значением ВЗ амплитудное значение фазного статорного напряжения равно 5,08 В, а под центром условного восьмого полюса в точке с максимальным значением ВЗ – 5,05 В. Разница между амплитудными значениями

фазного статорного напряжения в точках с максимальным и номинальным значениями ВЗ составляет 0,1 В. При смещении геометрической оси ротора в 8,8 мкм под центром условного первого полюса в точке с минимальным значением ВЗ амплитудное значение фазного статорного напряжения равно 5,22 В, под центром условного шестого полюса в точке с номинальным значением ВЗ амплитудное значение фазного статорного напряжения равно 5,08 В, а под центром условного восьмого полюса в точке с максимальным значением ВЗ – 5,02 В. Разница между амплитудными значениями фазного статорного напряжения в точках с максимальным и номинальным значениями ВЗ составляет 0,14 В. Таким образом, установлено, что чем больше величина смещения геометрической оси ротора тем больше разница между амплитудными значениями фазного статорного напряжения в точках с максимальным и номинальным значениями ВЗ, из этого следует вывод, что значение разности амплитуд под центрами условных полюсов может быть использовано в качестве диагностического параметра для выявления несоосности статора и ротора АГ.

Теперь следует проанализировать результаты, полученные с использованием подпрограммы для расчета основных электромеханических характеристик АГ (Рисунок 3.16).

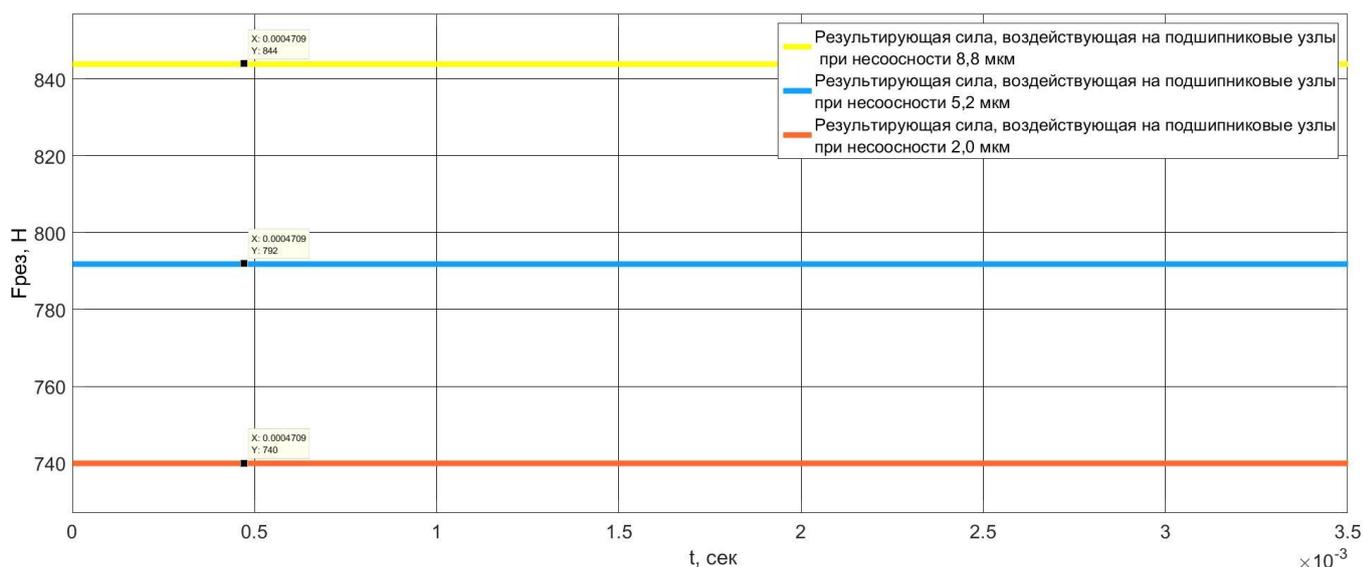


Рисунок 3.16 – Осциллограмма результирующей силы, действующей на подшипниковые узлы при частоте вращения ротора 5000 об/мин

В ходе анализа рисунка 3.15, установлено, что несоосность статора и ротора значительно влияет на формирование равнодействующей электромагнитной силы одностороннего притяжения ротора к статору [27, 28]. Так, например, смещению геометрической оси ротора в 2,0 мкм соответствует результирующая сила, равная 740 Н, а смещению геометрической оси ротора в 8,8 мкм соответствует результирующая сила, равная 844 Н, что больше силы натяжения ремня привода АГ в 8 раз.

Наконец, следует проанализировать результаты расчета, полученные с использованием подпрограммы для определения вероятности безотказной работы подшипниковых узлов в зависимости от значений результирующей силы. Вероятность безотказной работы подшипниковых узлов оценивается в течение периода гарантийной эксплуатации автомобиля, заданного в часах.

Итак, результирующей силе равной 740 Н (смещение геометрической оси ротора 2,0 мкм) соответствует вероятность безотказной работы переднего подшипникового узла равная 0,97, а вероятность безотказной работы заднего подшипникового узла при таком значении результирующей силы равна 0,81. Результирующей силе равной 844 Н (смещение геометрической оси ротора 8,8 мкм) соответствует вероятность безотказной работы переднего подшипникового узла равная 0,96, а вероятность безотказной работы заднего подшипникового узла при таком значении результирующей силы составляет 0,72 [36].

3.3 Реализация вероятностного расчетно-статистического инструмента для оценки влияния стабильности технологического процесса на стабильность основных электротехнических и электромеханических характеристик автомобильного генератора

Автомобильный генератор – продукт, выпускающийся массово, воздействие группы факторов, влияющих на возникновение технологических погрешностей во

время процесса производства индивидуально для каждого отдельно взятого АГ [69, 76]. В главе 1 диссертации вынесено предположение, что повышение стабильности технологического процесса, путем перехода от 8 качества к 7 качеству (сужение поля допуска на посадку подшипников АГ до 50 % относительно существующего значения) позволит повысить стабильность основных электротехнических и электромеханических характеристик АГ, а значит и повысить вероятность безотказной работы подшипниковых узлов [30, 36].

Для реализации вероятностного расчетно-статистического эксперимента по методу Монте-Карло в программу интегрирована подпрограмма генератора случайных чисел, реализующая нормальный закон распределения [65].

Подпрограмма генератора случайных чисел создает две выборки АГ с различными значениями смещения геометрической оси ротора, значения первой выборки лежат в диапазоне установленного в ТУ поля допуска на посадку подшипников в щиты, значения второй – в диапазоне суженого на 50 % поля допуска на посадку подшипников в щиты (таблица 3.3). Число АГ в каждой выборке – 100 штук.

Таблица 3.3 – Диапазон значений смещений геометрической оси ротора АГ при установленном в ТУ и суженом на 50 % полях допусков на посадку подшипников в щиты

Количество АГ в выборке, %	Смещение оси вращения ротора относительно статора при установленном в ТУ поле допуска, мкм	Количество АГ в выборке, %	Смещение оси вращения ротора относительно статора при суженом на 50 % поле допуска, мкм
4	2,7	2	1,5
5	3,5	7	2,2
6	4,5	12	2,4
12	4,7	16	3,2
18	5,2	26	3,7
27	5,6	17	4,1
16	6,1	10	4,5

Продолжение таблицы 3.3

8	7,4	4	5,3
3	8,2	4	5,4
1	12	2	5,9

Теперь следует выполнить оценку результатов, полученных в ходе вероятностного расчетно-статистического эксперимента по методу Монте-Карло (рисунки 3.17-3.22).

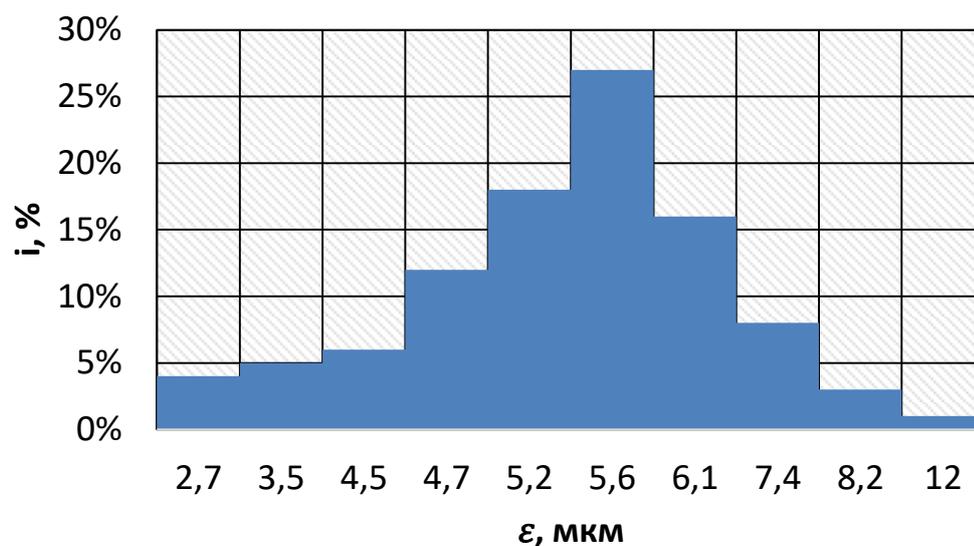


Рисунок 3.17 – Гистограмма диапазона значений смещений геометрической оси вращения ротора относительно статора первой выборки АГ

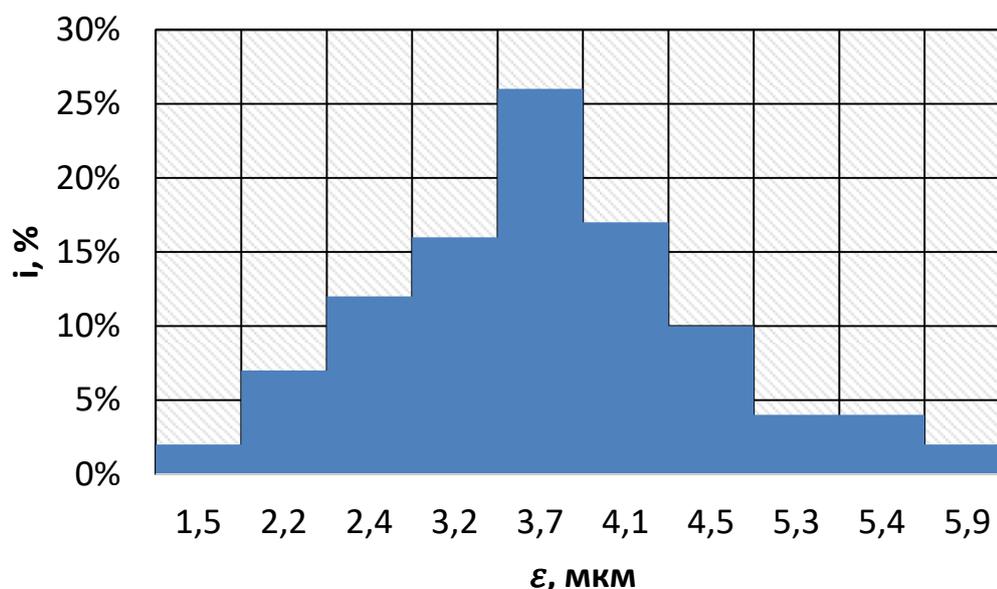


Рисунок 3.18 – Гистограмма диапазона значений смещений геометрической оси вращения ротора относительно статора второй выборки АГ

В результате анализа рисунков 3.17 и 3.18, установлено, что первая выборка АГ имеет меньшую суммарную плотность распределения величин смещения геометрической оси ротора сравнительно со второй выборкой АГ. Суммарная плотность распределения величин смещения геометрической оси ротора первой выборки АГ равна 0,7513, второй – 0,80. Большая суммарная плотность распределения величин смещения геометрической оси ротора АГ свидетельствует о том, что при суженом на 50 % поле допуска на посадку подшипников в щиты технологический процесс становится более стабильным.

При повышении стабильности технологического процесса должна повышаться стабильность основных электротехнических и электромеханических характеристик.

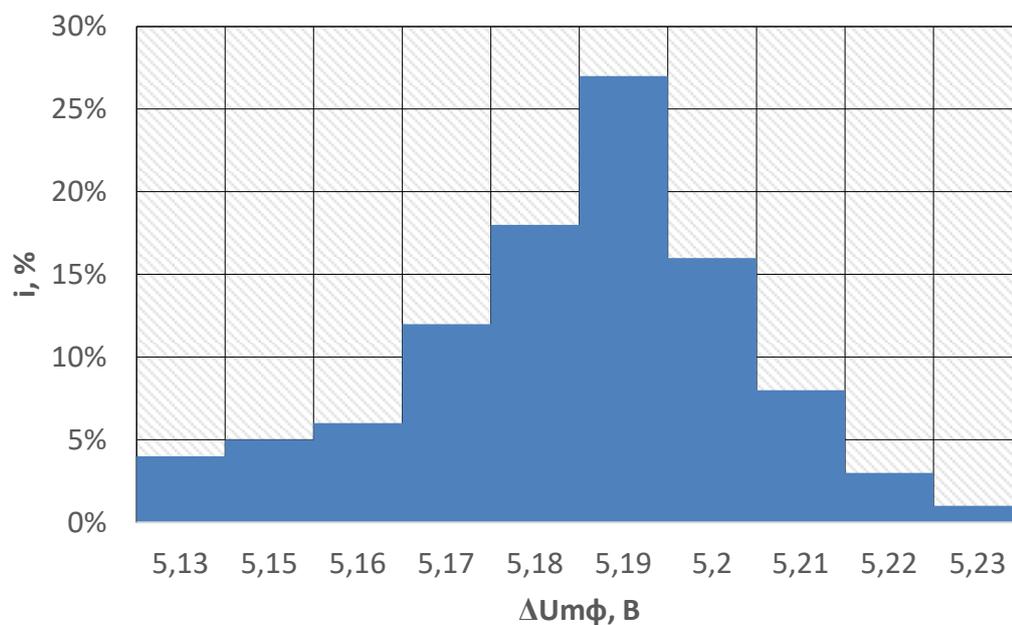


Рисунок 3.19 – Гистограмма диапазона амплитудных значений фазного статорного напряжения под центром условного первого полюса в точке с минимальным значением ВЗ первой выборки АГ

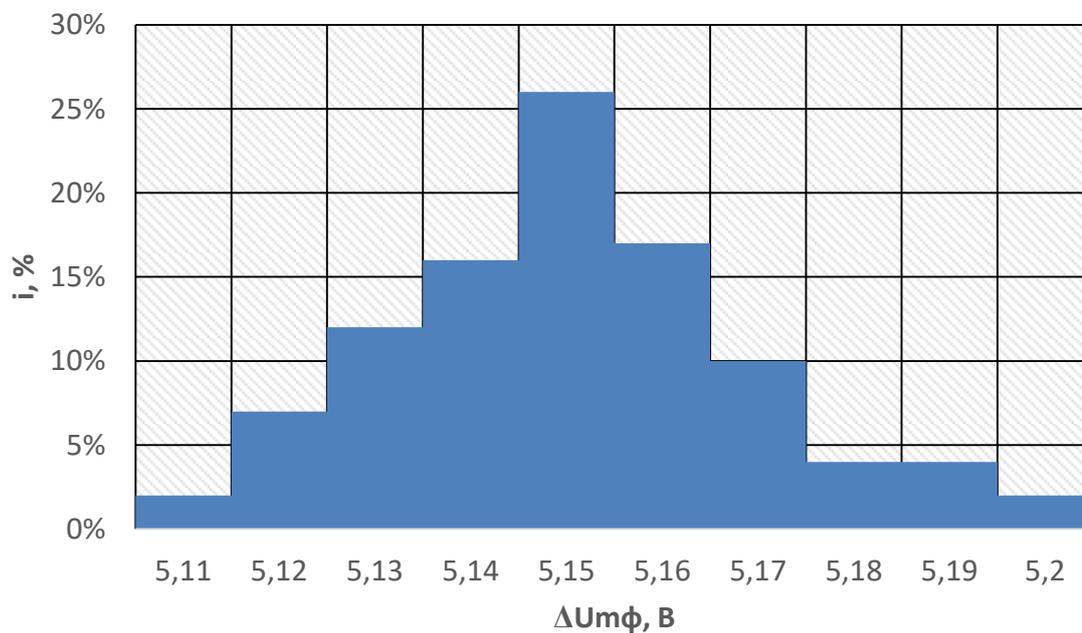


Рисунок 3.20 – Гистограмма диапазона амплитудных значений фазного статорного напряжения под центром условного первого полюса в точке с минимальным значением ВЗ второй выборки АГ

В результате анализа рисунков 3.19 и 3.20, установлено, что первая выборка АГ имеет меньшую суммарную плотность распределения амплитудных значений фазного статорного напряжения под центром условного первого полюса в сравнении со второй выборкой АГ. Суммарная плотность распределения первой выборки АГ равна 0,038, а второй – 0,039. Большая суммарная плотность распределения амплитудных значений фазного статорного напряжения под центром условного первого полюса АГ свидетельствует о том, что при суженом на 50 % поле допуска на посадку подшипников в щиты основные электротехнические характеристики АГ имеют более высокую стабильность в сравнении с установленным в ТУ полем допуска.

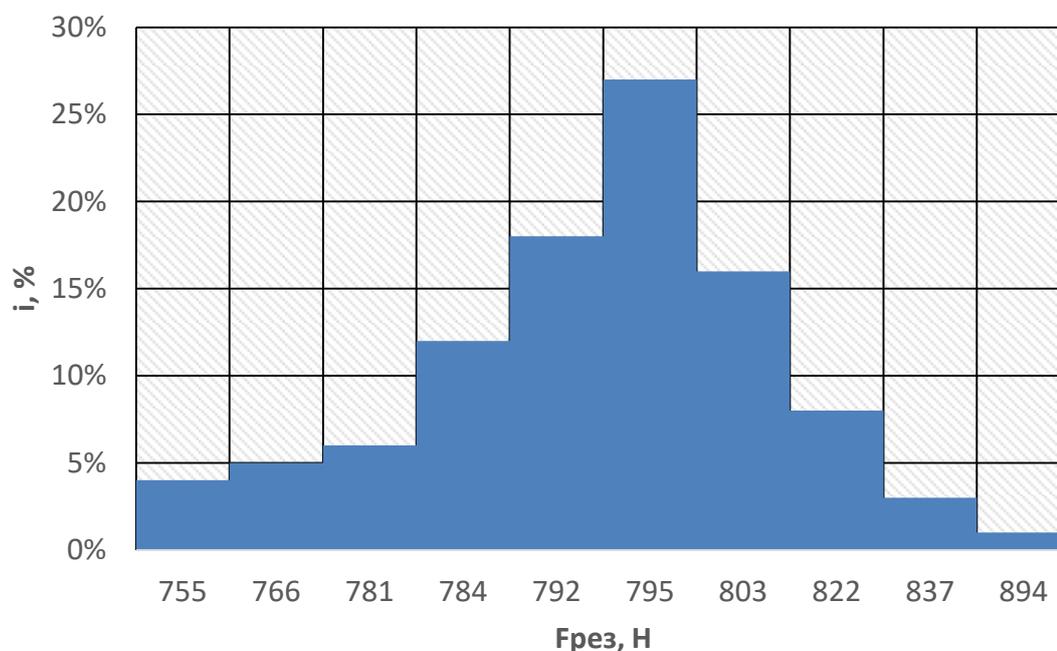


Рисунок 3.21 – Гистограмма диапазона значений результирующей силы, действующей на подшипниковые узлы первой выборки АГ

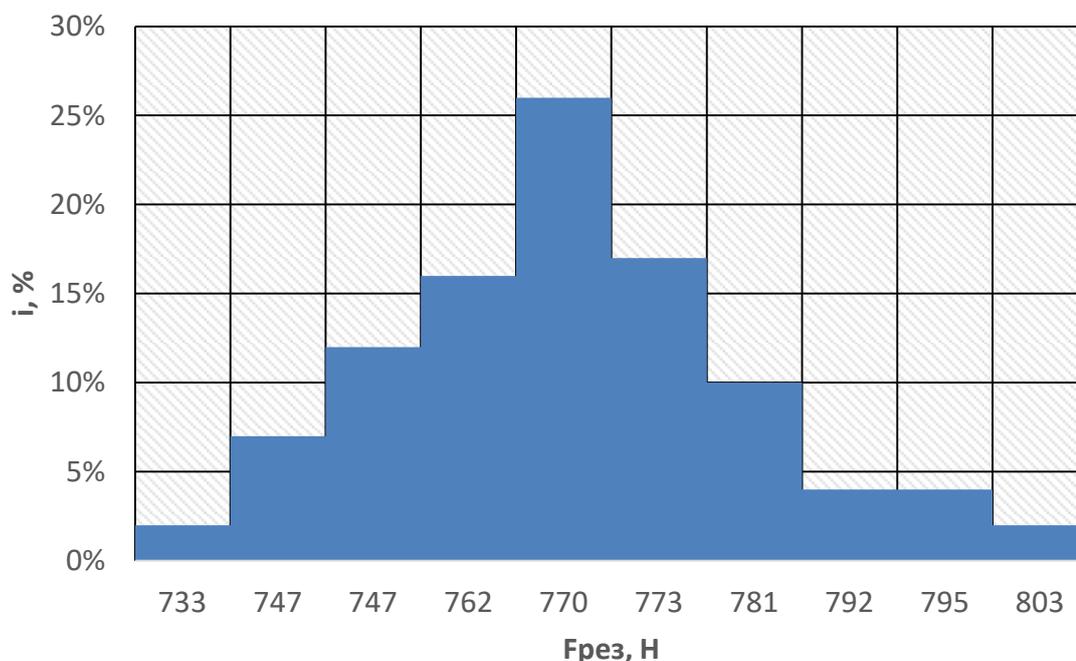


Рисунок 3.22 – Гистограмма диапазона значений результирующей силы, действующей на подшипниковые узлы второй выборки АГ

В результате анализа рисунков 3.21 и 3.22, установлено, что первая выборка АГ имеет меньшую суммарную плотность распределения значений результирующей силы в сравнении со второй выборкой АГ. Суммарная плотность распределения значений результирующей силы первой выборки АГ равна 0,047, а второй – 0,054. Большая суммарная плотность распределения значений результирующей силы АГ является свидетельством того, что при суженом на 50 % поле допуска на посадку подшипников в щиты основные электромеханические характеристики АГ имеют более высокую стабильность в сравнении с установленным в ТУ полем допуска.

Численные значения плотностей распределения величин смещения геометрической оси ротора, а также основных электротехнических и электромеханических характеристик при установленном в ТУ и суженом на 50 % полях допуска на посадку подшипников в щиты сведены в таблицу 3.4.

Таблица 3.4 – Плотности распределения величин смещения геометрической оси ротора, и основных электротехнических и электромеханических характеристик при установленном в ТУ и суженом на 50 % полях допуска на посадку подшипников в щиты

Существующее поле допуска			Суженое поле допуска		
$f(\varepsilon)$, мм	$f(\Delta U_{m\phi})$, В	$f(\vec{f}_{рез})$, Н	$f(\varepsilon)$, мм	$f(\Delta U_{m\phi})$, В	$f(\vec{f}_{рез})$, Н
0,0006	$1,27 \cdot 10^{-5}$	$1,94 \cdot 10^{-5}$	0,0027	0,0001	$4,95 \cdot 10^{-5}$
0,0096	0,0007	0,0004	0,0312	0,0009	0,0022
0,088	0,0026	0,0064	0,0525	0,0037	0,0022
0,1163	0,0064	0,0064	0,1897	0,0091	0,014
0,1772	0,01	0,0088	0,2224	0,0122	0,0152
0,1911	0,01	0,0139	0,1767	0,0091	0,0133
0,1515	0,0064	0,0111	0,1022	0,0037	0,006
0,0152	0,0026	0,0007	0,0132	0,0009	0,0007
0,0011	0,0001	$9,87 \cdot 10^{-6}$	0,0093	0,0001	0,0003
$1,22 \cdot 10^{-14}$	$2,42 \cdot 10^{-13}$	$3,72 \cdot 10^{-20}$	0,0012	$7,51 \cdot 10^{-6}$	$2,44 \cdot 10^{-5}$

Теперь нужно определить степень влияния стабильности технологического процесса на стабильность основных электротехнических и электромеханических характеристик АГ, используя коэффициент влияния, который в рамках диссертационного исследования выступает в качестве количественного критерия степени влияния стабильности технологического процесса на стабильность основных электротехнических и электромеханических характеристик АГ. Для оценки степени влияния стабильности технологического процесса на стабильность основных электротехнических и электромеханических характеристик АГ разработан скрипт, показанный в приложении 1. С применением этого скрипта получены зависимости коэффициента влияния от разностей амплитудных значений фазного статорного напряжения в точках с минимальным и номинальным значениями ВЗ и коэффициента влияния от значений результирующей силы, воздействующей на подшипниковые узлы АГ (рисунки 3.23-3.24).

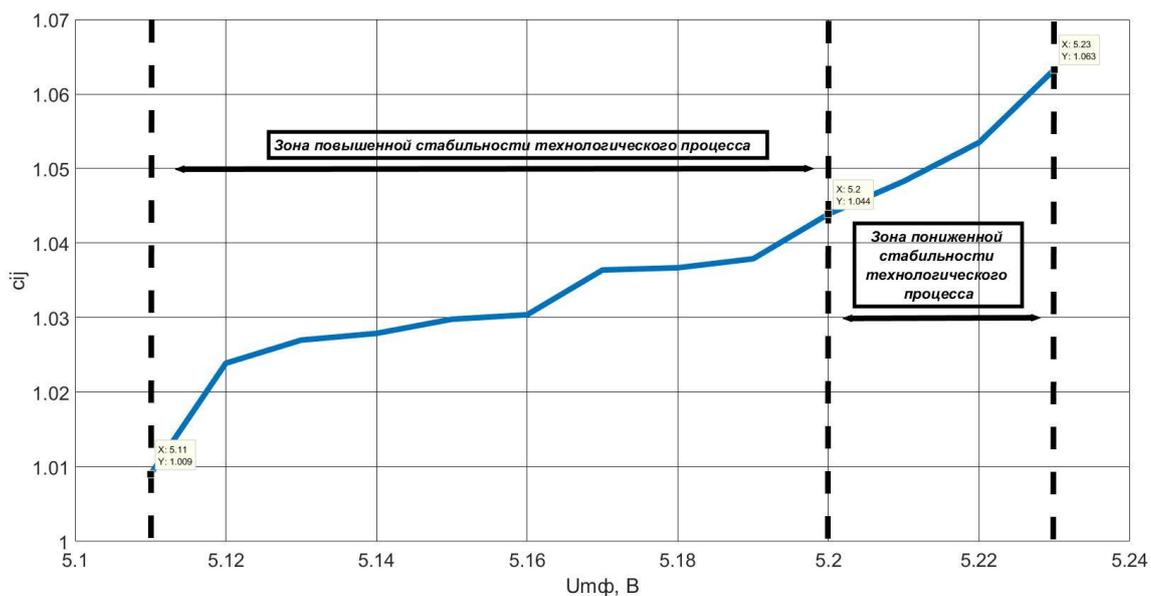


Рисунок 3.23 – График зависимости коэффициента влияния от диапазона значений амплитудных значений фазного статорного напряжения в точке с минимальным значением ВЗ

По результатам анализа графика зависимости коэффициента влияния от амплитудных значений фазного статорного напряжения в точке с минимальным значением ВЗ, сделано заключение, о том, что повышение стабильности технологического процесса (сужение поля допуска на посадку подшипников в щиты на 50 %) благоприятно влияет на стабильность основных электротехнических характеристик АГ. Так, при недостаточной стабильности технологического процесса, значения коэффициента влияния лежат в диапазоне 1,044-1,063, а при повышенной стабильности технологического процесса значения коэффициента влияния лежат в диапазоне 1,009-1,044.

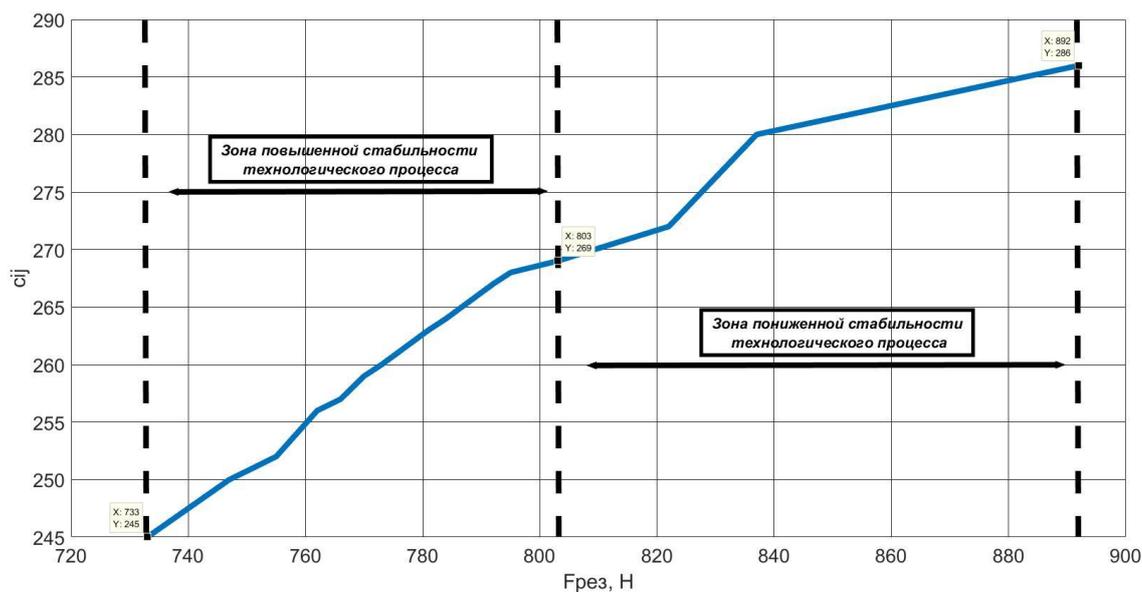


Рисунок 3.24 – График зависимости коэффициента влияния от диапазона значений результирующей силы, воздействующей на подшипниковые узлы

По результатам анализа графика зависимости коэффициента влияния от значений результирующей силы, сделано заключение, о том, что повышение стабильности технологического процесса благоприятно влияет на стабильность основных электромеханических характеристик АГ. Так, при недостаточной стабильности технологического процесса, значения коэффициента влияния лежат в диапазоне 269-286, а при повышенной стабильности технологического процесса значения коэффициента влияния лежат в диапазоне 245-269.

Теперь следует оценить вероятность безотказной работы переднего и заднего подшипниковых узлов АГ в зависимости от величины результирующей силы, формируемой под влиянием несоосности статора и ротора в течение периода гарантийной эксплуатации автомобиля (рисунок 3.25).

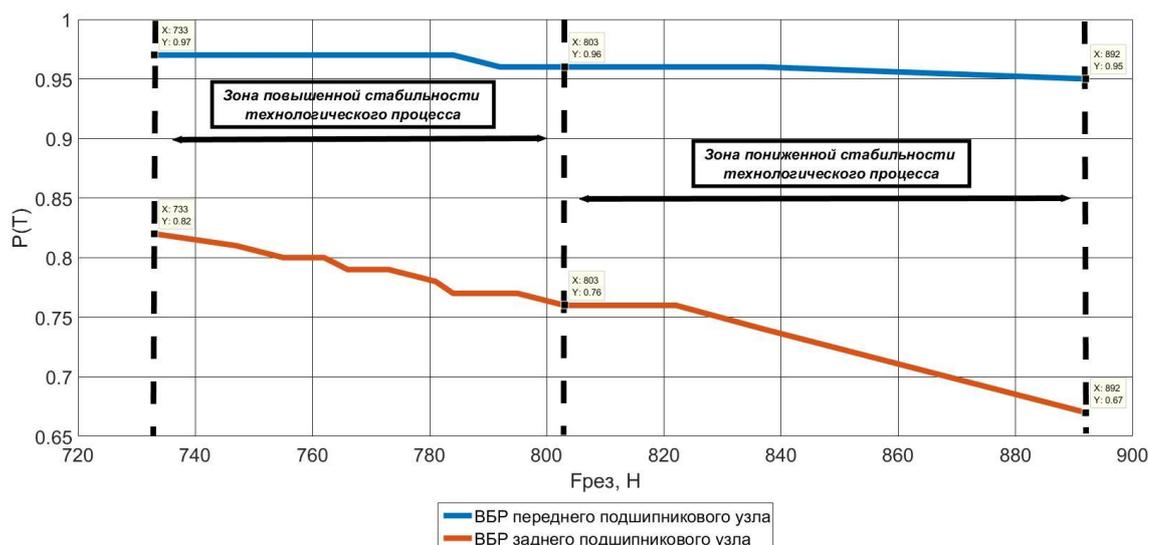


Рисунок 3.25 – График зависимости вероятности безотказной работы $P(T)$ переднего и заднего подшипниковых узлов от значений результирующей силы

Анализируя рисунок 3.25, установлено, что сужение поля допуска на посадку подшипников в щиты благоприятно сказывается на вероятности безотказной работы подшипниковых узлов. Так, при недостаточной стабильности технологического процесса значения вероятности безотказной работы подшипниковых узлов АГ лежат в пределах 0,95-0,96 для переднего подшипникового узла и 0,67-0,76 для заднего подшипникового узла. При более высокой стабильности технологического процесса значения вероятности безотказной работы подшипниковых узлов АГ лежат в пределах 0,96-0,97 для переднего подшипникового узла и 0,76-0,82 для заднего подшипникового узла.

3.4 Выводы к главе 3

В третьей главе, на основе стандартной расчетной методики АГ и разработанной ранее математической модели разработана комплексная программа

для установления взаимосвязи между несоосностью статора и ротора и основными электротехническими и электромеханическими характеристиками АГ. С ее использованием исследовано влияние несоосности статора и ротора АГ на формирование основных электротехнических и электромеханических характеристик АГ. Так, при смещении геометрической оси ротора в 2,0 мкм значение амплитуды фазного статорного напряжения под центром условного первого полюса в точке с минимальным значением ВЗ в промежуток времени 0- $3,5 \cdot 10^{-3}$ с составляет 5,11 В, а под центром условного восьмого полюса в этот же промежуток времени в точке с максимальным значением ВЗ – 5,04 В (значение амплитуды фазного статорного напряжения при номинальном ВЗ полученное в программе составляет 5,08 В).

С использованием программы выявлена взаимосвязь между несоосностью статора и ротора АГ с формированием равнодействующей электромагнитной силы одностороннего притяжения ротора к статору, которая с учетом силы натяжения приводного ремня генератора обозначается как результирующая сила. Так, например, при смещении геометрической оси ротора в 2,0 мкм результирующая сила равна 740 Н, а при смещении геометрической оси ротора в 8,8 мкм результирующая сила равна 844 Н. Установлена взаимосвязь между значениями результирующей силы с вероятностью безотказной работы подшипниковых узлов АГ. Например, результирующей силе в 740 Н соответствует вероятность безотказной работы в 0,97 для переднего подшипникового узла и в 0,82 для заднего подшипникового узла. Результирующей силе в 844 Н соответствует вероятность безотказной работы в 0,96 для переднего подшипникового узла и в 0,72 для заднего подшипникового узла.

В этой главе реализован вероятностный расчетно-статистический эксперимент по методу Монте-Карло для установления взаимосвязи между стабильностью технологического процесса и стабильностью основных электротехнических, и электромеханических характеристик АГ. По результатам, полученным в ходе вероятностного расчетно-статистического эксперимента по

методу Монте-Карло установлено, что сужение поля допуска на посадку подшипников в щиты на 50 % позволяет увеличить стабильность основных электротехнических и электромеханических характеристик. Эффективность от сужения поля допуска на посадку подшипников оценена с применением количественного критерия (коэффициент влияния). Так, например, значения коэффициента влияния для результирующей силы, воздействующей на подшипниковые узлы АГ при недостаточной стабильности технологического процесса лежат в диапазоне 269-286, при более высокой стабильности технологического процесса значения коэффициента влияния результирующей силы лежат в диапазоне 245-269.

4 Экспериментальное исследование влияния несоосности статора и ротора автомобильного генератора на его основные электротехнические и электромеханические характеристики

4.1 Обоснование, основные допущения и постановка эксперимента

В предыдущей главе разработана комплексная программа для установления взаимосвязи между несоосностью статора и ротора и основными электротехническими и электромеханическими характеристиками АГ. В этой главе необходимо проверить адекватность полученных с применением программы результатов путем постановки эксперимента.

Для реализации экспериментального исследования влияния несоосности статора и ротора на формирование основных электротехнических и электромеханических характеристик было принято решение о создании специализированного стенда.

Предварительно были разработаны три концепции специализированного стенда:

- 1) стенд, в котором ротор АГ приводится во вращение посредством двигателя постоянного тока;
- 2) стенд, в котором используется АГ, установленный на автомобиле с двигателем внутреннего сгорания;
- 3) стенд, в котором ротор АГ приводится во вращение посредством асинхронного двигателя.

Концепция специализированного стенда на базе двигателя постоянного тока была отвергнута, т.к. такие двигатели имеют достаточно низкую степень управляемости, невысокую эксплуатационную безопасность, а также недостаточно высокую степень регулирования частоты вращения ротора. Концепция использования АГ, установленного на автомобиле также была

отвергнута, главным образом из-за того, что доступ к АГ на автомобиле затруднен.

В результате анализа вариантов концепций специализированного стенда был выбран третий вариант, в силу ряда преимуществ, в сравнении с другими вариантами:

- 1) возможность плавного регулирования частоты вращения ротора двигателя;
- 2) более высокая точность регулирования частоты вращения ротора, в сравнении с двигателем постоянного тока;
- 3) более высокая эксплуатационная безопасность, в сравнении с двигателем постоянного тока;
- 4) более высокая степень управляемости, в сравнении с двигателем постоянного тока.

Разработанный специализированный стенд на базе асинхронного двигателя с частотным управлением показан на рисунке 4.1.

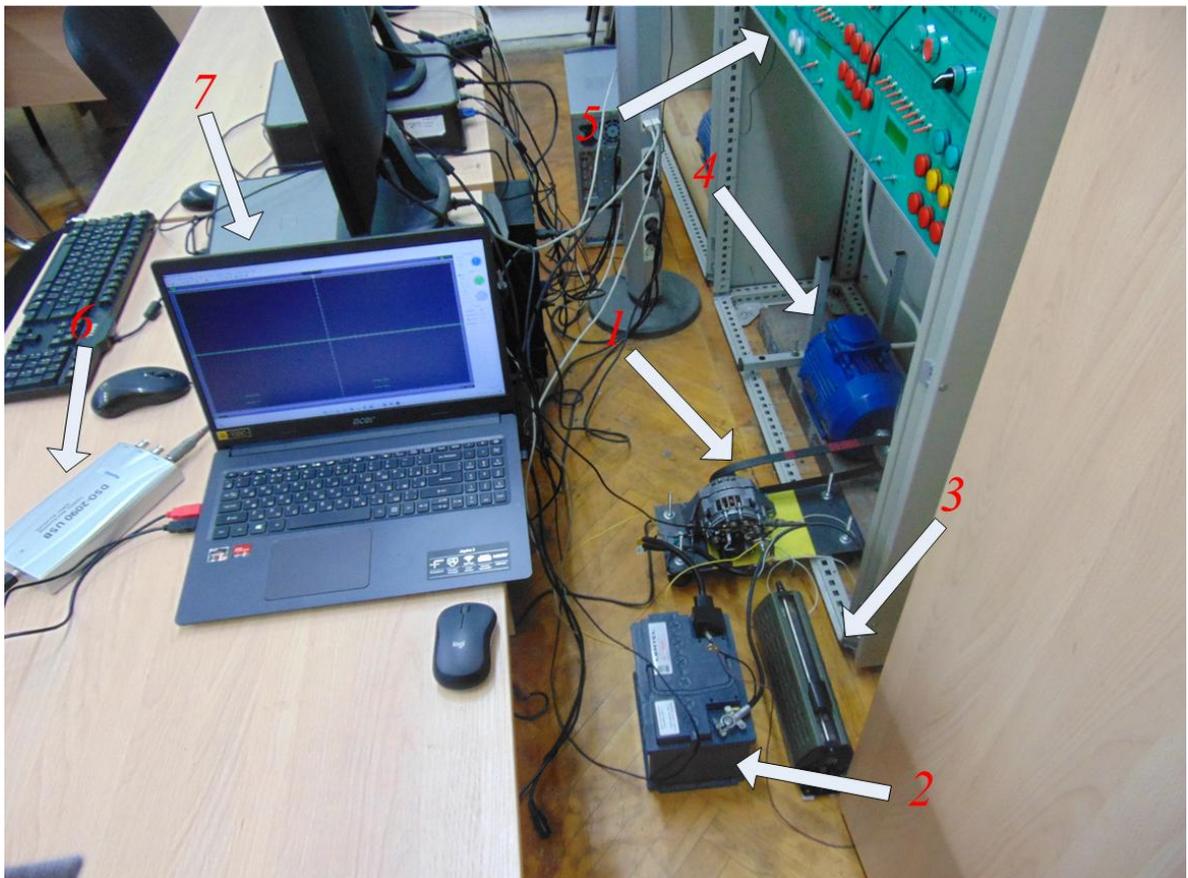


Рисунок 4.1 – Специализированный стенд.

Специализированный стенд включает в свой состав испытуемый автомобильный генератор (1) типа 9402.3701-14М (рисунок 4.2), к выводам статорной обмотки которого подключен цифровой осциллограф Hantek DSO 2090 USB (паспорт цифрового осциллографа показан на рисунке 4.5) (6), передающий сигнал на персональный компьютер (7) на котором установлено программное обеспечение осциллографа, преобразующее выходной сигнал осциллографа в изображение кривой фазного статорного напряжения АГ. Для возбуждения АГ используется аккумуляторная кислотная батарея (2), к клеммам которой подключен нагрузочный реостат (3). Для привода АГ используется асинхронный двигатель (4), питаемый через частотный преобразователь (5). Валы асинхронного двигателя и АГ соединены ременной передачей.



Рисунок 4.2 – Автомобильный генератор типа 9402.3701-14М

Для задания конкретного значения смещения геометрической оси ротора в каждый подшипниковый узел были установлены подкладки, изготовленные из алюминиевой фольги. Толщина каждой подкладки – 5,0 мкм (рисунок 4.2 б). Измерение толщины фольги производилось с применением цифрового штангенциркуля ШЦЦ-1-300 (рисунок 4.3 а), паспорт измерительного прибора показан на рисунке 4.4.



Рисунок 4.3 а – Вид цифрового штангенциркуля ШЦЦ-1-300

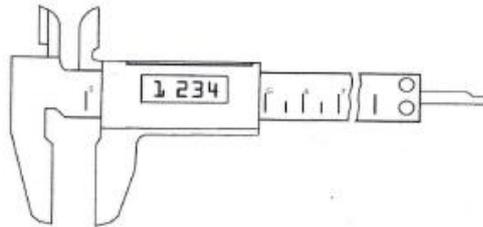


Рисунок 4.3 б – Замер толщины алюминиевой фольги, необходимой для постановки эксперимента

CE

Micron

**ПАСПОРТ
ШТАНГЕНЦИРКУЛЬ ДВУСТОРОННИЙ ЦИФРОВОЙ
С ГЛУБИНОМЕРОМ ШЦЦ (тип I)
Модель □125, □150, □200, □300
□SOLAR, □ABS**



Штангенциркули двусторонние цифровые с глубиномером Micron внесены в Государственный реестр измерений за №43761-10. Свидетельство об утверждении типа средств измерений СЗ.С.27.004.А №39264 от 24.04.2010 г.

1. Устройство и назначение

Штангенциркуль двусторонний цифровой с глубиномером (тип I) предназначен для наружных и внутренних измерений. Пример обозначения штангенциркуля при заказе: Штангенциркуль ШЦЦ-I-300 0,01.

2. Основные технические характеристики

Диапазон измерения, мм	Цена деления отсчётного устройства, мм	Предел допускаемой погрешности, мм	Класс точности
0...125	0,01	±0,03	1
0...150	0,01	±0,03	1
0...200	0,01	±0,03	1
0...300	0,01	±0,04	1

2.1. Максимальная скорость измерения 1,5 м/с.

2.2. Тип дисплея – жидкокристаллический.

2.3. Источник питания: напряжение 1.5В, ёмкость 165мАч.

2.4. При исполнении SOLAR реализована дополнительно система питания от солнечной батареи, автоматически включающаяся при освещенности ниже 200 люкс.

3. Условия эксплуатации

Температура окружающей среды: 20±10°С.

Относительная влажность воздуха: 60±20%.

4. Комплектность

4.1. Штангенциркуль

4.2. Футляр

4.3. Паспорт

5. Подготовка к работе и правила эксплуатации

5.1. Перед работой протереть штангенциркуль чистой сухой тканью, никогда не использовать бензин, ацетон или другие органические растворители.

5.2. Если вы не будете использовать штангенциркуль какое-то время, прибор необходимо выключать.

5.3. Не подводить электрическое напряжение и не дотрагиваться щупами электротестера во избежание поломки электронного узла штангенциркуля.

5.4. Не измерять детали на ходу станка.

5.5. Вероятны ошибочные показания дисплея при замене элемента питания. В этом случае выньте элемент питания на 40 секунд, затем поставьте его обратно.

6. Техническое обслуживание

После окончания работы штангенциркуль протереть чистой салфеткой, смоченной в нефрасе, затем насухо - чистой салфеткой и уложить в футляр.

7. Методы и средства проверки

Проверка штангенциркулей проводится в соответствии с методикой ФГУП «ВНИИМС».

Межповерочный интервал - 1 год.

8. Сведения о консервации и упаковке

Штангенциркуль подвергнут консервации и упаковке. Срок консервации - 2 года.

9. Гарантии изготовителя

Изготовитель гарантирует соответствие штангенциркуля требованиям при соблюдении условий транспортирования, хранения и эксплуатации. Гарантийный срок эксплуатации – 12 месяцев со дня ввода штангенциркуля в эксплуатацию, но не более 18 месяцев со дня приобретения.

10. Свидетельство о приемке

Штангенциркуль двусторонний цифровой с глубиномером ШЦЦ-I-_____ заводской № _____, соответствует НТД MICRONTOLS S.P.O. и признан годным к эксплуатации.

Штамп контролёра:

made by MICRON Czech Republic

Рисунок 4.4 – Паспорт штангенциркуля ШЦЦ-I-300

Hantek  DSO-2090 Manual

Hardware Specification

Input	
Max. sample rate	Realtime sampling: 100MS/s using one channel, 50MS/s using two channels
Channels	2
Bandwidth	40MHz analog bandwidth
Vertical resolution	8 bits/channel
Gain range	10mV ~ 5V/div @ x1 probe(10mV, 20mV, 50mV, 100mV, 200mV, 500mV, 1V, 2V, 5V/div1,2,5 sequence) 100mV ~ 50V/div @ x10 probe 1V ~ 500V/div @ x100 probe 10V ~ 5KV/div @ x1000 probe
Range	8 divisions
Offset level	+/-4 divisions
Coupling	AC, DC
Offset increments	0.02 div
Impedance	1M ohm
DC accuracy	+/-3%
Input protection	35Vpk (DC + peak AC < 10 kHz, without external attenuation)
Display Mode	Y-T, X-Y
Timebase	
Timebase range	4ns/div ~ 1h/div(4ns, 10ns, 20ns, 40ns, 100ns, 200ns, 200ns, 400ns, 1us, 2us, 4us, 10us, 20us, 40us, 100us, 100us, 200us, 400us, 1ms, 2ms, 4ms, 10ms, 20ms, 40ms, 100ms, 200ms, 400ms, 1s,2s, 4s, 10s,20s,40s, 10m,20m,40m,1h /div 1-2-4 sequence)
Acquisition mode	Realtime sampling: 4ns /div ~ 400ms/div Roll mode: 1s/div ~ 1h/div
Range	10 divisions
Buffer size	10K ~ 64K samples
Trigger	
Mode	Auto, Normal and Single
Type	Edge trigger: Rising edge, falling edge.
Autoset	Yes

4

DSO-2090 Manual **Hantek** 

Range	10 divisions
Trigger level	+/-4 divisions
Settability	0.02 div increments
Math	
Measurements	Vp-p, Vmax, Vmin, Vmean, Vrms, Vamp, Vhigh, Vlow, positive overshoot, negative overshoot, cycle mean, cycle rms, period, frequency, positive pulse width, negative pulse width, rise time (10%-90%), fall time (10%-90%), positive duty cycle, negative duty cycle
Cursor	Time/frequency difference, voltage difference Frequency only in FFT mode
Math	Addition, Subtraction, Multiplication, Division
FFT	Rectangular, Hanning, Hamming, Blackman Window
Physical	
Interface	Universal Serial Bus
Power	No external power source required. Bus-powered from USB
Dimensions	187 x100 x 33(mm)

Introduction

DSO-2090 USB developed by our company, is a portable PC-based Digital Oscilloscope.

High performance

DSO-2090 USB has the following features: 40MHz analog bandwidth, 100MHz real-time sampling.

USB connected

DSO-2090 USB uses USB that supports plug'n play, with 12Mt communication speed.

Best performance for your dollar

DSO-2090 USB has many features that are comparable to the speed stand-alone DSOs. But it costs a fraction of the price.

No external power required

DSO-2090 USB does not need an external power source, because it is bus-powered from USB



日期: _____

质检人: _____

Рисунок 4.5 – Паспорт цифрового осциллографа Hantek DSO-2090 USB с приложенным талоном технического контроля

При постановке эксперимента учитываются следующие допущения:

- 1) к АГ подключена исключительно активная нагрузка;
- 2) активная нагрузка не меняется во времени;
- 3) частота вращения ротора не меняется во времени.

С использованием разработанного исследовательского стенда выполнено три опыта. В первом опыте частота вращения ротора АГ составляет 1000 об/мин, во втором опыте частота вращения ротора АГ составляет 1200 об/мин, а в третьем – 2000 об/мин. Осциллограммы кривых фазного статорного напряжения, полученные в ходе опытов показаны на рисунках 4.6-4.8.

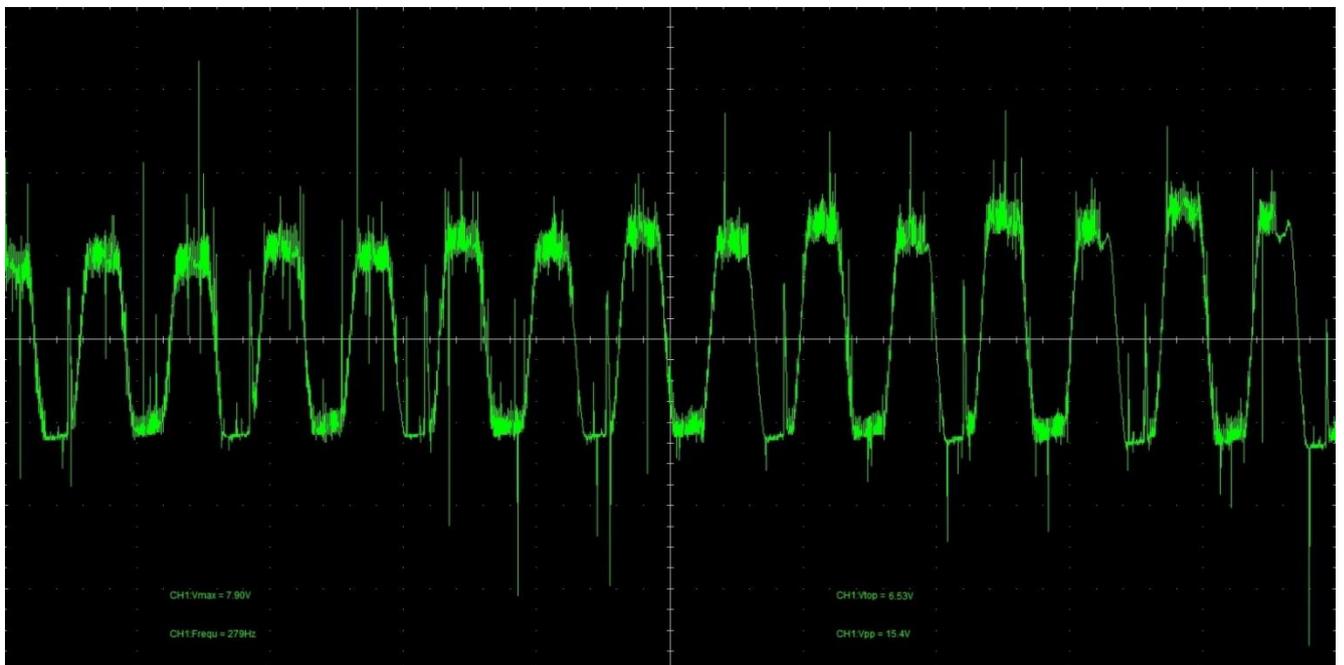


Рисунок 4.6 – Осциллограмма кривой фазного статорного напряжения АГ, полученная в первом опыте

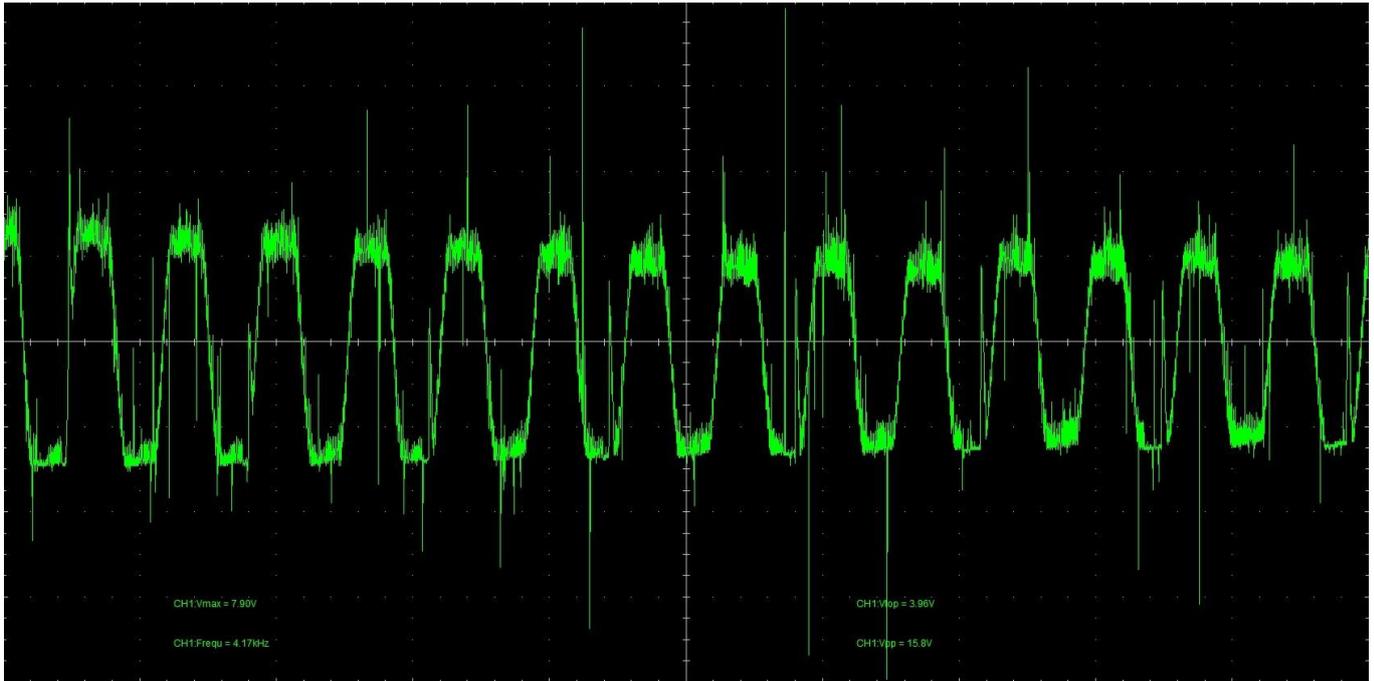


Рисунок 4.7 – Осциллограмма кривой фазного статорного напряжения АГ, полученная во втором опыте

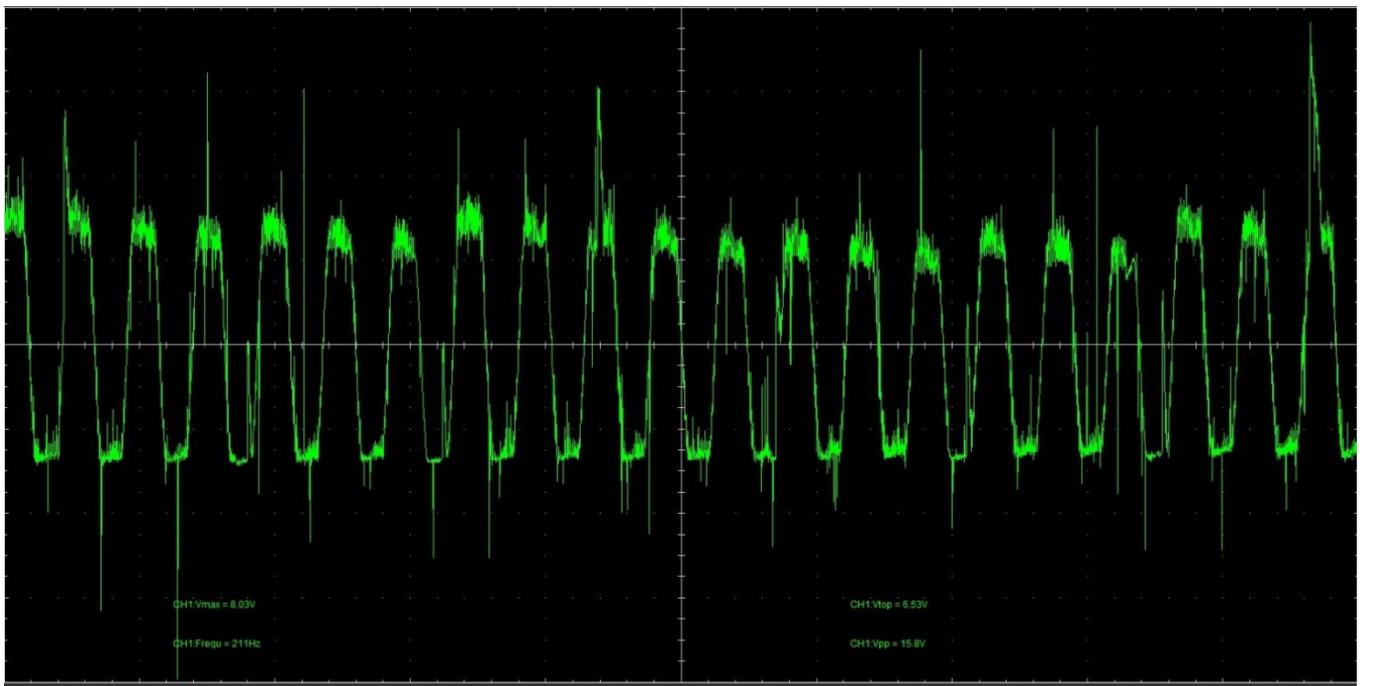


Рисунок 4.8 – Осциллограмма кривой фазного статорного напряжения АГ, полученная в третьем опыте

В ходе анализа полученных в эксперименте осциллограмм кривых фазного статорного напряжения 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 5,22 В, а под центром условного шестого полюса – -5,11 В.

Для проверки сходимости экспериментальных данных и результатов, полученных с применением программы, построены огибающие кривых фазного статорного напряжения при наличии смещении геометрической оси ротора АГ в 5,0 мкм (рисунок 4.9).

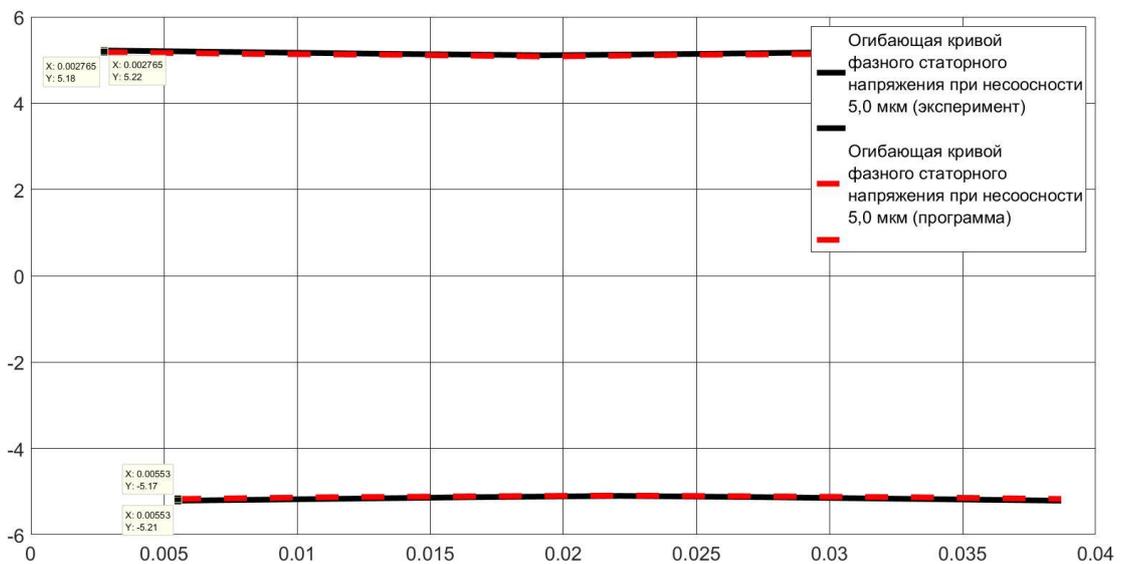


Рисунок 4.9 – Оциллограмма огибающих кривых фазного статорного напряжения в эксперименте и модели

В ходе анализа огибающих кривых фазного статорного напряжения полученных в эксперименте и с применением программы установлено, что расхождение между результатами составляет не более 5 %, из чего следует, что результаты, полученные с применением программы адекватны.

4.2 Разработка рекомендаций по совершенствованию инструментария обеспечения качества автомобильных генераторов по параметрам, определяющим несоосность статора и ротора

В диссертационной работе с использованием разработанной программы установлено, что несоосность статора и ротора АГ оказывает существенное влияние на вероятность безотказной работы АГ. Значит, при проектировании новых конструкций АГ, при технологической подготовке производства АГ необходимо учитывать влияние несоосности статора и ротора на основные электротехнические и электромеханические характеристики АГ. Результаты, полученные в диссертационной работе, легли в основу методики, позволяющей учитывать влияние несоосности статора и ротора АГ на его основные электротехнические и электромеханические характеристики [25, 63].

На первом этапе следует определить размерные параметры активной зоны АГ используя стандартную расчетную методику [3, 7, 40]. Полученные значения размерных параметров вносятся в соответствующие блоки программы. Для того, чтобы учесть влияние несоосности статора и ротора на основные электротехнические и электромеханические характеристики АГ, следует задать значения смещений геометрической оси ротора, лежащие в пределах установленного поля допуска на посадку подшипников в щиты. Значения заносятся в соответствующий блок программы. Далее программа последовательно определяет фазную статорную ЭДС, фазное статорное напряжение, результирующую силу, действующую на подшипниковые узлы и вероятность безотказной работы АГ подшипниковых узлов АГ в течение заданного временного промежутка в зависимости от величины смещения геометрической оси ротора.

Для прогнозирования стабильности технологического процесса в зависимости от установленной ширины поля допуска на посадку подшипников в щиты следует использовать подпрограмму генератора случайных чисел.

Генератор случайных чисел создает выборку величин смещения геометрической оси ротора в пределах установленного поля допуска на посадку подшипников в щиты, затем программа выполняет расчет основных электротехнических и электромеханических характеристик АГ, а также вероятность безотказной работы подшипниковых узлов в течение заданного промежутка времени при каждом значении смещения геометрической оси ротора. Используя полученные результаты расчетов, можно определить значения коэффициентов влияния величин смещения геометрической оси ротора на основные электротехнические и электромеханические характеристики. По полученным результатам строятся графики зависимостей коэффициентов влияния от амплитудных значений фазного статорного напряжения и результирующей силы, воздействующей на подшипниковые узлы. Затем определяется разница между крайними значениями коэффициента влияния для той или иной характеристики АГ, чем меньше разница – тем стабильнее технологический процесс и, соответственно, стабильнее основные электротехнические и электромеханические характеристики АГ.

В графическом формате методика показана на рисунке 4.10.

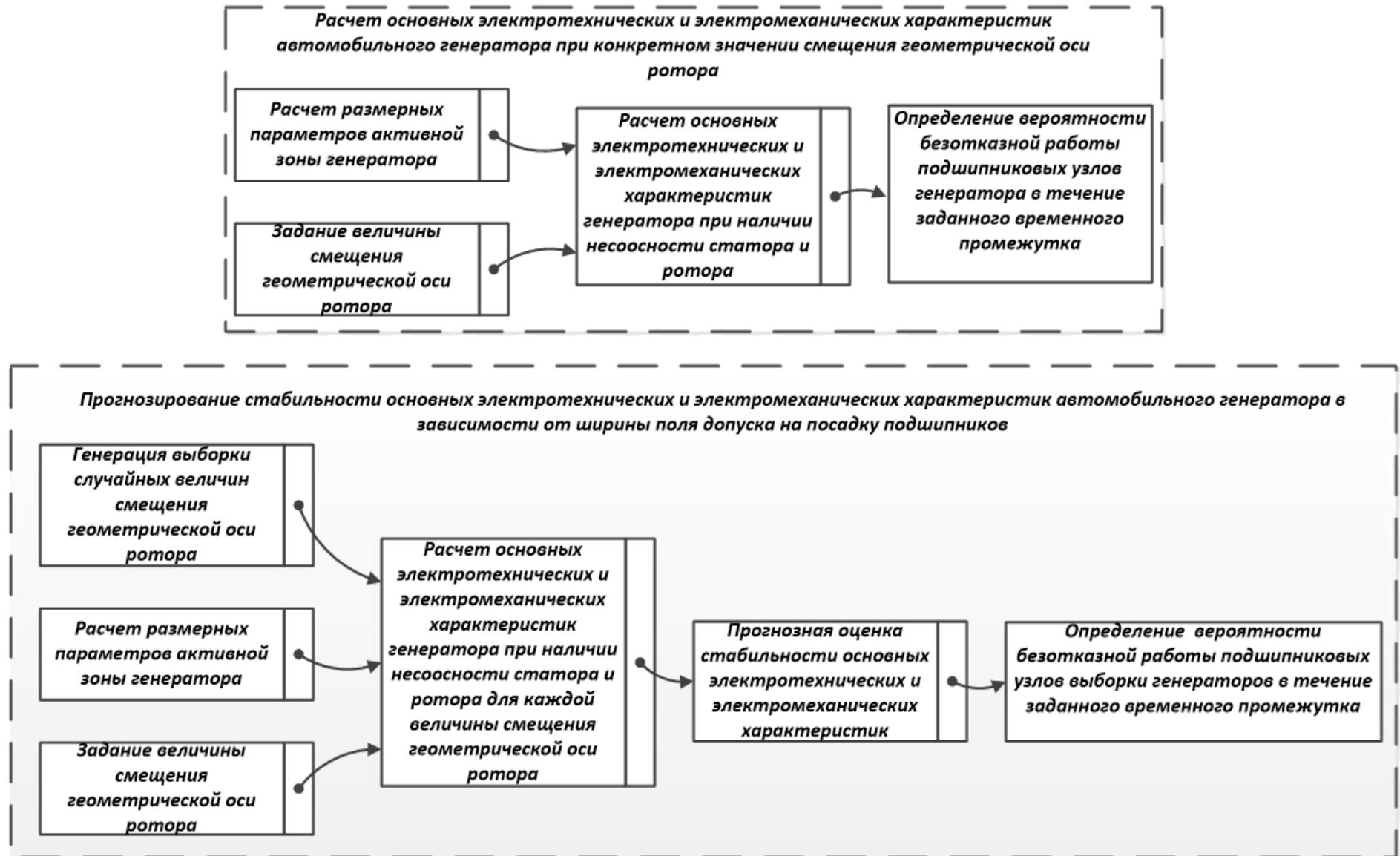


Рисунок 4.10 – Концепция методики обеспечения качества АГ по параметрам несоосности статора и ротора

Методика, разработанная на основе результатов диссертационного исследования, вошла в устойчивую практику Департамента технического контроля ПАО «КАМАЗ», справка о внедрении результатов диссертационного исследования показана в приложении 2. Использование результатов диссертационного исследования в практике ПАО «КАМАЗ» позволяет обеспечить экономический эффект в размере 2,4 млн. руб. в год, что говорит о достаточной эффективности разработанной методики.

4.3 Выводы к главе 4

Итак, в главе 4 экспериментальным путем с применением исследовательского стенда подтверждена взаимосвязь между несоосностью статора и ротора и основными электротехническими и электромеханическими характеристиками АГ. Экспериментально установлено, что при наличии несоосности статора и ротора, обусловленной некачественной посадкой подшипников, кривая фазного статорного напряжения изменяет свои амплитудные значения под центром каждого полюса.

Выполнена проверка сходимости результатов эксперимента с результатами, полученными с использованием программы, разработанной в главе 3 диссертации. Расхождение результатов, полученных в ходе эксперимента, с результатами, полученными с применением программы составляет не более 5 %, что говорит об адекватности результатов, полученных в ходе работы с программой.

В главе разработана концепция методики обеспечения качества АГ по параметрам, определяющим формирование несоосности статора и ротора. Концепция методики вошла в устойчивую практику Департамента технического контроля ПАО «КАМАЗ», экономический эффект от ее внедрения составляет 2,4 млн. руб. в год, что говорит об ее эффективности.

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 полюса в точке с минимальным значением ВЗ составляет 5,11 В (при номинальном значении ВЗ амплитудное значение, полученное в программе равно 5,08 В). Несοοсность 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 течении 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.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Акимов С.В. Электрооборудование автомобилей. / С.В. Акимов, Ю.П. Чижков. – Москва: За рулем, 2004. – 383 с.
2. Анисимов, В.М. Электромеханические стартер-генераторные системы автомобильных транспортных средств: Теория, проектирование, исследование: специальность 05.09.01 "Электромеханика и электрические аппараты": автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Анисимов Владимир Михайлович. – Самара, 2004. – 44 с.
3. Балагуров, В.А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока / В.А. Балагуров, – Москва: Высшая школа, 1982. – 272 с.
4. Белоусова, В.И. Высшая математика: учебное пособие / В.И. Белоусова, Г.М. Ермакова, М.М. Михалева, Ю.В. Шпарь, И.А. Шестакова. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет, 296 с.
5. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебное пособие / Л.А. Бессонов, – Москва: Высшая школа, 1996. – 580 с.
6. Буль, Б.К. Основы теории и расчета магнитных цепей. / Б.К. Буль. – Москва: Энергия, 1964. – 464 с.
7. Василевский, В.И. Автомобильные генераторы / В.И. Василевский, В.А. Купеев – Москва: Транспорт, 1978. – 159 с.
8. Влияние эксцентриситета ротора на магнитное поле быстроходных магнитоэлектрических генераторов / Ф.Р. Исмагилов, И.Х. Хайруллин, В.Е. Вавилов, В.С. Дуракова // Вестник машиностроения. – 2014. – № 7. – С. 32-34.
9. Вольдек, А.И. Электрические машины переменного тока: учебник для вузов / А.И. Вольдек, В.В. Попов – Санкт-Петербург: Питер, 2010. – 350 с.
10. Гольдберг, О.Д. Надежность электрических машин: учебник для студентов высших учебных заведений / О.Д. Гольдберг, С.П. Хелемская – Москва: Издательский центр «Академия», 2010. – 288 с.

11. ГОСТ 15467-79 Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения: межгосударственный стандарт: дата введения 26-01-1979 / Государственный комитет СССР по стандартам. – Москва: Стандартиформ, 2009. – 21 с.
12. ГОСТ 25346-89 Основные нормы взаимозаменяемости. Единая система допусков и посадок. Общие положения, ряды допусков и основных отклонений: межгосударственный стандарт: дата введения 11-04-1989 / Министерство станкостроительной и инструментальной промышленности СССР. – Москва: Стандартиформ, 2001. – 26 с.
13. ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике. Термины и определения: межгосударственный стандарт: дата введения 12-05-2011 / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – Москва: Стандартиформ, 2011. – 67 с.
14. ГОСТ 520-2011 Подшипники качения. Общие технические условия: межгосударственный стандарт: дата введения 12-05-2011 / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – Москва: Стандартиформ, 2011. – 67 с.
15. Дружинин В.В. Магнитные свойства электротехнической стали. / В.В. Дружинин. – Москва: Энергия, 1974. – 240 с.
16. Дьяконов, В.П. Simulink 5/6/7: Самоучитель. / В.П. Дьяконов. – Москва: ДМК-Пресс, 2008. – 784 с.
17. Ермаков, С.М. Метод Монте-Карло и смежные вопросы: монография / С. М. Ермаков, – Москва: Наука, 1975. – 473 с.
18. Исмагилов, Ф.Р. Влияние неравномерности воздушного зазора на ЭДС синхронного генератора переменного тока / Ф.Р. Исмагилов, И.Х. Хайруллин, В.Е. Вавилов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – Т. 9. – № 4. – С. 54-60.
19. Калабро С.Р. Принципы и практические вопросы надежности / С.Р. Калабро. – Москва: Машиностроение, 1966. 376 с.

20. Карасев, В.А. Теория вероятностей и математическая статистика. Математическая статистика: Практикум / В. А. Карасев, Г. Д. Левшина. – Москва: Издательский Дом МИСиС, 2016. – 120 с.
21. Кацман М.М. Электрические машины: учебное пособие / М.М. Кацман. – Москва: Высшая школа, 2001. – 463 с.
22. Клепиков, В.В. Технология машиностроения: учебник/В.В. Клепиков, А.Н. Бодров – Москва: Инфра-М, 2004. – 860 с.
23. Козловский В.Н. Методология анализа и прогнозирования качества автомобилей в эксплуатации / В.Н. Козловский, Д.В. Антипов, А.В. Заятров // Актуальные проблемы экономики. – 2016. Т.186 №12. С. 387-398.
24. Козловский, В.Н. Автоматизированный совместный анализ электронных баз данных по удовлетворенности потребителей надежностью электрооборудования автомобилей / В.Н. Козловский, А.В. Заятров // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации. – 2012. – № 2. – С. 254-259.
25. Козловский, В.Н. Влияние неравномерности воздушного зазора на выходные параметры тягового синхронного генератора тепловоза вследствие эллипсности статора / В.Н. Козловский, А.С. Саксонов, Е.В. Стрижакова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 3. – С. 149-152.
26. Козловский, В.Н. Информационно-аналитический метод определения ключевых проблем надежности в автомобилестроении / В.Н. Козловский, А.В. Заятров, Д.И. Панюков // Грузовик. – 2016. – № 3. – С. 39-45.
27. 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.
28. 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.

29. 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.

30. Козловский, В.Н. Математическое моделирование надежности системы электрооборудования современного легкового автомобиля / В.Н. Козловский, В.Е. Ют // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2009. – № 1. – С. 31-34.

31. Козловский, В.Н. Метод обеспечения качества автомобильной генераторной установки при проектировании и производстве: специальность 05.09.03 "Электротехнические комплексы и системы": автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Козловский Владимир Николаевич. – Москва, 2005. – 21 с.

32. Козловский, В.Н. Обеспечение качества и надежности системы электрооборудования автомобилей: специальность 05.09.03 "Электротехнические комплексы и системы": автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Козловский Владимир Николаевич. – Тольятти, 2010. – 41 с.

33. Козловский, В.Н. Обеспечение качества и надежности электрооборудования автомобилей: монография / В.Н. Козловский. – Тольятти: ТГУ, 2009. – 273 с.

34. Козловский, В.Н. Стратегическое планирование конкурентоспособности с точки зрения качества / В.Н. Козловский, С.А. Шанин, Д.И. Панюков // Стандарты и качество. – 2017. – № 3. – С. 76-80.

35. Козловский, В.Н. Тенденции развития электрооборудования современных автомобилей и актуализация задачи по разработке системы мониторинга комплекса электроснабжения / В.Н. Козловский, А.П. Новикова,

Н.И. Блинов // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2017. – № 1. – С. 2-4.

36. 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.

37. 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.

38. Коновалов, А.Б. Ременные передачи: учебное пособие / А.Б. Коновалов, В.М. Гребенникова – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров, 2011. – 106 с.

39. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин: учебное пособие / И.П. Копылов, – Москва: Высшая школа, 2001. – 327 с.

40. Копылов, И.П. Проектирование электрических машин: учебник для вузов / И.П. Копылов, – Москва: Юрайт, 2011. – 767 с.

41. Кузнецов, Н.Л. Надежность электрических машин / Н.Л. Кузнецов, – Москва: Издательский дом МЭИ, 2006. – 432 с.

42. Макаричев Ю.А. Синхронные машины: учебное пособие / Ю.А. Макаричев, В.Н. Овсянников. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2010. – 156 с.

43. Макаричев, Ю.А. Теоретические основы расчета и проектирования радиальных электромагнитных подшипников / Ю.А. Макаричев, А. В. Стариков – Москва: Энергоатомиздат, 2009. – 150 с.

44. Макаричев, Ю.А. Дискретная математическая модель цифровой системы управления электромагнитным подвесом ротора / Ю.А. Макаричев, А.В.

Стариков, И.С. Ткаченко // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. – 2007. – № 2. – С. 186-188.

45. Макаричев, Ю.А. Сравнение эффективности различных конструкций радиальных электромагнитных подшипников / Ю.А. Макаричев, И.С. Ткаченко // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2006. – № 40. – с. 147-151.

46. Мансуров, Н.Н. Теоретическая электротехника / Н.Н. Мансуров, В.С. Попов – Москва: Энергия, 1966. – 576 с.

47. 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.

48. Метод расчета нелинейных искажений электродвижущей силы явнополюсного генератора / И.З. Богуславский, И.Ю. Кручинина, А.С. Любимцев, Л.Ю. Штайнле // Электричество. – 2017. – № 2. – С. 27-32.

49. 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.

50. Модели мониторинга качества автомобилей в эксплуатации / В.Н. Козловский, Д.И. Панюков, Н.В. Афиногентова, А.В. Заятров // Автомобильная промышленность. – 2017. – № 1. – С. 1-5.

51. Перспективные направления аналитических исследований качества и надежности автомобилей в эксплуатации / В.Н. Козловский, В.И. Строганов, Д.И. Панюков, Н.В. Афиногентова // Труды НАМИ. – 2014. – № 259. – С. 79-97.

52. Перспективный информационно-аналитический комплекс оценки качества автомобилей в эксплуатации / В.Н. Козловский, Н.В. Афиногентова, Е.В. Полякова, А.В. Заятров // Грузовик. – 2015. – № 9. – С. 4-10.

53. Письменный, Д.Т. Конспект лекций по высшей математике: полный курс / Д.Т. Письменный – 10-е изд., испр. – Москва: Айрис-пресс, 2011.

54. Полякова, Е.В. Моделирующая система управления как инструмент обеспечения стабильности показателей качества производства электромеханических преобразователей / Е.В. Полякова, В.Н. Козловский, Р.А. Малеев // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. – 2013. – № 1. – с. 166-171.

55. Пузаков, А.В. Диагностирование генераторов автомобилей ВАЗ в условиях сервисного предприятия / А.В. Пузаков, Н.Н. Ларионов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – Т. 3. – № 5-3(16-3). – С. 74-77.

56. Пузаков, А.В. Методика диагностирования автомобильных генераторов по параметрам выходного напряжения: специальность 05.22.10 "Эксплуатация автомобильного транспорта": автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Пузаков Андрей Владимирович. – Оренбург, 2016. – 17 с.

57. Разработка вероятностно-статистической математической модели и критерия оценки соответствия бортового электрооборудования партии автомобилей по параметрам помехоустойчивости / В.Н. Козловский, П.А. Николаев, А.С. Подгорный [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 2. – С. 548-554.

58. Разработка систем обратной связи с потребителями в управлении качеством и надежностью автомобилей в период эксплуатации / В.Н. Козловский, Р.А. Малеев, Е.В. Полякова, В.И. Коротков // Известия МГТУ МАМИ. – 2014. – Т. 1. – № 2(20). – С. 37-41.

59. Разработка электротехнической системы термостатирования высоковольтных литий-ионных автомобильных аккумуляторных батарей / Д.М. Якунов, В.В. Дебелов, В.С. Стручков [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 6. – С. 317-326.

60. Решетников, А.Н. Управление синхронной электрической машиной с возбуждением от постоянных магнитов в стартер-генераторной установке / А.Н.

Решетников, С.А. Харитонов // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2014. – № 2(55). – С. 52-59.

61. 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.

62. 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.

63. 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.

64. 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.

65. 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.

66. Селихов, А.В. Повышение эффективности диагностирования технического состояния генератора автомобиля электрорезистивным методом: специальность 05.22.10 "Эксплуатация автомобильного транспорта": автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Селихов Алексей Владимирович. – Орел, 2017. – 21 с.

67. Сергеев, В.А. Теория, конструкция и расчет вентильного автомобильного генератора. Часть 1: Учебное пособие / В.А. Сергеев, В.В. Трошин, М.Т. Мифтахов – Самара: Самарский государственный технический университет, 2013. – 100 с.

68. Соловьев, Г.Е. Электротехнические материалы: учебное пособие / Г.Е. Соловьев, Е.Ю. Микаэльян, Н.П. Воронова; ФГБОУ ВО Ростовский государственный университет путей сообщения. – Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2017. – 222 с.

69. Технология производства электрооборудования автомобилей и тракторов: Учебник / В. В. Морозов, В. М. Приходько, Л. А. Соколов [и др.]. – Москва: Научно-издательский центр ИНФРА-М, 2015. – 376 с.

70. Трофимова Е.А. Теория вероятностей и математическая статистика / Е.А. Трофимова, Н.В. Кисляк, Д.В. Гилев. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет, 2018, 164 с.

71. Трошин, В.В. Особенности проектирования автомобильных генераторных установок / В.В. Трошин, В.А. Сергеев // Актуальные проблемы автотранспортного комплекса: Межвузовский сборник научных статей (с международным участием) / Самарский государственный технический университет. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2013. – с. 46-53.

72. ТУ 4573-029-05808959-2007 Генератор 9402.3701-14: технические условия: дата введения 01-07-2010 / ПАО «ЗиТ». – Самара: ПАО «ЗиТ», 2010. – 50 с.

73. Цопов, Г.И. Технологическое обеспечение надежности автомобильной генераторной установки (ГУ) / Г.И. Цопов, В.Н. Овсянников, Н.А. Елшанский // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2013. – № 3(39). – С. 192-197.

74. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. / И.В. Черных. – Москва: ДМК-Пресс, 2008. – 288 с.
75. Шанин, С.А. Параметры тревожных сигналов в области качества автомобилей в эксплуатации / С.А. Шанин, С.И. Клейменов, В.Н. Козловский // Управление качеством: Избранные научные труды семнадцатой Международной научно-практической конференции, Москва, 15–16 марта 2018 года. – Москва: Издательство Пробел-2000, 2018. – С. 409-414.
76. Шевчук, Д.А. Управление качеством: учебник / Д.А. Шевчук, – Москва: ГроссМедиа, 2008. – 216 с.
77. Шлегель, А.О. Повышение надежности электромеханической системы автомобильного генератора: специальность 05.09.01 "Электромеханика и электрические аппараты": автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Шлегель Алексей Олегович. – Самара, 2007. – 19 с.
78. Ютт, В.Е. Электрооборудование автомобилей: учебник для студентов автомобильных специальностей высших учебных заведений / В.Е. Ютт. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: Горячая линия-Телеком, 2006. – 319 с.
79. Algorithm development for finding the minimum level of noise immunity of an onboard electrical complex during control tests / V. Kozlovsky, A. Podgorny, A. Saksonov [et al.] // E3S Web of Conferences, Saint-Petersburg, 23–26 ноября 2020 года. – Saint-Petersburg, 2020. – P. 1-5
80. Semiconductors – the Next Wave. — Текст: электронный // Deloitte: [сайт]. — URL: <https://www2.deloitte.com/tw/en/pages/technology-media-and-telecommunications/articles/semiconductor-next-wave.html> (дата обращения: 06.10.2020).
81. Testing of Electromagnetic Interference Level by Means of Onboard Intelligent Measuring System as a Tool for Assessing Operating Quality of Passenger Car Electrical Systems / V.N. Kozlovsky, A.S. Saksonov, S.V. Petrovsky [et al.] // 2021 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport

Complex, TIRVED 2021 – Conference Proceedings, Moscow, 11–12 November 2021 – Moscow, 2021.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Программный скрипт для определения зависимости коэффициента влияния от параметров основных электротехнических и электромеханических характеристик

Приложение 2

Справка о внедрении основных результатов научно-технической деятельности в практику ПАО «КАМАЗ»

Приложение 3

Код подпрограммы для расчета основных электромеханических характеристик АГ

Приложение 1

```

%номинальные значения входных и выходных параметров:
Xj1=0.365; fxj1=5.08; fxj2=3;
%Расчет коэффициентов влияния НСР на основные электротехнические и
электромеханические характеристики АГ:
%Приращение входного параметра: Приращение выходного параметра:
dxj11=0.3636; dfXj11=5.13; dfXj21=755;
%Расчет коэффициентов влияния:
Cij11=((dfXj11)./(dXj11)).*(Xj1./fxj1); Cij21=((dfXj21)./(dXj11)).*(Xj1./fxj2);
%Приращение входного параметра: Приращение выходного параметра:
dxj12=0.3616; dfXj12=5.15; dfXj22=766;
%Расчет коэффициентов влияния:
Cij12=((dfXj12)./(dXj12)).*(Xj1./fxj1); Cij22=((dfXj22)./(dXj12)).*(Xj1./fxj2);
%Приращение входного параметра: Приращение выходного параметра:
dxj13=0.3607; dfXj13=5.16; dfXj23=781;
%Расчет коэффициентов влияния:
Cij13=(dfXj13)./(dXj13).*(Xj1./fxj1); Cij23=(dfXj23)./(dXj13).*(Xj1./fxj2);
%Приращение входного параметра: Приращение выходного параметра:
dxj14=0.3605; dfXj14=5.17; dfXj24=784;
%Расчет коэффициентов влияния:
Cij14=(dfXj14)./(dXj14).*(Xj1./fxj1); Cij24=(dfXj24)./(dXj14).*(Xj1./fxj2);
%Приращение входного параметра: Приращение выходного параметра:
dxj15=0.36; dfXj15=5.18; dfXj25=792;
%Расчет коэффициентов влияния:
Cij15=(dfXj15)./(dXj15).*(Xj1./fxj1); Cij25=(dfXj25)./(dXj15).*(Xj1./fxj2);
%Приращение входного параметра: Приращение выходного параметра:
dxj16=0.3593; dfXj16=5.19; dfXj26=795;
%Расчет коэффициентов влияния:
Cij16=(dfXj16)./(dXj16).*(Xj1./fxj1); Cij26=(dfXj26)./(dXj16).*(Xj1./fxj2);
%Приращение входного параметра: Приращение выходного параметра:
dxj17=0.3579; dfXj17=5.20; dfXj27=803;
%Расчет коэффициентов влияния:
Cij17=(dfXj17)./(dXj17).*(Xj1./fxj1); Cij27=(dfXj27)./(dXj17).*(Xj1./fxj2);
%Приращение входного параметра: Приращение выходного параметра:
dxj18=0.3571; dfXj18=5.21; dfXj28=822;
%Расчет коэффициентов влияния:
Cij18=(dfXj18)./(dXj18).*(Xj1./fxj1); Cij28=(dfXj28)./(dXj18).*(Xj1./fxj2);
%Приращение входного параметра: Приращение выходного параметра:
dxj19=0.3560; dfXj19=5.22; dfXj29=837;
%Расчет коэффициентов влияния:
Cij19=(dfXj19)./(dXj19).*(Xj1./fxj1); Cij29=(dfXj29)./(dXj19).*(Xj1./fxj2);
%Приращение входного параметра: Приращение выходного параметра:
dxj110=0.3534; dfXj110=5.23; dfXj210=894;
%Расчет коэффициентов влияния:
Cij110=(dfXj110)./(dXj110).*(Xj1./fxj1); Cij210=(dfXj210)./(dXj110).*(Xj1./fxj2);

```

Приложение 2

СПРАВКА

О ВНЕДРЕНИИ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ПРАКТИКУ ПАО «КАМАЗ»

В рамках совместной работы ПАО «КАМАЗ» и ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «СамГТУ») реализуются комплексные мероприятия по совершенствованию организационно-технической деятельности в области улучшения качества продукции и услуг.

Под научным руководством д.т.н., профессора ФГБОУ ВО «СамГТУ» Козловского В.Н. решаются задачи по совершенствованию инструментов контроля и мониторинга качества продукции и услуг на этапах жизненного цикла.

Решением задачи по развитию инструментов контроля качества автомобильных генераторов на этапе входного статистического контроля в ПАО «КАМАЗ» занимается м.н.с., аспирант ФГБОУ ВО «СамГТУ» Саксонов Александр Сергеевич.

Настоящей справкой подтверждается, что выделенная Саксоновым А.С. научно-техническая задача, связанная с обеспечением качества автомобильных генераторов по параметрам стабильности сборки подшипниковых узлов, определяющих несоосность ротора и статора электромеханического преобразователя является крайне важной и актуальной, для автомобильного производства.

Разработанные Саксоновым А.С. рекомендации, методика обеспечения качества и количественный критерий определяющий весомость влияния стабильности параметров определяющих несоосность основных компонентов электромеханического преобразователя на стабильность выходных характеристик автомобильного генератора, вошли в устойчивую практику ПАО «КАМАЗ». На их основе разработаны дополнительные требования к качеству автомобильных генераторов, а также инструменты входного статистического контроля качества, которые позволяют не допускать дефектную продукцию на самых ранних этапах производственного процесса.

Внедрение предложенного инструментария обеспечивает экономический эффект в размере 2,4 млн. руб. в год, в ценах 2021 г.

Заместитель директора Департамента
технического контроля ПАО «КАМАЗ»,
к.т.н.



С.А. Шанин

Приложение 3

```
1 /*
2  * File: sfun_target5.c
3  *
4  * Code generated for Simulink model 'sfun_target5'.
5  *
6  * Model version : 1.46
7  * Simulink Coder version : 8.9 (R2015b) 13-Aug-2015
8  * C/C++ source code generated on : Tue Nov 22 14:43:52 2022
9  *
10 * Target selection: ert.tlc
11 * Embedded hardware selection: Intel->x86-64 (Windows64)
12 * Code generation objectives:
13 * 1. Execution efficiency
14 * 2. RAM efficiency
15 * Validation result: Not run
16 */
17
18 #include "sfun_target5.h"
19
20 /* Private macros used by the generated code to access rtModel */
21 #ifndef rtmlsMajorTimeStep
22 # define rtmlsMajorTimeStep(rtm) (((rtm)->Timing.simTimeStep) == MAJOR_TIME_STEP)
23 #endif
24
```

```
25 #ifndef rtmsMinorTimeStep
26 # define rtmsMinorTimeStep(rtm) (((rtm)->Timing.simTimeStep) == MINOR_TIME_STEP)
27 #endif
28
29 #ifndef rtmGetTPtr
30 # define rtmGetTPtr(rtm) ((rtm)->Timing.t)
31 #endif
32
33 #ifndef rtmSetTPtr
34 # define rtmSetTPtr(rtm, val) ((rtm)->Timing.t = (val))
35 #endif
36
37 /* Continuous states */
38 X rtX;
39
40 /* Block signals and states (auto storage) */
41 DW rtDW;
42
43 /* External inputs (root inport signals with auto storage) */
44 ExtU rtU;
45
46 /* External outputs (root outports fed by signals with auto storage) */
47 ExtY rtY;
48
49 /* Real-time model */
```

```
50 RT_MODEL rtM_;
51 RT_MODEL *const rtM = &rtM_;
52
53 /* private model entry point functions */
54 extern void sfun_target5_derivatives(void);
55
56 /*
57 * This function updates continuous states using the ODE3 fixed-step
58 * solver algorithm
59 */
60 static void rt_ertODEUpdateContinuousStates(RTWSolverInfo *si )
61 {
62 /* Solver Matrices */
63 static const real_T rt_ODE3_A[3] = {
64 1.0/2.0, 3.0/4.0, 1.0
65 };
66
67 static const real_T rt_ODE3_B[3][3] = {
68 { 1.0/2.0, 0.0, 0.0 },
69
70 { 0.0, 3.0/4.0, 0.0 },
71
72 { 2.0/9.0, 1.0/3.0, 4.0/9.0 }
73 };
74
```

```

75 time_T t = rtsiGetT(si);
76 time_T tnew = rtsiGetSolverStopTime(si);
77 time_T h = rtsiGetStepSize(si);
78 real_T *x = rtsiGetContStates(si);
79 ODE3_IntgData *id = (ODE3_IntgData *)rtsiGetSolverData(si);
80 real_T *y = id->y;
81 real_T *f0 = id->f[0];
82 real_T *f1 = id->f[1];
83 real_T *f2 = id->f[2];
84 real_T hB[3];
85 int_T i;
86 int_T nXc = 2;
87 rtsiSetSimTimeStep(si,MINOR_TIME_STEP);
88
89 /* Save the state values at time t in y, we'll use x as ynew. */
90 (void) memcpy(y, x,
91 (uint_T)nXc*sizeof(real_T));
92
93 /* Assumes that rtsiSetT and ModelOutputs are up-to-date */
94 /* f0 = f(t,y) */
95 rtsiSetdX(si, f0);
96 sfun_target5_derivatives();
97
98 /* f(:,2) = feval(odefile, t + hA(1), y + f*hB(:,1), args:)(*)); */
99 hB[0] = h * rt_ODE3_B[0][0];

```

```
100 for (i = 0; i < nXc; i++) {
101 x[i] = y[i] + (f0[i]*hB[0]);
102 }
103
104 rtsiSetT(si, t + h*rt_ODE3_A[0]);
105 rtsiSetdX(si, f1);
106 sfun_target5_step();
107 sfun_target5_derivatives();
108
109 /* f(:,3) = feval(odefile, t + hA(2), y + f*hB(:,2), args:)(*); */
110 for (i = 0; i <= 1; i++) {
111 hB[i] = h * rt_ODE3_B[1][i];
112 }
113
114 for (i = 0; i < nXc; i++) {
115 x[i] = y[i] + (f0[i]*hB[0] + f1[i]*hB[1]);
116 }
117
118 rtsiSetT(si, t + h*rt_ODE3_A[1]);
119 rtsiSetdX(si, f2);
120 sfun_target5_step();
121 sfun_target5_derivatives();
122
123 /* tnew = t + hA(3);
124 ynew = y + f*hB(:,3); */
```

```
125 for (i = 0; i <= 2; i++) {
126   hB[i] = h * rt_ODE3_B[2][i];
127 }
128
129 for (i = 0; i < nXc; i++) {
130   x[i] = y[i] + (f0[i]*hB[0] + f1[i]*hB[1] + f2[i]*hB[2]);
131 }
132
133 rtsiSetT(si, tnew);
134 rtsiSetSimTimeStep(si, MAJOR_TIME_STEP);
135 }
136
137 /* Model step function */
138 void sfun_target5_step(void)
139 {
140   if (rtIsMajorTimeStep(rtM)) {
141     /* set solver stop time */
142     rtsiSetSolverStopTime(&rtM->solverInfo, ((rtM->Timing.clockTick0+1)*
143     rtM->Timing.stepSize0));
144   } /* end MajorTimeStep */
145
146   /* Update absolute time of base rate at minor time step */
147   if (rtIsMinorTimeStep(rtM)) {
148     rtM->Timing.t[0] = rtsiGetT(&rtM->solverInfo);
149   }
```

```

150
151 /* Outputs for Atomic SubSystem: '<Root>/Подпрограмма расчета основных электромеханических
    характеристик АГ' */
152 /* Integrator: '<S1>/Integrator Limited1' */
153 /* MATLAB Function 'Подпрограмма расчета основных электромеханических характеристик
    АГ/MATLAB Function1': '<S2>:1' */
154 /* '<S2>:1:4' */
155 /* Limited Integrator */
156 if (rtX.IntegratorLimited1_CSTATE >= 6.2831853071795862) {
157     rtX.IntegratorLimited1_CSTATE = 6.2831853071795862;
158 } else {
159     if (rtX.IntegratorLimited1_CSTATE <= 0.0) {
160         rtX.IntegratorLimited1_CSTATE = 0.0;
161     }
162 }
163
164 /* Fcn: '<S1>/Fcn' incorporates:
165 * Inport: '<Root>/Индукция в ВЗ'
166 * Inport: '<Root>/Размер ВЗ'
167 * Inport: '<Root>/Угол поворота ротора'
168 */
169 /* MATLAB Function 'Подпрограмма расчета основных электромеханических характеристик
    АГ/MATLAB Function3': '<S4>:1' */
170 /* '<S4>:1:4' */
171 /* MATLAB Function 'Подпрограмма расчета основных электромеханических характеристик
    АГ/MATLAB Function2': '<S3>:1' */
172 /* '<S3>:1:4' */

```

```

173 rtDW.Fcn = pow(rtU.y, 2.0) / pow(rtU.u_pk, 2.0) * cos(rtU.u_b) * 1.2;
174
175 /* Integrator: '<S1>/Integrator Limited2' */
176 /* Limited Integrator */
177 if (rtX.IntegratorLimited2_CSTATE >= 3600.0) {
178   rtX.IntegratorLimited2_CSTATE = 3600.0;
179 } else {
180   if (rtX.IntegratorLimited2_CSTATE <= 0.0) {
181     rtX.IntegratorLimited2_CSTATE = 0.0;
182   }
183 }
184
185 rtDW.IntegratorLimited2 = rtX.IntegratorLimited2_CSTATE;
186
187 /* End of Integrator: '<S1>/Integrator Limited2' */
188
189 /* Outport: '<Root>/Результирующая сила, воздействующая на подшипники' incorporates:
190  * Constant: '<S1>/t'
191  * Fcn: '<S1>/Fcn1'
192  * Inport: '<Root>/Длина ВЗ'
193  * Inport: '<Root>/Количество ремней '
194  * Inport: '<Root>/Коэффициент динамической нагрузки ремня'
195  * Inport: '<Root>/Коэффициент длины ремня'
196  * Inport: '<Root>/Коэффициент угла обхвата ремня'
197  * Inport: '<Root>/Магнитная проницаемость воздуха'

```

```

198 * Inport: '<Root>/Номинальная передаваемая мощность на вал АГ'
199 * Inport: '<Root>/Погонная масса ремня'
200 * Inport: '<Root>/Средний диаметр ВЗ'
201 * Inport: '<Root>/Частота вращения ротора'
202 * Integrator: '<S1>/Integrator Limited1'
203 * MATLAB Function: '<S1>/MATLAB Function1'
204 * MATLAB Function: '<S1>/MATLAB Function2'
205 * MATLAB Function: '<S1>/MATLAB Function3'
206 */
207 rtY.u_j = (rtU.u * rtU.u_e / (rtU.u_d * 4.0) * rtX.IntegratorLimited1_CSTATE -
208 ((2.5 - rtU.u_j) * rtU.u_f * rtU.u_g / (rtU.u_j * rtU.u_h * rtU.u_p
209 * rtU.u_m) * 500.0 + rtU.u_h * rtU.u_h * rtU.u_hs) * 1.0E-6) *
210 0.31882880144861769;
211
212 /* End of Outputs for SubSystem: '<Root>/Подпрограмма расчета основных электромеханических
    характеристик АГ' */
213 if (rtIsMajorTimeStep(rtM)) {
214   rt_ertODEUpdateContinuousStates(&rtM->solverInfo);
215
216   /* Update absolute time for base rate */
217   /* The "clockTick0" counts the number of times the code of this task has
218   * been executed. The absolute time is the multiplication of "clockTick0"
219   * and "Timing.stepSize0". Size of "clockTick0" ensures timer will not
220   * overflow during the application lifespan selected.
221   */

```

```
222 ++rtM->Timing.clockTick0;

223 rtM->Timing.t[0] = rtsiGetSolverStopTime(&rtM->solverInfo);

224

225 {

226 /* Update absolute timer for sample time: [0.1s, 0.0s] */

227 /* The "clockTick1" counts the number of times the code of this task has

228 * been executed. The resolution of this integer timer is 0.1, which is the step size

229 * of the task. Size of "clockTick1" ensures timer will not overflow during the

230 * application lifespan selected.

231 */

232 rtM->Timing.clockTick1++;

233 }

234 */ end MajorTimeStep */

235 }

236

237 /* Derivatives for root system: '<Root>' */

238 void sfun_target5_derivatives(void)

239 {

240 boolean_T lsat;

241 boolean_T usat;

242 XDot *_rtXdot;

243 _rtXdot = ((XDot *) rtM->ModelData.derivs);

244

245 /* Derivatives for Atomic SubSystem: '<Root>/Подпрограмма расчета основных

электромеханических характеристик АГ' */
```

```
246 /* Derivatives for Integrator: '<S1>/Integrator Limited1' */
247 lsat = (rtX.IntegratorLimited1_CSTATE <= 0.0);
248 usat = (rtX.IntegratorLimited1_CSTATE >= 6.2831853071795862);
249 if (((!lsat) && (!usat)) || (lsat && (rtDW.IntegratorLimited2 > 0.0)) || (usat
250 && (rtDW.IntegratorLimited2 <= 0.0))) {
251   _rtXdot->IntegratorLimited1_CSTATE = rtDW.IntegratorLimited2;
252 } else {
253   /* in saturation */
254   _rtXdot->IntegratorLimited1_CSTATE = 0.0;
255 }
256
257 /* End of Derivatives for Integrator: '<S1>/Integrator Limited1' */
258
259 /* Derivatives for Integrator: '<S1>/Integrator Limited2' */
260 lsat = (rtX.IntegratorLimited2_CSTATE <= 0.0);
261 usat = (rtX.IntegratorLimited2_CSTATE >= 3600.0);
262 if (((!lsat) && (!usat)) || (lsat && (rtDW.Fcn > 0.0)) || (usat && (rtDW.Fcn <
263 0.0))) {
264   _rtXdot->IntegratorLimited2_CSTATE = rtDW.Fcn;
265 } else {
266   /* in saturation */
267   _rtXdot->IntegratorLimited2_CSTATE = 0.0;
268 }
269
270 /* End of Derivatives for Integrator: '<S1>/Integrator Limited2' */
```

```
271 /* End of Derivatives for SubSystem: '<Root>/Подпрограмма расчета основных  
электромеханических характеристик АГ' */  
  
272 }  
  
273  
  
274 /* Model initialize function */  
  
275 void sfun_target5_initialize(void)  
  
276 {  
  
277 /* Registration code */  
  
278 {  
  
279 /* Setup solver object */  
  
280 rtsiSetSimTimeStepPtr(&rtM->solverInfo, &rtM->Timing.simTimeStep);  
  
281 rtsiSetTPtr(&rtM->solverInfo, &rtmGetTPtr(rtM));  
  
282 rtsiSetStepSizePtr(&rtM->solverInfo, &rtM->Timing.stepSize0);  
  
283 rtsiSetdXPtr(&rtM->solverInfo, &rtM->ModelData.derivs);  
  
284 rtsiSetContStatesPtr(&rtM->solverInfo, (real_T **)  
  
285 &rtM->ModelData.contStates);  
  
286 rtsiSetNumContStatesPtr(&rtM->solverInfo, &rtM->Sizes.numContStates);  
  
287 rtsiSetNumPeriodicContStatesPtr(&rtM->solverInfo,  
  
288 &rtM->Sizes.numPeriodicContStates);  
  
289 rtsiSetPeriodicContStateIndicesPtr(&rtM->solverInfo,  
  
290 &rtM->ModelData.periodicContStateIndices);  
  
291 rtsiSetPeriodicContStateRangesPtr(&rtM->solverInfo,  
  
292 &rtM->ModelData.periodicContStateRanges);  
  
293 rtsiSetErrorStatusPtr(&rtM->solverInfo, (&rtmGetErrorStatus(rtM)));  
  
294 rtsiSetRTModelPtr(&rtM->solverInfo, rtM);
```

```
295 }  
  
296  
297 rtsiSetSimTimeStep(&rtM->solverInfo, MAJOR_TIME_STEP);  
298 rtM->ModelData.intgData.y = rtM->ModelData.odeY;  
299 rtM->ModelData.intgData.f[0] = rtM->ModelData.odeF[0];  
300 rtM->ModelData.intgData.f[1] = rtM->ModelData.odeF[1];  
301 rtM->ModelData.intgData.f[2] = rtM->ModelData.odeF[2];  
302 rtM->ModelData.contStates = ((X *) &rtX);  
303 rtsiSetSolverData(&rtM->solverInfo, (void *)&rtM->ModelData.intgData);  
304 rtsiSetSolverName(&rtM->solverInfo, "ode3");  
305 rtmSetTPtr(rtM, &rtM->Timing.tArray[0]);  
306 rtM->Timing.stepSize0 = 0.1;  
  
307  
308 /* InitializeConditions for Atomic SubSystem: '<Root>/Подпрограмма расчета основных  
электромеханических характеристик АГ' */  
309 /* InitializeConditions for Integrator: '<S1>/Integrator Limited1' */  
310 rtX.IntegratorLimited1_CSTATE = 0.0;  
311  
312 /* InitializeConditions for Integrator: '<S1>/Integrator Limited2' */  
313 rtX.IntegratorLimited2_CSTATE = 0.0;  
314  
315 /* End of InitializeConditions for SubSystem: '<Root>/Подпрограмма расчета основных  
электромеханических характеристик АГ' */  
316 }  
  
317  
318 /*
```

319 * *File trailer for generated code.*

320 *

321 * *[EOF]*

322 */

323