

На правах рукописи



Бельский Игорь Олегович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ДИАГНОСТИКИ
АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО ПАРАМЕТРАМ
ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка
информации (транспорт)

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Иркутск – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО ИргУПС)

Научный руководитель: Лукьянов Анатолий Валерианович,
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры «Физика, механика и приборостроение»
ФГБОУ ВО ИргУПС

Официальные оппоненты: Суворов Иван Флегонтович,
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры «Энергетика» ФГБОУ ВО «ЗабГУ»,
г. Чита

Эльхутов Сергей Николаевич,
кандидат технических наук, доцент, заведующий
кафедрой «Промышленная электроника и информа-
ционно-измерительная техника» ФГБОУ ВО
«АнГТУ», г. Ангарск

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образо-
вательное учреждение высшего образования
«Иркутский национальный исследовательский
технический университет» (ФГБОУ ВО
«ИРНИТУ»), г. Иркутск

Защита состоится 17 декабря 2020 г., в 13.00 часов на заседании диссертационного совета Д 218.004.03, созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения» по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, ауд. Д601, тел. 8(3952)638-394, e-mail: diss_sovet@irgups.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения» и на сайте <http://www.irgups.ru>

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



Ю.М. Краковский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Асинхронные электродвигатели (АЭД) благодаря высоким эксплуатационным показателям, надёжности и простоте конструкции нашли широкое применение во многих отраслях промышленности и народного хозяйства. На железнодорожном транспорте АЭД используются в качестве тяговых двигателей и привода вспомогательных машин (мотор-компрессоров, мотор-вентиляторов и т.п.). Асинхронные электродвигатели общего назначения мощностью до 100 кВт являются наиболее распространённым видом электрических машин. Поэтому вопросы повышения надёжности АЭД, как наиболее ответственного звена транспортного машинного оборудования, являются актуальными.

Управление техническим состоянием и обслуживанием АЭД машинного оборудования, является приоритетной задачей, для решения которой необходима разработка методов и средств диагностики состояния АЭД. Это позволит определять дефекты на ранней стадии развития, проводить оценку степени их опасности и своевременно выводить АЭД в ремонт. Применение данных методов позволит уменьшить время простоя оборудования из-за неплановых ремонтов, избежать аварийных ситуаций и их негативных последствий.

Частые причины возникновения дефектов АЭД – это их работа в критических условиях эксплуатации, например, при частых пусках, в условиях повышенных нагрузок, неравномерного распределения подводимого фазного напряжения или в условиях повышенных (пониженных) температур. Именно поэтому возникает необходимость в проведении периодического контроля технического состояния АЭД, при этом частота его проведения должна зависеть от степени развития дефектов и условий эксплуатации.

Наиболее распространённая в данный момент система планово-предупредительного обслуживания включает в себя проведение осмотров оборудования и плановых ремонтов АЭД через конкретные промежутки времени или пробега.

Однако, развитие дефектов может носить быстро развивающийся характер. При этом возможен выход АЭД из строя, задолго до проведения плановых диагностических мероприятий. Именно поэтому предпочтительным является проведение обслуживания оборудования по фактическому состоянию. Данный подход включает мониторинг параметров технического состояния, обнаружение неисправностей на ранней стадии их развития и подготовку к проведению ремонтных работ до возникновения отказов. Эти процессы относятся к управлению техническим состоянием машинного оборудования по диагностическим параметрам возникающих дефектов, а измерение и анализ этих параметров связаны с обработкой больших массивов информации. Причём увеличение количества и качества диагностических параметров, обеспечение возможности их прогнозирования повышает достоверность диагностики развития дефектов и создаёт возможность своевременной подготовки оборудования к ремонту.

Одним из наиболее перспективных на данный момент является системный подход к управлению техническим состоянием объектов. Его сущность состоит в реализации общей теории систем, согласно которой объект исследования (система диагностики АЭД) должен рассматриваться как сложная система и, одновременно, в составе более сложной системы (система методов обслуживания по фактическому состоянию).

Вклад в развитие методов системного анализа внесли такие учёные как Волкова В.Н., Денисов А.А., Емельянов А.А., Кинг В., Клиланд Д., Коваленко А.Н., Месарович М., Оптнер С.Л., Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П., Уёмов А.И., Черняк Ю.И. и др.

Современные тенденции развития техники и транспорта обуславливают разработку наиболее приоритетных направлений научных исследований – энерго- и ресурсосбережения. Актуальным становится повышение надёжности и экономической эффективности эксплуатации АЭД путём снижения издержек на обслуживание и ремонт, внедрения цифровых технологий контроля и управления техническим состоянием.

Поэтому актуальной является задача разработки методов и средств диагностики технического состояния АЭД на основе новых каналов диагностической информации, обладающих высокой достоверностью выходных данных, способных выявлять дефекты на ранней стадии развития без остановки на ремонт.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности эксплуатации асинхронных электродвигателей транспортных машин путём управления их техническим состоянием за счёт введения дополнительной диагностической информации от разработанной системы контроля пространственной структуры внешнего магнитного поля и угловой скорости ротора.

Для достижения поставленной цели необходимо решить **следующие задачи**:

1) Повышение эффективности управления техническим состоянием асинхронных электродвигателей транспортных машин на основе использования дополнительных каналов диагностической информации о пространственном распределении внешнего магнитного поля и колебаний угловой скорости ротора.

2) Применение системного подхода к разработке структуры и изготовление опытного образца многоканального комплекса синхронной регистрации внешнего магнитного поля и колебаний угловой скорости ротора в задачах диагностики дефектов «несимметрия фаз питающего тока» и «обрыв стержней ротора» АЭД.

3) Повышение достоверности идентификации дефектов, степени их развития и возможности локализации их положения за счёт обработки и анализа дополнительной диагностической информации о параметрах пространственного распределения напряжённости внешнего магнитного поля и колебаний угловой скорости ротора.

4) Разработка математической и конечно-элементной моделей изменения новых диагностических параметров АЭД – распределения внешнего магнитного поля и колебаний угловой скорости ротора от вида и степени развития дефектов, определение их критического уровня развития.

5) Разработка методики сбора, обработки и визуализации диагностической информации о параметрах внешнего магнитного поля и колебаний угловой скорости роторов электродвигателей.

Объектом исследования является система контроля технического состояния АЭД по параметрам внешнего магнитного поля (ВМП) и угловой скорости вращения ротора (УСВР).

Предметом исследования является математическое, конечно-элементное и методическое обеспечение обработки диагностической информации АЭД, натурное моделирование ВМП и созданные на их основе методики обработки, анализа и визуализации диагностической информации.

Научная новизна состоит в следующем:

1) Предложен системный подход к разработке структуры многоканального комплекса контроля параметров внешнего магнитного поля и колебаний угловой скорости ротора асинхронных машин, разработана методика проведения диагностических исследований АЭД как важных электромеханических элементов сложных технических систем (п. 2, 5).

2) Разработано математическое, конечно-элементное обеспечение диагностики технического состояния АЭД на основе новых диагностических параметров внешнего

магнитного поля и колебаний угловой скорости ротора, изменения их распределения при развитии дефектов (п. 2, 5).

3) Предложен новый способ и разработано устройство многоканальной модульной системы на основе дополнительной диагностической информации о пространственном распределении внешнего магнитного поля и колебаний угловой скорости ротора, позволяющих повысить эффективность управления техническим состоянием АЭД транспортных машин (п. 12).

4) Разработана методика сбора, обработки и визуализации диагностической информации, экспериментально подтверждена зависимость параметров распределения напряжённости внешнего магнитного поля и колебаний угловой скорости ротора от вида и степени развития дефектов АЭД (п. 12).

Практическая значимость:

а) Впервые предложен способ, разработана и изготовлена модульная многоканальная система, позволяющая проводить комплексную диагностику технического состояния асинхронных электродвигателей транспортных машин широкой номенклатуры по пространственному распределению внешнего магнитного поля и колебаниям угловой скорости ротора.

б) Опытный экземпляр многоканальной системы диагностики АЭД прошёл успешную опытную апробацию в сервисном локомотивном депо «Улан-Удэнское» ООО «ЛокоТех-Сервис» при диагностике дефектов асинхронных электродвигателей вспомогательных машин электровозов.

в) Разработанная система позволяет повысить достоверность контроля и распознавания развивающихся дефектов АЭД «обрыв стержней ротора» и «несимметрия фаз питающего тока», определить степень их опасности для дальнейшей эксплуатации и локализовать их расположение, что позволяет повысить эффективность эксплуатации электродвигателей по фактическому состоянию.

Тематика работы соответствует пунктам паспорта специальности **05.13.01**: п. 2 «Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации»; п. 5 «Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации»; п. 12 «Визуализация, трансформация и анализ информации на основе компьютерных методов обработки информации».

Методы исследований. Выводы и результаты диссертационной работы получены с использованием методов системного анализа, математического и конечно-элементного моделирования, метода симметричных составляющих, теоретических основ электротехники, неразрушающего контроля и экспериментальных исследований.

Степень достоверности полученных результатов исследований и выводов, сделанных в работе, обеспечивается удовлетворительной сходимостью результатов, рассчитанных при математическом и КЭ моделировании с полученными результатами экспериментальных исследований при испытаниях на лабораторной установке с искусственно созданными дефектами и на реальном эксплуатируемом объекте.

На защиту выносятся следующие положения и результаты:

1) Способ диагностики дефектов АЭД на основе добавления новых каналов диагностической информации о пространственном распределении ВМП и колебаний УСВР, использующий системный подход.

2) Результаты математического и КЭ моделирования АЭД в динамике развития дефектов «несимметрия фаз питающего тока» и «обрыв стержней ротора».

3) Устройство многоканальной модульной системы диагностики технического состояния АЭД на основе комплексного контроля параметров распределения ВМП и УСВР.

4) Методика сбора и обработки диагностической информации, получаемой при диагностике АЭД широкой номенклатуры.

Реализация результатов подтверждена актом об использовании результатов НИОКР на тему: «Разработка комплекса регистрации и обработки данных о параметрах внешнего магнитного поля для диагностики дефектов асинхронных электродвигателей электровозов и тепловозов» в сервисном локомотивном депо «Улан-Удэнское» ООО «ЛокоТех-Сервис».

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях: IV всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» (г. Иркутск, 2013); пятой Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Проблемы транспорта Восточной Сибири» (г. Иркутск, 2014); VI международной конференция «Проблемы механики современных машин» (г. Улан-Удэ 2015); VI международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» (г. Иркутск, 2015); VII международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» (г. Иркутск, 2016); VIII международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» (г. Иркутск, 2017); IX международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» (г. Иркутск, 2018); VI международном научно-практическом симпозиуме «Инновации и обеспечение безопасности эксплуатации современных железных дорог» (г. Иркутск, 2018); X международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» (г. Иркутск, 2019).

Личный вклад автора состоит в построении классификации современных методов диагностики на основе системного подхода, проектировании многоканальной модульной системы синхронной регистрации ВМП на основе системного подхода, разработке математической и КЭ моделей, подготовки средств и методик проведения исследований напряжённости ВМП и колебаний УСВР, проведении натурных испытаний АЭД в составе лабораторного стенда и реальных условиях эксплуатации.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 16 научных работ, из них 1 патент на изобретение и 4 публикации в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, имеющего 146 наименований и трёх приложений. Общий объём работы составляет 191 страницу, включая 109 рисунков и 12 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и поставлены задачи исследований, определены объект и предмет исследований, сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведён обзор устройства АЭД с короткозамкнутым ротором. Рассмотрено управление техническим состоянием асинхронных машин как элементов сложных электромеханических систем на основе обобщённой схемы (рисунок 1).

Изменение рабочих характеристик АЭД (объекта управления) в составе сложной системы вызывает изменение параметров, характеризующих его состояние (параметры потерь, механические или электрические характеристики), которые должны быть скомпенсированы с помощью введения цепи обратной связи по рабочим параметрам, образующей основной контур управления.

Цепь обратной связи включает систему контроля параметров, предназначенную для сбора текущей диагностической информации о техническом состоянии АЭД.



Рисунок 1 – Обобщённая схема управления техническим состоянием АЭД в составе сложной системы

Управление состоянием эксплуатации реализуется на основании данных, поступающих из блока контроля параметров. Корректирующие воздействия, выработанные блоком управления состоянием эксплуатации, подаются на вход системы эксплуатации, откуда вырабатывается регулирующее воздействие, которое уменьшает отклонение выходного параметра АЭД (объекта управления).

Организационное воздействие в виде принятия решений о техническом состоянии АЭД по результатам диагностической информации реализуется эксплуатационным персоналом по алгоритмам или инструкциям (регламентирующим документам предприятия) выявления дефектов и способам реагирования на них.

Современные методы диагностики АЭД, позволяют обнаружить только признаки наличия дефектов, но не позволяют определять степень их опасности, а значит, и организовать управляющие воздействия в терминах «допустимо» («Д», т.е. допустимо для дальнейшей эксплуатации), «требуется принятия мер» («ТПМ», т.е. допустима кратковременная эксплуатация с определением вида дефекта, неисправной детали или узла, с проведением мероприятий по подготовке к ремонту), «недопустимо» («НД», т.е. безусловный вывод машинного оборудования из эксплуатации в ремонт). В связи с этим возникает необходимость добавления новых каналов информации и разработки комплексных методов диагностики на их основе, способных уточнять техническое состояние АЭД, выявлять место расположения дефектов и их опасность для эксплуатации.

На основе проведённых исследований описан процесс возникновения и развития распространённых дефектов АЭД – «несимметрия фаз питающего тока» и «обрыв стержней ротора». Рассмотрен метод симметричных составляющих, применяемый для расчёта несимметричных электрических систем.

Изучена структура приборов, способы регистрации и обработки информации о параметрах магнитных полей. Рассмотрены существующие типы чувствительных элементов. Обоснована необходимость использования в качестве чувствительного к ВМП элемента Холла, превосходящего по характеристикам их другие виды.

Проведён анализ существующих методов получения диагностической информации о техническом состоянии АЭД. Особое внимание уделено магнитным методам контроля и источникам возникновения магнитных полей в АЭД. Литературный обзор позволил сделать вывод о слабой проработанности данной области диагностики, представляющей особый интерес в связи с ограниченным количеством существующих устройств, принципов регистрации и обработки диагностической информации.

Описан системный подход к проектированию многоканальной модульной системы контроля АЭД по параметрам ВМП рассеяния. Системный подход предполагает рассмотрение исследуемой системы, как набора частей, с учётом их взаимодействия, с известным набором ограничений. В связи с этим разрабатываемая система магнитного контроля АЭД может быть рассмотрена как набор подсистем (рисунок 2).

На основании рассмотрения места каждой подсистемы в составе общей системы (рисунок 2) сформулированы требования к проектированию многоканального модульного комплекса диагностики АЭД по параметрам ВМП рассеяния с использованием таких принципов системного анализа как использование блочно-иерархического подхода, а именно декомпозиции сложных объектов, их деления на иерархические уровни с выделением этапов и стадий, зависящих от целей создания, использования принципов обратной связи. На рисунке 3 представлена разработанная схема многоканального комплекса магнитного контроля АЭД, составленная на основе системного подхода к проектированию.

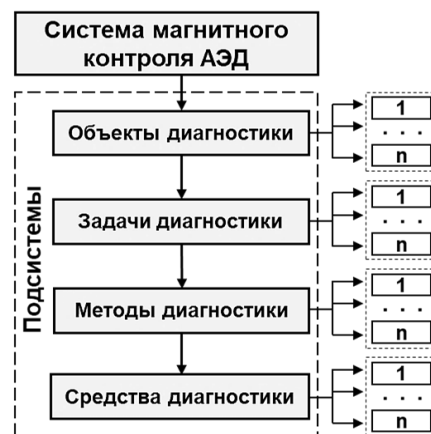


Рисунок 2 – Схема системы магнитного контроля АЭД

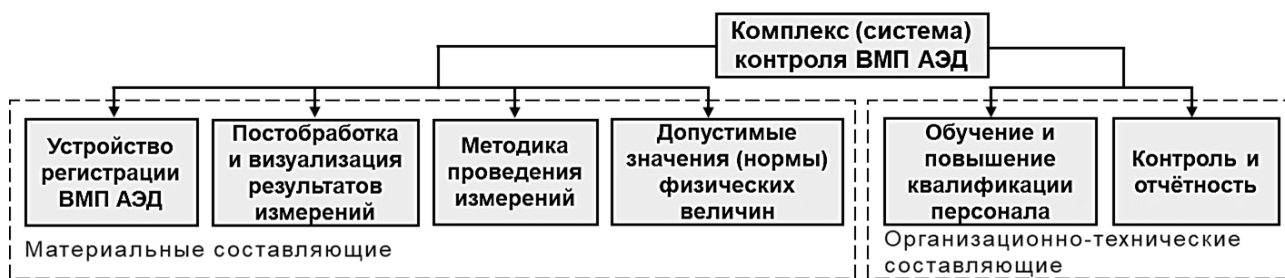


Рисунок 3 – Схема многоканального комплекса магнитного контроля АЭД

Рассмотрены методы технического обслуживания оборудования, наибольшее внимание уделено техническому обслуживанию по фактическому состоянию (ОФС). Рассмотрен обобщённый алгоритм диагностики в составе методов ОФС.

По результатам проведённого литературного обзора и анализа сделаны выводы об актуальности темы диссертационной работы, поставлена цель и задачи исследования.

Во второй главе приведены результаты разработки математических моделей при возникновении и развитии распространённых дефектов АЭД.

Модель №1. Отражает изменение электромеханических характеристик АЭД при дефекте «обрыв стержней ротора».

Активное сопротивление стержня фазы ротора с учётом изменения площади поперечного сечения повреждённого стержня определяется как

$$r_c = \rho\psi_r \frac{l_2}{q_c k_{ц}}, \quad (1)$$

где l_2 – длина магнитопровода; q_c – площадь поперечного сечения стержня; $\rho\psi_r$ – удельное сопротивление материала беличьей клетки ротора; $k_{ц}$ – коэффициент поперечного сечения стержня, изменяющийся в диапазоне $[0...1]$.

Ток фазы статора находится в соответствии с формулой

$$I_2' = \frac{U_1 - I_1(r_1 + jx_1)}{z_2}, \quad (2)$$

где U_1 – среднее действующее напряжение; I_1 – ток фазы статора; r_1, x_1 – активное и индуктивное сопротивления обмотки фазы статора; z_2 – полное сопротивление ротора.

Момент на валу АЭД определяется по формуле

$$M = \frac{P_2}{\omega_1(1-s)}, \quad (3)$$

где P_2 – полная механическая мощность на валу АЭД; ω_1 – угловая скорость вращения магнитного поля статора, об/сек; $s = (n_1 - n)/n_1$ – относительное скольжение, где n_1 – скорость вращения ротора, n – скорость вращения магнитного поля.

На рисунке 4 представлены графики рассчитанных по формулам (2) и (3) тока в обмотках статора и вращающего момента на валу АЭД при площади поперечного сечения стержня 75% от номинальной.

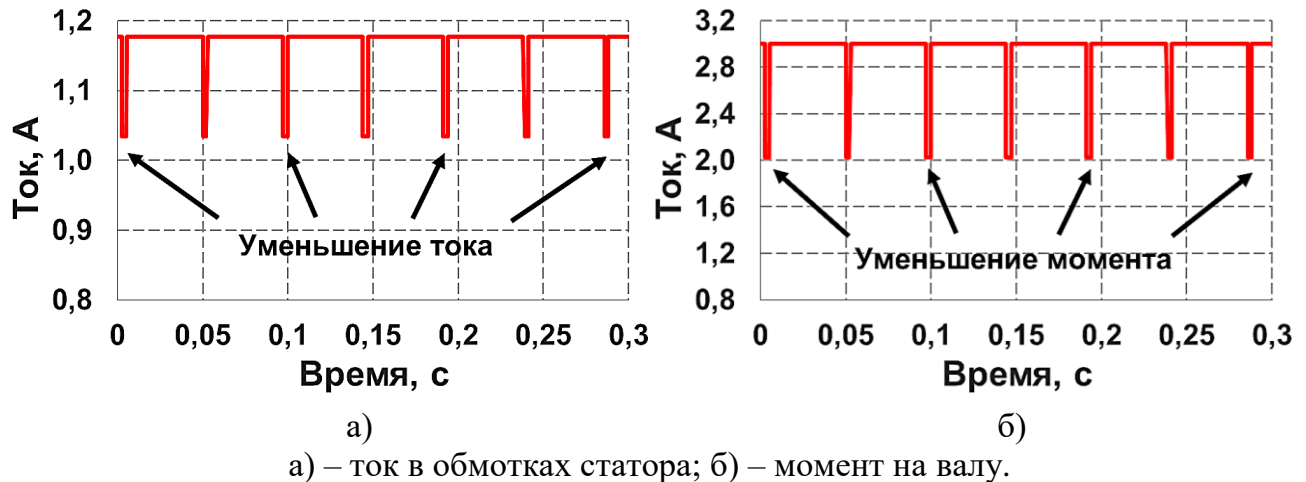


Рисунок 4 – Графики рассчитанных вращающего момента и тока в статорной обмотке АЭД при площади поперечного сечения стержня 75% от номинальной

При прохождении дефектного стержня через полюс АЭД уменьшается величина тока в обмотках статора (рисунок 4 (а)). При малом развитии дефекта изменение силы тока в статорных обмотках слабое и увеличивается по мере развития дефекта.

При прохождении дефектного стержня через полюс (рисунок 4 (б)) величина вращающего момента уменьшается. В связи с этим, при наличии повреждений стержней обмотки ротора, АЭД может работать под меньшей нагрузкой на валу.

Модель №2. Описывает влияние дефекта «обрыв стержней ротора» на ток в обмотках статора АЭД уравнениями в дифференциальной форме.

Сумма токов в фазных обмотках статора определяется по формуле

$$i_A + i_B + i_C = 0, \quad (4)$$

где i_A, i_B, i_C – токи в фазах А, В и С.

Уравнения ЭДС фазных обмоток статора и обмотки ротора для общего случая

$$\begin{cases} u_A = R_A i_A + d\psi_A/dt \\ u_B = R_B i_B + d\psi_B/dt \\ u_C = R_C i_C + d\psi_C/dt \\ u_r = R_r i_r + d\psi_r/dt \end{cases} \quad (5)$$

где R_A, R_B, R_C, R_r – активные сопротивления обмоток фаз А, В, С и фазы ротора; $\psi_A, \psi_B, \psi_C, \psi_r$ – потокосцепления контуров фаз статора и ротора.

Для установившегося режима работы АЭД из уравнений (5) имеем уравнения напряжений в фазных обмотках статора и ротора

$$\dot{U}_A = [R_A + j\omega_s(L_{\Gamma A} + L_{\sigma A})]\dot{I}_A + j\omega_s L_{AB}\dot{I}_B + j\omega_s L_{AC}\dot{I}_C + j\omega_s L_{Ar}\dot{I}_r + j\omega_s L_{A06}\dot{I}_{06}, \quad (6)$$

$$\dot{U}_B = [R_B + j\omega_s(L_{\Gamma B} + L_{\sigma B})]\dot{I}_B + j\omega_s L_{BA}\dot{I}_A + j\omega_s L_{BC}\dot{I}_C + j\omega_s L_{Br}\dot{I}_r + j\omega_s L_{B06}\dot{I}_{06}, \quad (7)$$

$$\dot{U}_C = [R_C + j\omega_s(L_{\Gamma C} + L_{\sigma C})]\dot{I}_C + j\omega_s L_{CA}\dot{I}_A + j\omega_s L_{CB}\dot{I}_B + j\omega_s L_{Cr}\dot{I}_r + j\omega_s L_{C06}\dot{I}_{06}, \quad (8)$$

$$0 = \dot{U}_r = [R_r + j\omega_s(L_{\Gamma r} + L_{\sigma r})]\dot{I}_r + j\omega_s L_{rA}\dot{I}_A + j\omega_s L_{rB}\dot{I}_B + j\omega_s L_{rC}\dot{I}_C. \quad (9)$$

где $L_{A06}, L_{B06}, L_{C06}$ – индуктивности обратного контура; \dot{I}_{06} – ток обратного контура.

Напряжения контура тока обратной последовательности ротора

$$0 = [R_r + j\omega_s(2-s)(L_{Gr} + L_{\sigma r})]I_{o6} + j\omega_s(2-s)L_{rA}I_A + j\omega_s(2-s)L_{rB}I_B + j\omega_s(2-s)L_{rC}I_C. \quad (10)$$

Уравнения (6) – (10) в комплексной форме образуют систему, отражающую электрические процессы работы АЭД, из которой можно определить токи контуров в различных режимах работы. Для расчёта процессов, происходящих в АЭД при повреждении стержней беличьей клетки ротора, модифицируем матрицу пересчитав некоторые её члены, зависящие от изменяющихся во времени сопротивлений

$$\begin{bmatrix} U_A(t) \\ U_B(t) \\ U_C(t) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_A & Z_{AB} & Z_{AC} & Z_{Ar}(t) & Z_{A00}(t) & 10^{10} \\ Z_{BA} & Z_B & Z_{BC} & Z_{Br}(t) & Z_{B00}(t) & 10^{10} \\ Z_{CA} & Z_{CB} & Z_C & Z_{Cr}(t) & Z_{C00}(t) & 10^{10} \\ Z_{rA}(t) & Z_{rB}(t) & Z_{rC}(t) & Z_r(t) & Z_{r00}(t) & 10^{10} \\ Z_{o6A}(t) & Z_{o6B}(t) & Z_{o6C}(t) & Z_{o6r}(t) & Z_{o6}(t) & 10^{10} \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \\ I_r \\ I_{o6} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

На рисунке 5 приведены рассчитанные графики тока в фазных обмотках статора при площади поперечного сечения стержня 75% относительно номинальной.

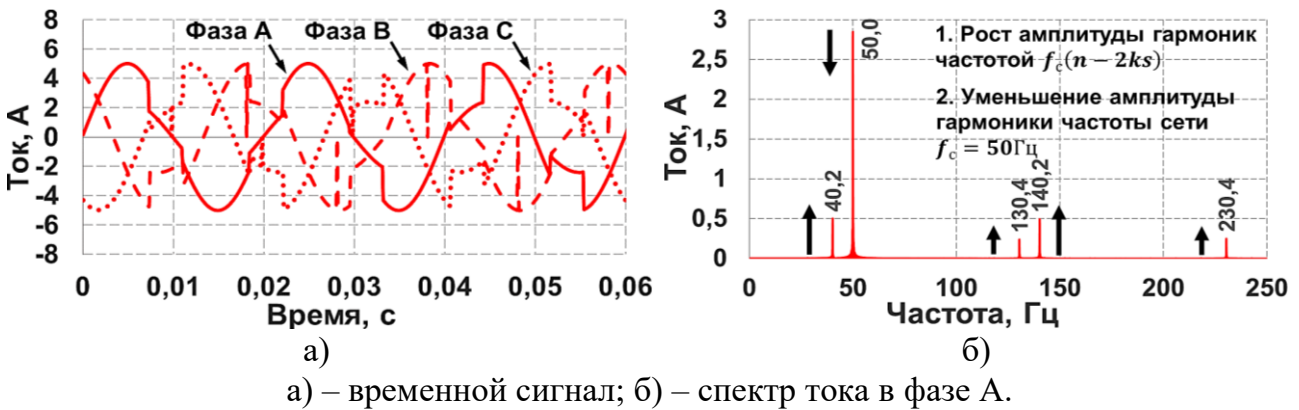


Рисунок 5 – Ток в обмотках статора при площади стержня 75% от номинальной

Модель №3. Описывает тангенциальную составляющую электромагнитных сил в воздушном зазоре АЭД при развитии дефекта «несимметрия фаз питающего тока».

Тангенциальная составляющая электромагнитных сил, может быть найдена как

$$p_{\tau}^{pp} = 0,5A_2B_1 \cos(2\omega_1 t + \varphi_{b1} - \varphi_{a2}), \quad (12)$$

где A_2 – линейная токовая нагрузка статора обратного следования фаз; B_1 – индукция результирующего магнитного поля в воздушном зазоре прямого следования фаз; ω_1 – угловая частота; φ_{a2} – фаза тока статора обратной последовательности; φ_{b1} – фаза индукции магнитного поля прямого следования фаз в воздушном зазоре.

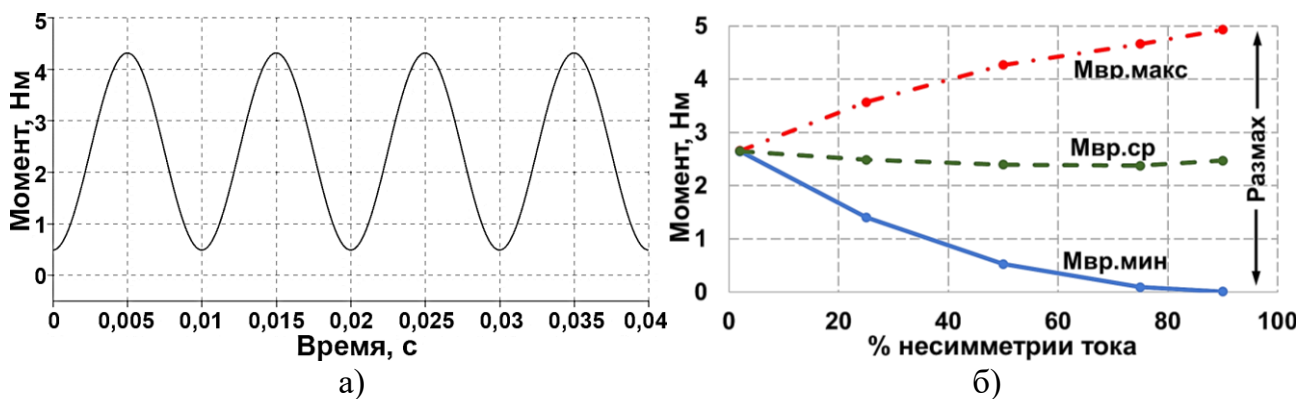
Магнитный момент рассчитывается в соответствии с выражением

$$M_{вр}^{pp} = 2\pi R^2 l p_{\tau}^{pp}, \quad (13)$$

где R – радиус ротора; l – длина ротора.

В результате расчётов по формуле (13) получены графики вращающего момента при несимметрии 50% (рисунок 6 (а)) и в динамике развития дефекта (рисунок 6 (б)).

При развитии несимметрии происходит модуляция момента на валу АЭД частотой 100 Гц, амплитуда колебаний возрастает при развитии дефекта. В связи с этим искажается форма распределения тангенциальных сил по окружности статора, возникает тормозной электромагнитный момент, что приводит к неравномерному вращению ротора АЭД, с замедлением в местах расположения обмотки дефектной фазы и последующим быстрым проскоком в местах расположения обмоток двух других фаз.



а) – при несимметрии 50%; б) – в динамике развития несимметрии.
 Рисунок 6 – Рассчитанный вращающий момент АЭД при несимметрии

В третьей главе приведены результаты КЭ моделирования АЭД при развитии дефектов «несимметрия фаз питающего тока» и «обрыв стержней ротора».

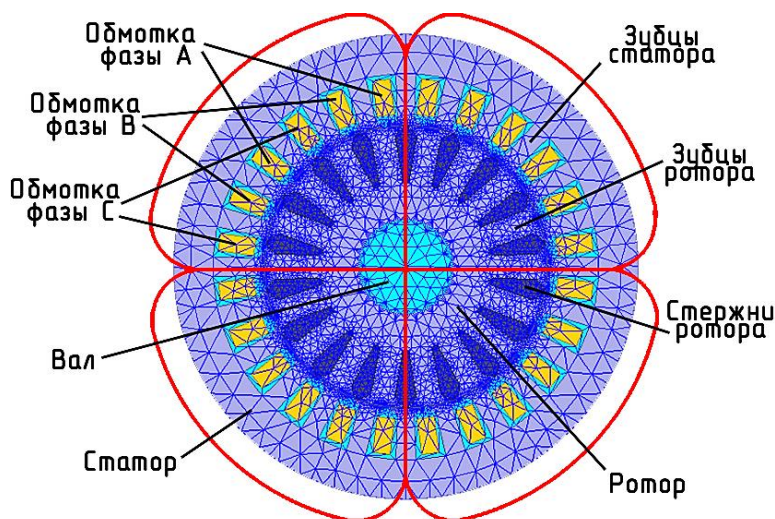
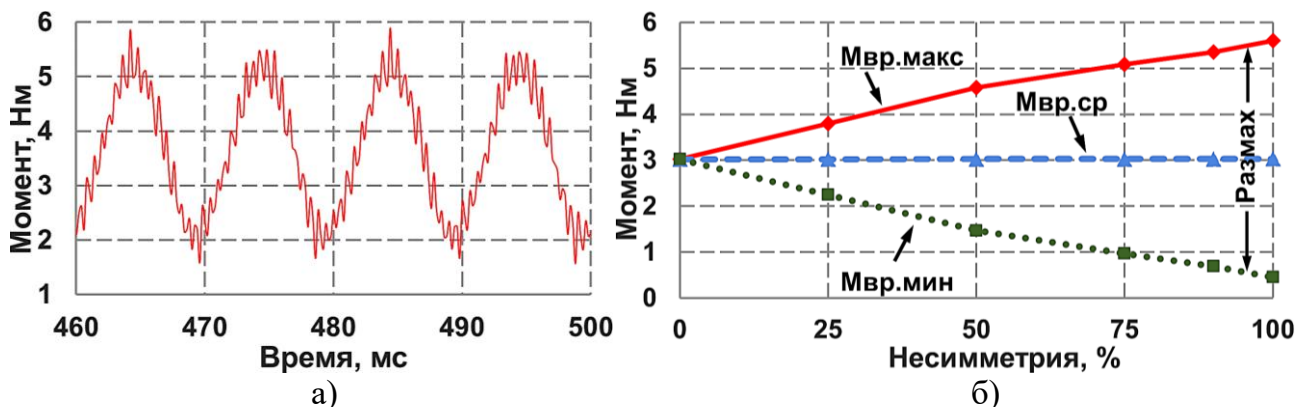


Рисунок 7 – Модель АЭД с короткозамкнутым ротором с сеткой конечных элементов

На рисунке 7 показана построенная КЭ модель АЭД с сеткой конечных элементов в плоскопараллельной постановке задачи. Для реализации модели использовался программный пакет ANSYS Maxwell. Задавались граничные условия в виде приравнения к нулю векторного магнитного потенциала на границе области моделирования. В качестве базовой модели был выбран четырёхполюсный АЭД с короткозамкнутым ротором марки АИР63В4, который был использован для проведения дальнейших натурных исследований.

Моделирование дефекта «несимметрия фаз питающего тока». При развитии несимметрии увеличивается вклад токов обратной последовательности, происходят колебания вращающего момента на валу АЭД (рисунок 8 (а)). На рисунке 8 (б) приведена зависимость колебаний вращающего момента на валу в динамике развития дефекта.



а) – несимметрия 50%; б) – в динамике развития дефекта.
 Рисунок 8 – Вращающий момент на валу АЭД при несимметрии

Переменная составляющая колебаний вращающего момента возрастает при развитии несимметрии, в то время как величина постоянной составляющей практически не изменяется. Колебания вращающего момента на валу приводят к колебаниям скорости вращения ротора АЭД. На рисунке 9 представлена круговая диаграмма скорости вращения ротора при обрыве фазы статора А за один оборот.

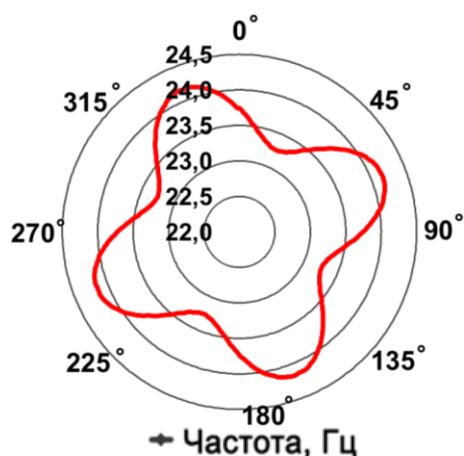


Рисунок 9 – Скорость вращения ротора при обрыве фазы А

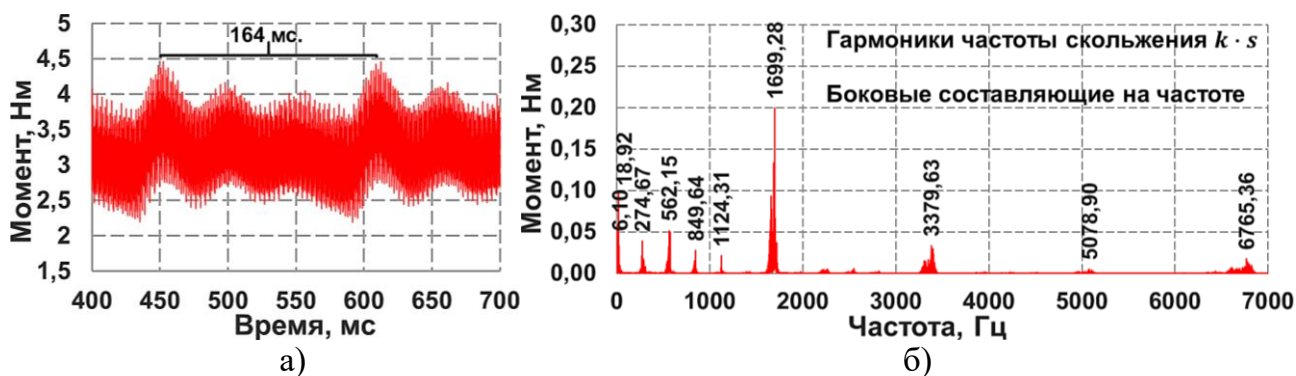
Из рисунка 9 видно, что при увеличении уровня несимметрии возникает флуктуация скорости вращения ротора АЭД с замедлением в местах оборванной фазы статора и последующим быстрым проскоком при проходе обмоток остальных двух фаз. При развитии несимметрии амплитуда данных пульсаций возрастает. Отсюда дополнительным диагностическим признаком наличия дефекта «несимметрия фаз питающего тока» можно считать пульсации скорости вращения ротора на удвоенной частоте сети $2f_c = 2 \cdot 50 = 100$ Гц.

В таблице 1 приведена величина пульсаций скорости вращения ротора АЭД при развитии несимметрии.

Таблица 1 – Пульсация скорости вращения ротора при развитии несимметрии

Несимметрия, %	0	25	50	75	90	100
Пульсация скорости, %	0,04	0,96	1,98	2,96	3,52	3,68

Моделирование дефекта «обрыв стержней ротора». При обрыве стержней беличьей клетки ротора происходит низкочастотная флуктуация скорости вращения ротора и вращающего момента на валу АЭД. Временной сигнал вращающего момента на валу и его спектр при обрыве трёх стержней представлены на рисунке 10.



а) – временной сигнал; б) – спектр временного сигнала.

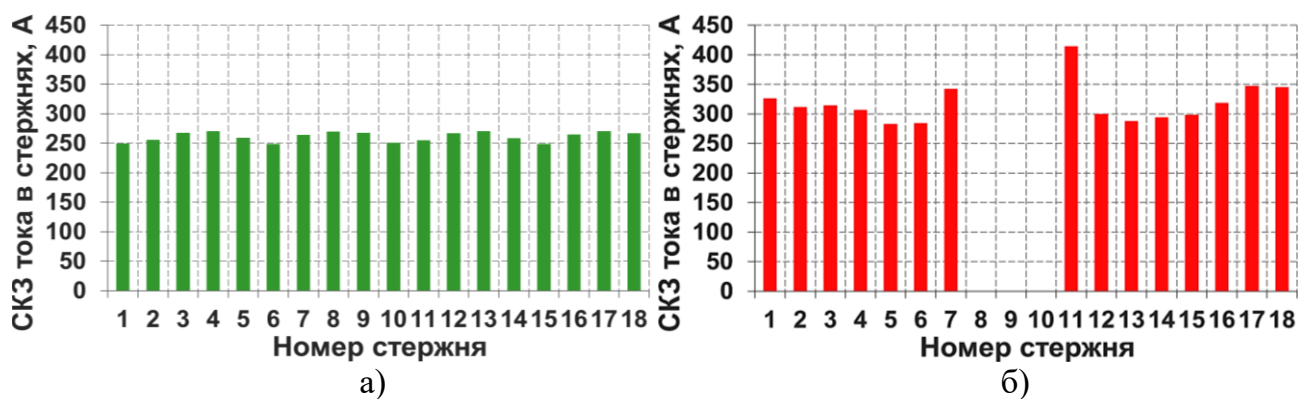
Рисунок 10 – Вращающий момент на валу АЭД при обрыве трёх стержней ротора

Величина пульсаций скорости вращения ротора (таблица 2) зависит от текущего скольжения АЭД и возрастает при увеличении количества оборванных стержней.

Таблица 2 – Пульсация скорости вращения ротора АЭД в динамике развития дефекта

Число оборванных стержней	0	1	2	3	4	5
Пульсация скорости вращения ротора, %	0	0,77	1,8	3,77	4,34	4,6
Частота колебаний скорости, Гц	0	5,17	5,64	6,25	7,14	8,22

На рисунке 11 представлены среднеквадратичные значения (СКЗ) тока, во всех стержнях беличьей клетки ротора в нормальном режиме и обрыве трёх стержней.

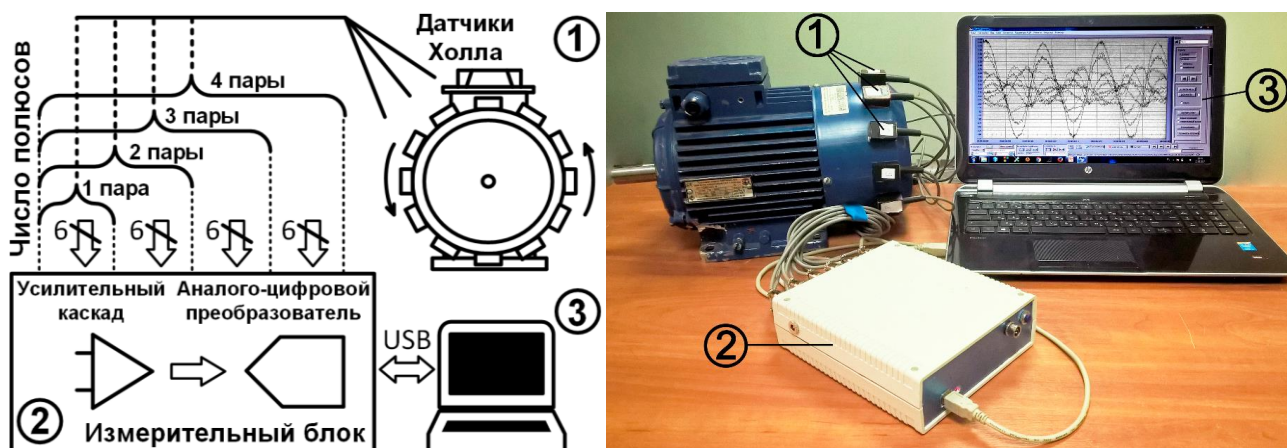


а) – нормальный режим; б) – обрыв трёх стержней.

Рисунок 11 – Рассчитанные среднеквадратичные значения тока, протекающего по всем стержням беличьей клетки ротора в нормальном режиме и обрыве стержней

При обрыве стержней происходит изменение распределения и общее возрастание СКЗ токов во всей беличьей клетке ротора. Возникает перегрев и расплавление стержней, следующих за повреждённым по направлению движения ротора. За счёт этого, со временем, ротор полностью выходит из строя. Критическим уровнем развития дефекта, является обрыв 25-30% от общего количества стержней (5 стержней при их полном количестве – 18), при этом АЭД не выходит в номинальный режим работы.

В четвертой главе описана методика разработки опытного образца многоканальной модульной системы регистрации ВМП рассеяния при помощи системного подхода к проектированию. Модульная компоновка системы с числом каналов от 6 до 24 позволяет измерять напряжённость ВМП АЭД с числом пар полюсов $p = 1, 2, 3, 4$ без потери значимой информации. На рисунке 12 представлен опытный образец системы.



1 – датчики Холла (12 шт.); 2 – многоканальный усилитель с блоком фильтров и встроенным АЦП; 3 – ПК с программой анализа и визуализации ВМП.

Рисунок 12 – Многоканальная модульная система регистрации ВМП рассеяния

Полученные при измерении напряжённости ВМП аналоговые сигналы, поступающие с установленных по внешней окружности статора АЭД датчиков Холла, подаются на первый усилительный каскад, расположенный в одном корпусе с чувствительным элементом. Далее сигналы передаются по экранированному кабелю, в измерительный блок, где происходит их фильтрация, усиление и оцифровка. Оцифрованный сигнал подаётся на персональный компьютер (ПК) для дальнейшей обработки и анализа.

Многоканальная система позволяет получать картину распределения ВМП рассеяния АЭД по окружности статора в конкретный момент времени. Малые габариты датчиков (30×20×15 мм.) позволяют проводить измерения АЭД различной мощности. Высокая частота выборки АЦП даёт возможность получать спектр высокого разрешения.

Экспериментальные исследования. Проведены измерения напряжённости ВМП и колебаний УСВР на лабораторном стенде с искусственно созданными дефектами. На рисунке 13 приведено распределение напряжённости ВМП во всех фазных обмотках каждого из 4 полюсов АЭД (12 точек) при несимметрии фазы А.



Рисунок 13 – Напряжённость ВМП АЭД в динамике развития несимметрии

При возникновении и развитии несимметрии тока форма распределения ВМП приобретает пульсирующий характер на удвоенной частоте сети $2f_c = 100$ Гц. Происходит уменьшение величины СКЗ напряжённости ВМП по окружности статора АЭД.

На рисунке 14 представлены диаграммы распределения колебаний УСВР за один оборот, полученные при обрыве каждой из трёх фаз в виде круговых диаграмм.

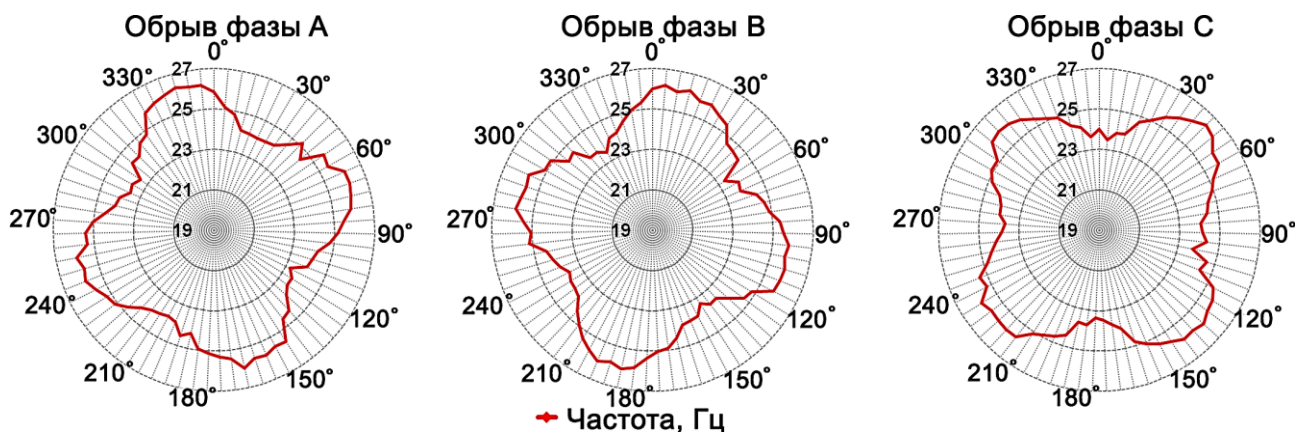
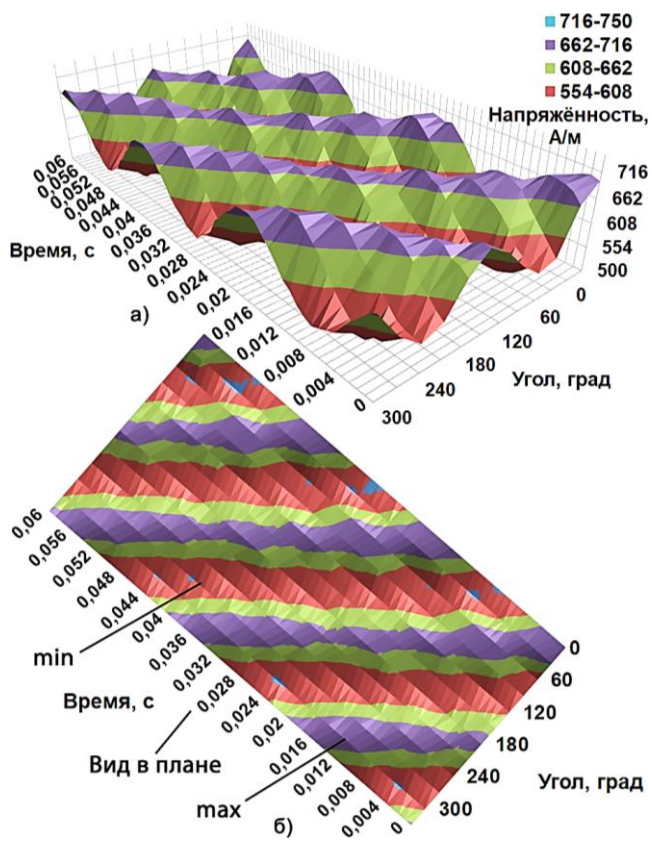


Рисунок 14 – Круговые диаграммы УСВР при обрыве каждой из трёх фаз АЭД

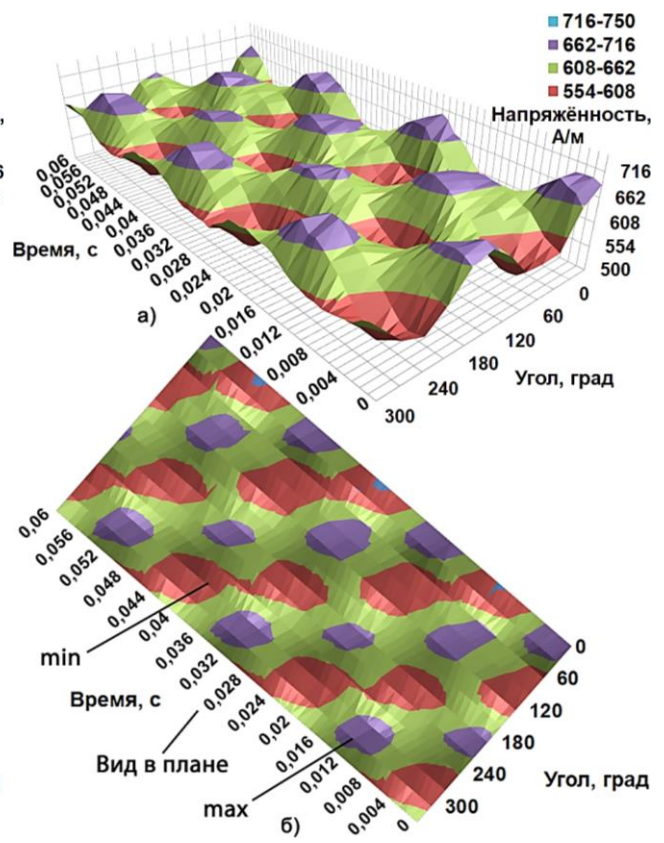
При обрыве каждой фазы (рисунок 14) распределение УСВР становится неравномерным, что связано с искажением формы магнитного поля в воздушном зазоре.

На рисунках 15 и 16 представлены объёмные графики распределения ВМП по внешней кольцевой поверхности двигателя в зависимости от угла ϑ и времени при несимметрии 0 и 100%, соответственно.

Из рисунков 14, 15 и 16 видно, что колебания УСВР и распределение напряжённости ВМП имеют взаимосвязанный характер и совпадают с данными, полученными в результате математического и КЭ моделирования, что говорит о сходимости результатов математического и КЭ моделирования с экспериментально полученными данными.

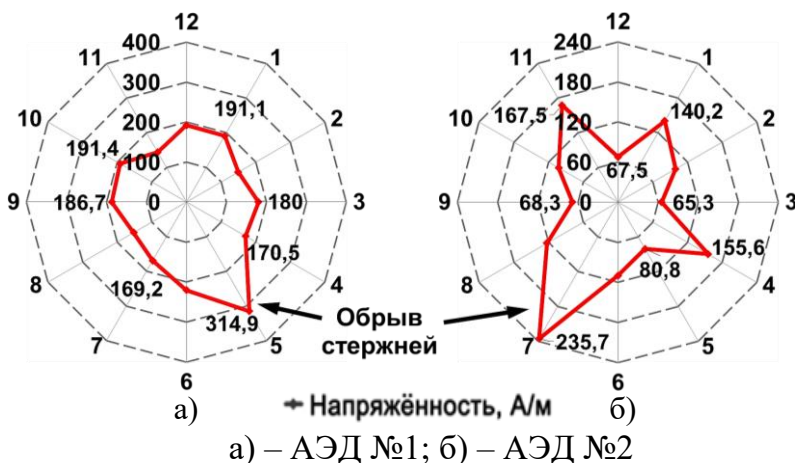


а) – 3-х мерный график; б) – вид сверху.
Рисунок 14 – Объёмный график распределения ВМП при симметрии



а) – 3-х мерный график; б) – вид сверху.
Рисунок 15 – Объёмный график распределения ВМП при несимметрии 100%

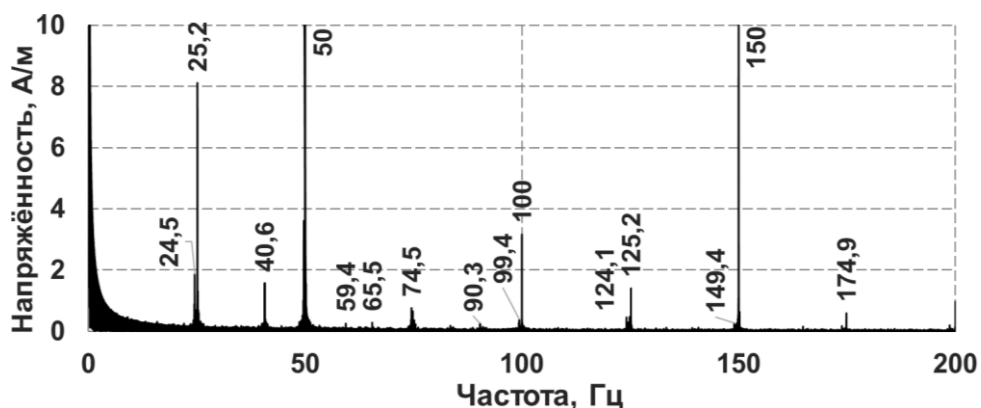
Экспериментальные исследования параметров напряжённости ВМП АЭД вспомогательных машин электровозов. В качестве объекта исследования был выбран трёхфазный АЭД с короткозамкнутым ротором НВА-55, используемый в качестве привода вспомогательных машин электровозов ВЛ80С и ЗЭС5К. Круговые диаграммы напряжённости ВМП по окружности статора АЭД представлены на рисунке 16.



а) – АЭД №1; б) – АЭД №2
Рисунок 16 – Круговые диаграммы распределения напряжённости ВМП рассеяния

Увеличение амплитуды напряжённости ВМП в точке 5 на рисунке 16 (а) и точке 7 на рисунке 16 (б) говорят о геометрическом совпадении в конкретный момент времени положительного полюса АЭД и повреждённого стержня. Уменьшение амплитуды напряжённости ВМП в точке 2, 8 и 11 на рисунке 16 (а) и в точке 3, 6, 9 и 12 на рисунке 16 (б) говорит о наличии дефекта «несимметрия фаз питающего тока».

Картины распределения ВМП по окружности статора АЭД в виде круговых диаграмм позволяют наиболее точно определять место расположения дефекта благодаря контролю ВМП в каждой фазной обмотке. На рисунке 17 представлен спектр временного сигнала напряжённости ВМП рассеяния АЭД модели НВА-55 №1.



Гармоники:

1. Частота сети $k \cdot f_c$ – 50; 100; 150 Гц.
2. Боковые гармоники частоты сети $f_c(1 \pm 2s)$ – 40,6; 59,4 Гц.
3. Модуляция гармоник на частоте 0,6 Гц – 24,5; 99,4; 124,5; 149,4 Гц.

Рисунок 17 – Спектр временного сигнала ВМП АЭД модели НВА-55 №1

На рисунке 17 просматривается наличие гармоник, кратных частоте модуляции линейной частоты фазного тока f_c , (9,4 Гц), наличие которых вызвано совпадением фактического положения магнитного полюса и сломанного стержня ротора. Данные характерные частоты определяются как $f_c(1 \pm 2s)$. Наличие левых боковых гармоник 0,6 Гц, согласно диагностическим признакам, выявленным при математическом и КЭ моделировании, говорит о дефекте «обрыв стержней беличьей клетки ротора».

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1) С использованием системного подхода к проектированию сформулированы требования к разработке и изготовлена многоканальная модульная система синхронной регистрации пространственного распределения ВМП и колебаний УСВР асинхронных машин. Экспериментальные исследования системы подтвердили её работоспособность и эффективность.

2) Разработаны математические модели, отражающие изменение электромагнитных и механических характеристик АЭД при возникновении и развитии дефектов «несимметрия фаз питающего тока» и «обрыв стержней ротора».

3) Проведено конечно-элементное моделирование динамики развития дефектов АЭД. Установлены причинно-следственные связи между степенью развития дефекта и диагностическими признаками на основании информации о распределении ВМП и УСВР асинхронных машин. Определён критический уровень развития дефекта «обрыв стержней ротора» и локализовано место его расположения.

4) На основе проведённой классификации средств измерения магнитных полей впервые предложен способ и разработано устройство многоканальной модульной системы с использованием новых каналов диагностической информации о параметрах распределения ВМП и колебаний УСВР, позволяющих повысить достоверность идентификации распространённых дефектов и обеспечить повышение эффективности управления техническим состоянием АЭД транспортных машин.

5) Разработана методика сбора, обработки и визуализации диагностической информации по двум дополнительным каналам: структуре и параметрам ВМП и УСВР.

6) Проведены испытания многоканальной системы при искусственном создании дефектов и в реальных условиях эксплуатации. При испытаниях АЭД мотор-вентиляторов в условиях железнодорожного ремонтного производства обнаружены дефекты «несимметрия фаз питающего тока» и «обрыв стержней ротора», локализовано их место расположения и определена степень их развития, что подтверждает достоверность полученных результатов математического и конечно-элементного моделирования.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Лукьянов, А. В. Исследование комплекса параметров вибрации и внешнего магнитного поля в задачах диагностики асинхронных электродвигателей / А. В. Лукьянов, Ю. С. Мухачёв, **И. О. Бельский** // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – №2 (22). – С. 61–69.

2. **Бельский, И. О.** Исследование параметров внешнего магнитного поля асинхронных электродвигателей при несимметрии фаз питающего тока / И. О. Бельский, А. В. Лукьянов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2016. – №2 (50). – С. 186–191.

3. **Бельский, И. О.** Математическое, численное и натурное моделирование параметров магнитного поля при несимметрии тока в фазах асинхронных электродвигателей / И. О. Бельский, А. В. Лукьянов // Системы. Методы. Технологии. – 2018. – №2 (38). – С.44–53.

4. **Бельский, И. О.** Исследование угловой скорости и магнитного поля при дефектах асинхронных электродвигателей // И. О. Бельский, И. С. Куприянов, А. В. Лукьянов // Системы. Методы. Технологии. – 2018. – №4 (40). – С. 62–69.

Патенты на изобретение:

5. Пат. 2716172 Российская федерация: МПК G01R 31/34, СПК G01R 31/346. Способ диагностики асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором / **И. О. Бельский**, И. С. Куприянов, А. В. Лукьянов; заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО ИрГУПС) (RU). – Заявка №2018109180; заявл. 14.03.2018, опубл. 16.09.2019; Бюл. №7.

В других изданиях:

6. **Бельский, И. О.** Численное моделирование параметров магнитного поля при обрыве стержней асинхронных электродвигателей машиностроительного производства / И. О. Бельский // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2018. – №. 1(57). – С. 60–70.

7. Куприянов, И. С. Математическое моделирование параметров асинхронных двигателей при электрических дефектах ротора / И. С. Куприянов, **И. О. Бельский**, А. В. Лукьянов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 63, №3. – С. 154–163.

8. **Бельский, И. О.** Исследование параметров внешнего магнитного поля в задачах диагностики асинхронных электродвигателей / И. О. Бельский, А. В. Лукьянов, И. С. Куприянов // Вопросы естествознания. – 2017. – №1(13). – С. 9–15.

9. **Бельский, И. О.** Исследование параметров внешнего магнитного поля в задачах диагностики асинхронных электродвигателей / И.О. Бельский, А.В. Лукьянов // Проблемы механики современных машин: Материалы VI Международной конференции, 29 июня – 4 июля 2015г. – г. Улан-Удэ. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2015. – Т.1. – С. 8–13.

10. **Бельский, И. О.** Разработка многоканальной системы контроля внешнего магнитного поля асинхронных электродвигателей в задачах диагностики дефектов / И. О. Бельский, А. В. Лукьянов // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: материалы шестой международной научно-практической конференции с международным участием, 30 сентября – 3 октября 2015 г., г. Иркутск. – Иркутск: Изд-во ИрГУПС, 2015. – Т. 2. – С. 390–394.

11. **Бельский, И. О.** Исследование параметров внешнего магнитного поля в задачах диагностики асинхронных электродвигателей / И. О. Бельский, И. С. Куприянов, А. В. Лукьянов // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: материалы восьмой международной научно-практической конференции с международным участием, 28 марта – 1 апреля 2017 г., г. Иркутск. – Иркутск: Изд-во ИрГУПС, 2017. – Т. 2. – С. 536–542.

12. Куприянов, И. С. Комплекс контроля и диагностики дефектов асинхронных электродвигателей по напряжённости магнитного поля / И. С. Куприянов, **И. О. Бельский**, А. В. Лукьянов // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: материалы седьмой международной научно-практической конференции с международным участием, 29 марта – 1 апреля 2016 г., г. Иркутск. – Иркутск: Изд-во ИрГУПС, 2016. – Т. 2. – С. 647–651.

13. Лукьянов, А. А. Лабораторный стенд для регистрации магнитных полей рассеяния трёхфазных асинхронных электродвигателей / А. А. Лукьянов, Ю. С. Мухачёв, **И. О. Бельский**, А. А. Савватеев // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: материалы четвёртой всероссийской научно-практической конференции с международным участием, 13-17 мая 2013 г., г. Иркутск. – Иркутск: Изд-во ИрГУПС, 2013. – Т. 1. – С. 279–283.

14. **Бельский, И. О.** Исследование напряжённости внешнего магнитного поля асинхронных электродвигателей / И. О. Бельский, А. В. Лукьянов // Проблемы транспорта Восточной Сибири: сборник трудов пятой Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных факультетов «Транспортные системы» и «Системы обеспечения транспорта», 13 – 14 мая 2014 г. – Иркутск – 2014. – Т. 2. – С. 107–114.

15. Лукьянов, А. В. Исследование угловой скорости вращения ротора асинхронного электродвигателя при дефектах / А. В. Лукьянов, **И. О. Бельский**, И. С. Куприянов, А. В. Назаров // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: материалы девятой международной научно-практической конференции с международным участием, 10 – 13 апреля 2018 г., г. Иркутск. – Иркутск: Изд-во ИрГУПС, 2018. – Т. 2. – С. 455–460.

16. **Belsky, I. O.** Auxiliary asynchronous electric locomotives machines magnetic field parameters modeling in current asymmetry in phases / I. O. Belsky, A. V. Lukyanov / Proceedings of the 6th international symposium on innovation and sustainability of modern railway. – 2018. – pp. 183–188.

Подписано в печать 29.09.2020 г.

Формат 60 x 90 1/16. Бумага офсетная.

Печать трафаретная. Усл. печ. л. 2

Тираж 100 экз. Заказ № 508 Н

Отпечатано: ООО «Глазковская типография».

Адрес: 664039, г. Иркутск, ул. Гоголя, 53;

тел. 38-78-40, 70-78-40. ИНН 3849068526