


На правах рукописи



Романова Виктория Викторовна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СРОКА СЛУЖБЫ
НИЗКОВОЛЬТНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА**

Специальность 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Чита 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Забайкальский государственный университет» на кафедре «Энергетики»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Батухтин Андрей Геннадьевич

Официальные оппоненты: **Назарычев Александр Николаевич**
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», г. Санкт-Петербург, кафедра «Базовая научная компетенция», заведующий кафедрой

Булатов Юрий Николаевич
кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Братский государственный университет», г. Братск, кафедра «Энергетики», заведующий кафедрой

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород

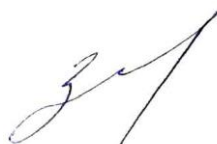
Защита состоится 19 сентября 2023 г. в 13 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.310.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51, ауд. Д. 224, тел./факс (843) 519-42-55.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, с указанием контактных данных и заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51, учёному секретарю диссертационного совета 24.2.310.02.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» и на официальном сайте КГЭУ <http://www.kgeu.ru>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2023 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Зиганшин Ш.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Качество электрической энергии (КЭЭ), связанное с несимметрией напряжений, одна из актуальных проблем в электрических сетях России. Отличительной особенностью Забайкальской электроэнергетической системы (ЭЭС) является наличие несимметричных режимов работы электрических сетей, возникающих в результате электромагнитной несовместимости системы тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог переменного тока с другой частью электроэнергетической системы региона. Экспериментальные исследования показали, что несимметрия напряжений имеет достаточно высокий уровень, преобладает как постоянно действующий фактор при работе электрических сетей Забайкальского края. Указанная ситуация, способствует повышению количества рисков технологических отказов, и главным образом, требует адаптивности эксплуатируемого электрооборудования.

Как известно, эффективное функционирование электротехнических комплексов (ЭТК) промышленных предприятий зависит от безаварийной работы отдельных его элементов, в частности асинхронных электродвигателей (АД). Исследования низковольтных асинхронных электродвигателей, работающих на предприятиях Забайкальского края, показывают, что высокая аварийность электродвигателей связана с условиями эксплуатации. Систематизация причин отказов АД позволяет судить о том, что большая часть отказов происходит вследствие некачественного питающего напряжения, при этом вероятность выхода из строя по причине такого типа отказа оценивается в 50% от всех возможных вариантов поломок. Стоит заметить, что экономический ущерб от поломок, потенциально связанный с низким КЭЭ, помимо затрат на восстановление оборудования, включает в себя ущерб от многочисленных остановок производственного процесса предприятия и упущенной прибыли.

Комплексное решение обозначенной проблемы невозможно без совершенствования методов, ориентированных на оценку и увеличение срока службы АД, их эффективной реализации с использованием программного обеспечения, учитывающих эксплуатационные режимы работы асинхронных электродвигателей.

Исследования в области разработки и внедрения методов оценки срока службы АД, главным образом, направлены на улучшение эффективности и технико-экономических показателей работы ЭТК, посредством обеспечения безаварийной работы АД в условиях совместного воздействия эксплуатационных факторов. Данные исследования являются востребованными инновационными решениями, основанными на интегрированной информации различных методов исследования. Сказанное выше определяет актуальность проблемы и основных направлений данной работы.

Степень разработанности проблемы. Исследованию и разработке эффективных методов оценки несимметрии напряжений посвящены работы известных авторов Т.П. Губенко, И.В. Жежеленко, И.И. Карташева, А.А. Ковзана, А.В. Крюкова, А.Д. Музыченко, И.В. Наумова, А.Л. Церазова, А.К. Шидловского, Л.Е. Эбина и др. В области изучения вопросов надёжности электрических машин

стоит выделить следующие работы, выполненные такими учёными и специалистами, как: М.П. Александров, О.Д. Гольдберг, Н.П. Ермолин, И.П. Жерихин, В.Г. Кузнецов, Т.Е. Минакова, О.П. Муравлёв, А.М. Мусин, А.Н. Назарычев, Б.В. Папков, Ю.П. Похолков, Э.К. Стрельбицкий, И.А. Сыромятников, С.П. Хелемская, С.О. Хомутов, А.Н. Bonnett, F. Z. Dekhandji, S. Deleanu, T.G. Habetler, C. Nyberg, L. Refoufi, T.M. Soares, J.M. Tabora, M.E. Tostes, C. Yung, P. Zhang и др. Перечисленные авторы достигли существенных успехов в аспектах математического моделирования условий эксплуатации АД, развития методик его диагностирования, помимо этого в вопросах решения проблем безопасности и анализа рисков аварий. Однако, следует отметить, что вопросы совершенствования методов оценки срока службы АД в условиях постоянно действующей несимметрии напряжений в электрических сетях раскрыты недостаточно. Учитывая вышеизложенное аргументируем следующее, что совершенствование методов оценки срока службы низковольтных асинхронных электродвигателей электротехнического комплекса на основе комплекса исследований внешних воздействующих факторов, технологических параметров процесса эксплуатации, данных об отказах узлов электродвигателей является актуальной научно-технической задачей.

Объект исследования – электротехнический комплекс, в состав которого входят асинхронные электродвигатели, эксплуатируемые в распределительных сетях электроснабжения 0,4 кВ.

Предмет исследования – развитие методов оценки параметров эксплуатации, определяющих срок службы низковольтных асинхронных электродвигателей.

Цель работы – повышение эффективности эксплуатации электротехнического комплекса с промышленной электродвигательной нагрузкой за счёт симметрирования напряжений.

Задачи исследования:

1. Провести анализ эксплуатационных параметров низковольтных асинхронных электродвигателей, работающих на предприятиях Забайкальского края.

2. Выполнить экспериментальные исследования фактического состояния несимметрии напряжений в электрических сетях 0,4; 6; 35 кВ электроэнергетической системы Забайкальского края.

3. Определить эксплуатационные режимы работы низковольтных асинхронных электродвигателей, способствующие продлению их срока службы.

4. Разработать методику и программу определения рациональных мест установки технических средств симметрирования (симметрирующих трансформаторов ТМГСУ, ТСТ; вольтодобавочных трансформаторов ТВМГ; нормализаторов напряжения NORMEL) в электротехническом комплексе.

Научная новизна работы:

1. Разработан метод определения эксплуатационных режимов работы АД серий 4А, АИ, способствующих продлению их срока службы в зависимости от параметров эксплуатации (коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности, коэффициента загрузки), позволяющие обеспечить длительную безаварийную эксплуатацию электродвигателей в ЭТК предприятий.

2. Разработан метод определения рациональных мест установки технических средств симметрирования в электротехническом комплексе, основанный на выборе оптимального состава и мест размещения устройств, позволяющих снизить величину несимметрии напряжений.

3. Разработана усовершенствованная методика технико-экономического обоснования применения средств симметрирования в электротехническом комплексе.

Теоретическая значимость результатов работы заключается в развитии методического подхода комплексной системы методов, направленного на оценку и увеличение срока службы низковольтных асинхронных электродвигателей электротехнического комплекса.

Практическая значимость результатов работы.

1. Результаты проведённых исследований, внедрённые в проектную и эксплуатационную практику, способствуют решению задач снижения несимметрии напряжений в ЭТК, обеспечивают увеличение срока службы низковольтных асинхронных электродвигателей.

2. Разработана и зарегистрирована «Программа для определения оптимального места установки средств симметрирования» (Свидетельство о регистрации № 2018665997).

3. Результаты диссертационной работы приняты к использованию и внедрены в проектной деятельности РУП «Белэнергосетьпроект», АО «Татэлектромонтаж».

4. Результаты и рекомендации диссертационной работы включены в проект «Стратегии социально-экономического развития Забайкальского края до 2035 г.».

5. Результаты проведённых в диссертационной работе исследований используются в учебном процессе Забайкальского государственного университета при подготовке студентов, обучающихся по направлению 13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника» направленность (профиль) «Энергосбережение и энергоэффективность» в рамках курсов «Перспективные направления развития электротехнических комплексов», «Оптимизация режимов работы электроэнергетических систем».

Связь работы с научными программами, планами, темами, грантами.

Результаты диссертационной работы включены в отчёты по итогам выполнения НИР в рамках реализации научных грантов Совета по научной и инновационной деятельности ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет» в период 2017 – 2019 г.г., 2022 г.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод определения эксплуатационных режимов работы асинхронных электродвигателей серий 4А, АИ, способствующих продлению их срока службы, основанный на выявлении значений параметров эксплуатации (коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности, коэффициента загрузки), позволяющих осуществить эффективное функционирование ЭТК с электродвигательной нагрузкой.

2. Метод определения рациональных мест установки технических средств симметрирования, позволяющий повысить эффективность и улучшить технико-экономические показатели работы электротехнического комплекса с электродвигательной нагрузкой за счёт коррекции напряжений.

3. Усовершенствованная методика технико-экономического обоснования применения средств симметрирования в электротехническом комплексе.

Методы исследований. Реализация поставленных задач исследования осуществлена с использованием положений теоретической электротехники, электрических машин, теории вероятности и математической статистики, теории надёжности, методов экономической теории, средств объектно-ориентированного программирования и методов компьютерного моделирования в пакете «SimPowerSystems» среды программирования MATLAB/Simulink.

Достоверность и обоснованность полученных научных результатов подтверждается репрезентативной выборкой исходных данных, полученных на основе экспериментальных исследований и аналитических расчётов; корректным и методологически обоснованным применением специализированного математического аппарата и вычислительных программных продуктов; принятые допущения обоснованы путём экспериментальной верификации результатов теоретических исследований.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности 2.4.2 «Электротехнические комплексы и системы».

Диссертационная работа соответствует следующим областям исследования паспорта научной специальности:

П.1 «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем...», в диссертационной работе представлено компьютерное и физическое моделирование режимов работы АД, с целью исследования совместного воздействия эксплуатационных параметров (K_{2U} , K_3) на работоспособность электродвигателей различных серий и мощностей.

П.2 «Разработка научных основ проектирования...» в диссертационной работе представлена разработанная прикладная программа, позволяющая автоматизировать расчётные процедуры определения рациональных мест установки технических средств симметрирования в электротехническом комплексе.

П.4 «Исследование работоспособности и качества...» в диссертационной работе представлены экспериментальные исследования влияния параметров эксплуатации (K_{2U} , K_3) на электродвигатели серии 4А и АИ, с целью определения эксплуатационных режимов работы АД, способствующих продлению их срока службы.

Личный вклад автора состоит в постановке и реализации научно-исследовательских и практических задач, в создании алгоритмов и методов их решения, кроме того, в разработке и реализации мероприятий по повышению эффективности эксплуатации электротехнического комплекса с промышленной электродвигательной нагрузкой, путём обеспечения симметрирования напряжений. Проведена интерпретация и формализация полученных результатов исследования с последующим формированием соответствующих выводов.

Апробация диссертационной работы проведена на всероссийских и международных конференциях и семинарах: Всероссийской конференции «Энергетика России в XXI веке. Инновационное развитие и управление» (г. Иркутск, 2015 г.); Международной научной конференции «МНСК-2016» (г. Новосибирск, 2016 г.); Всероссийской научно - практической конференции

«Электроэнергетика байкальского региона: проблемы и перспективы» (г. Улан-Удэ, 2016 г.); Международной научно-практической конференция «Транссиб: на острие реформ» (г. Чита, 2016 г.); Всероссийской научной конференции «Наука. Технологии. Инновации (НТИ-2016)» (г. Новосибирск, 2016 г.); Международном научном семинаре им. Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики» (Кыргызская Республика, г.Чолпон-Ата, 2017 г.; г. Иркутск, 2018 г.; г. Ташкент, 2019 г.; г. Казань, 2020 г.; г. Волжский, 2021 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 48 печатных работ, в том числе в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК – 12, в коллективных монографиях – 1, в изданиях, входящих в базу данных Web of Science и Scopus – 6, свидетельство о регистрации программы для ЭВМ – 1.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, приложений и списка литературы. Общий объём работы составляет 179 страниц. Работа содержит 47 рисунков, 23 таблицы.

Автор выражает благодарность д-ру техн. наук, профессору Суворову И.Ф., старшему преподавателю кафедры «Энергетики» Хромову С.В. Забайкальского государственного университета за оказанную помощь и ценные рекомендации в ходе выполнения диссертационной работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и решаемые задачи исследования, изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, основные научные положения, выносимые на защиту, представлена структура работы.

В первой главе выполнен анализ фактического состояния несимметрии напряжений в электрических сетях Забайкальского края. Установлено, что несимметрия напряжений в электрических сетях 0,4; 6; 35 кВ Забайкальской электроэнергетической системы преобладает как постоянно действующий фактор, K_{2U} изменяется от 2,22% до 11,2% и в 2 – 3 раза превышает регламентируемое ГОСТ 32144 – 2013 значение.

Проведённые исследования характеризуют недопустимый уровень K_{2U} , снижающий эффективность функционирования электрооборудования электрических сетей. Вследствие малого сопротивления обратной последовательности обмоток АД, особое значение приобретает присутствие напряжения обратной последовательности в электрической сети. В свою очередь, создающее значительные токи обратной последовательности, которые приводят к нагреву обмоток статора, и, как следствие, к ускоренному старению изоляции, выходу электродвигателя из строя.

Многолетний опыт эксплуатации АД на предприятиях Забайкальского края, показывает их высокую повреждаемость, которая ежегодно достигает 45% и более от общего числа повреждений электрооборудования.

С целью оценки наиболее характерных причин отказов АД проведены энергетические обследования (энергоаудит) промышленных предприятий Забайкальского края. Проанализированы материалы актов расследования

повреждаемости, полученные в реальных условиях эксплуатации АД серии 4А, АИ в диапазоне мощностей от 5,5 кВт до 160 кВт, частотой вращения от 750 до 3000 об/мин. за период 2013 – 2019 гг. Всего за указанный период эксплуатации зафиксировано 548 случаев выхода из строя приводных электродвигателей. Материалы по эксплуатации свидетельствуют о том, что на ряде предприятий аварийность достигала 200% (каждый электродвигатель дважды в год выходил из строя).

Согласно проведенным исследованиям и их анализу высокая аварийность электродвигателей, обусловлена особенностями их эксплуатации. При этом следует отметить, что доминирующим фактором отказов электродвигателей является повреждение изоляции обмоток статора, вследствие низкого качества питающего напряжения.

Показана целесообразность совершенствования методов оценки срока службы низковольтных асинхронных электродвигателей электротехнического комплекса, направленных на улучшение эффективности и технико-экономических показателей работы ЭТК, посредством обеспечения безаварийной эксплуатации АД в условиях совместного воздействия эксплуатационных факторов.

Вторая глава посвящена разработке метода оценки совместного воздействия параметров эксплуатации (K_{2U} , K_3) на режимы работы АД различных серий и мощностей, основанного на компьютерном моделировании.

Исследование режимов работы АД проведено на компьютерной модели (рис.1), реализованной на основе пакета «SimPowerSystems» интерактивной среды программирования MATLAB/Simulink.

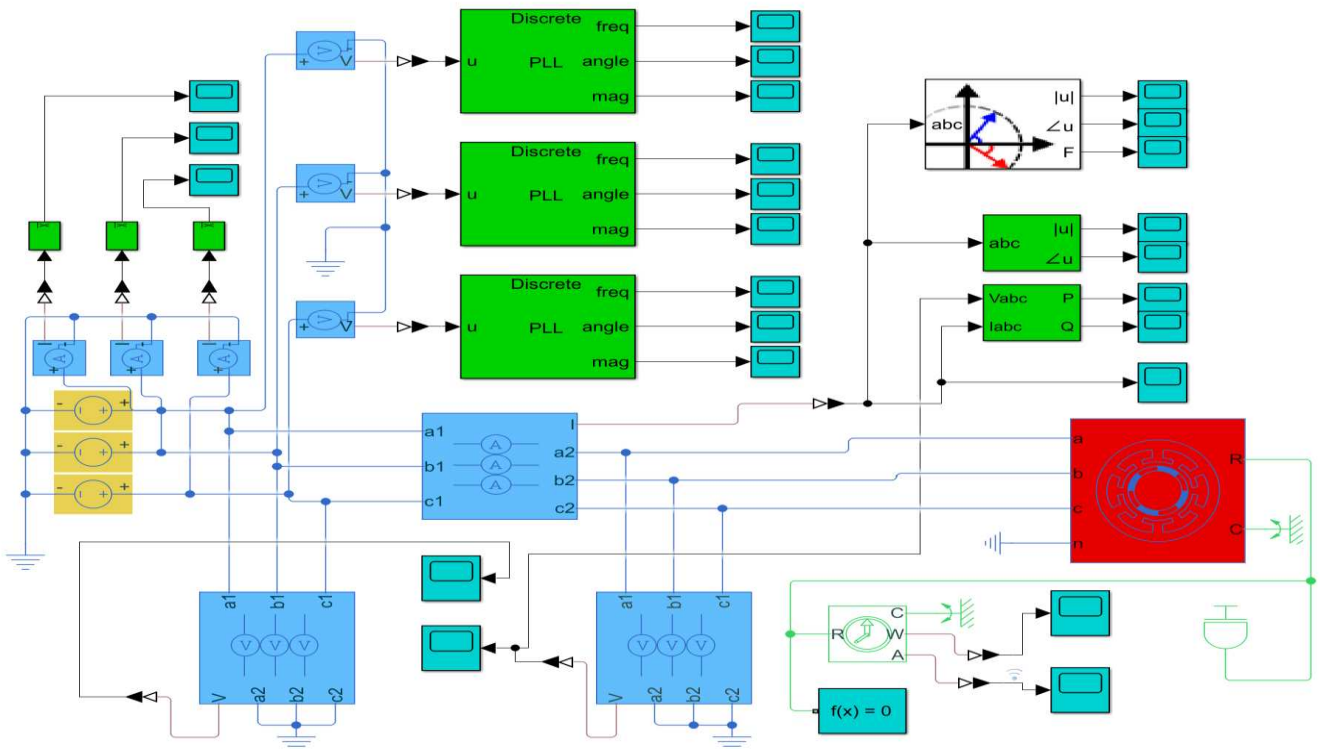


Рис. 1. Компьютерная модель, выполненная в пакете «SimPowerSystems» среды программирования MATLAB/Simulink.

Разработанная компьютерная модель позволила реализовать метод оценки воздействия эксплуатационных параметров (K_{2U} , K_3) на АД, отличительной

особенностью которого является моделирование работы АД в несимметричных режимах с учётом изменения нагрузки на валу электродвигателя.

С целью экспериментального исследования режимов работы АД, вместе с тем, в рамках верификации разработанной компьютерной модели реализована экспериментальная установка.

Эксперименты выполнены на основе компьютерной и физической моделях исследования при режиме «Холостой ход» и «Полная загрузка» электродвигателя.

Проведение эксперимента позволило подтвердить достоверность и обоснованность сформированной компьютерной модели. Результат сравнения данных экспериментального исследования работы АД, полученных с использованием компьютерного и физического моделирования (рис.2), показал высокую корреляцию между данными компьютерной и физической моделями.

Оценка RMSE соответствует значению 3,15 % при эксперименте «Холостой ход» и 3% при эксперименте «Полной загрузки» АД. Оценка MAE при эксперименте «Холостой ход» составила 2,39 %, при эксперименте «Полной загрузки» АД 2,27 %.

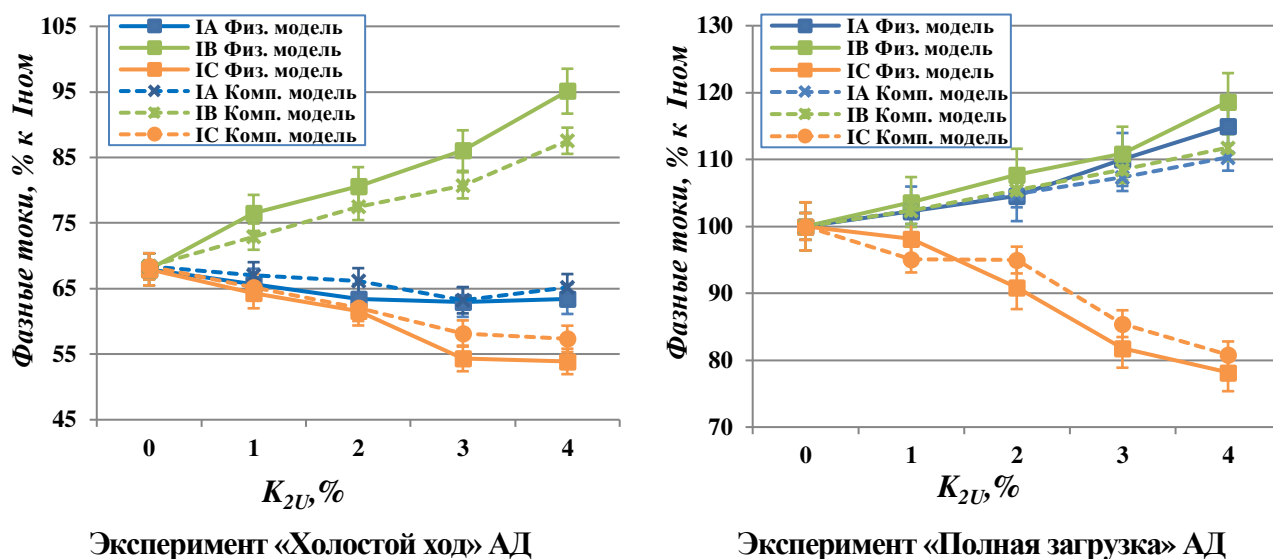


Рис.2. Графическая интерпретация сравнения значений токов в фазах АД от параметра K_{2U} .

Таким образом, разработанный метод оценки воздействия эксплуатационных факторов (K_{2U} , K_3) на АД способствует решению задач экспериментального исследования физических процессов, протекающих в электродвигателях. В первую очередь, позволяет проводить анализ качества функционирования и работоспособности электродвигателей в различных режимах работы.

В третьей главе приведены результаты исследований эксплуатационных факторов, влияющих на работоспособность АД. Выявление эксплуатационных режимов работы асинхронных электродвигателей разных серий и мощностей, способствующих продлению их срока службы.

С использованием разработанной компьютерной модели исследованы режимы работы АД с учётом параметров эксперимента: $K_{2U} = (0 - 5) \%$ с шагом изменения 1 % и $K_3 = (0 - 120) \%$ с шагом изменения 20 %.

В результате выполнения экспериментов исследованы электродвигатели серии 4А, АИ с номинальной мощностью от 5,5 кВт до 200 кВт, $n = 1500$ об/мин. В

качестве примера рассмотрены асинхронные электродвигатели серии 4А (4А132S4Y3 с $P_H = 7,5$ кВт; 4А250S4Y3 с $P_H = 75$ кВт; 4А315M4Y3 с $P_H = 200$ кВт) и серии АИ (АИР132S4 с $P_H = 7,5$ кВт; АИР250S4 с $P_H = 75$ кВт; АИР355M6 с $P_H = 200$ кВт).

На основании проведённых исследований для каждой фазы рассматриваемых электродвигателей построены зависимости, отображающие характер изменения тока АД от эксплуатационных факторов (K_{2U} , K_3). Контрольное значение допустимого тока перегрузки, в проводимых исследованиях, принято равным 1,1 номинального тока АД.

Путём линейной аппроксимации данных, на основе результатов компьютерного моделирования, выведены аналитические зависимости тока АД в наиболее загруженной фазе, характеризующие взаимосвязь эксплуатационных факторов, позволяющие учесть комплексное влияние функционально не связанных параметров.

Аналитическая зависимость определяется выражением:

- для электродвигателя серии 4А:

$$I \% \text{ от } I_{\text{ном}} = ((-0,0002P_H + 0,1436) K_{2U} + (0,7194 K_3 + 0,1631)) \cdot 100, \% \quad (1)$$

- для электродвигателя серии АИ:

$$I \% \text{ от } I_{\text{ном}} = ((-0,0003P_H + 0,1535) K_{2U} + (0,7212 K_3 + 0,159)) \cdot 100, \% \quad (2)$$

Принимаем значение тока АД в наиболее загруженной фазе равное $I, II_{\text{ном}} \cdot 100\%$, тогда выражение для определения рекомендуемых значений $K_{2U_{\text{рек}}}$ АД, с учётом полученных формул (1), (2) примет вид:

- для электродвигателя серии 4А:

$$K_{2U_{\text{рек}}} = ((-I, II_{\text{ном}} + (0,7194 K_3 + 0,1631)) / (0,0002P_H - 0,1436)) \cdot 100, \% \quad (3)$$

- для электродвигателя серии АИ:

$$K_{2U_{\text{рек}}} = ((-I, II_{\text{ном}} + (0,7212 K_3 + 0,159)) / (0,0003P_H - 0,1535)) \cdot 100, \% \quad (4)$$

В результате экспериментальных исследований выявлено, что:

1) рекомендуемый эксплуатационный режим работы электродвигателей зависит от следующих параметров – P_H , K_3 и K_{2U} .

Рекомендуемый эксплуатационный режим работы АД, в соответствии с нормами ГОСТ 32144 – 2013:

- для АД серии 4А максимальная величина K_3 составляет 70%, для АД серии АИ K_3 составляет 80%, при значениях K_{2U} от 0% до 2%;

- для АД серии 4А максимальная величина K_3 составляет 31%, для АД серии АИ K_3 составляет 35%, при значениях K_{2U} от 2% до 4%;

2) рекомендуемое значение $K_{2U_{\text{рек}}}$, а также рекомендуемый режим работы АД по перегрузочной способности индивидуальны для каждого типоразмера АД.

На основании полученных значений рекомендуемых величин $K_{2U_{\text{рек}}}$ выполнен анализ изменения срока службы АД при различных значениях несимметрии напряжений. Основываясь на методику расчёта А.К. Шидловского выведена уточнённая формула определения срока службы электродвигателей с учётом нагрева обмоток, вызванного воздействием несимметрии напряжений:

$$z = e^{[-280(13,73 \cdot K_{2U}^2)]} \quad (5)$$

В алгоритме расчёта принимаем, что снижение срока службы низковольтных асинхронных электродвигателей наступает при достижении значения $K_{2U_{\text{рек}}}$.

Следовательно, уточнённая формула определения срока службы асинхронных электродвигателей примет вид:

$$z = e \left[-280 \left(13,73 (K_{2U} - K_{2U_{рек}})^2 \right) \right] \quad (6)$$

В результате проведённых исследований изменения срока службы АД отслеживается следующая тенденция, что сокращение срока службы исследуемых электродвигателей наблюдается при значении $K_{2U} > 2\%$. С увеличением K_{2U} происходит уменьшение срока службы асинхронных электродвигателей, так при значении $K_{2U} = 3\%$ срок службы электродвигателя серии 4А132S4Y3 с $P_n = 7,5$ кВт сокращается на $\Delta Z' = 8,43$ года; 4А250S4Y3 с $P_n = 75$ кВт $\Delta Z' = 6,15$ года; 4А315М4Y3 с $P_n = 200$ кВт $\Delta Z' = 5,38$ года; АИР132S4 с $P_n = 7,5$ кВт $\Delta Z' = 6,93$ года; АИР250S4 с $P_n = 75$ кВт $\Delta Z' = 4,99$ года; АИР355М6 с $P_n = 200$ кВт $\Delta Z' = 4,76$ года относительно номинального срока службы.

Установлено, что АД серии АИ обладают большей устойчивостью к воздействию несимметрии напряжений, чем АД серии 4А, наименьшему воздействию K_{2U} подвержены электродвигатели большей мощности.

Обоснование вывода уточнённой формулы. Обоснованность корректировки уточнённой формулы (6) подтверждается на основе сравнения ряда экспериментальных данных об изменении срока службы АД, полученных в ходе анализа материалов эксплуатации на предприятиях Забайкальского края при различных значениях параметра K_{2U} , со значениями, полученными при исследованиях изменения срока службы АД с помощью известной зависимости А.К. Шидловского и уточненной формулы (6). Результаты исследования изменения срока службы АД представлены на (рис.3).

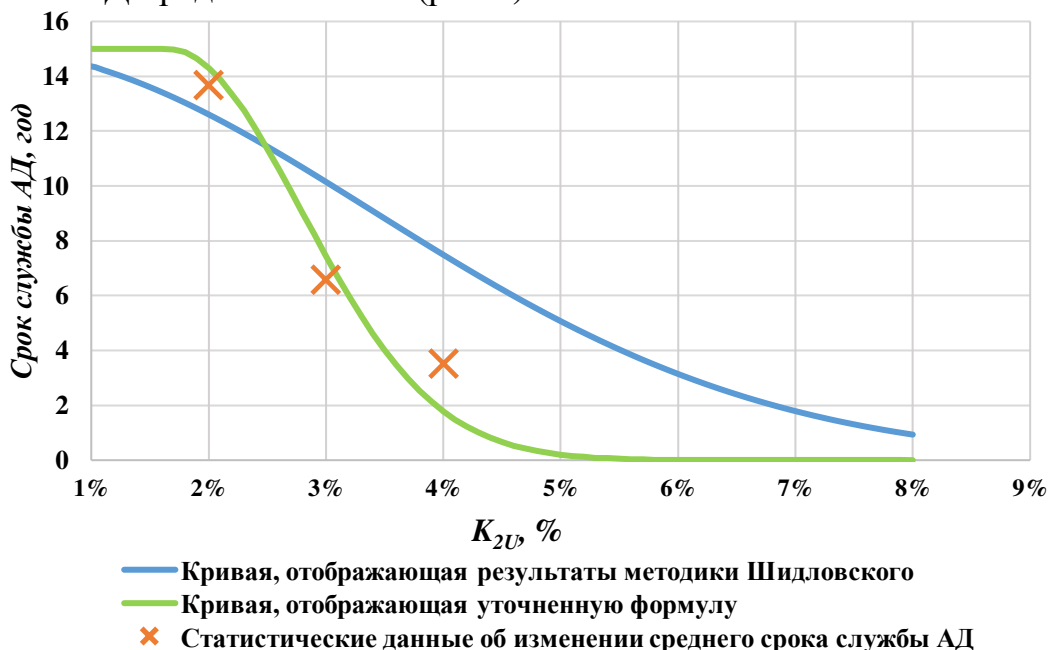


Рис. 3. Результаты исследования изменения срока службы АД с наложенными экспериментальными данными.

Выполненная оценка качества вычислений уточнённой формулы (6) показала высокий уровень корреляционной связи с экспериментальными данными АД. Оценка RMSE соответствует значению 1,17, оценка MAE 1,07.

В результате выполненного исследования влияния факторов, определяющих эксплуатационный режим работы АД, необходимо отметить:

1) нормирование K_{2U} следует выполнять согласно рекомендуемому эксплуатационному режиму работы электродвигателей. Исходя из динамики изменения срока службы АД нейтрализация негативного влияния K_{2U} требуется при наличии несимметрии напряжений, превышающей величину 1,3%;

2) принятие решения по изменению загрузки АД либо вводу средств симметрирования в ЭТК определяется, прежде всего, особенностями производственного процесса предприятия;

3) при проектировании ЭТК, содержащих электродвигательную нагрузку, необходимо учитывать влияние рекомендуемых в условиях эксплуатации АД величин K_{2U} , K_3 .

Четвёртая глава посвящена реализации метода определения рациональных мест установки технических средств симметрирования в ЭТК с электродвигательной нагрузкой. Разработке усовершенствованной методики технико-экономического обоснования применения средств симметрирования в электротехническом комплексе.

Разработка метода определения рациональных мест установки технических средств симметрирования в ЭТК с электродвигательной нагрузкой. Алгоритм расчёта рационального размещения технических средств симметрирования программно реализован на языке программирования C# в среде Microsoft Visual Studio 2012, с применением встраиваемой кроссплатформенной базы данных SQLite. Программа выполняет многовариантные расчёты установки и выбора оптимального состава устройств симметрирования в электрической схеме ЭТК предприятий.

Алгоритм программы основан на анализе исходных данных схемы ЭТК, в случае, если величина $K_{2U} > K_{2U_{рек}}$ выполняется подбор оптимального состава средств симметрирования и предпочтительные места их установки. Принятие решения, об наиболее эффективном варианте установки, основан на методе минимума приведенных затрат.

Ключевой особенностью программного продукта является использование в алгоритме программы рекомендуемого значения $K_{2U_{рек}}$, главным образом, определяющего эксплуатационный режим работы электродвигателей.

Таким образом, реализованный программный продукт, как инструмент разработанного метода, предоставляет возможность автоматизировать расчётные процедуры выявления рациональных мест установки технических средств симметрирования в ЭТК предприятий, наглядно отображает места установки средств симметрирования на проектируемой электрической схеме ЭТК, помимо этого, предоставляет информацию технико-экономического содержания.

Разработка усовершенствованной методики технико-экономического обоснования применения технических средств симметрирования в электротехническом комплексе. Методика расчёта ориентирована на комплексную оценку эффективности реализации технических мероприятий симметрирования напряжения в электрической сети. В методике рассматриваются составляющие эффекта, кроме того, динамические критерии оценки эффективности. Разработанная прикладная программа является одним из средств определения

составляющих методики расчёта.

Технико-экономический эффект от симметрирования напряжений в ЭТК за счёт установки симметрирующих устройств состоит из составляющих:

$$\Delta W_{\text{общ}} = \Delta W_{\text{доп}} + \Delta W_{\text{сс}} + \Delta W_{\text{н}} + \Delta W_{\text{ущ}}, \quad (7)$$

где $\Delta W_{\text{доп}}$ – технико-экономический эффект от снижения потерь мощности в основных элементах электрической схемы ЭТК, руб/год; $\Delta W_{\text{сс}}$ – технико-экономический эффект от увеличения фактического остаточного срока службы всех АД, находящихся в ЭТК, руб/год; $\Delta W_{\text{н}}$ – скидка по тарифу за электрическую энергию, руб/год; $\Delta W_{\text{ущ}}$ – технико-экономический эффект от снижения ущерба от повреждения и остановки технологического оборудования, руб/год.

Используя разработанную методику расчёта выполнена оценка эффективности установки симметрирующих устройств на примере электрической схемы ЭТК с. Таптугары Могочинского района Забайкальского края. Рассмотрено шесть вариантов применения средств симметрирования с различными вариациями мест установки.

Экономические расчёты позволили определить наиболее эффективный вариант установки средств симметрирования, при этом получены следующие показатели: годовой технико-экономический эффект от внедрения симметрирующих трансформаторов ТСТ2 $S_{\text{н}} = 25$ кВА составил 80 тысяч рублей; окупаемость разработанных мероприятий соответствует 3,32 года. Дополнительные потери мощности в основных элементах электрической схемы ЭТК, за счёт улучшения качества электрической энергии, снизились на 94 %, продление фактического остаточного срока службы АД составило 7 лет.

Оценка эффективности разработанных мероприятий показала их высокую инвестиционную привлекательность ($NPV > 0$ проект эффективен; $PI > 1$ проект более эффективен, чем альтернативное вложение капитала).

В приложении к диссертации содержатся исходная информация для проведения исследований, результаты исследования и материалы, подтверждающие внедрение данной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе, выполненных в диссертационной работе исследований формулируем следующее заключение:

1. Проведён анализ материалов повреждаемости низковольтных АД на предприятиях Забайкальского края. Установлено, что основной причиной ускоренного износа и выхода из строя изоляции обмоток электродвигателей является тепловое воздействие, вследствие низкого качества питающего напряжения.

2. Выполнены экспериментальные исследования фактического состояния несимметрии напряжений в электрических сетях 0,4; 6; 35 кВ электроэнергетической системы Забайкальского края. Установлено, что несимметрия напряжений в электрических сетях региона преобладает как постоянно действующий фактор, K_{2U} изменяется от 2,22% до 11,2% и в 2 – 3 раза превышает регламентируемое ГОСТ 32144 – 2013 значение.

3. Разработан метод оценки параметров эксплуатации (K_{2U} , K_3) влияющих на режимы работы АД разных серий и мощностей, основанный на компьютерном моделировании. Достоверность компьютерной модели подтверждена реализованной физической моделью.

4. Установлены эксплуатационные режимы работы асинхронных электродвигателей серии 4А, АИ, способствующие продлению их срока службы.

5. Выведена зависимость срока службы АД с учётом величины рекомендуемого значения $K_{2Uрек}$.

6. Разработан метод определения рациональных мест установки технических средств симметрирования в электротехническом комплексе с электродвигательной нагрузкой.

7. Разработана усовершенствованная методика технико-экономического обоснования применения средств симметрирования в электротехническом комплексе.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования. Тенденциями дальнейшего приоритетного развития результатов диссертационного исследования являются – совершенствование методов и средств оценки технического состояния низковольтных асинхронных электродвигателей с учётом параметров эксплуатации; развитие системы технических воздействий, направленных на поддержание технического состояния и уровня надёжности асинхронных электродвигателей электротехнического комплекса, учитывая условия их эксплуатации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ОТРАЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ АВТОРА

Статьи, опубликованные в научных журналах из Перечня ВАК РФ по специальности 2.4.2:

1. Романова В.В. Исследование влияния несимметрии фазных напряжений на режимы работы асинхронных двигателей в среде имитационного моделирования MATLAB/SIMULINK / В.В. Романова, С.В. Хромов, И.Ф. Суворов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика», 2016. – Т. 16, № 3. С. 72 – 83.

2. Романова В.В. Применение методов математической статистики для прогнозирования возникновения несимметрии напряжений в электрических сетях / В.В. Романова, С.В. Хромов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика», 2017. – Т. 17, № 4. С. 59 – 71. DOI: 10.14529/power170407.

3. Романова В.В. Методика расчёта экономической эффективности внедрения технических средств симметрирования в электротехнический комплекс с электродвигательной нагрузкой / В.В. Романова, С.В. Хромов, В.Н. Гонин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика», 2020. – Т. 20, № 2. С. 15 – 27. DOI:10.14529/power200202.

4. Романова В.В. Анализ воздействующих факторов, влияющих на эксплуатационную надёжность низковольтных асинхронных электродвигателей / В.В. Романова, К.В. Суслов, С.В. Хромов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики, 2021. – Т.23, № 3. С. 80 – 89. DOI:10.30724/1998-9903-2021-23-3-80-89.

5. Романова В.В. Анализ степени влияния несимметрии питающего напряжения на эксплуатационную надёжность низковольтных асинхронных электродвигателей / В.В. Романова, К.В. Суслов, А.Г. Батухтин, С.В. Хромов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики, 2022. – Т.24, № 4. С.131 – 141. DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-4-131-141.

6. Романова В.В. Разработка метода определения рационального места установки технических средств симметрирования в электротехническом комплексе с наличием электродвигательной нагрузки / В.В. Романова, К.В. Суслов, А.Г. Батухтин, С.В. Хромов, М.В. Кобылкин // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки», 2022. – Т.30, № 3. С.141 – 157. DOI: 10.14498/tech.2022.3.10.

Статьи, опубликованные в научных журналах из Перечня ВАК РФ по другим специальностям:

7. Романова В.В. Оценка влияния несимметрии системы питающих напряжений на режимы работы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором / В.В. Романова, С.В. Хромов, И.Ф. Суворов, Д.А. Дейс // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование, 2016. – №3 (51). С. 222 – 227.

8. Романова В.В. Сравнение режимов работы двух разных серий асинхронных двигателей в условиях несимметрии напряжений / В.В. Романова, С.В. Хромов, И.Ф. Суворов // Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления, 2016. – № 6 (63). С.74 – 83.

9. Романова В.В. Оценка достоверности результатов компьютерного моделирования влияния несимметрии напряжений на режимы работы асинхронного двигателя / В.В. Романова, С.В. Хромов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование, 2016. – №4 (52). С.155 – 163.

10. Романова В.В. Новый подход к нормированию коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности для узлов нагрузок систем электроснабжения с асинхронными двигателями / В.В. Романова, С.В. Хромов, И.Ф. Суворов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование, 2017. – №1 (53). С. 209 – 214.

11. Romanova V.V. Development of procedures for determining the optimal placement of symmetration devices for electrical supply systems 0.4 kV with motor-actuated load / V.V. Romanova, S.V. Khromov, I.F. Suvorov // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, 2018. – 11(5). С. 528 – 535.

12. Romanova V.V. The program for determining the optimal location for installation of symmetry facilities in 0.4 kV power supply systems with a motor-drive load / V.V. Romanova // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, 2020. – 13(5). С. 643 – 651. DOI: 10.17516/1999 - 494X - 0253.

Монографии:

13. Качество электрической энергии, современное состояние, проблемы, предложения по их решению / отв. ред. Н.И. Воропай. – Новосибирск: Наука, 2017. 219 с.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:

14. Свидетельство №2018665997 Российская Федерация. Свидетельство об официальной государственной регистрации программ для ЭВМ. Программа определения оптимального места установки средств симметрирования / В.В.

Романова, К.С. Балбекина (РФ). – №2018665997; заявл. 26.11.2018; опубл. 11.12.2018, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

Статьи, опубликованные в научных журналах, включенных в базы данных Web of Science и Scopus:

15. Romanova V.V. Software for optimal selection of places for installation of balancing devices in 0,4 kV electric power systems loaded with electric motors / V.V. Romanova, S. V. Khromov, I.F. Suvorov, K.S. Balbekina // E3S Web of Conferences, 2017, Vol. 25 (04002), 8 p. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172504002>.

16. Romanova V.V. Effect of asymmetry of supply voltages on asynchronous motor operation modes / V.V. Romanova, S. V. Khromov // E3S Web of Conferences, 2018, Vol.58 (03013), 6 p. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185803013>.

17. Romanova V.V. Determination of optimal location for installation of symmetry facilities in 0.4 kV power supply systems with motor-drive load / V.V. Romanova // E3S Web of Conferences, 2018, Vol. 58 (03014), 6 p. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185803014>.

18. Romanova V.V. Operational reliability of low-voltage induction motors in conditions of voltage asymmetry / V.V. Romanova, S. V. Khromov // E3S Web of Conferences, 2019, Vol. 139 (01053), 5 p. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913901053>.

19. Romanova V.V. Multi-factor analysis of external effects influencing the operational reliability of asynchronous electric motors / V.V. Romanova, K.V. Suslov, S.V. Khromov // E3S Web of Conferences, 2020, Vol. 216 (01084), 4 p. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601084>.

20. Romanova V.V. Ensuring the reliability of power supply systems by improving the quality of electrical energy / V.V. Romanova, K.V. Suslov, S.V. Khromov // AIP Conference Proceedings, 2023, Vol. 2552 (070017), 7 p. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0117210>.

Автором дополнительно опубликовано 28 статей по теме диссертационной работы в других изданиях (сборниках докладов и тезисов, журналах).