

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ЗАБАЙКАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Романова Виктория Викторовна

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

Специальность 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
д.т.н., доцент
Батухтин Андрей Геннадьевич

Чита 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	12
1.1. Требования к уровню несимметрии напряжений и фактическое состояние проблемы несимметрии в электрических сетях Забайкальского края	12
1.2. Сложность работы асинхронных электродвигателей в существующих условиях эксплуатации	19
1.3. Анализ способов и технических средств снижения несимметрии напряжений в электрических сетях 0,4 кВ	27
1.4. Постановка задач исследования.....	37
1.5. Выводы по первой главе	39
ГЛАВА 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА АСИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ	41
2.1. Разработка методов экспериментального исследования режимов работы асинхронных электродвигателей.....	41
2.2. Реализация компьютерной модели исследования режимов работы асинхронных электродвигателей.....	46
2.3. Метод экспериментального исследования режимов работы асинхронных электродвигателей, основанный на компьютерном моделировании	51
2.4. Реализация физической модели исследования режимов работы асинхронных электродвигателей.....	56
2.5. Метод экспериментального исследования режимов работы асинхронных электродвигателей, основанный на физическом моделировании	58
2.6. Оценка достоверности разработанной компьютерной модели.....	61
2.7. Выводы по второй главе	64

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА РЕЖИМЫ РАБОТЫ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ..... 66

3.1. Исследование фактического уровня несимметрии напряжений в электрических сетях 0,4 кВ энергосистемы Забайкальского края 66

3.2. Исследование режимов работы асинхронных электродвигателей серии 4А, АИ..... 78

3.3. Вывод аналитической зависимости токов в фазах асинхронных электродвигателей серии 4А, АИ..... 85

3.4. Выявление рекомендуемых эксплуатационных режимов работы асинхронных электродвигателей серии 4А, АИ..... 90

3.5. Выводы по третьей главе 104

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ МЕСТ УСТАНОВКИ СРЕДСТВ СИММЕТРИРОВАНИЯ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ С ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКОЙ..... 106

4.1. Разработка методики расчёта рационального размещения средств симметрирования в электротехническом комплексе с наличием электродвигательной нагрузки..... 106

4.2. Программная реализация алгоритма расчёта рационального размещения средств симметрирования в электротехническом комплексе..... 116

4.3. Апробация программы в действующем электротехническом комплексе Забайкальского края..... 120

4.4. Реализация усовершенствованной методики технико-экономического обоснования внедрения технических средств симметрирования в электротехническом комплексе с наличием электродвигательной нагрузки..... 123

4.5. Выводы по четвёртой главе..... 138

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	139
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	141
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	142
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Перечень технических средств коррекции величины несимметрии напряжений.....	159
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Результаты моделирования асинхронных электродвигателей серии 4А, АИ с $P_n = 7,5; 75; 200$ кВт	168
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ	174
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Акты о внедрении.....	175

ВВЕДЕНИЕ

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 учеными 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.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Требования к уровню несимметрии напряжений и фактическое состояние проблемы несимметрии в электрических сетях Забайкальского края

Качество электрической энергии (КЭЭ) в России и странах СНГ нормируется согласно ГОСТ 32144 – 2013 [1] и определяется степенью соответствия параметров напряжения сети регламентированным значениям.

Указанный межгосударственный стандарт является аналогом европейского регионального стандарта EN 50160 – 2010 / A3:2019 [2]. Следует отметить, что в приведённых нормативных документах несимметрия напряжений входит в число основных показателей качества электрической энергии (ПКЭ). Несимметрия напряжений (voltage unbalance) – условия в многофазной системе, при которых среднеквадратичные значения фазных напряжений или углы сдвига между последовательными фазами не равны [3]. Несимметрия напряжений, главным образом, характеризуется коэффициентами – коэффициентом несимметрии напряжений по нулевой последовательности (K_{0U}) и коэффициентом несимметрии напряжений по обратной последовательности (K_{2U}). Так, согласно нормативным требованиям [1] для K_{2U} и K_{0U} установлены предельные значения в размере 2 % для 95% и 4% для 100 % времени измерений, интервалом в одну неделю.

Несоответствие коэффициентов несимметрии требованиям ГОСТ 32144 – 2013 приводит к негативным последствиям. С точки зрения авторов [4 – 9], несимметрия напряжений в низковольтных электрических сетях вносит коррективы в ухудшение КЭЭ, приводит к потерям мощности в элементах электрических сетей и снижению срока эксплуатации электросетевого оборудования, кроме того, отрицательно отражается на энергетических характеристиках электрических машин. Вследствие малого сопротивления обратной последовательности обмоток АД, особое значение приобретает

присутствие напряжения обратной последовательности в электрической сети. Преимущественно создающее значительные токи обратной последовательности, порождая тормозной электромагнитный момент, помимо этого, дополнительный нагрев активных частей АД. В свою очередь, приводящие к уменьшению коэффициента полезного действия и снижению срока службы изоляции обмоток электродвигателей.

Исследованиями установлено, что в электрических сетях России уровень несимметрии напряжений существенно превышает допустимый и достигает значений, составляющих 8 – 9 % [10 – 12]. Проведённый анализ КЭЭ показывает, что ПКЭ некоторых регионов не соответствуют требованиям, установленным ГОСТ 32144 – 2013. Нарушение требований стандарта имеют массовый и систематический характер, наибольшие уровни искажения ПКЭ зафиксированы в Забайкальской электроэнергетической системе. Электроэнергетическая система Забайкальского края выделена, как самая проблематичная с точки зрения несимметричных режимов работы электрических сетей.

Следует отметить, что несимметричные режимы работы электрических сетей преобладают не только в России. Проведённые исследования [10, 13 – 16] указывают на недопустимые уровни несимметрии напряжений в различных странах (табл.1.1).

Таблица 1.1 – Уровень несимметрии напряжений в различных странах

Страна	Нормативный документ	Измеренное значение, %	Нормативное значение, %
Австралия	AS/NZS 61000.3.6 – 2001	2,6	2
Беларусь	ГОСТ 32144 – 2013	2,9	2 – 4
Германия	EN 50160 – 2010 /A3:2019	2,5	2 – 3
Италия	EN 50160 – 2010 /A3:2019	3,2	2 – 3
Китай	GB/T 15543 – 2008	2,3	2
Кыргызстан	ГОСТ 32144 – 2013	4,2	2 – 4
Португалия	EN 50160 – 2010 /A3:2019	3	2 – 3
Россия	ГОСТ 32144 – 2013	8	2 – 4
США	IEEE Std 519 – 2022	2,4	2
Узбекистан	ГОСТ 32144 – 2013	3,1	2 – 4
Украина	ДСТУ ІЕС 61000 – 2 – 12:2013	5	2 – 3

Совершенно очевидно, что приоритетное внимание следует уделять исследованию и оценке несимметричных режимов, как режимов, приводящих к уменьшению надёжности работы электрических сетей и её элементов.

Забайкальская электроэнергетическая система (ЭЭС) охватывает территорию Забайкальского края, входит в Объединённую энергетическую систему Сибири (ОЭС Сибири). Забайкальская ЭЭС энергодефицитна, покрывает свои нужды за счёт перетоков электроэнергии по межсистемной связи из ОЭС Сибири через Республику Бурятия. Характерной особенностью Забайкальской ЭЭС является то, что существенную долю её нагрузки составляют тяговые подстанции филиала ОАО «РЖД» «Забайкальская железная дорога» (ЗабЖД).

Наблюдается устойчивая тенденция роста электропотребления ОАО «РЖД» ЗабЖД. Так, по данным АО «Читаэнергосбыт» с 2015 – 2020 гг. доля потребления ЗабЖД составила 43 – 54% от общего потребления электроэнергии в крае.

Структура электропотребления по отраслям экономики за 2020 год представлена на (рис.1.1).

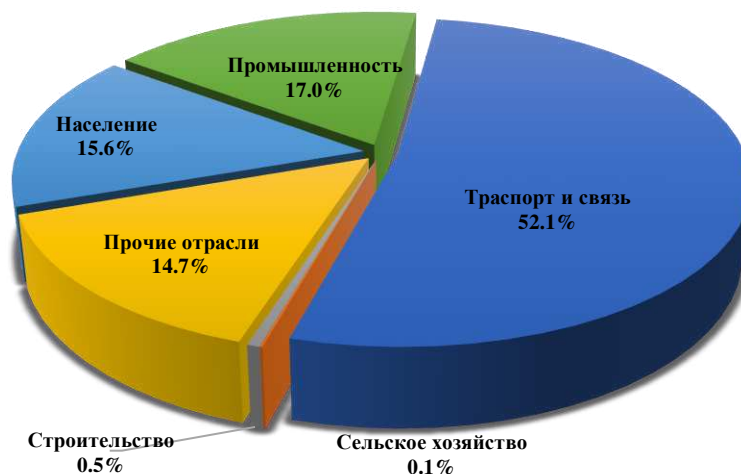


Рис.1. 1 – Структура электропотребления по отраслям экономики за 2020 год

В динамике изменения электропотребления по отраслям, в течение 2015 – 2020 годов (рис. 1.2), отмечен стабильный рост на 14,2 % электропотребления отрасли «Транспорт и связь» и незначительное снижение в 2015 году на 1,2 % по отношению к предыдущему году. Увеличение электропотребления данной отрасли обусловлено ростом объёма грузоперевозок по Забайкальскому краю.



Рис.1.2 – Динамика изменения электропотребления по отраслям в 2015 – 2020 годах

Отличительной особенностью Забайкальской ЭЭС является использование тяговых подстанций филиала ОАО «РЖД» для питания населённых пунктов и промышленных предприятий, которые удалены от источников генерации.

Система тягового электроснабжения Забайкальского края работает на однофазном переменном токе при напряжении 25 кВ (основная часть подстанций тягового транзита ОАО «ЗабЖД») и 2×25 кВ (тяговые подстанции «Южного хода» ОАО «ЗабЖД»).

Как известно [17], система тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог переменного тока основана на использовании 2 фаз из 3 фаз питающей сети. В связи с этим, происходит проблема электромагнитной совместимости системы тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог с другой частью электроэнергетической системы. Как следствие этого, возникают несимметричные режимы работы в электрических сетях региона.

Наибольшие проблемы, вызванные тяговой нагрузкой в Забайкальской ЭЭС возникают на электропередаче 220 кВ Холбон-Могоча-Ерофей Павлович.

В соответствии с программой инновационного развития ПАО «ФСК ЕЭС» на 2016 – 2020 годы с перспективой до 2025 года, в 2012 году на подстанции 220 кВ Могоча положено начало реализации Забайкальского преобразовательного

комплекса (ЗБПК). Ключевой целью преобразовательного комплекса является объединение раздельно работающих энергосистем ОЭС Сибири и ОЭС Востока через вставку постоянного тока (ВПТ) на базе статического компенсатора реактивной мощности «СТАТКОМ» [18]. Забайкальский преобразовательный комплекс выполнен на базе двух параллельно включенных вставок постоянного тока, содержащих трёхуровневые преобразователи напряжения типа «СТАТКОМ» мощностью 120МВА каждый, подключаемые к сети через силовые трансформаторы 220/35 кВ.

Ввод ЗБПК осуществлён в 2017 году, во время тестовой работы ВПТ значительно улучшилось качество работы тяговых подстанций Транссибирской железнодорожной магистрали, так и нетяговых потребителей электрической энергии. В настоящее время ЗБПК штатно работает в режиме СКРМ в силу не стабильной работы преобразовательного комплекса.

Произведено инструментальное обследование электрических сетей 0,4; 6; 35 кВ Забайкальской ЭЭС с целью детальной оценки и формализации реальных уровней несимметрии напряжений в электрических сетях Забайкальского края, служащих индикаторами и характеризующих несимметричные режимы в электрических сетях региона.

Обследование производилось в течение 2012 – 2019 годов в различных точках электрических сетей региона. Измерения осуществлялись согласно действующему стандарту [19] с использованием сертифицированных, поверенных приборов: «Прорыв-КЭ», «ПАРМА РКЗ. 01», «Энергомонитор 3.3Т».

Объектами исследований выбраны предприятия различной отраслевой принадлежности (жилищно-коммунальной, промышленной сферы) в том числе, получающие питание от тяговых подстанций ЗабЖД.

Диаграммы, изображённые на (рис.1.3,1.4) иллюстрируют результаты измерений и анализа K_{2U} в действующих электрических сетях 0,4; 6; 35 кВ Забайкальской ЭЭС. Представлены обобщенные данные минимальной и максимальной величин K_{2U} по исследуемым объектам в течение 95% и 100 %

времени измерений, интервалом в одну неделю.

По итогам проведённых исследований установлено, что несимметрия напряжений в действующих электрических сетях Забайкальской энергосистемы превалирует как постоянно действующий фактор. Выявлено, что K_{2U} в большинстве случаев, варьируется в диапазоне значений от 2,22% до 11,2% и в ряде случаев в 2 – 3 раза превышает нормируемое [1] значение.

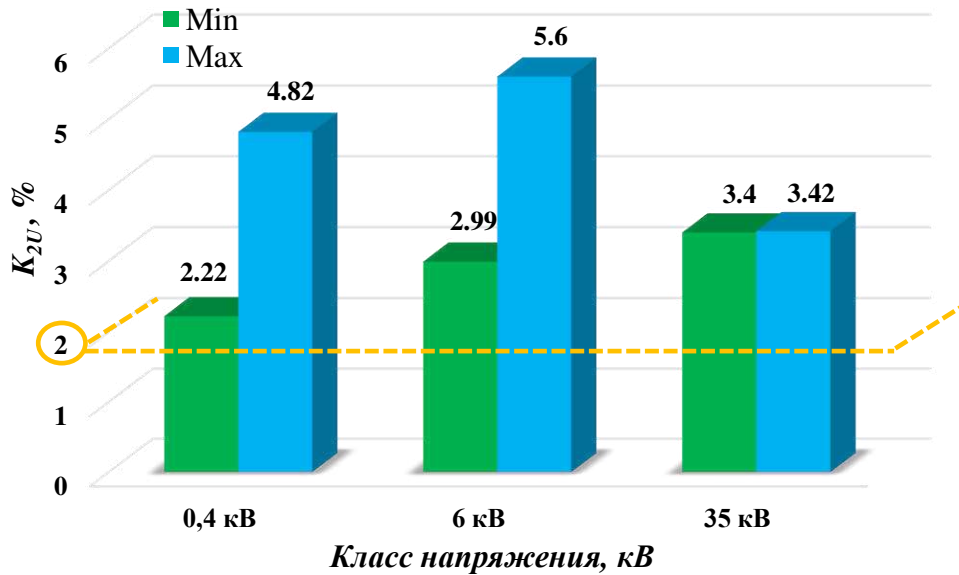


Рис.1.3 – Результаты экспериментальных исследований несимметрии напряжений, при 95% времени измерений

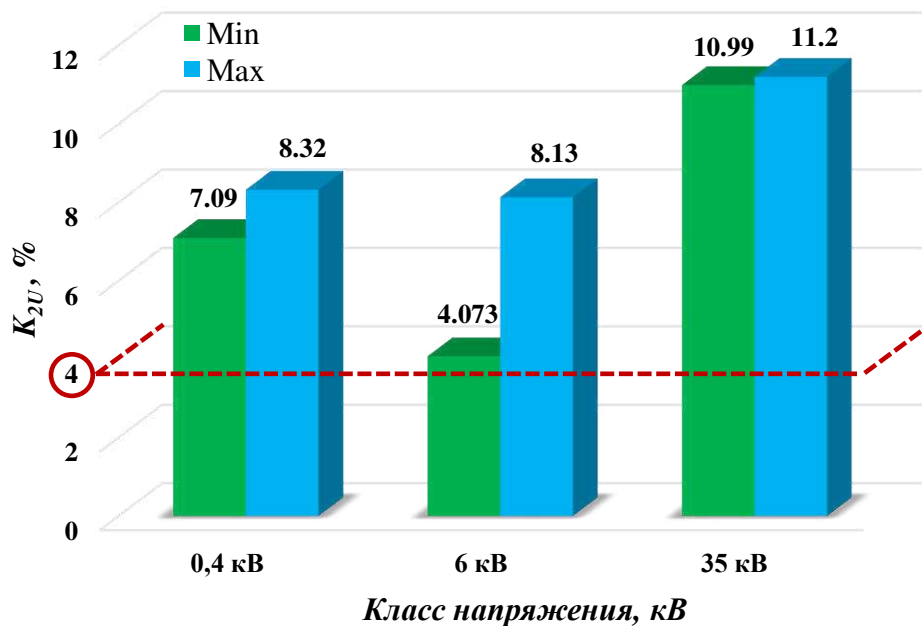


Рис.1.4 – Результаты экспериментальных исследований несимметрии напряжений, при 100% времени измерений

Отмечено, что с понижением класса напряжения K_{2U} несущественно улучшается, превышая установленные нормативные требования [1].

В электрических сетях, связанных с тяговой нагрузкой, наблюдается значительное отклонение K_{2U} от нормативных значений, наиболее высокие уровни зафиксированы на объектах, расположенных в Могочинском районе Забайкальского края. Сравнительно малое количество искажений в низковольтных сетях возможно объяснить их удалённостью от тяговых сетей ЗабЖД и питанием от районных подстанций 220 кВ Забайкальской ЭЭС.

Проведённые исследования характеризуют недопустимый уровень K_{2U} , снижающий эффективность и надёжность функционирования электрооборудования электрических сетей.

Инновационное развитие транспортной компании ОАО «РЖД» осуществлено в соответствии с задачами, определяемыми «Стратегией развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года» [20]. Стратегией предусмотрено увеличение грузоперевозок по Транссибирской железнодорожной магистрали и БАМу.

По данным ОАО «ЗабЖД» увеличение пропускной способности магистрали реализовано путём увеличения количества поездов, помимо этого, применением технологии соединённых грузовых поездов, то есть использованием поездов повышенной массы и длины состава. Так, по состоянию на ноябрь 2021 года вес грузовых поездов повышенной массы состава составил 9000 тонн, планируется увеличение веса составов до 12000 тонн. Соответственно, возникает зависимость, увеличивается масса состава грузового поезда, увеличивается нагрузка на подстанции тягового транзита ОАО «ЗабЖД».

Анализируя вышесказанное необходимо отметить, что подобные мероприятия приведут к значительному ухудшению текущей ситуации с КЭЭ Забайкальской ЭЭС. Очевидно, что Забайкальская ЭЭС с комплексом неблагоприятных факторов накладывает коррективы на режимы работы электрических сетей региона.

1.2. Сложность работы асинхронных электродвигателей в существующих условиях эксплуатации

Проблемы работы асинхронных электродвигателей заключающиеся в снижении их эффективности и надёжности обусловлены основными факторами: качеством изготовления деталей конструкции и условиями эксплуатации. Если качество изготовления деталей конструкции возможно рассматривать как случайный фактор, который должен контролироваться заводом изготовителем на стадии ОТК, то условия эксплуатации, как фактор, требуют детального изучения и контроля со стороны эксплуатационной организации на всем периоде работы АД.

В соответствии с [21,22], низковольтные общепромышленные АД предназначены для работы в определенных режимах. В условиях правильной эксплуатации срок службы АД до капитального ремонта достигает 15 лет. Правильными условиями эксплуатации считаются номинальные условия, указанные в паспорте электрооборудования, однако практика эксплуатации АД показывает крайне низкую вероятность соответствия фактических условий эксплуатации номинальным.

Представляется, что каждый АД имеет определенные номинальные параметры, приведённые в паспорте или на шильдике электрооборудования, соответствующие номинальному режиму работы электродвигателя. Допустимые отклонения от номинального режима имеют строгий диапазон изменений, установленные в нормативных документах.

Номинальный режим работы общепромышленных асинхронных электродвигателей зависит, прежде всего, от ряда факторов:

1) условий эксплуатации (температуры, влажности окружающей среды, атмосферного давления, пыли, инея, параметров уровня загрузки электродвигателя, климатического исполнения и категории размещения, взрывоопасных и пожароопасных зон производственных помещений);

2) режимов работы электродвигателей. Согласно ГОСТ ИЕС 60034-1-2014

[23] предусмотрено 10 номинальных режимов для электродвигателей (S1 – S10);

3) воздействующих факторов (тепловое, химическое, механическое, электродинамическое, электрофактическое (влияние режима напряжения)).

На данный момент нормативной базой в области качества электроэнергии, требований к надёжности электрических машин, ориентированных на обеспечение безаварийной эксплуатации электродвигателей, являются следующие стандарты [1, 23 – 26].

Стоит отметить, что согласно [26], во избежание отказа АД при достижении K_{2U} значений, превышающих 1% электродвигатели следует разгружать, а при достижении K_{2U} значений, превышающих 5% требуется выводить АД из эксплуатации.

На основании МЭК 892 допустимая полная загрузка АД зависит от величины K_{2U} . Так, полная (100%) загрузка АД возможна при $K_{2U} < 1\%$. В процессе эксплуатации АД с постоянной нагрузкой, при достижении величины $K_{2U} = 2\%$ загрузку целесообразно уменьшить до 96%, при $K_{2U} = 3\%$ снизить до 90%, при $K_{2U} = 4\%$ снизить до 83%, при $K_{2U} = 5\%$ снизить до 76%. Согласно [27] оптимальная величина коэффициента загрузки составляет в пределах от 85% до 100 % номинальной мощности АД. Несбалансированная величина коэффициента загрузки оказывает влияние на величину тока в обмотках электродвигателя, соответственно и на величину мощности её тепловыделений.

Аналитический обзор работ авторов [28,30,36] показал, что на практике рассмотренные показатели крайне редко соответствуют нормированным значениям, отмечаются факты их многократного превышения. Практическая невозможность прерывания технологического цикла предприятия, при превышении пороговых значений рассматриваемых показателей, и связанная с этим работа АД в ненормативных условиях неизбежно ведет к отказу АД.

Как известно, при оценке надёжности асинхронных электродвигателей существенное значение имеет установление причин возникновения отказов. Согласно [24], отказ – это частичная либо полная потеря работоспособного

состояния объекта.

Исследованием надёжности асинхронных электродвигателей и систематизацией их отказов занимаются с 60-х годов 20 века. В работах [21,28,32] представлена систематизация и анализ причин отказов, согласно авторским сведениям главной причиной отказов АД является выход из строя обмоток статора. По разным оценкам вероятность выхода АД из строя по причине такого типа отказа оценивается в интервале от 30 до 55 % от всех возможных вариантов поломок.

Согласно исследованиям [22,30,33,34,37,38] известно, что выход из строя АД в подавляющем большинстве случаев рассматривается как результат отказа изоляции, преимущественно самой слабой их части. Анализ причин пробоев изоляции обмоток АД позволил установить следующее, что основной причиной разрушения изоляции является тепловое воздействие. Основными возможными факторами, вызывающими тепловое воздействие, являются несоблюдение условий эксплуатации, в частности, недопустимые режимы работы, кроме того, не соответствие условий окружающей среды в процессе эксплуатации электродвигателей.

В работах [30,32 – 34,39] приведено систематизированное формализованное изложение исследований в области функционирования электродвигателей в разнообразных режимах работы. Авторы указывают значительное влияние ряда факторов на срок службы АД, среди которых отметим следующие – искажение КЭЭ (около 30% отказов), нагрузка и вибрация электродвигателя, параметры окружающей среды (около 25% отказов).

Систематизация особенностей и условий эксплуатации электродвигателей [29,31,33,35,37,40] позволила выявить приоритетные факторы, оказывающие негативное влияние на срок службы изоляции обмоток АД. Так, в результате комплексных исследований отмечено, что в наибольшей степени на срок службы АД оказывает одновременное воздействие нескольких эксплуатационных факторов.

Исходя из этого факта, для определения достоверного прогноза реального

срока службы электродвигателей, кроме того, оценки их надёжности целесообразно принимать во внимание совокупное воздействие эксплуатационных факторов. Именно поэтому, для обеспечения безаварийной эксплуатации электродвигателей ЭТК необходим анализ условий эксплуатации, исследование режимов работы и процессов, приводящих к ускоренному износу деталей электродвигателей.

Многолетний опыт эксплуатации АД на предприятиях Забайкальского края, показывает их высокую повреждаемость. Согласно статистике, ежегодно в общем числе отказов электрооборудования более 45% занимают повреждения, связанные с низковольтными асинхронными электродвигателями. В условиях действующего производства аварийные ситуации приводят к останову основных технологических процессов, наносят экономический ущерб. Асинхронные электродвигатели в ЭТК предприятий обеспечивают привод таких ответственных производственных механизмов, как: насосов, дымососов, дутьевых вентиляторов, компрессоров, мельниц, дробилок. Поэтому от безотказной работы электродвигателей в большей степени зависит весь технологический процесс производства и эффективность работы предприятия.

С целью оценки наиболее характерных причин отказов АД проведены энергетические обследования (энергоаудит) промышленных предприятий Забайкальской ЭЭС, осуществлённые в соответствии с Федеральным законом № 261 – ФЗ [41].

Для выявления причин отказов АД предприятий Забайкальского края выполнен сбор, обработка и анализ исходных данных по аварийности низковольтных электродвигателей общепромышленного назначения. Полученные данные классифицированы по условиям эксплуатации, режимам работы, месту повреждения электродвигателей.

Проанализированы материалы актов расследования повреждений АД серии 4А, АИР в диапазоне мощностей от 5,5 кВт до 160 кВт, частотой вращения $n = 750 - 3000$ об/мин. за период 2013 – 2019 гг. АД эксплуатировались в продолжительном

S1, кратковременном S2, повторно-кратковременном S3 режимах работы.

Анализ отказов приводных низковольтных электродвигателей общепромышленного назначения выполнен на основании статистических данных их повреждаемости, полученных в реальных условиях эксплуатации таких предприятий как: теплогенерирующих компаний ООО «Коммунальник», ООО «РСО «Тепловодоканал», горнопромышленного предприятия ОАО «Рудник Александровский» и др. 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). На некоторых предприятиях региона зафиксирован массовый выход из строя АД, так, например, в декабре 2017 года был объявлен режим чрезвычайной ситуации в населённых пунктах Могочинского района, в результате последовательного выхода из строя, на котельных и объектах водоснабжения, 17 электродвигателей [42].

ОАО «Рудник Александровский» является одним из крупнейших горнопромышленных предприятий Забайкальского края, занимающийся разработкой Александровского золоторудного месторождения в Могочинском районе Забайкальского края открытым способом. Переработка минерального сырья осуществляется с применением эффективных технологий обогащения, при этом используется современное электрооборудование. Общее извлечение золота на предприятии составляет 92 – 93%.

Технологический процесс гидрометаллургических операций предприятия осуществляется в непрерывном режиме работы, с применением водно-шламовой схемы обогащения. При данной технологии обогащения минерального сырья в производственном процессе используется до 70% асинхронных электродвигателей, как приводных механизмов насосных установок, служащих для перекачки оборотных вод (песковые, шламовые и др.).

Проведённые исследования [43] показали, что в процессе работы ОАО

«Рудник Александровский» сталкивается с трудностями из-за низкого качества поставляемой электрической энергии, и, как следствие, повреждением электрооборудования, многочисленными перебоями в производственном процессе предприятия, длительными простоями золотодобывающего комплекса.

Эксплуатационным персоналом предприятия зафиксировано до 20 раз в сутки остановок производственного процесса золотодобывающего комплекса.

Испытания КЭЭ на отходящих фидерах ПС «Фабрика» 35/6 кВ, питающая ОАО «Рудник Александровский», выполненные электролабораторией ОАО "ИРМЕТ" показали, что измеренные значения несимметрии напряжений как 95% так и 100% времени измерения превышают установленные нормативные значения [1].

Анализ времени простоя предприятия показал, что количество часов отключения электроэнергии ежегодно увеличивается. Очевидно, что ОАО «Рудник Александровский» несёт финансовые потери вследствие простоя предприятия.

В (табл. 1.2) представлена информация о простоях предприятия, вызванных низким качеством электрической энергии.

Таблица 1.2 – Сведения о простоях предприятия

Год	Количество простоев предприятия	Потери рабочего времени, час
2014	130	159
2015	140	216
2016	133	141
2017	691	332

Расчёт экономического ущерба [43], выполненного на основе статистических данных простоев предприятия в виде упущенной прибыли, приведен в (табл.1.3). Как показали исследования [43], помимо ущерба, связанного с упущенной прибылью, ОАО «Рудник Александровский» имеет финансовые убытки в виде стоимости оборудования, которое установлено взамен поврежденного.

Проблему низкого качества поставляемой электроэнергии предприятие решает самостоятельно, установкой частотных преобразователей на ответственные в технологическом процессе электрооборудование. Так на каждый АД

индивидуально установлен преобразователь частоты, таких производителей как: Danfoss, DELTA Electronics, Mitsubishi Electric.

Таблица 1.3 – Экономический ущерб, вызванный простоем предприятия

Год	Средняя производительность металла, г / час	Количество не произведённого металла, г	Упущенная прибыль, тыс.руб.
2014	40	6360	9406
2015	112	24192	50924
2016	157	22137	59416
2017	157	52124	119885
Всего		68703	239631

Реализация технических решений по компенсации искажений КЭЭ на ОАО «Рудник Александровский» внедрена с 2018 года, эксплуатационным персоналом предприятия отмечено резкое снижение простоев золотодобывающего комплекса.

ОАО «Рудник Александровский» не единственный потребитель электрической энергии Забайкальской ЭЭС сталкивающийся с проблемами низкого качества поставляемой электроэнергии.

Таким образом, при проведении энергетических обследований предприятий Забайкальской ЭЭС подтвержден факт наличия несимметрии в электрических сетях региона, вследствие чего, несимметричные режимы работы сети являются эксплуатационными режимами работы АД предприятий Забайкальского края.

Статистика свидетельствует, что в подавляющем большинстве случаев отказы АД происходили из-за повреждения изоляции обмоток статора (до 50% от всех отказов АД). При этом наиболее уязвимыми являлись длительный 60%, повторно-кратковременный 25% режимы работы электродвигателей.

Причины отказов дифференцированы следующим образом: эксплуатационные 60% (атмосферные и коммутационные перенапряжения, неудовлетворительное качество питающего напряжения), технологические 28% (заклинивание подшипников, перегрузки), конструкционные 12% (брак, неудовлетворительное качество ремонта). Стоит заметить, что 40% отказов АД происходили из-за повреждения изоляции обмоток статора вследствие

несимметрии питающей сети.

Согласно проведенным исследованиям и их анализу, следует заметить, что высокая аварийность электродвигателей предприятий Забайкальской ЭЭС, обусловлена особенностями их эксплуатации. При этом следует отметить, что доминирующим фактором отказов электродвигателей является повреждение изоляции обмоток статора, вследствие низкого качества питающего напряжения, помимо этого, несбалансированной величины загрузки АД.

Известно, что недогруз АД ведёт к ухудшению эксплуатационных показателей электропривода, так как при этом уменьшается КПД и коэффициент мощности электродвигателя [44,45]. При перегрузках АД под действием высокой температуры разрушается изоляция обмоток статора, уменьшается эксплуатационный срок службы электродвигателя, происходит выход его из строя. В источнике [30] отмечается, что при 2% несимметрии напряжений срок службы АД сокращается на 10 % в силу дополнительных потерь активной мощности.

Резюмируя вышеизложенное стоит отметить, что перечисленные факторы определяют безаварийную эксплуатацию АД в ЭТК, поэтому необходимо дальнейшее изучение данных воздействующих факторов.

Подводя итог вышесказанному, следует отметить:

1. В результате проведенных исследований низковольтных асинхронных электродвигателей, эксплуатируемых на предприятиях Забайкальского края, выявлены наиболее характерные причины отказов, уязвимые детали АД.

2. Установлено, что при эксплуатации АД в рабочих и переходных режимах работы, основным фактором деградации изоляции обмоток статора АД является тепловое воздействие вследствие низкого качества питающего напряжения. Отказы зависят от назначения электродвигателей и варьируются в зависимости от эксплуатационного режима работы АД.

1.3. Анализ способов и технических средств снижения несимметрии напряжений в электрических сетях 0,4 кВ

Вопросам регулирования несимметрии напряжений в электрических сетях 0,4 кВ, вместе с тем, техническим способам их решения посвящены труды и разработки следующих ученых: В.Д. Василенко, А.В. Виноградова, М.Ю. Егорова, А.Н. Евсеева, Ф.Д. Косоухова, В.Г. Кузнецова, И.В. Наумова, С.В. Подъячих, С.М. Рожавского, С.В. Сукьясова, М.Ю. Теремецкого, А.К. Шидловского и др.

Тенденция реализации мероприятий снижения несимметрии в электрических сетях 0,4 кВ, сводится к тому, чтобы значения параметров K_{2U} и K_{0U} не превышали допустимых значений, регламентируемых [1]. Снижение несимметрии напряжений, прежде всего, возможно за счёт использования достаточно широкого спектра способов и технических средств, каждый из которых различается по эффективности, сложности, функциональным возможностям и технической доступности для разных категорий потребителей. Применение способов и технических средств симметрирования позволяет восстановить симметрию напряжений в электрической сети. Восстановление симметрии способствует длительной безаварийной эксплуатации электрооборудования в ЭТК предприятий.

Авторами ряда исследований [46 – 59, 65, 75, 78] разработаны различные способы и средства симметрирования напряжений в электрических сетях. Стоит отметить, что их условно возможно разделить на два типа – технические и организационные, в тоже время некоторые из них могут реализовываться одновременно. Технические решения предполагают внедрение устройств симметрирования в действующую электрическую сеть, а также проведение реконструкции существующей сети. Организационные мероприятия представляют собой применение возможных мероприятий эксплуатационного характера. В этом случае применяются уже имеющиеся элементы и устройства, используемые в данной сети. Также к организационным мероприятиям стоит отнести и принятие определенных проектных решений на этапе проектирования новых сетей.

Классификация основных способов снижения несимметрии напряжений в электрических сетях 0,4 кВ представлена на (рис.1.5).



Рис.1.5 – Классификация способов снижения несимметрии напряжений

Исходя из указанной классификации, достижение поставленных результатов возможно при реализации различными способами:

- уменьшением сопротивления нулевой последовательности сети;
- применением замкнутых схем распределительных сетей 0,4 кВ;
- перераспределением нагрузок по фазам распределительной электрической сети;
- устранением составляющих нулевой и обратной последовательностей

трёхфазного напряжения.

Выравнивание нагрузок по фазам электрической сети возможно реализовать двумя основными способами. Прежде всего, вручную, путём действий обслуживающего персонала. Кроме того, посредством использования автоматических переключающих устройств, действие которых основано на применении специальных контролирующих систем.

Как правило, снизить величину сопротивления нулевой, обратной последовательностей возможно за счёт увеличения сечения нулевого провода. Помимо этого, путём сокращения протяженности линий, замены на ТП 10/0,4 кВ трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_0 на трансформатор со схемой соединения обмоток Y/Z_0 или трансформатор с симметрирующим устройством типа ТМГСУ; внедряя симметрирующие трансформаторы типа ТСТ и шунто-симметрирующие устройства. Устранение несимметрии напряжений путём вольтодобавки возможно осуществить посредством применения вольтодобавочных трансформаторов типа ТВМГ, нормализаторов напряжения, устройств симметрирования и стабилизации фазных напряжений типа УССФН.

Рассмотрим основные способы и технические средства снижения несимметрии напряжений в электрических сетях 0,4 кВ.

В Приложении А (табл. А.1) представлены схемы технических устройств коррекции величины несимметрии напряжений.

Способы снижения несимметрии напряжений в электрических сетях 0,4 кВ.

1. *Применение замкнутых и полужамкнутых схем сети 0,4 кВ.* Снижение несимметрии напряжений посредством сопутствующего выравнивания нагрузок фаз возможно реализовать переводом сети 0,4 кВ в режим полужамкнутой или замкнутой сети [60,63,68]. В первом случае замыкается сеть, питающаяся от одного распределительного трансформатора, во втором – от нескольких распределительных трансформаторов. Наиболее эффективным способом в аспекте выравнивания нагрузок по фазам электрической сети является замыкание линий,

которые присоединены к одному распределительному трансформатору. При этом стоит отметить, что напряжение на выходе распределительного трансформатора синхронизировано по величине и фазе для всех линий электрической сети.

Замыкание электрической сети способствует выравниванию нагрузок фаз и перераспределению симметричных нагрузок между участками электрической сети. Соответственно, чем больше число замыкаемых линий сети низшего напряжения, тем лучше эффект от выравнивания нагрузок.

Применение данного способа симметрирования усложняется тем, что его реализация довольно сложна вследствие большой протяженности линий, наличием множества ответвлений и неполнофазных участков, что требует больших капитальных вложений. В связи с этим, экономическая эффективность применения данного способа уменьшается с увеличением числа замыкаемых магистралей.

2. Увеличение сечения фазного и нулевого проводов линии 0,4 кВ. Исследованиями установлено [70], что уменьшение R_0 сети приводит к увеличению в ней токов нулевой последовательности. Поэтому увеличение сечения нулевого провода должно быть ограничено значением, составляющим 0,75 сечения фазного провода, так как дальнейшее увеличение сечения не приведёт к заметному снижению дополнительных потерь мощности в распределительных сетях. Кроме того, известно, что сечение фазных и нулевого проводов выбираются по экономическим нагрузкам. Соответственно, переход на следующий номинал сечения провода требует дополнительных капитальных затрат, которые составляют 6 % от стоимости электрической сети 0,4 кВ, что в свою очередь приводит к удорожанию сети.

3. Изменение схемы соединения обмоток трансформатора. Реализация данного способа заключается в замене трансформаторов со схемой соединения обмоток Y/Y_0 на трансформатор со схемой соединения Y/Z_0 [61,64].

В работах авторов отмечено [65,66,68], что применение таких трансформаторов не рекомендуется в электрических сетях со смешанным типом нагрузки. Однако стоит отметить, что применение трансформаторов со схемой

соединения Y/Z_0 позволяет значительно снизить в узлах нагрузки напряжение нулевой последовательности. Следовательно, их применение целесообразно только в электрических сетях 0,4 кВ с коммунально-бытовым характером нагрузки.

4. Перераспределение нагрузок по фазам обслуживающим персоналом. Перераспределение нагрузок осуществляется в результате текущего контроля обслуживающим персоналом предприятий. Данные операции необходимо производить, по результатам контрольных замеров распределения нагрузок в линиях электрической сети. В научных трудах авторов [63,71] отмечено, что перераспределение нагрузок по фазам электрической значительно улучшает ПКЭ (отклонение напряжения, K_{2U} и K_{0U}). Согласно [72] потери электрической энергии, вследствие несимметрии питающей сети, могут быть снижены на 15 – 20%.

Недостатком данного способа является низкая оперативность выполняемых переключений.

Технические средства снижения несимметрии напряжений в электрических сетях 0,4 кВ.

1. Автоматическое подключение однофазной нагрузки к наименее загруженной фазе. Реализация данного способа осуществляется посредством применения специальных симметрирующих устройств (СУ), включаемых в сеть 0,4 кВ [73,80,82,88,92,93]. Благодаря использованию специальных СУ обеспечивается равномерное распределение по фазам однофазных нагрузок сети. Что, следовательно, приводит к уменьшению токов нулевой последовательности и дополнительных потерь мощности в электрических сетях 0,4 кВ.

Недостатком данного способа является сложность подбора однофазной нагрузки соответствующей мощности. Также необходимо отметить на неизбежное снижение надёжности электроснабжения однофазной переключаемой нагрузки при использовании такого типа СУ, кроме того, измерительный и коммутационный комплекс этих устройств представляется достаточно сложным.

2. Использование симметрирующих устройств для компенсации токов обратной последовательности. Реализация данного способа достигается на основе

применения СУ, воздействующих только на токи обратной последовательности. Пример схем подобных СУ приведен в (Приложение А, схема 4) [69,74,77,83].

Применение рассматриваемых СУ способствует получению более высокого cosφ в электрической сети [69].

Недостатком данных СУ является достаточно низкая эффективность фильтрации. Данный недостаток устраняется в устройстве (Приложение А, схема б), так благодаря использованию дополнительного конденсатора создаются дополнительные фильтровые звенья, увеличивая при этом эффективность фильтрации в трёхфазной электрической сети.

Использование СУ данной группы для улучшения КЭЭ и снижения потерь в электрических сетях недостаточно эффективно, так как максимально возможное уменьшение потерь, обусловленное компенсацией токов обратной последовательности, составляет не более 10 – 15% [81].

3. Применение комбинированных симметрирующих устройств. К данным симметрирующим устройствам относят устройства, позволяющие компенсировать токи обратной и нулевой последовательностей (Приложение А, схема 17) [79,85,92,94]. Рассмотренные устройства обеспечивают симметрирование в довольно широком диапазоне фазовых углов нагрузки.

Недостатками данных СУ является то, что их целесообразно использовать в случае постоянства нагрузки.

4. Применение симметрирующих устройств фильтрового типа. К данным устройствам относят шунтосимметрирующие устройства (ШСУ) (Приложение А, схема 3,4,5,6,7,8,12,19).

ШСУ подразделяются на устройства электромагнитного типа [97] (Приложение А, схема 8) и устройства на основе индуктивно-емкостных элементов (Приложение А, схема 3,19) [86].

Рассмотренные симметрирующие устройства способствуют более качественному симметрированию напряжений на его выходе и могут использоваться для повышения ПКЭ, снижения потерь электрической энергии в

трёхфазных сетях с нулевым проводом.

5. Применение симметрирующих трансформаторов.

5.1 Применение СУ, встроенного в бак трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_0 типа ТМГСУ. ОАО «МЭТЗ» им. В. И. Козлова и Минскэнерго разработали специальное симметрирующее устройство, которое является неотъемлемой частью трансформатора со схемой Y/Y_0 (Приложение А, схема 24) [95].

Трансформатор ТМГСУ позволяет поддерживать симметричность фазных напряжений в электрических сетях с неравномерно распределенной нагрузкой по фазам. По данным производителей, сопротивление нулевой последовательности трансформаторов серии ТМГСУ отличается от аналогов без симметрирующего устройства в среднем в 3 раза. Результаты экспериментальных исследований, опубликованные в работе [87], показывают, что трансформатор с СУ позволяет снизить потери мощности и электроэнергии в самом трансформаторе в 1,5 раза, уменьшая коэффициенты несимметрии напряжений в 2 – 4 раза в зависимости от вида нагрузки, а отклонения напряжений на 8 – 10%.

Следовательно, использование ТМГСУ эффективно для повышения КЭЭ, так как происходит снижение значений параметров K_{2U} и K_{0U} [76].

5.2 Применение симметрирующих трансформаторов типа ТСТ. Симметрирующие трансформаторы типа ТСТ серийно выпускаются компаниями ООО «Энергосберегающие Технологии» [99], ООО «Компания Интер Электро» [100], АО «Тульский завод трансформаторов» [101]. Разработанные устройства запатентованы [54 – 57,89,98,102] (Приложение А, схема 20).

Симметрирующие трансформаторы ТСТ выпускаются различными модификациями, основная функция которых, устранение несимметрии напряжений в трёхфазных электрических сетях 0,4 кВ, выравнивание напряжения в фазах питающей сети, равномерное распределение нагрузки между фазами, кроме того, повышение пропускной способности линий и уменьшение в ней потерь электроэнергии.

Принцип работы основан на том, что обмотки трёхфазного симметрирующего трансформатора, первичная и вторичная, подключаются «звездой», в которые включена особая симметрирующая обмотка, обхватывающая его первичную высоковольтную обмотку. Эта дополнительная обмотка изготавливается по особой технологии, выдерживает продолжительный ток нагрузки симметрирующего трансформатора, при работе в обычном режиме на одной фазе. Вспомогательная симметрирующая обмотка включена в разрыв нулевого проводника трансформатора. При возникновении уравнивающего тока в нулевом проводнике по причине несимметричности нагрузок, магнитные потоки обмоток в магнитопроводе нивелируются противоположными потоками вспомогательной обмотки. Как результат перекос напряжений на фазах полностью исчезает.

Применение симметрирующих трансформаторов типа ТСТ способствует более качественному симметрированию напряжений на его выходе, позволяет выравнивать напряжение не на каждой фазе отдельно, а симметрировать фазы между собой, то есть симметрировать всю трёхфазную систему напряжений. Рассмотренные симметрирующие трансформаторы обладают большой эффективностью, не только потребляют меньше электроэнергии, но и снижают общее электропотребление.

6. Применение вольтодобавочных трансформаторов типа ТВМГ. Вольтодобавочные трансформаторы (ВДТ) типа ТВМГ, выпускаемые компанией ООО «СКЭ-Электро» (Приложение А, схема 21) [96] представляют собой трёхфазный автотрансформатор, состоящий из трёх однофазных, в цепь первичной обмотки которых включена катушка с регулируемым значением индуктивности.

Регулирование напряжения достигается изменением индуктивности катушки управления, встроенной в цепь первичной обмотки автотрансформатора, состоящей из основной обмотки и обмотки управления. Изменение индуктивности приводит к изменению величины напряжения на первичной обмотке автотрансформатора и, следовательно, на вторичной.

Использование подобных устройств позволяет решить несколько задач:

- автономное регулирование напряжений в каждой фазе – возможность компенсации несимметричности напряжения при 100 % несимметрии нагрузки;
- повышение и стабилизация напряжения в сети потребителей переменного тока 0,4 кВ;
- обеспечение при помощи функции байпас непрерывности электроснабжения в аварийных режимах.

Однако, основным недостатком ВДТ типа ТВМГ является ограниченный ряд мощностей данного устройства.

7. *Применение нормализаторов напряжения.* Научно-производственным предприятием ООО АВЭК разработано устройство – трёхфазные нормализаторы переменного напряжения для автоматического регулирования величины напряжения в электрических сетях 0,4 кВ. Разработанное устройство запатентовано [59] (Приложение А, схема 18).

Нормализаторы переменного напряжения промышленной серии ESSV с функцией энергосбережения и контролем напряжения по каждой фазе состоят из оригинального электронного блока управления (контроллера, блока коммутации, блока снабберов) и силовой части (аппаратов силовых защитно-коммутационных, системы фазированных электромагнитных преобразователей).

Принцип регулирования параметров электрической сети, применяемый в технологии NORMEL осуществляется путём наведения разнонаправленных электродвижущих сил со стороны обмотки фазных дросселей посредством изменения их полярности подключения относительно силовой обмотки.

Устройство обеспечивает контроль входного напряжения с диапазоном 170 – 260 В и одноступенчатым регулированием напряжения по каждой фазе отдельно. Функционально обеспечивает следующие режимы работы:

- при повышенном напряжении в режиме вольтоограничения напряжение сети понижается на 5%;
- при пониженном напряжении в режиме вольтодобавки напряжение повышается на 5%;

– в режиме «транзит» не происходит регулирования напряжения, то есть напряжение на нагрузку потребителя подается без изменения параметров.

Использование нормализаторов переменного напряжения является эффективным средством энергосбережения в электрических сетях с любым типом нагрузки с возможностью пофазно в автоматическом режиме регулировать величину напряжения.

8. Применение устройства симметрирования и стабилизации фазных напряжений на вольтодобавочном принципе типа УССФН. Устройство (УСФНВП) содержит три обмоточных группы из трёх одинаковых последовательно соединенных вторичных обмоток трёх однофазных трансформаторов, имеющих по одной первичной обмотке. На магнитопроводе каждого трансформатора размещается добавочная обмотка с ответвлениями через равное количество витков, начало которой присоединяется к началу первичной обмотки и началу крайней вторичной обмотки одной из обмоточных групп.

Принцип работы УССФН заключается в том, что на первом этапе входные фазные напряжения изменяются одинаково в определенное количество раз (симметричные отклонения), а затем получившаяся система напряжений симметрируется.

Разработанное устройство запатентовано [103] (Приложение А, схема 25).

Очевидным достоинством данного технического решения является обеспечение более совершенного процесса коррекции фазных напряжений за счёт того, что учитывается не только несимметрия фазных напряжений, но и их симметричные отклонения.

Подводя итог вышесказанному, следует отметить:

1. Нормализация уровня несимметрии напряжений в электрических сетях 0,4 кВ достигается за счёт применения различных способов и технических средств, главным образом, позволяющих восстановить симметрию напряжений в электрической сети. Следует отметить, что наиболее эффективным техническим средством коррекции значения несимметрии является применение специальных

СУ, способствующих минимизации параметров K_{2U} и K_{0U} , в частности симметрирующих трансформаторов (ТСТ, ТМГСУ). Указанные технические средства, прежде всего, способствуют более качественному симметрированию напряжений на выходе устройства, обеспечивают равномерное распределение нагрузок по фазам питающей сети.

2. Аналитический обзор существующих технических тенденций симметрирования напряжений в электрической сети играет ключевую роль при реализации мероприятий, направленных на обеспечение безаварийной эксплуатации АД. При этом важно заметить, что выбор технических мероприятий осуществляется в зависимости от характера несимметрии в электрической сети, вместе с тем, в зависимости от технологического процесса предприятия, в котором задействован электродвигатель.

1.4. Постановка задач исследования

Анализ литературных источников о надёжности АД общепромышленного назначения, информации об условиях их эксплуатации, наиболее характерных причинах отказов электродвигателей на предприятиях Забайкальского края показывает, что степень изученности работоспособности АД, при влиянии эксплуатационных факторов высока, однако в известных работах недостаточно рассмотрено совокупное влияние факторов, воздействующих на эксплуатацию электродвигателей. Вместе с тем, не в полной мере освещены вопросы количественной оценки параметров эксплуатации, определяющих срок службы низковольтных асинхронных электродвигателей.

Решение обозначенной проблемы невозможно без разработки системы методов, ориентированной на оценку и увеличение срока службы электродвигателей. В связи с этим необходим поиск подходов, с применением существующих методов исследования, их эффективной реализации с использованием программного обеспечения, учитывающих допустимые режимы

работы асинхронных электродвигателей.

Исследования в области создания базовых элементов новой парадигмы – разработки и внедрения методов оценки и увеличения срока службы низковольтных асинхронных электродвигателей, главным образом, направленные на улучшение эффективности и технико-экономических показателей работы ЭТК, посредством обеспечения безаварийной эксплуатации АД в условиях совместного воздействия эксплуатационных факторов. Данные исследования превалируют как востребованные инновационные решения, основанные на интегрированной информации различных методов исследования.

Комплексная система методов исследования, с применением программных средств, способствует выполнению актуальной научно – практической задачи, ориентированная на длительную безаварийную эксплуатацию АД в ЭТК промышленных предприятий, при воздействии эксплуатационных факторов.

Следовательно, диссертационная работа направлена на повышение эффективности функционирования электротехнического комплекса с электродвигательной нагрузкой путём обеспечения безаварийной эксплуатации низковольтных асинхронных электродвигателей.

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

Для реализации поставленной цели определены *задачи исследования*:

1. Проведён анализ эксплуатационных параметров АД, работающих на предприятиях Забайкальского края.

2. Выполнено экспериментальное исследование фактического состояния несимметрии напряжений в электрических сетях 0,4; 6; 35 кВ электроэнергетической системы Забайкальского края.

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

4. Разработаны методика и программа определения рациональных мест

установки технических средств симметрирования (симметрирующих трансформаторов ТМГСУ, ТСТ; вольтодобавочных трансформаторов ТВМГ; нормализаторов напряжения NORMEL) в электротехническом комплексе.

1.5. Выводы по первой главе

1. Решение задач снижения несимметрии напряжений в электрических сетях является особо значимой. Так, в результате воздействия несимметрии напряжений происходит снижение работоспособности и качества функционирования электрооборудования электрических сетей.

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

2. Выполненные исследования повреждаемости низковольтных асинхронных электродвигателей, эксплуатируемых на предприятиях Забайкальского края, позволили выявить наиболее характерные причины отказов, уязвимые детали АД. Согласно проведённым исследованиям и их анализу высокая аварийность электродвигателей обусловлена особенностями их эксплуатации. При этом важно отметить, что доминирующим фактором отказов электродвигателей является повреждение изоляции обмоток статора, вследствие низкого качества напряжения в сети. Отказы зависят от назначения электродвигателей и варьируются в зависимости от эксплуатационного режима работы АД.

3. Критический анализ способов и технических средств снижения несимметрии напряжений в электрических сетях 0,4 кВ с позиции требований к симметрированию напряжений показал, что организационные мероприятия не решают проблему коррекции несимметрии даже в краткосрочной перспективе

ввиду постоянно действующего характера несимметрии в исследуемых сетях региона. Поэтому технические решения, а именно, применение симметрирующих трансформаторов (ТМГСУ, ТСТ), корректируют уровень напряжения, тем самым повышают эффективность функционирования АД в ЭТК предприятий.

ГЛАВА 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА АСИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

В рамках данной главы диссертационного исследования предлагается рассмотреть развитие методических принципов исследования параметров эксплуатации на асинхронные электродвигатели в виде разработанных методов экспериментального исследования, основанных на компьютерном и физическом моделировании.

2.1. Разработка методов экспериментального исследования режимов работы асинхронных электродвигателей

Наиболее используемыми в ЭТК промышленных предприятий являются асинхронные электродвигатели, составляющие основу привода большинства различных механизмов.

Надёжность является наиболее важным технико-экономическим показателем качества работы АД, определяет способность безотказно работать с неизменными техническими характеристиками в течение заданного промежутка времени при определённых условиях эксплуатации [105,106]. В зависимости от назначения объекта и условий его применения включает в себя безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость и другие их сочетания.

Понятие «долговечность» предполагает рассмотрение работоспособности объекта за весь период его эксплуатации и учитывает проведение мероприятий по поддержанию и восстановлению работоспособности, утрачиваемой в процессе эксплуатации. В соответствии с [106], показателем долговечности является срок службы, определяемый как продолжительность эксплуатации объекта от начала его применения до наступления предельного состояния.

Согласно [27], срок службы АД общепромышленного назначения составляет

15 лет при наработке 40000 часов непрерывной работы. При этом наработка активных частей обмотки статора – не менее 20000 часов, наработка подшипников – не менее 10000 часов, а вероятность безотказной работы АД составляет 0,9 при 10000 часов наработки.

Прогнозирование срока службы АД сводится к определению количественных показателей надёжности. На практике, при эксплуатации АД ставится задача изменения показателей надёжности в сторону повышения их уровня.

При решении задач обеспечения безаварийной эксплуатации электродвигателей, выявления эксплуатационных режимов работы АД, способствующих продлению их срока службы целесообразен системный подход, состоящий из следующих этапов:

Этап 1. Анализ причин отказов приводных низковольтных электродвигателей, полученных в реальных условиях эксплуатации ЭТК предприятий, помимо этого, анализ технологических параметров процесса эксплуатации АД.

Этап 2. Выявление закономерностей воздействующих факторов на эксплуатацию АД. Количественная оценка параметров эксплуатации, определяющих срок службы низковольтных асинхронных электродвигателей.

Этап 3. Разработка мероприятий по устранению факторов негативно влияющих на работу АД в ЭТК промышленных предприятий. Технико-экономическое обоснование эффективности разработанных мероприятий.

Каждому из рассмотренных этапов концепции системного подхода характерен определённый метод исследования.

Исходя из вышеперечисленных этапов системного подхода, требуется сформировать систему методов, направленную на оценку и увеличение срока службы АД, способствующую повышению эффективности и технико-экономических показателей работы ЭТК, посредством обеспечения безаварийной работы АД в условиях совместного воздействия эксплуатационных факторов.

Как известно из трудов автора [107], асинхронные электродвигатели отображаются системой, содержащей соответствующие детали и узлы. В реальных условиях эксплуатации АД возможность проведения экспериментальных исследований достаточно трудоёмка и экономически невыгодна. Соответственно, в качестве экспериментальной системы используют её модель. Именно поэтому, оценка надёжности и эффективности функционирования АД целесообразна с применением физических и математических моделей исследования. При этом, достоверность выполнения процесса оценки количественных показателей непосредственно обусловлена корректным и обоснованным выбором метода исследования.

Аналитический обзор методов оценки и увеличения срока службы электродвигателей [108 – 114] позволил выявить наиболее рациональный подход исследования, состоящий из нескольких этапов, первым из которых является научный подход, основанный на использовании вероятностно-статистических методов, в силу того, что они дают количественную оценку причин отказов, помимо этого, использование метода экспертных оценок, позволяет осуществить анализ причин и масштабов отказов АД с участием специалистов, количественное оценивание допустимых значений эксплуатационных параметров АД. На втором этапе наиболее целесообразно применить физико-статистические и математические методы исследования, для реализации математического аппарата, позволяющего выявить закономерности влияния воздействующих факторов на эксплуатацию АД. Помимо этого, создание технических решений по устранению факторов, оказывающих негативное воздействие на работу электродвигателей в ЭТК предприятий.

Несомненно, что указанные методы исследования, являются наиболее информационно обеспеченными, как с точки зрения количественных характеристик надёжности, так и с точки зрения качественных характеристик, отображающих взаимосвязь воздействия внешних факторов, использующих показатели надёжности как связующее звено при исследованиях

работоспособности АД.

Разработку системы методов, направленную на оценку и увеличение срока службы электродвигателей структурно разделим на блоки:

Блок 1. *Анализ и синтез воздействующих факторов, влияющих на эксплуатацию АД:*

– численные оценки степени влияния различных факторов на эксплуатацию электродвигателей.

Блок 2. *Моделирование физических процессов, протекающих в АД. Исследование и последующий анализ качества функционирования и работоспособности электродвигателей в разнообразных режимах работы, при одновременном воздействии внешних факторов:*

– создание математического аппарата, позволяющего определить допустимые значения параметров эксплуатации. Кроме того, установить диапазон эксплуатационных режимов работы АД с учётом влияния воздействующих факторов;

– количественная оценка воздействующих факторов, определяющая безаварийную эксплуатацию электродвигателей.

Блок 3. *Конструирование проектных процедур:*

– разработка программного обеспечения проектирования ЭТК с АД, реализующего проектные процедуры по подбору средств симметрирования, снижающих уровень несимметрии напряжений.

Блок 4. *Проектирование ЭТК с электродвигательной нагрузкой:*

– обоснование технических решений по выбору оптимального состава, мест размещения устройств симметрирования в ЭТК;

– оценка технико-экономической эффективности установки средств симметрирования для нормализации уровня напряжения в электрической сети.

Исходя из вышеизложенного отметим, что комплексная система методов, ориентированная на оценку и увеличение срока службы АД сформирована совокупностью общеизвестных методов исследования, особенностью которой

является наличие связей между ними, импорте результатов исследования одного метода к последующему, выражающихся в интеграции подходов исследования. Интеграция отображает основную тенденцию идеи исследования, сущность которой заключается в объединении инструментов исследования – моделей, методов, программных комплексов, с помощью которых выполняются вычислительные эксперименты.

Структурная схема комплексной системы методов, ориентированная на оценку и увеличение срока службы АД наглядно представлена на (рис.2.1).

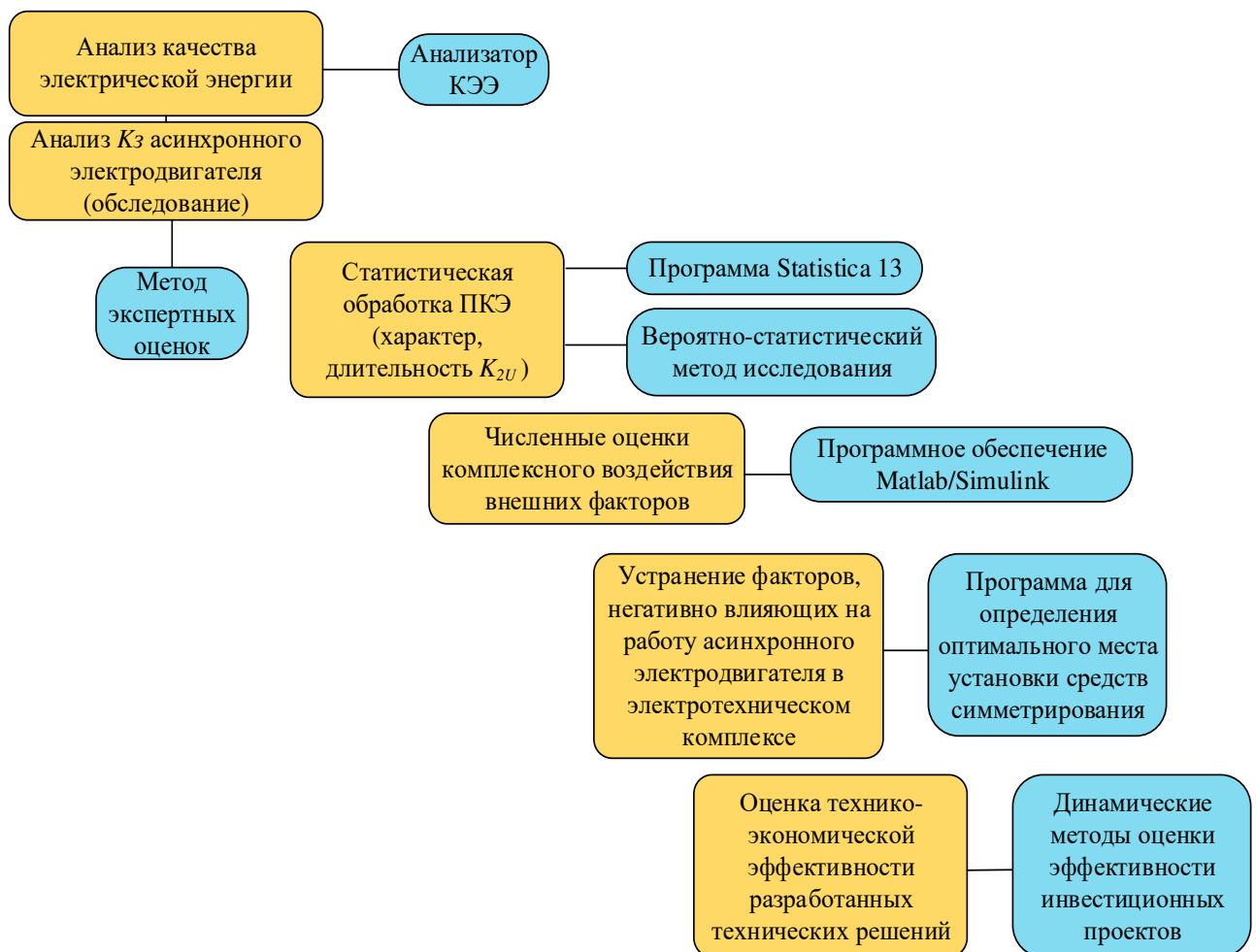


Рис.2.1 – Отображение связей комплексной системы методов исследования

Подводя итог вышесказанному, следует отметить следующее, что комплексная система методов исследования, способствует выполнению актуальной научно - практической задачи улучшения технико-экономических показателей работы ЭТК, кроме того, повышения его эффективности путём

обеспечения безаварийной эксплуатации электродвигателей ЭТК промышленных предприятий. Система методов исследования, прежде всего, направлена на решение следующих задач:

- выявления основных эксплуатационных факторов, влияющих на эксплуатацию электродвигателей, при их работе в ЭТК;
- количественное оценивание допустимых значений эксплуатационных факторов АД;
- определение рекомендуемых эксплуатационных режимов работы АД;
- разработку и реализацию технических решений, обеспечивающих длительную безаварийную эксплуатацию АД в ЭТК предприятий;
- оценку технико-экономической эффективности разработанных технических решений.

2.2. Реализация компьютерной модели исследования режимов работы асинхронных электродвигателей

Достижение задач исследования работоспособности электродвигателей в разнообразных режимах работы эффективно проводить с использованием программных продуктов, в частности применяя компьютерное моделирование на основании пакета «SimPowerSystems» интерактивной среды программирования MATLAB/Simulink.

При формировании имитационной модели исследования использована стандартная модель из библиотеки Simulink с представлением величин в относительных единицах.

Компьютерное моделирование физических процессов, протекающих в АД возможно условно разделить на этапы:

- 1) формирование структурной схемы посредством подбора блоков модели из библиотеки Simulink среды программирования MATLAB;
- 2) соединение элементов схемы модели, обобщение их в единую модель

исследования;

3) расчёт параметров схемы замещения блоков модели, например, таких как асинхронный электродвигатель.

Компьютерная модель исследования, основанная на пакете «SimPowerSystems» в среде MATLAB/Simulink, изображена на (рис.2.2).

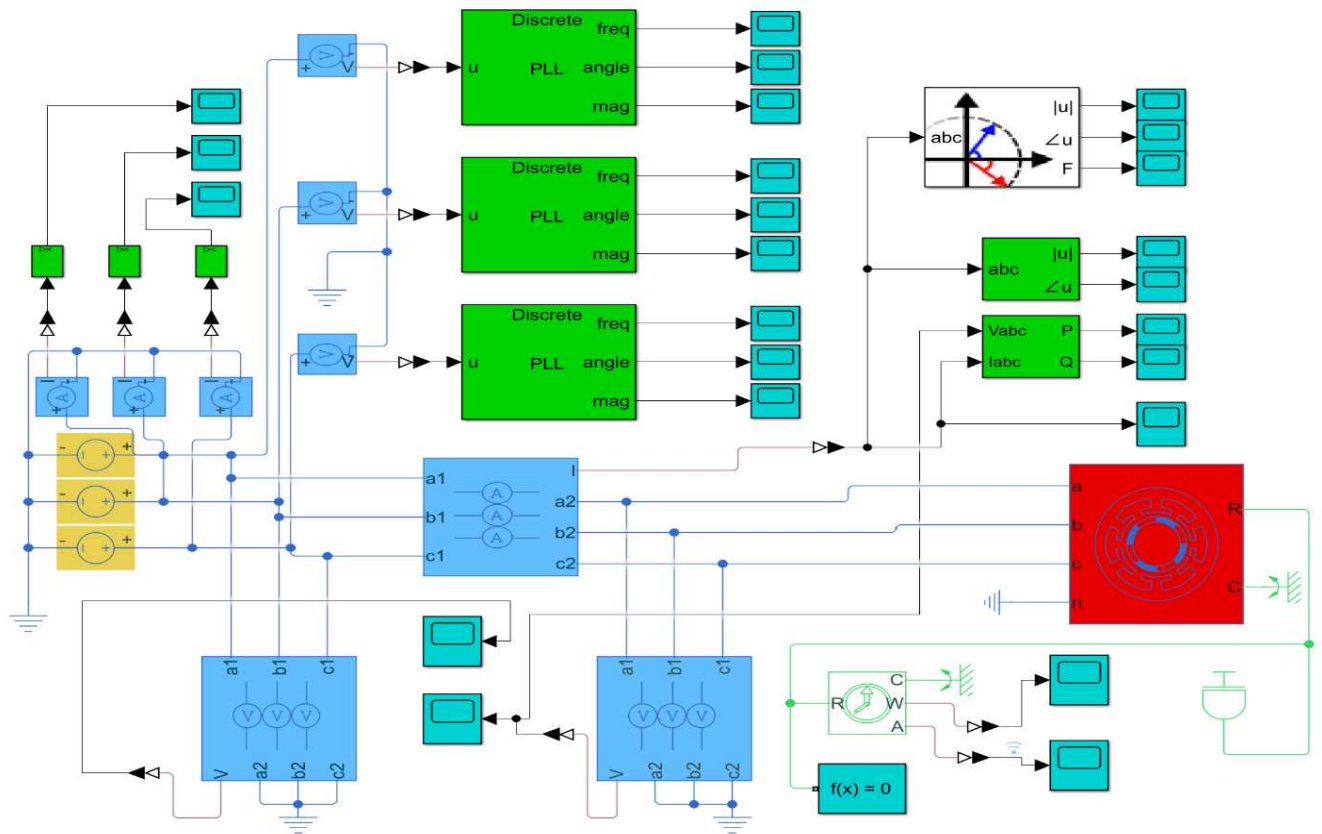


Рис. 2.2 – Модель работы АД при несимметричном питающем напряжении, сформированная в среде MATLAB /Simulink

Разработанная модель исследования (рис.2.2) представляет собой схему, состоящую из элементов: асинхронного электродвигателя (блок Asynchronous Machine); трёх однофазных источников напряжения (блоки AC Voltage Source); блоков для измерения основных параметров электродвигателя (блоки Power, Ideal Rotational Motion Sensor); блока задания нагрузки на валу электродвигателя (блок Moment); измерителей напряжения (блок Voltage Measurement) и тока (блок Current Measurement); осциллографов для измерения тока, напряжения, момента и скорости (блок осциллографа Scope); графопостроителя для отображения механической характеристики электродвигателя (блок XY Graph); блоков контроля

формы синусоиды питающего напряжения (блоки Three-Phase Sequence Analyzer, Sequence Analyzer).

Реализация расчёта параметров схемы замещения блоков компьютерной модели основана на использовании значений параметров каталожных данных АД, кроме того, расчёте параметров на основании этих данных. Для моделирования режимов работы АД выполним расчёт недостающих данных по методике профессора И. В. Черных, изложенной в [115].

В качестве примера рассмотрим АД АИР90LA8У3 с соответствующими данными, приведёнными в (табл. 2.1).

Таблица 2.1 – Каталожные данные АД АИР90LA8У3

№	Параметры асинхронного электродвигателя	Значение параметра
1	Номинальная мощность, P_n (кВт)	0,75
2	Частота питающего напряжения, f_n (Гц)	50
3	Номинальное линейное напряжение, U_n (В)	380
4	Синхронная частота вращения, n_c (об/мин)	750
5	Коэффициент мощности, $\cos\varphi$	0,67
6	Коэффициент полезного действия в номинальном режиме, η_n (%)	70
7	Частота вращения в номинальном режиме n_n , (об/мин)	730
8	Ток статора номинальный I_n , (А)	2,6
9	Число пар полюсов, p	4
10	Кратность пускового момента K_n , (о.е.)	1,6
11	Кратность пускового тока K_I , (о.е.)	3,5
12	Момент инерции, J (кг·м ²)	0,0063
13	Кратность максимального момента K_{max} , (о.е.)	1,7

Расчёт параметров АД производится в следующей последовательности:

1. Критическое и номинальное скольжение АД:

$$S_n = \frac{n_1 - n_n}{n_1} = \frac{750 - 730}{750} = 0,03 \text{ о. е.} \quad (2.1)$$

$$S_{кр} = S_n \left(K_{max} + \sqrt{K_{max}^2 - 1} \right) = 0,03 \times \left(1,7 + \sqrt{1,7^2 - 1} \right) = 0,09 \text{ о. е.} \quad (2.2)$$

2. Номинальная скорость АД:

$$\omega_n = \frac{\pi \cdot n_1}{30} = \frac{3,14 \cdot 750}{30} = 78,5 \text{ рад/с} \quad (2.3)$$

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{4} = 750 \text{ об/мин}$$

3. Номинальный момент АД:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{750}{78,5} = 9,55 \text{ Нм} \quad (2.4)$$

4. Критический момент АД:

$$M_{max} = K_{max} \cdot M_H = 1,7 \cdot 9,55 = 16,25 \text{ Нм} \quad (2.5)$$

5. Пусковой момент АД:

$$M_{\Pi} = K_{\Pi} \cdot M_H = 1,6 \cdot 9,55 = 15,28 \text{ Нм} \quad (2.6)$$

6. Активные сопротивления статора и приведенное сопротивление ротора АД.

1) учитывая, что диапазон величин конструктивного коэффициента $C = (1,01 - 1,05)$. При этом меньшее значение которого соответствует АД большей мощности. Следовательно, при расчёте используем величину коэффициента $C = 1,05$.

2) принимая во внимание, что рекомендуемые значения механических потерь в асинхронном электродвигателе соответствуют следующему диапазону величин $\Delta P_{\text{мех}} = (0,01 - 0,05) P_H$. При этом, меньшее значение которого соответствует АД большей мощности. Следовательно, при расчёте используем значение механических потерь в АД равное $\Delta P_{\text{мех}} = 0,05 P_H$.

$$R_r = \frac{P_H + P_{\text{мех}}}{3I_H^2 \frac{1-S_H}{S_H}} = \frac{750 + (0,05 \cdot 750)}{3 \cdot 2,6^2 \frac{1-0,03}{0,03}} = 1,2 \text{ Ом} \quad (2.7)$$

$$R_s = \frac{380 \cdot \cos \varphi (1-\eta)}{\sqrt{3} \cdot I_H} - C^2 \cdot R_r - \frac{\Delta P_{\text{мех}}}{3I_H^2} \quad (2.8)$$

$$R_s = \frac{380 \cdot 0,67(1-0,7)}{\sqrt{3} \cdot 2,6} - 1,05^2 \cdot 1,2 - \frac{0,05 \cdot 750}{3 \cdot 2,6^2} = 14,157 \text{ Ом}$$

7. Индуктивность рассеяния статора и приведенная ротора:

$$L_s = L_r = \frac{\frac{U_{\text{лн}}}{\sqrt{3}}}{4\pi f_1 (1+C^2) K_I I_H} = \frac{220}{4 \cdot 3,14 \cdot 50 (1+1,05^2) 3,5 \cdot 2,6} = 0,02 \text{ Гн} \quad (2.9)$$

$$L_1 = L_m + L_s = \frac{\frac{U_{ЛН}}{\sqrt{3}}}{2\pi f_1 I_{Н\sqrt{1-(\cos\varphi)^2}} - \frac{4\pi f_1 M_{кр} S_{Н}}{1,7 U_{ЛН} p S_{кр}}} \quad (2.10)$$

$$L_1 = \frac{220}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 2,6 \sqrt{1 - (0,67)^2}} - \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 16,24 \cdot 0,03}{1,7 \cdot 380 \cdot 4 \cdot 0,09} = 0,36 \text{ Гн}$$

8. Конструктивный коэффициент:

$$C1 = 1 + \frac{L_s}{L_m} = 1 + \frac{0,02}{0,36 - 0,02} = 1,05 \quad (2.11)$$

Выполним сравнение расчётной величины конструктивного коэффициента с ранее принятым. Значение коэффициента $C1 = C = 1,05$, соответственно, расчёты параметров АД по методике И.В. Черных показали удовлетворительную сходимость результатов.

После расчёта параметров выполняется процесс моделирования режимов работы АД. Вместе с тем, при реализации моделирования необходимо внести рассчитанные данные в соответствующие графы окон задания параметров АД.

Компьютерная имитация режимов работы АД, с применением разработанной модели (рис.2.2), позволяет для каждой фазы АД проводить измерения следующих величин: фазных и линейных напряжений, фазных токов. Выполнив моделирование режимов работы АД, снимаем с блоков цифровых дисплеев значения токов и напряжений электродвигателя.

Следует отметить, что разработанная модель исследования универсальна, изменяя исходные (входные) параметры моделирования, отслеживаем изменения основных параметров АД различных типоразмеров.

Таким образом, сформированная имитационная модель способствует решению задач экспериментального исследования физических процессов, протекающих в АД. В первую очередь, позволяет проводить анализ качества функционирования и работоспособности электродвигателей в различных режимах его работы. Кроме того, отслеживать количественное изменение исследуемых параметров в результате воздействия внешних факторов.

2.3. Метод экспериментального исследования режимов работы асинхронных электродвигателей, основанный на компьютерном моделировании

Используя разработанную имитационную модель (рис.2.2) выполним исследование режимов работы АД при совместном воздействии эксплуатационных факторов. Экспериментальное исследование основано на моделировании несимметричного режима работы электродвигателя, путём изменения величин фазных напряжений, с учётом изменения нагрузки на валу электродвигателя.

Выполним имитацию режимов работы АД номинальной мощностью $P_n = 0,75$ кВт, частотой вращения $n = 750$ об/мин.

Порядок выполнения эксперимента:

1. Осуществляем ввод, полученных расчётным путём, параметров электродвигателя. Устанавливаем значения параметров АД в окне задания (блок Asynchronous Machine).

2. Осуществляем ввод значений напряжения на трёх стандартных однофазных источниках переменного напряжения (блоки AC Voltage Source). Исходная величина напряжения составляет 220 В, при этом на каждом из источников устанавливается определённое значение напряжения, искусственно создаём «перекос фаз» – несимметричный режим работы АД.

Устанавливаем напряжения на источниках в зависимости от величины K_{2U} . Значения устанавливаемых напряжений определяем, используя формулу (Б.18) ГОСТ 13109 – 97.

В соответствии с ГОСТ 13109 – 97, который действовал до принятия, существующего ГОСТ 32144 – 2013, величина действующего значения напряжения обратной последовательности $U_{2(1)i}$ при частоте 50 Гц определяется выражением:

$$U_{2(1)i} = \sqrt{\frac{1}{12} \left[\left(\sqrt{3}U_{AB(1)i} - \sqrt{4U_{BC(1)i}^2 - \left(\frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} + U_{AB(1)i} \right)^2} \right)^2 + \left(\frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} \right)^2 \right]} \quad (2.12)$$

где $U_{AB(1)i}$, $U_{BC(1)i}$, $U_{CA(1)i}$ – величины действующих значений линейных напряжений при частоте 50 Гц в i -ом наблюдении, В.

Коэффициент несимметрии напряжений K_{2Ui} :

$$K_{2Ui} = \frac{U_{2(1)i}}{U_{1(1)i}} \cdot 100 \%, \quad (2.13)$$

где $U_{2(1)i}$ – величина действующего значения напряжения обратной последовательности при частоте 50 Гц в i -ом наблюдении, В;

$U_{1(1)i}$ – величина действующего значения напряжения прямой последовательности при частоте 50 Гц в i -ом наблюдении, В.

Фазное напряжение:

$$U_A = \frac{U_{AB}}{\sqrt{3}} \quad (2.14)$$

Амплитудное значение фазного напряжения:

$$U_{\text{амп}} = \sqrt{2}U_A \quad (2.15)$$

Таким образом, расчёт параметров позволил установить на каждом из трёх однофазных источников переменного напряжения модели определённую амплитудную величину напряжения.

Для каждой величины параметра K_{2U} рассчитываются соответствующие фазные напряжения. Так, для $K_{2U} = 1\%$ напряжения на однофазных источниках напряжения (блоки AC Voltage Source) схемы моделирования равны: $U_A = 221,49$ В, $U_B = 221,28$ В, $U_C = 215,1$ В.

Аналогично выполним расчёт значений напряжения для $K_{2U} = 2;3;4 \%$. В (табл.2.2) приведены значения устанавливаемых напряжений, используемых в ходе эксперимента.

Таблица 2.2 – Значения устанавливаемых напряжений на каждом из источников схемы моделирования

$K_{2U}, \%$	$U_A, \text{В}$	$U_B, \text{В}$	$U_C, \text{В}$
0	220	220	220
1	221,49	221,28	215,1
2	223,58	223,48	210,79
3	225,78	225,79	206,3
4	228,1	228	201,9

3. Осуществляем ввод значений нагрузки АД (блок Moment). Устанавливаем величину нагрузки АД для эксперимента «Холостой ход». Выполним эксперимент

электродвигателя для каждого значения $K_{2U} = (0 - 4) \%$.

4. Производим процесс моделирования режима работы АД путём нажатия кнопки «Пуск».

5. После окончания переходного процесса в моделируемой схеме снимаем показания линейных и фазных напряжений, фазных токов с блоков измерения.

6. Фиксируем полученные данные в таблицу измерений (табл.2.3) при эксперименте «Холостой ход».

7. Аналогичным способом выполняем эксперимент «Полная загрузка» электродвигателя.

Устанавливаем величину нагрузки АД для данного эксперимента. Для задания величины механического момента на валу АД используем следующую формулу:

$$M = 9,55 P_2/n, \quad (2.16)$$

где P_2 – полезная мощность АД, Вт;

n – частота вращения ротора АД, об/мин.

Величина загрузки, исследуемого АД, в режиме 100% загрузки равна $M = 9,55$ Нм. Выполним эксперимент «Полная загрузка» электродвигателя для каждого значения $K_{2U} = (0 - 4) \%$.

8. Фиксируем полученные данные в таблицу измерений (табл.2.3) при эксперименте «Полная загрузка» электродвигателя.

В результате, эксперимент выполнен при двух значениях загрузки электродвигателя – режим «Холостой ход» и «Полная загрузка» электродвигателя для каждого значения $K_{2U} = (0 - 4) \%$.

Используя компьютерную модель (рис.2.2) исследованы режимы «Холостой ход» и «Полная загрузка» электродвигателя, полученные результаты экспериментов представлены в (табл.2.3), графическая интерпретация изменения токов в фазах электродвигателя в зависимости от значения K_{2U} приведена на (рис. 2.3, 2.4).

Отметим следующее, что разработанный метод исследования позволил проанализировать физические процессы, происходящие в АД, кроме того, способствует определению количественных показателей эксплуатационных факторов для принятия решений, направленных на обеспечение эффективной и безаварийной эксплуатации электродвигателей.

Таблица 2.3 – Результаты исследования

Параметры эксперимента	Холостой ход						Полная нагрузка					
	K_{2U}	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	
Коэффициент несимметрии, %	K_{2U}											
	Фазные напряжения, В	U_A	220	221,49	223,58	225,78	228,1	220	221,49	223,58	225,78	228,1
		U_B	220	221,28	223,48	225,79	228	220	221,28	223,48	225,79	228
U_C		220	215,1	210,7	206,3	201,9	220	215,1	210,7	206,3	201,9	
Линейные напряжения, В	U_{AB}	380	383,3	387,1	391	394,7	380	383,3	387,1	391	394,7	
	U_{AC}	380	378,2	376,4	374,4	372,7	380	378,2	376,4	374,4	372,7	
	U_{BC}	380	378	376,1	374,3	372,5	380	378	376,1	374,3	372,5	
Фазные токи, % к $I_{ном}$	I_A	68,39	67,03	66,12	63,22	65,22	100	102,36	104,85	107,29	110,33	
	I_B	68,39	72,92	77,45	80,75	87,55	100	102,36	105,39	108,47	111,78	
	I_C	68,39	65,22	62,05	58,15	57,34	100	95,11	94,97	85,46	80,8	
Фазные токи, А	I_A	1,51	1,48	1,46	1,396	1,44	2,208	2,26	2,315	2,369	2,436	
	I_B	1,51	1,61	1,71	1,783	1,933	2,208	2,26	2,327	2,395	2,468	
	I_C	1,51	1,44	1,37	1,284	1,266	2,208	2,1	2,097	1,887	1,784	

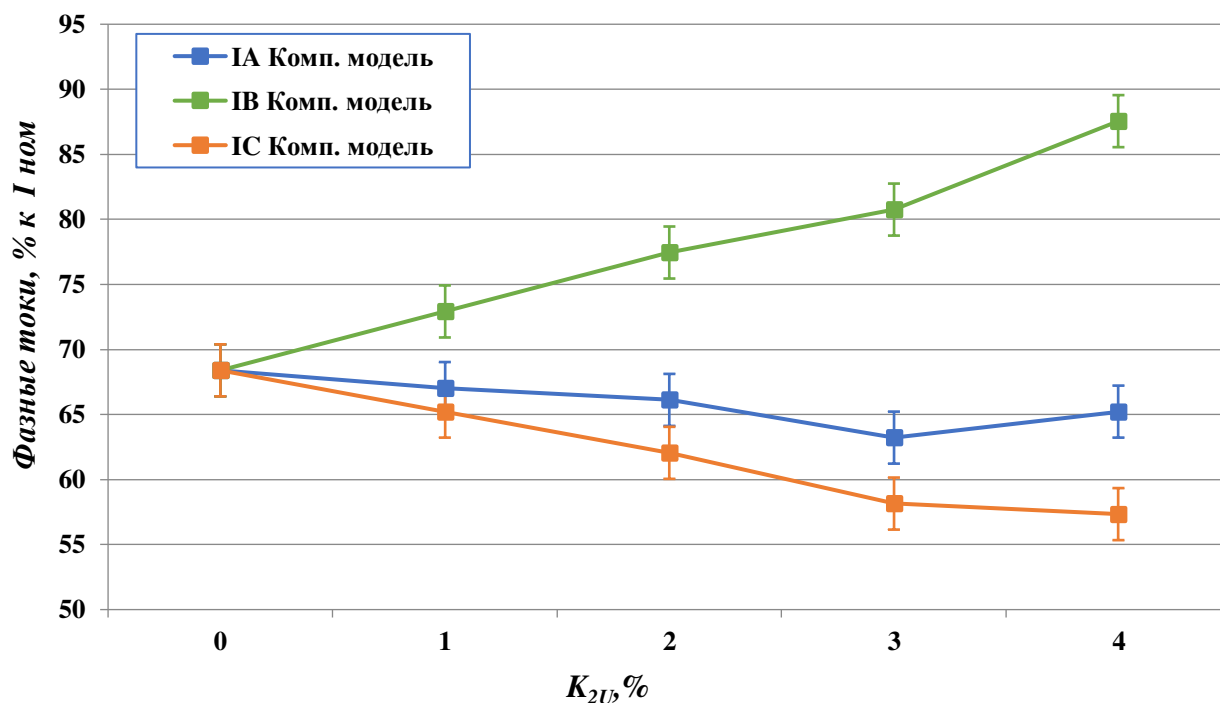


Рис.2.3 – Графическое отображение изменения токов в фазах электродвигателя от K_{2U} АД $P_n = 0,75$ кВт (компьютерная модель при эксперименте «Холостой ход»)

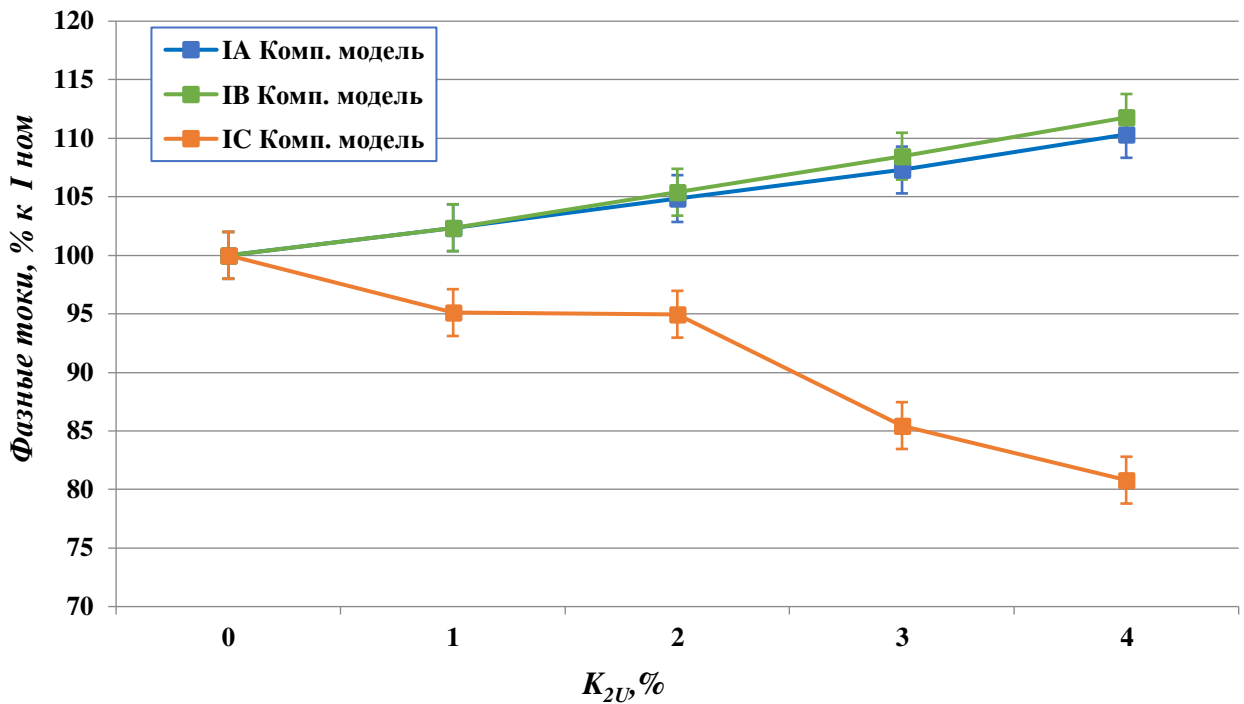


Рис.2.4 – Графическое отображение изменения токов в фазах электродвигателя от K_{2U} АД $P_n = 0,75$ кВт (компьютерная модель при эксперименте «Полная загрузка»)

Оценка погрешности реализованной компьютерной модели исследования.

Погрешность компьютерной модели оценивалась исходя из функциональной зависимости, полученной в результате эксперимента выходных величин от ряда задаваемых входных величин, погрешность которых известна. Математический характер взаимосвязи каждого выходного параметра с входными параметрами рассмотрен как результат косвенного измерения:

$$y_j = f(x_{1j}, x_{2j}, x_{3j}, \dots, x_{zj}), \quad (2.17)$$

где y_j – выходная величина компьютерной модели;

$x_{1j}, x_{2j}, x_{3j}, \dots, x_{zj}$ – входные величины компьютерной модели.

Поскольку компьютерная модель построена на основе пакета программ «SimPowerSystems» системы MATLAB/Simulink с разделением модели на элементарные объекты, следовательно, получить функциональные зависимости для выходных величин в явном виде является сложной задачей, однако возможности системы MATLAB/Simulink позволяют выявить погрешность выходных величин путём задания рандомизированных поправок определенного

диапазона к входным величинам, моделируя поведение их погрешностей. Многократные вычисления выходных величин разработанной модели позволяют получать массивы статистических данных, которые априори подчиняются законам нормального распределения, что позволяет оценить погрешность выходных величин через статистическую оценку параметров распределения случайных величин.

В частности, для выходной величины – «Фазные токи в % к $I_{ном}$ », получено значение абсолютной погрешности, составляющей $\pm 2\%$ при доверительной вероятности $p = 0,95$. При этом, на (рис. 2.3 и 2.4) погрешности модели обозначены соответствующими планкам.

2.4. Реализация физической модели исследования режимов работы асинхронных электродвигателей

Верификация компьютерной модели выполнена методом сравнения её результатов с результатами экспериментального исследования. Экспериментальное исследование проводилось с применением натурно-физической модели, созданной на лабораторной базе Энергетического факультета Забайкальского государственного университета.

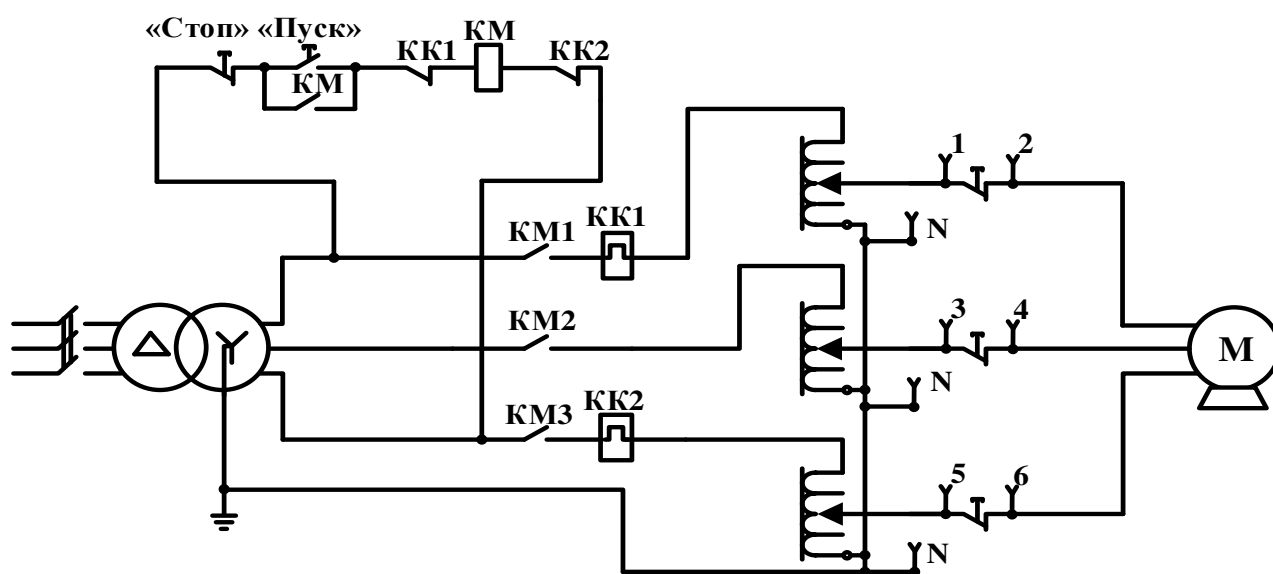


Рис. 2.5 – Принципиальная схема экспериментальной установки

Натурно-физическая установка функционально отражает компьютерную модель и включает в себя основной элемент – асинхронный электродвигатель, подключенный через устройства, позволяющие регулировать входные параметры питающей электрической сети. Принципиальная электрическая схема экспериментальной установки представлена на (рис. 2.5).

Реализованная экспериментальная установка (рис. 2.6) состоит из следующих основных элементов: разделительного трансформатора, набора лабораторных автотрансформаторов (ЛАТР), асинхронного электродвигателя, мультиметра, устройства имитации нагрузки.



Рис.2.6 – Экспериментальная установка

Согласно принципиальной схеме (рис. 2.5) гальваническая развязка цепей осуществляется за счёт разделительного трансформатора. При этом, плавное регулирование напряжения, моделирующее его «перекос» осуществляется ЛАТРами для каждой из фаз АД (в диапазоне от 0 до 250 В). Электродвигатель, в свою очередь, соединен с основной частью схемы через контакты 1 – 6, предназначенные для подключения измерительных приборов (мультиметра). Имитация нагрузки производилась посредством тормозной колодки, позволяющей регулировать нагрузочный режим работы АД (от режима «Холостой ход» до 120%).

2.5. Метод экспериментального исследования режимов работы асинхронных электродвигателей, основанный на физическом моделировании

Исследование асинхронного электродвигателя выполнено на экспериментальной установке (рис.2.6), состоящей из основных элементов – разделительного трансформатора мощностью 10 кВА, трёх лабораторных автотрансформаторов, АД с короткозамкнутым ротором серии АИР90LA8УЗ с $P_n = 0,75$ кВт, частотой вращения $n = 750$ об/мин.

В процессе исследования, с использованием натурно-физической модели, необходимо рассмотреть динамику изменения аналогичных параметров, что и при компьютерном моделировании.

Эксперимент основан на создании несимметричного режима работы АД, путём изменения величин фазных напряжений с использованием ЛАТРов.

Порядок выполнения эксперимента:

1. Реализуем несимметричный режим работы АД. Моделирование несимметричного режима работы АД основано на изменении величины фазных напряжений. ЛАТРами выставлялось входное напряжение таким образом, чтобы получить определённые значения фазных напряжений, соответствующих определённой величине коэффициента K_{2U} , при этом изменение K_{2U} контролировалось в пределах от 0 до 4%. Шаг изменения K_{2U} в эксперименте составлял 1%. Измерение фазных токов, фазных и линейных напряжений производилось с помощью мультиметра.

При выполнении эксперимента количественные значения входных параметров установлены по аналогии с параметрами компьютерного моделирования.

2. Реализуем изменение нагрузочного режима работы посредством физического торможения вала электродвигателя. Торможение осуществлялось тормозной колодкой, обеспечивающей плавное регулирование нагрузки при изменении силы прижима к шкиву АД.

После установки необходимого значения нагрузки на валу АД измеряем величины фазных токов путём переключения соединительных проводов. При подключении проводов к зажимам:

- 1-2 определим величину тока в фазе А;
- 3-4 определим величину тока в фазе В;
- 5-6 определим величину тока в фазе С.

Подобным способом измеряем значения линейных и фазных напряжений на экспериментальной установке.

В процессе исследования значение K_{2U} изменяется в диапазоне от 0 – 4%, следовательно, для каждого значения K_{2U} выполнен эксперимент «Холостой ход» и «Полная загрузка» электродвигателя.

Используя физическую модель (рис.2.6) исследованы режимы «Холостой ход» и «Полная загрузка» электродвигателя. Результаты исследований сведены в (табл. 2.4), их графическая интерпретация представлена на (рис. 2.7 и 2.8).

Таблица 2.4 – Результаты исследований

Параметры эксперимента	Холостой ход						Полная загрузка				
	K_{2U}	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4
Фазные напряжения, В	U_A	220	223,6	224,9	226,7	229,5	220	223,6	224,9	226,7	229,5
	U_B	220	222,4	224,2	225,8	228,6	220	222,4	224,2	225,8	228,6
	U_C	220	215	210	204	199	220	215	210	204	199
Линейные напряжения, В	U_{AB}	380	384,2	389,1	392,3	396,9	380	384,2	389,1	392,3	396,9
	U_{AC}	380	376,4	375,2	373,4	371,7	380	376,4	375,2	373,4	371,7
	U_{BC}	380	377,1	376	373,3	370,7	380	377,1	376	373,3	370,7
Фазные токи, % к $I_{ном}$	I_A	67,93	65,67	63,41	62,95	63,41	100	102,27	104,55	110	115
	I_B	67,93	76,54	80,62	86,05	95,11	100	103,64	107,73	110,91	118,64
	I_C	67,93	64,31	61,59	54,35	53,89	100	98,18	90,91	81,82	78,18
Фазные токи, А	I_A	1,5	1,45	1,4	1,39	1,4	2,2	2,25	2,3	2,42	2,53
	I_B	1,5	1,69	1,78	1,9	2,1	2,2	2,28	2,37	2,44	2,61
	I_C	1,5	1,42	1,36	1,2	1,19	2,2	2,16	2	1,8	1,72

Отметим следующее, что разработанный метод позволил выполнить исследования режимов работы АД при воздействии эксплуатационных факторов. Однако, существует сложность его применения, заключающаяся в дороговизне физической модели, так как, при выполнении исследований для каждого типоразмера электродвигателей необходимо устанавливать конкретный АД. Кроме

того, при недостаточной квалификации персонала, проводившего эксперимент, возможен выход из строя экспериментальной установки. Именно поэтому, компьютерная модель лишена данных недостатков.

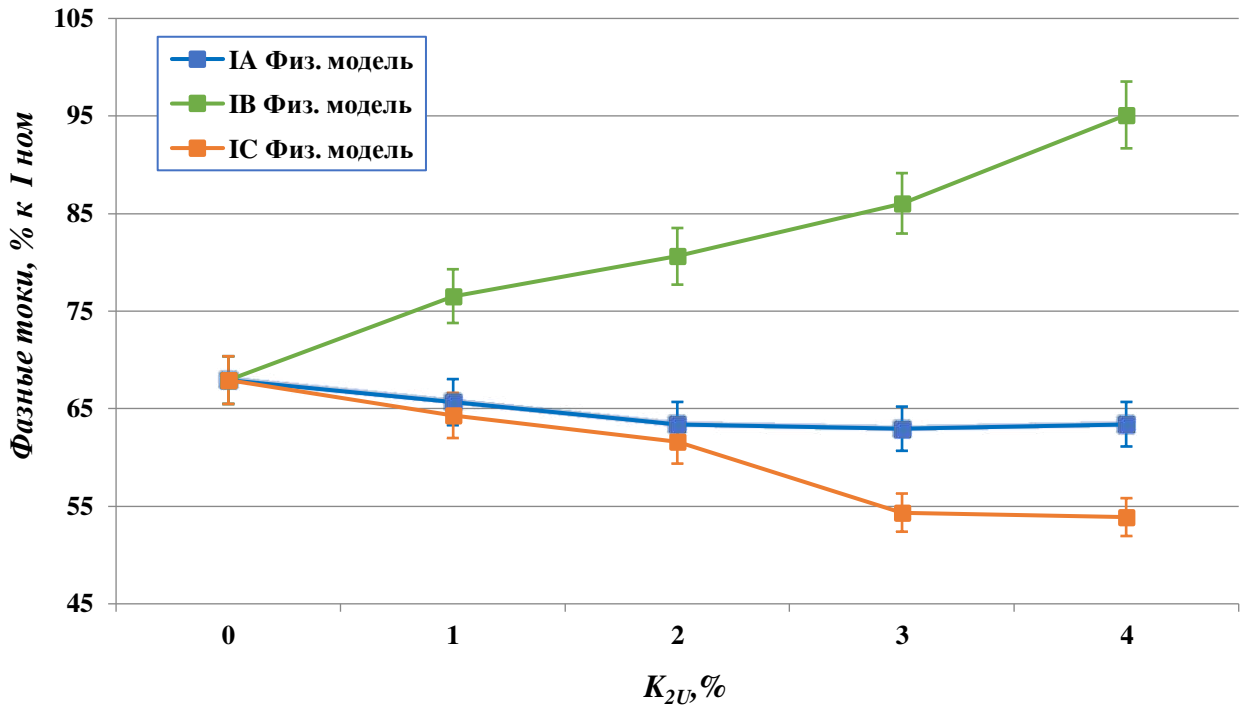


Рис.2.7 – Графическое отображение изменения токов в фазах электродвигателя от K_{2U} АД $P_n = 0,75$ кВт (физическая модель при эксперименте «Холостой ход»)

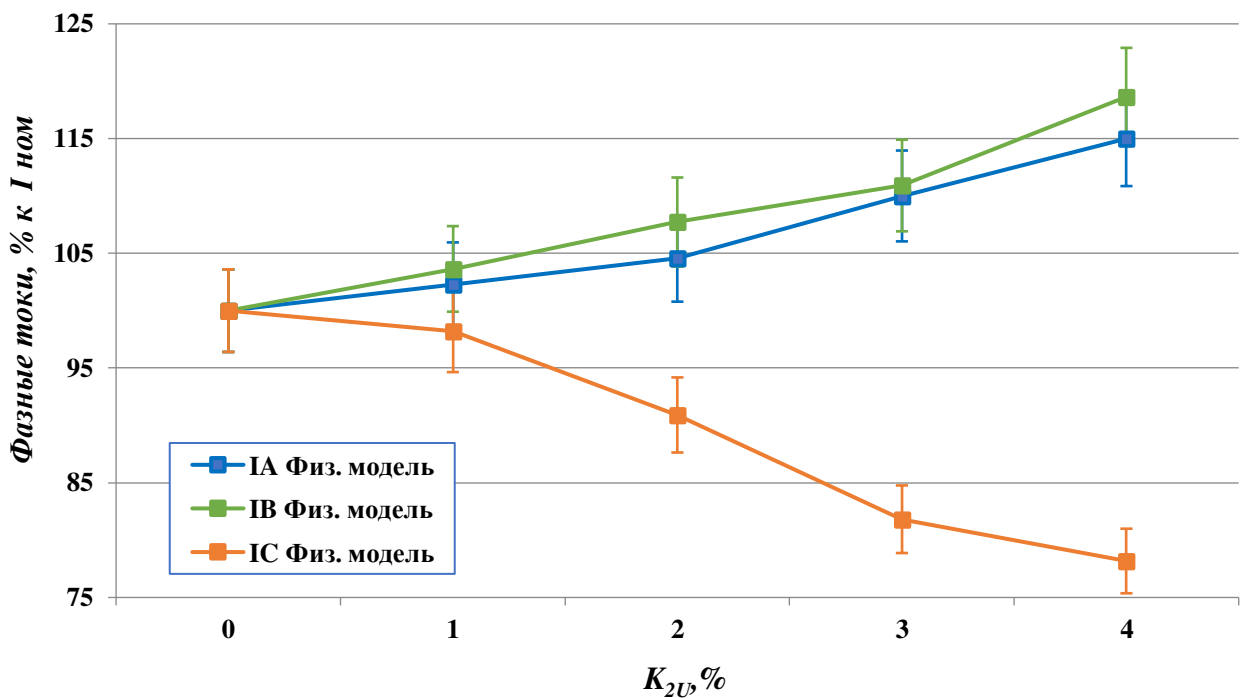


Рис.2.8 – Графическое отображение изменения токов в фазах электродвигателя от K_{2U} АД $P_n = 0,75$ кВт (физическая модель при эксперименте «Полная нагрузка»)

Оценка погрешности реализованной физической модели исследования. Поскольку физическая модель построена по принципу связанной измерительной системы, оценить погрешность измерений модели возможно через значения допустимых относительных погрешностей измерительного оборудования, которое входит в состав модели. В процессе измерения выходных параметров физической модели участвуют мультиметр с допустимой относительной погрешностью 2% и ЛАТР, точность установки значений напряжения на котором также оценивается через допустимую относительную погрешность в размере 3%. При этом, точность измерительной системы в таком случае оценивается через зависимость:

$$\delta_{ис} = \sqrt{\delta_m + \delta_{л}}, \quad (2.18)$$

где δ_m и $\delta_{л}$ – допустимая относительная погрешность мультиметра и ЛАТРа соответственно, %.

С учётом значений погрешностей оборудования, описанных выше получаем относительную погрешность измерительной системы физической модели равной 3,6 %. При этом, на (рис. 2.7 и 2.8) погрешности модели обозначены соответствующими планкам.

2.6. Оценка достоверности разработанной компьютерной модели

В процессе верификации разработанной компьютерной модели проведено сравнение экспериментальных результатов, полученных с помощью физической и компьютерной моделей. Наложение результатов (зависимостей токов в фазах АД от значения K_{2U}) двух типов моделей, при эксперименте «Холостой ход» отображено на (рис. 2.9), при эксперименте «Полная загрузка» АД – на (рис.2.10).

Полученные расхождения, наблюдаемые на представленных графических зависимостях (рис.2.9, 2.10), могут объяснены недостаточной точностью задания исходных данных при осуществлении эксперимента на физической модели. Причём, недостаточная точность регулировки ЛАТРов и погрешность измерения

мультиметра, в сочетании с потерями в электродвигателе приводят к незначительному искажению исследуемых значений.

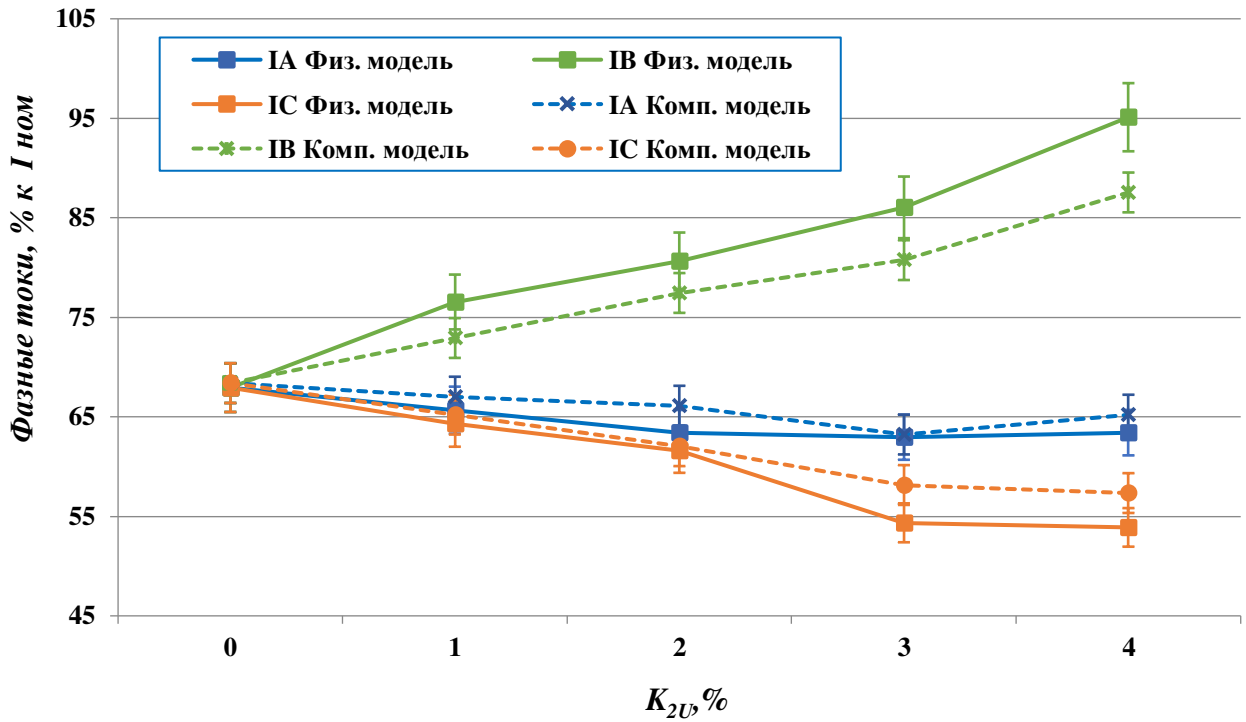


Рис.2.9 – Графическое отображение изменения токов в фазах электродвигателя от K_{2U} (при эксперименте «Холостой ход»)

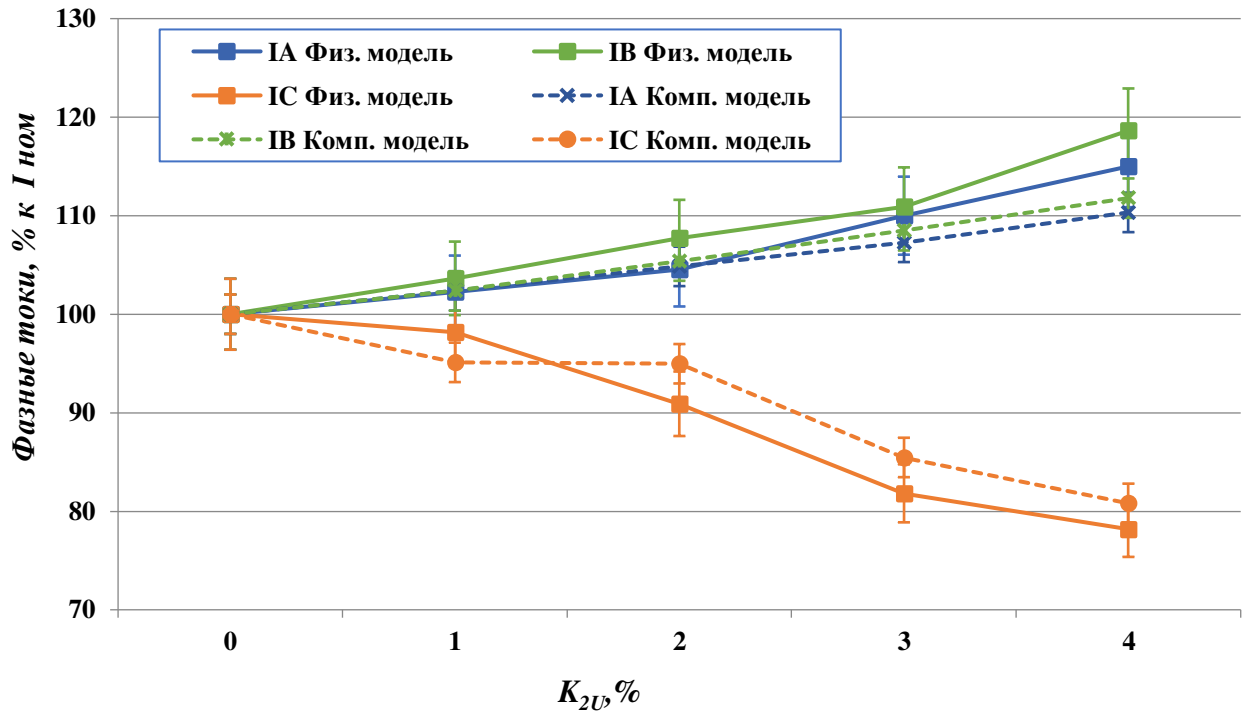


Рис.2.10 – Графическое отображение изменения токов в фазах электродвигателя от K_{2U} (при эксперименте «Полная загрузка»)

Как видно из графических зависимостей (рис.2.9, 2.10) во всех точках области допустимых значений пар данных физической модели и компьютерной модели либо полностью объединены, либо пересекают друг друга, а характер поведения пар зависимостей повторяет друг друга. Оценка корреляционных связей между компьютерной моделью и физической моделью проведена на основе методики определения коэффициента корреляции Пирсона согласно стандартной зависимости:

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \cdot (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (2.19)$$

где x_i – i -ый параметр из выборки x ;

y_i – i -ый параметр из выборки y ;

\bar{x} и \bar{y} – средние значения выборок x и y соответственно.

Для условий сопоставления моделей к выборке x отнесены выходные параметры физической модели, к выборке y выходные параметры компьютерной модели. Результаты оценки коэффициента корреляции Пирсона представлены в (табл.2.5).

Таблица 2.5 – Коэффициенты корреляции исследуемых зависимостей

Парные массивы исследуемых данных	Коэффициент корреляции
I _A физ. модель / комп. модель (при эксперименте «Холостой ход»)	0,97
I _B физ. модель / комп. модель (при эксперименте «Холостой ход»)	0,99
I _C физ. модель / комп. модель (при эксперименте «Холостой ход»)	0,99
I _A физ. модель / комп. модель(при эксперименте «Полная загрузка»)	0,98
I _B физ. модель / комп. модель (при эксперименте «Полная загрузка»)	0,99
I _C физ. модель / комп. модель (при эксперименте «Полная загрузка»)	0,96

Интерпретируя полученные данные (табл.2.5) отметим высокую корреляцию между данными компьютерной модели и физической модели.

Отклонение данных экспериментального исследования компьютерной модели от физической оценивалось по следующим двум метрикам:

среднеквадратической ошибке (RMSE) и средней абсолютной ошибке (MAE).

RMSE определяется по следующей зависимости:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(x_i - y_i)^2}{n}}, \quad (2.20)$$

где n – количество измерений.

MAE определяется следующей зависимостью:

$$MAE = \frac{|(x_i - y_i)|}{n} \quad (2.21)$$

В результате оценки метрик получено значение RMSE равное 3,15 % при эксперименте «Холостой ход» и 3% при эксперименте «Полная загрузка» АД. Оценка MAE при эксперименте «Холостой ход» составила 2,39 %, при эксперименте «Полная загрузка» 2,27 %. Для достижения поставленных целей диссертационного исследования и для условий реального практического использования отклонение моделей показывает удовлетворительный результат, что свидетельствует об успешной верификации созданной компьютерной модели на основе пакета «SimPowerSystems» системы MATLAB/Simulink.

2.7. Выводы по второй главе

1. Разработана комплексная система методов исследования, направленная на оценку и увеличение срока службы АД, основана на использовании вероятностно-статистических методов исследования, так как они дают количественную оценку причин отказов, помимо этого, использование метода экспертных оценок, позволяет осуществить анализ причин и масштабов отказов АД с участием специалистов, количественное оценивание допустимых значений эксплуатационных параметров АД. Применение физико-статистических и математических методов исследования, необходимо для реализации математического аппарата, позволяющего выявить закономерности влияния воздействующих факторов на эксплуатацию АД, вместе с тем, разработку

технических решений по ликвидации факторов, негативно влияющих на АД ЭТК промышленных предприятий.

2. Реализована компьютерная модель, предназначенная для исследования влияния параметров эксплуатации (K_{2U} , K_3) на электродвигатели разных серий и мощностей. Разработанная компьютерная модель позволила реализовать метод экспериментального исследования АД, отличительной особенностью которого является моделирование работы АД в несимметричных режимах с учётом изменения нагрузки на валу электродвигателя.

3. Разработана экспериментальная установка, реализующая компьютерную модель работы АД. Проведение эксперимента позволило подтвердить достоверность и обоснованность сформированной компьютерной модели. Результат сравнения данных экспериментального исследования работы АД, полученных с использованием компьютерного и натурно-физического моделирования, показал высокую корреляцию между данными компьютерной модели и физической модели. Оценка RMSE соответствует значению 3,15 % при эксперименте «Холостой ход» и 3% при эксперименте «Полная загрузка» АД. Оценка MAE при эксперименте «Холостой ход» составила 2,39 %, при эксперименте «Полная загрузка» АД 2,27 %. Значения метрик удовлетворяют требованиям к точности моделей для проводимого исследования.

4. Результаты, полученные в процессе выполнения экспериментов, показали, что для решения задач исследования воздействия эксплуатационных параметров (K_{2U} , K_3) на АД необходимы эксперименты, выполненные как на физической, так и на компьютерной моделях. В итоге, совокупность полученных результатов позволит оценить влияние внешних факторов на работоспособность электродвигателей в разнообразных режимах его работы.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА РЕЖИМЫ РАБОТЫ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

В рамках данной главы диссертационного исследования предлагается рассмотреть тенденции исследования воздействия параметров эксплуатации (K_{2U} , K_3) на асинхронные электродвигатели. Помимо этого, определение эксплуатационных режимов работы асинхронных электродвигателей серии 4А, АИ, способствующих продлению их срока службы.

3.1. Исследование фактического уровня несимметрии напряжений в электрических сетях 0,4 кВ энергосистемы Забайкальского края

Нестационарный характер возникновения несимметрии в электрических сетях позволяет целенаправленно отнести её к слабо зависимым случайным величинам, обработка которых осуществляется на основе применения центральной предельной теоремы. Математические методы обработки данных, основанные на положениях теории вероятности и математической статистики, способствуют определению характера и вероятности появления K_{2U} в определённых диапазонах на исследуемых объектах.

Обработка экспериментальных данных несимметрии напряжений с использованием вероятностно-статистических методов исследования.

Основываясь на полученные результаты инструментального обследования показателей качества электроэнергии, применяя вероятностно-статистический метод обработки данных, выявим основные статистические параметры K_{2U} , кроме того, используя нормативные значения ПКЭ [1], определим вероятность появления K_{2U} в регламентируемых диапазонах.

Для исследования используем данные замеров ПКЭ на вводе ВРУ – 0,4 кВ муниципального редакционно-издательского предприятия «Могочинский

рабочий» Могочинского района Забайкальского края. Измерения проводились с использованием прибора «Энергомонитор 3.3Т» в течение 7 суток с 15.01.2017 г. по 22.01.2017 г. с десятиминутным интервалом согласно [1].

В (табл.3.1) приведены результаты измерений параметра K_{2U} рассматриваемого объекта.

На основании экспериментальных исследований K_{2U} определим закон распределения случайной величины, при этом требуется провести следующие операции расчёта:

- получить статистический ряд распределения K_{2U} ;
- построить графическую интерпретацию полигона и гистограммы распределения K_{2U} ;
- осуществить проверку корректности и достоверности полученного распределения при помощи критериев согласия.

Таблица 3.1 – Результаты экспериментального исследования K_{2U}

Измеренный ПКЭ	Время измерения	Фаза А	Фаза В	Фаза С	Нормативное значение
$K_{2U}, \%$	95%		3,3		2
	100%		8,32		4

Выполним статистический анализ экспериментальных исследований K_{2U} . Первоначальный объем исходных данных составил 10080 результатов замеров параметра K_{2U} . После приведения исходного массива данных к условиям [1] объем выборки с усредненными интервальными значениями составил 1008 результатов.

Размах варьирования объема выборки определяется по следующей формуле:

$$l = x_{max} - x_{min}, \quad (3.1)$$

где x_{max} и x_{min} – максимальное и минимальное значение выборки соответственно;

$$l = 8,32 - 0,52 = 7,8$$

Определяем шаг интервала путём разбивки выборки на 12 интервалов. Количество интервалов выбрано в соответствии с рекомендуемыми ГОСТ Р 8.736 – 2011 значениями:

$$h = \frac{l}{n} \quad (3.2)$$

$$h = \frac{7,8}{12} = 0,65$$

Теоретическая частота исследуемой величины K_{2U} определяется по следующей формуле:

$$F_{om} = f/N, \quad (3.3)$$

где N – объем выборки;

f – частота.

Полученный в ходе расчёта интервальный ряд представлен в (табл. 3.2), построенные на его основе полигон частот и гистограмма относительных частот изображены на (рис. 3.1, 3.2) соответственно.

Таблица 3.2 – Интервальный ряд распределения частот и относительных частот

Интервал	Середина интервала	Частота	Относительная частота
0,52-1,17	0,845	17	0,017
1,17-1,82	1,495	175	0,174
1,82-2,47	2,145	230	0,228
2,47-3,12	2,795	218	0,216
3,12-3,77	3,445	141	0,140
3,77-4,42	4,095	101	0,100
4,42-5,07	4,745	45	0,045
5,07-5,72	5,395	43	0,043
5,72-6,37	6,045	17	0,017
6,37-7,02	6,695	14	0,014
7,02-7,67	7,345	5	0,005
7,67-8,32	7,995	2	0,002

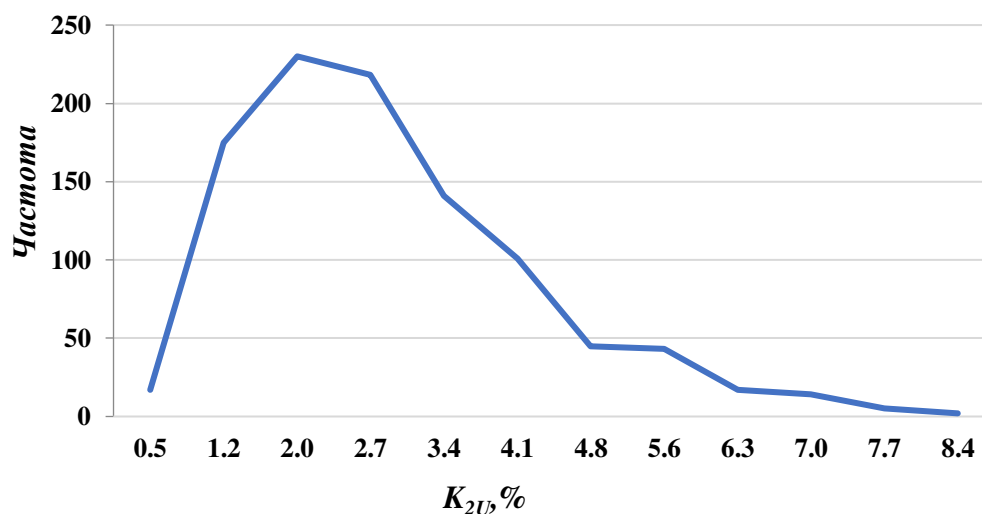


Рис. 3.1 – Графическая интерпретация полигона частот

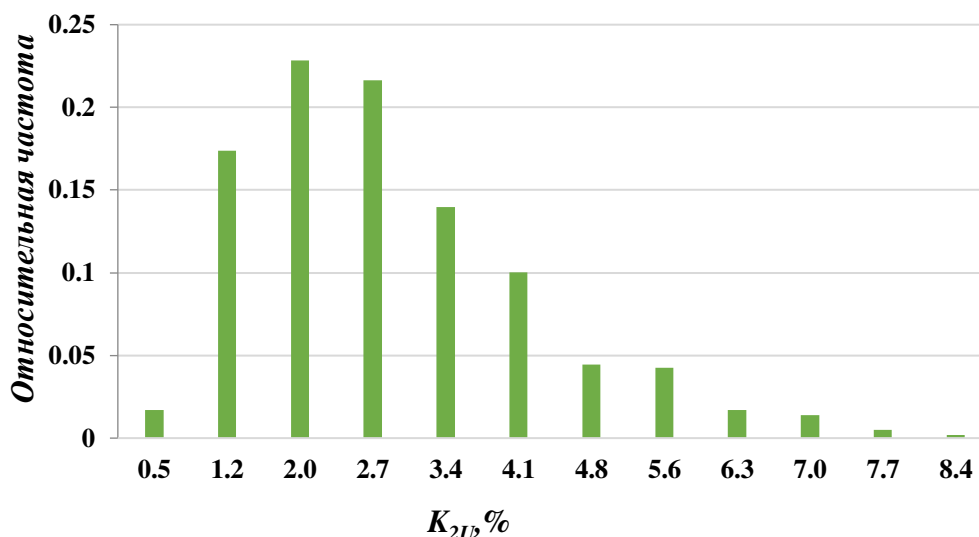


Рис. 3.2 – Графическая интерпретация гистограммы относительных частот

Полученные графические интерпретации дают возможность визуально оценить предполагаемый закон распределения случайной величины. Как видно из (рис. 3.1 и 3.2) пик среднего значения смещен влево относительно центра с формированием правого «хвоста».

Опираясь на обзор существующих законов распределения [117 – 119] рассматриваемый вид распределения возможно отнести к логарифмически нормальному ($\mu = 0,5$), при условии последующей строгой оценки его соответствия.

Оценка соответствия полученного распределения логарифмически нормальному проведена используя критерии согласия [120 – 123]. При проверке гипотезы о нормальном распределении для большого количества измерений исследуемых параметров, согласно ГОСТ Р 8.736 – 2011, рекомендуется использовать критерий согласия Пирсона (критерий χ^2). Также для повышения достоверности исследований принято решение использовать, в качестве контрольного критерия, критерий Крамера-Мизеса-Смирнова (критерий ω^2).

Принимая за основу гипотезу о логарифмически нормальном распределении запишем функцию распределения вида:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma_{\log}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\{\ln(x) - \overline{\ln(x)}\}^2}{2\sigma_{\log}^2}} \quad (3.4)$$

где x – случайная величина;

$\overline{\ln(x)}$ – среднее логарифма случайной величины;

$\sigma_{\text{лог}}$ – среднее квадратичное отклонение логарифмов случайной величины.

Логнормальное распределение определяется параметрами:

средней

$$\overline{\ln(x)} = \sum_{i=1}^n [\ln(x_i) \cdot P_i] / \sum_{i=1}^n P_i \quad (3.5)$$

и среднее квадратичное отклонением логарифмов

$$\sigma_{\text{лог}} = \sqrt{\ln\left(1 + \frac{\sigma^2}{\bar{x}^2}\right)}, \quad (3.6)$$

где \bar{x} – арифметическое среднее случайных чисел;

P_i – вероятность появления случайного числа x_i ;

$\sigma, \sigma_{\text{лог}}$ – среднее квадратичное отклонение случайных чисел и их логарифмов соответственно.

Принимая арифметическое среднее и среднее квадратичное отклонение для массива экспериментальных данных по K_{2U} получаем график плотности вероятности логарифмически нормального распределения, который изображен на (рис. 3.3).

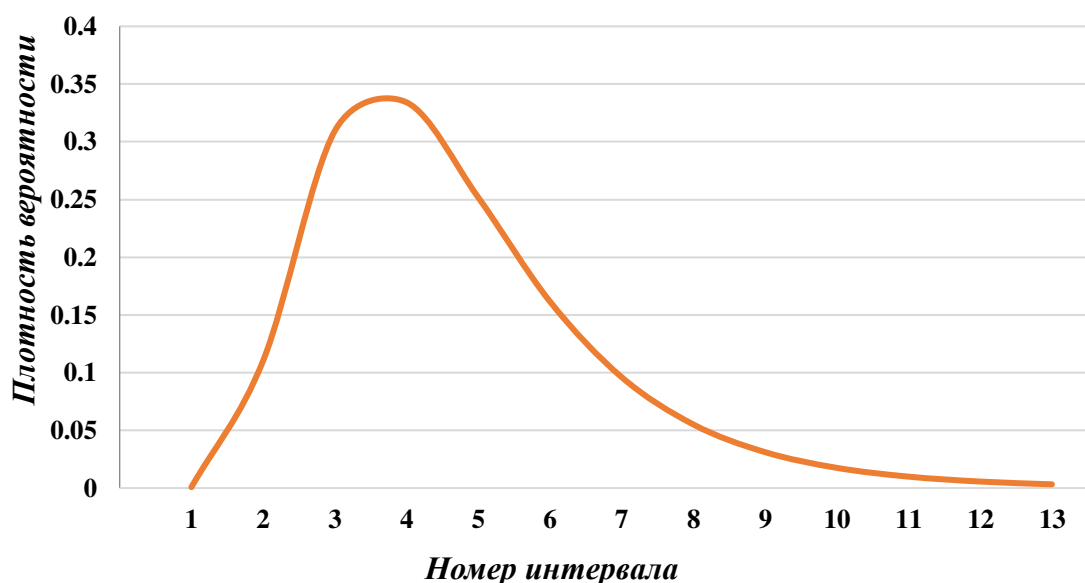


Рис. 3.3 – График плотности вероятности логарифмически нормального распределения случайной непрерывно распределенной величины K_{2U}

Анализируя графические зависимости (рис. 3.1, 3.3) отметим, что полученные графические отображения имеют схожий характер, следовательно, сделаем вывод о корректности выбора закона распределения.

Находим основные параметры логнормального распределения.

Определяем среднее $\overline{\ln(K_{2U})}$ по формуле (3.5):

$$\overline{\ln(K_{2U})} = 1,071$$

Определяем среднеквадратическое отклонение по формуле (3.6):

$$\sigma(K_{2U}) = 0,451$$

Выполним проверку на соответствие экспериментального распределения логарифмически нормальному применяя критерий Пирсона χ^2 .

Реализуем процесс проверки в следующей последовательности.

1. Вычислим эмпирическое значение критерия χ^2 по следующей формуле:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(n(i) - m(i))^2}{m(i)} \quad (3.7)$$

где $m(i)$ – теоретические частоты соответствующих значений;

$n(i)$ – эмпирические частоты соответствующих значений;

n – число разрядов наблюдаемых значений.

Критерий Пирсона $\chi_n^2 = 0,62$, данные заносим в (табл.3.3).

Таблица 3.3 – Проверка случайной величины по критерию Пирсона

x_i	$N(i)$	$n(i)$	$m(i)$	$\frac{(n(i) - m(i))^2}{m(i)}$
0,845	17	0,017	0,001	0,337
1,495	175	0,174	0,110	0,036
2,145	230	0,228	0,309	0,021
2,795	218	0,216	0,334	0,042
3,445	141	0,140	0,252	0,050
4,095	101	0,100	0,252	0,091
4,745	45	0,045	0,096	0,028
5,395	43	0,043	0,055	0,003
6,045	17	0,017	0,031	0,007
6,695	14	0,014	0,018	0,001
7,345	5	0,005	0,010	0,002
7,995	2	0,002	0,006	0,002
Σ	1008			$\chi_n^2 = 0,62$

2. Используя (табл. 3) приложения [124] при выбранном уровне значимости α и для числа степеней свободы ν определим критическую точку $\chi^2(\alpha, \nu)$

$$\nu = k - 3, \nu = 9, \quad (3.8)$$

где k – число групп выборки или число временных интервалов.

$$\chi^2(\alpha, \nu) = 2,7$$

$$2,7 > 0,62$$

3. При выполнении условия $\chi_n^2 < \chi_{кр}$, формируется вывод о том, что распределение K_{2U} подчинено логнормальному закону распределения.

Таким образом, проверка на соответствие экспериментального распределения логарифмически нормальному, применяя критерий Пирсона χ^2 , показала полное соответствие распределения величины K_{2U} принятому.

Выполним проверку на соответствие экспериментального распределения логарифмически нормальному применяя критерий согласия ω^2 (Крамера-Мизеса-Смирнова).

Реализуем процесс проверки в следующей последовательности.

1. Значение статистики Крамера – Мизеса – Смирнова S^* вычисляется по формуле:

$$S^* = n\omega^2 = \frac{1}{12n} + \sum_{i=1}^n \left[F(x_i) - \frac{2i-1}{2n} \right]^2 \quad (3.9)$$

Используя (табл. 2) приложения [124] примем значение вероятности равной $P(S > S^*) = 1 - a_1(S^*)$.

2. Критические значения критерия $a_1(S)$, при заданном параметре «а» приняты из таблиц приложения [114], где а – это уровень значимости, при этом значение $a \leq 0,01$ (второй уровень значимости).

$$\text{Тогда } a_1(S) = 0,74$$

3. Гипотеза не отвергается, если для вычисленного по выборке значения статистики S^* выполняется следующее условие:

$$P(S > S^*) = 1 - a_1(S^*) > a_1(S) \quad (3.10)$$

$$a_1(S^*) = 0,08$$

$$1 - a_1(S^*) = 0,92 > 0,74$$

Таким образом, проверка на соответствие экспериментального распределения логарифмически нормальному применяя критерий Крамера-Мизеса-Смирнова (критерий ω^2) показала полное соответствие распределения величины K_{2U} принятому.

В рамках двухкратной проверки закона распределения, оправдана гипотеза о логарифмически нормальном распределении со следующими основными параметрами: $\overline{\ln(K_{2U})} = 1,071$ и $\sigma(K_{2U}) = 0,451$.

Определим вероятности появления K_{2U} в нормируемых диапазонах : (0 – 2%), (2 – 4%) и (4 – ∞) на исследуемом объекте. Стоит отметить, что согласно требованиям [1] значения K_{2U} не должны превышать соответствующие значения – 2 % для 95% и 4% для 100 % времени измерений, интервалом в одну неделю, таким образом, будет справедлива следующая система записи вероятности появления K_{2U} :

$$P(0 < K_{2U} < 2) = 0,95 \text{ (95\%)}$$

$$P(2 < K_{2U} < 4) = 0,05 \text{ (5\%)}$$

$$P(4 < K_{2U} < \infty) = 0$$

В заданных интервалах рассчитывается вероятность появления K_{2U} согласно зависимости:

$$P(x) = \frac{1}{\sigma_{\log} \sqrt{2\pi}} \int_a^b \frac{e^{-\frac{\{\ln(x) - \overline{\ln(x)}\}^2}{2\sigma_{\log}^2}}}{x} dx \quad (3.11)$$

Вероятность появления K_{2U} в рассматриваемых интервалах определяется по формуле (3.11). Тогда получим следующие значения:

$$P(0 < K_{2U} < 2) = \frac{1}{0,451 \sqrt{2\pi}} \int_0^2 e^{-\frac{\{\ln(K_{2U}) - 1,071\}^2}{2 \cdot 0,451^2}} dK_{2U}$$

$$P(0 < K_{2U} < 2) = 0,119 = 12\%$$

$$P(2 < K_{2U} < 4) = \frac{1}{0,451 \sqrt{2\pi}} \int_2^4 e^{-\frac{\{\ln(K_{2U}) - 1,071\}^2}{2 \cdot 0,451^2}} dK_{2U}$$

$$P(2 < K_{2U} < 4) = 0,589 = 59\%,$$

$$P(4 < K_{2U} < \infty) = \frac{1}{0,451\sqrt{2\pi}} \int_4^{\infty} e^{-\frac{\{\ln(K_{2U})-1,071\}^2}{2 \cdot 0,451^2}} dK_{2U}$$

$$P(4 < K_{2U} < \infty) = 0,292 = 29\%$$

В результате исследования определили вероятность, с которой K_{2U} входит в определённый рассматриваемый предел. Получили следующие количественные значения вероятностей:

$$P(0 < K_{2U} < 2) = 12\%$$

$$P(2 < K_{2U} < 4) = 59\%$$

$$P(4 < K_{2U} < \infty) = 29\%$$

Соответственно, в указанных выше интервалах, наибольшая вероятность появления K_{2U} , составляющая 59%, наблюдается в интервале от 2% до 4 %, при нормативных требованиях составляющих 5%.

Статистическая обработка экспериментальных данных несимметрии напряжений с использованием программного комплекса Statistica 13.0.

Применяя специализированное программное обеспечение Statistica 13.0. выполнена обработка экспериментальных данных K_{2U} , построены гистограмма и кривые плотности распределения. В исследованиях использованы исходные данные представленные в (табл. 3.1), с сохранением объема выборки 1008 результатов измерений.

Гистограмма и кривые плотности распределения значений K_{2U} наиболее вероятных законов распределения представлены на (рис.3.4).

Следует отметить, что в результате анализа построенных кривых плотности распределения K_{2U} наиболее вероятными распределениями являются логарифмически нормальное распределение и гамма распределение.

Исходя из вида кривых распределения K_{2U} (рис.3.4) выдвигаем гипотезу о логарифмически нормальном распределении, вследствие того, что кривая распределения K_{2U} визуально ближе к модели логарифмически нормального

распределения теории вероятностей.

Гистограмма и кривая плотности логарифмически нормального распределения значений K_{2U} по интервалам представлена на (рис.3.5).

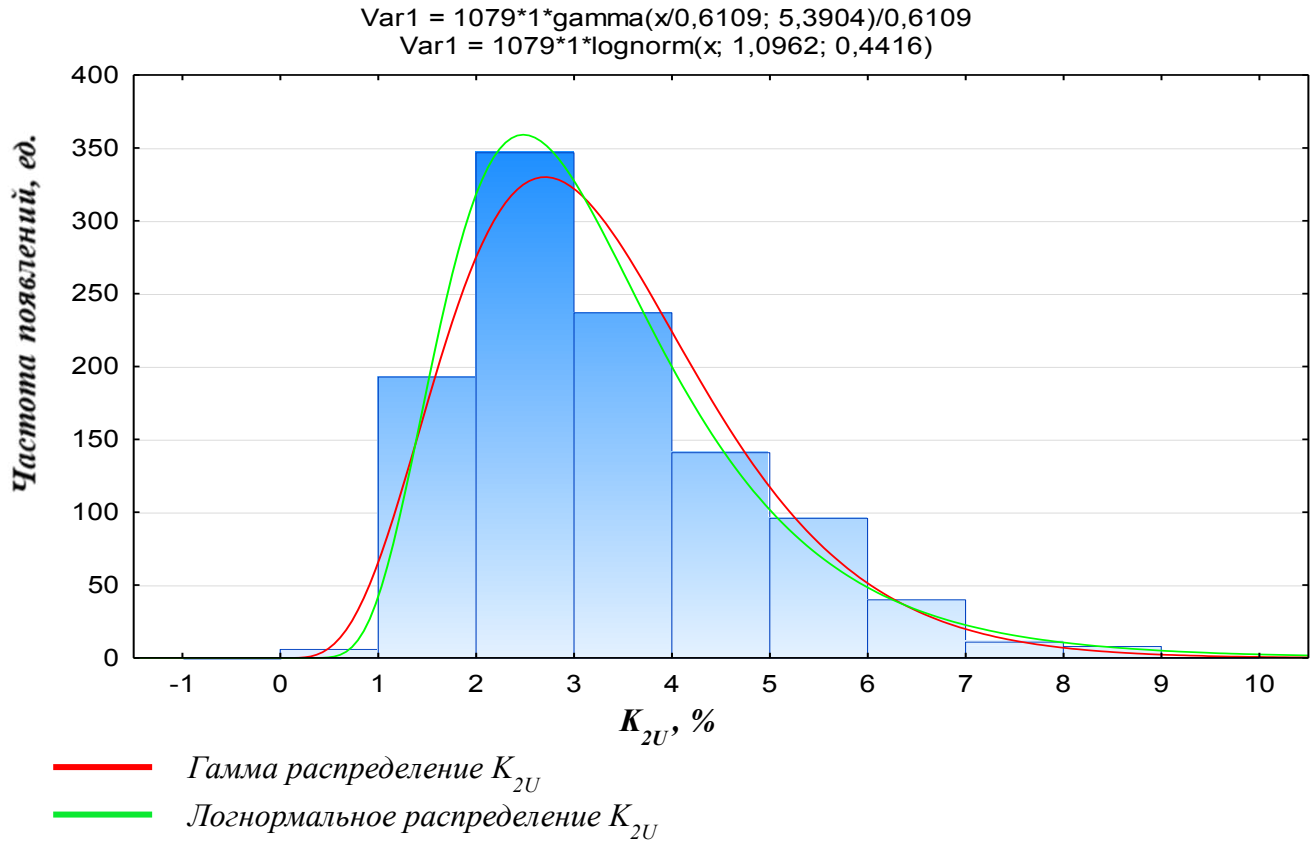


Рис.3.4 – Гистограмма, кривые плотности распределения K_{2U}

Последующая проверка корректности и достоверности полученного распределения выполнена с использованием критерия Пирсона (критерий χ^2). Проверка гипотезы показала, что при числе степеней свободы $k = 7$, для $\chi^2 = 0,163$ $p = 0,975$, нет оснований отвергнуть гипотезу применения выбранного закона распределения. Следовательно, с достаточно высокой вероятностью закон распределения K_{2U} следует логарифмически нормальному распределению теории вероятностей.

В результате получены следующие основные параметры: $\overline{\ln(K_{2U})} = 1,09$; $\sigma(K_{2U}) = 0,44$.

Важно отметить, что полученные результаты расчёта параметров распределения K_{2U} программным обеспечением Statistica 13.0 совпадают с данными на основе вероятностно-статистического метода исследования, проведенного выше. Отклонение результатов, двух этапов исследования, в пределах нормы [116].

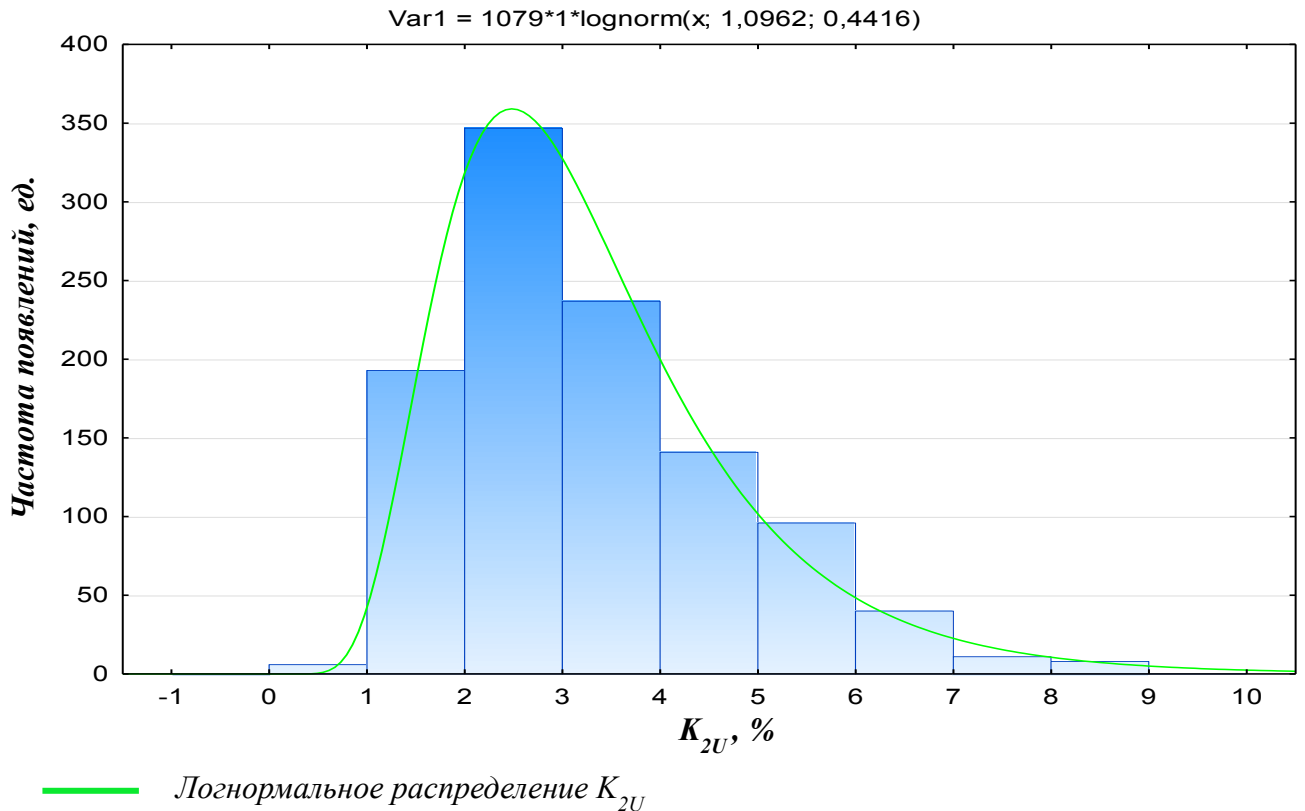


Рис.3.5 – Гистограмма, кривая плотности логарифмически нормального распределения K_{2U}

Вероятность появления K_{2U} в рассматриваемых интервалах, с учётом данных, полученных из программы Statistica 13.0 определяется согласно формуле:

$$P(x) = \frac{1}{\sigma_{\log} \sqrt{2\pi}} \int_a^b \frac{e^{-\frac{\{\ln(x) - \overline{\ln(x)}\}^2}{2\sigma_{\log}^2}}}{x} dx$$

Тогда получим следующие значения:

$$P(0 < K_{2U} < 2) = 0,116 = 12\%$$

$$P(2 < K_{2U} < 4) = 0,594 = 59\%$$

$$P(4 < K_{2U} < \infty) = 0,288 = 29\%$$

Проведённые исследования позволили определить вероятность, с которой K_{2U} входит в определённый рассматриваемый предел. Из результатов исследования наглядно видно, что из трёх рассмотренных интервалов, наибольшая вероятность появления K_{2U} , составляющая 59%, наблюдается в интервале от 2% до 4 %.

Результаты расчёта параметров распределения, кроме того, значения вероятностей появления K_{2U} в заданных интервалах с использованием вероятностно-статистических методов исследования совпадают с результатами расчёта, с использованием программного комплекса Statistica 13.0. Следовательно, результаты двух методов сопоставимы, что подтверждает достоверность и обоснованность полученных научных результатов.

Основываясь на виде кривой плотности логарифмически нормального распределения K_{2U} (рис.3.5) аргументируем следующее, что диапазон отслеживаемых значений K_{2U} довольно широк, и составляет диапазон значений равный $0 < K_{2U} < 10$. Соответственно, для нахождения диапазона массива данных величины K_{2U} в дальнейших планируемых исследованиях асинхронных электродвигателей, необходимо, чтобы совокупный интервал исследуемых значений K_{2U} соответствовал фактически измеренному массиву данных K_{2U} со степенью достоверности не менее $R^2 = 95\%$ [116].

Используя формулу (3.11) получим следующий диапазон значений массива данных:

$$P(0 < K_{2U} < 5) = 0,945 = 95\%$$

Следовательно, диапазон исследуемых величин K_{2U} следует принимать от нуля до пяти с шагом в один процент.

Подводя итог вышесказанному, следует отметить:

1. Проведённые исследования показали не соответствие фактических величин вероятностей нормативным значениям, регламентируемым [1]. Так, при величине $P(0 < K_{2U} < 2) = 12\%$ при нормативном значении равном 95%, $P(2 < K_{2U} < 4) = 59\%$ при 5%, $P(4 < K_{2U} < \infty) = 29\%$ при 0. Следовательно, результаты исследования характеризуют недопустимые значения параметра K_{2U} ,

приводящие к высокой аварийности эксплуатируемого электрооборудования.

2. Наличие информации о характере несимметрии в электрической сети, кроме того, величине вероятности, с которой K_{2U} входит в определённый регламентируемый предел, в соответствии с нормами ГОСТ 32144 – 2013, представляют особый интерес при разработке эффективных технических решений по снижению K_{2U} до нормированных значений в электрических сетях.

3.2. Исследование режимов работы асинхронных электродвигателей серии 4А, АИ

Как известно, промышленностью выпускаются электродвигатели, классифицируемые различными массовыми сериями. Наиболее распространёнными являются общепромышленные серии АД – серии 4А и АИ.

Ключевая цель исследования заключается в оценке воздействия эксплуатационных параметров (K_{2U} , K_3) на работоспособность электродвигателей в различных режимах работы, с использованием сформированной компьютерной модели на основе пакета «SimPowerSystems» системы MATLAB/Simulink.

При выполнении экспериментов основополагающим фактором являлось сравнение степени влияния K_{2U} на работу АД различных типоразмеров (серии 4А и АИ). Особое внимание уделено построению и последующему анализу графического отображения зависимостей фазных токов электродвигателей от значений параметров эксплуатации – K_{2U} , K_3 . При этом, в исследованиях рассмотрен обширный ряд электродвигателей с номинальной мощностью от 5,5 кВт до 200 кВт.

В качестве примера рассмотрим электродвигатели серии 4А, АИ с номинальной мощностью $P_n = 7,5; 75; 200$ кВт, при $n = 1500$ об/мин, каталожные данные [125,126] которых приведены в (табл. 3.4).

Экспериментальное исследование физических процессов, происходящих в электродвигателях, осуществлялось путём регулирования входного напряжения во

всех трёх фазах АД, исходная величина напряжения составляла 220 В. При этом, нагрузочный режим находился в диапазоне $K_3 = (0 - 120) \%$ с шагом изменения 20 %, а значение коэффициента несимметрии в диапазоне $K_{2U} = (0 - 5) \%$ с шагом изменения 1 %.

Таблица 3.4 – Каталожные данные исследуемых АД

Марка АД	Мощность АД, P_n , (кВт)	Номинальная синхронная частота вращения, n , (об/мин)	$\cos \varphi$	η	Кратность пускового момента, K_p	Момент инерции, J (кг·м ²)	Ток статора номинальный, I_n , (А)	Кратность пускового тока, K_I
4A132S4Y3	7,5	1500	0,86	87,5	2,2	0,02	16	7,5
4A250S4Y3	75	1500	0,9	93	1,2	1	142	7
4A315M4Y3	200	1500	0,92	94	1,3	3,97	357	6
АИР132S4	7,5	1500	0,86	87,5	2	0,0227	15,6	7,5
АИР250S4	75	1500	0,88	94	1,7	0,35	138,3	7,5
АИР355М6	200	1500	0,9	94,5	1,6	12,3	387	7

Следует отметить, что согласно [127,128] контрольное значение допустимого тока перегрузки, в проводимых исследованиях, принято равным 1,1 номинального тока.

С учётом вышеуказанных параметров эксперимента, на разработанной модели (рис.2.2), выполнены исследования режимов работы АД.

Результатом процесса моделирования являются графические изображения отношения значений фазных токов АД серий 4А, АИ от величин параметров K_{2U} , K_3 нескольких итераций моделирования.

В Приложении Б (табл. Б.1 – Б.6) обобщены результаты исследований электродвигателей $P_n = 7,5; 75; 200$ кВт серий 4А, АИ.

Графическая интерпретация, отображающая характер изменения тока в наиболее загруженной фазе АД (фаза «А») исследуемых серий $P_n = 7,5; 75; 200$ кВт от величин параметров K_{2U} и K_3 приведена на (рис. 3.6 – 3.8).

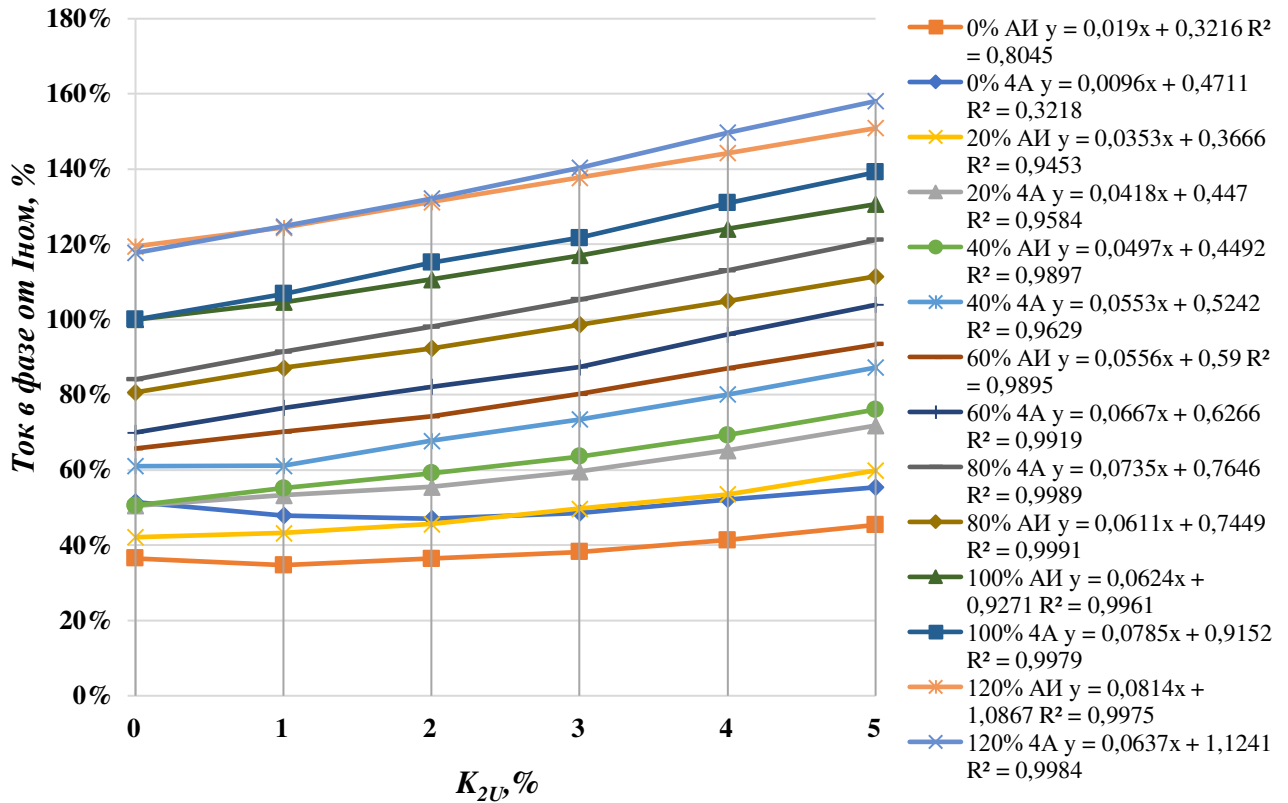


Рис.3.6 – Графическая интерпретация отношения значения фазных токов АД $P_n = 7,5$ кВт серий 4А, AI от величин параметров K_{2U} , K_3 нескольких итераций моделирования

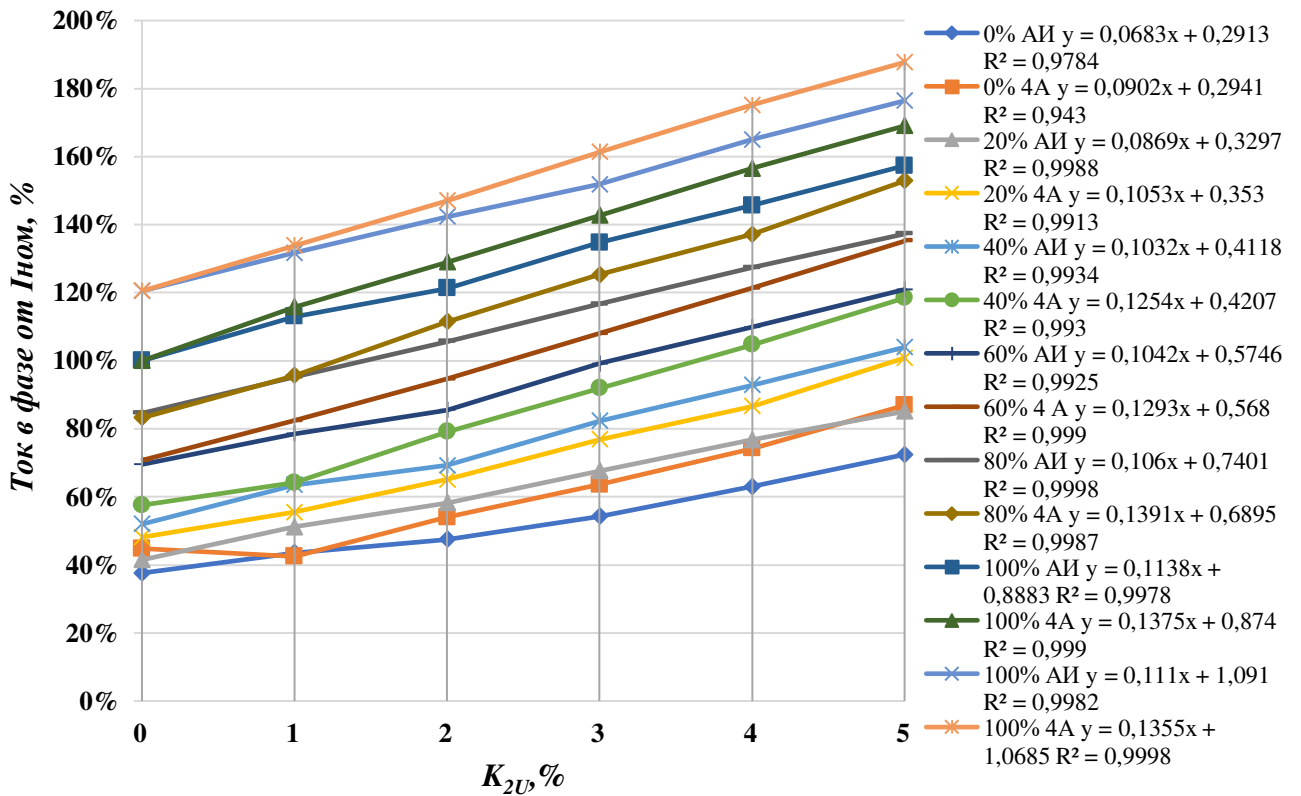


Рис.3.7 – Графическая интерпретация отношения значения фазных токов АД $P_n = 75$ кВт серий 4А, AI от величин параметров K_{2U} , K_3 нескольких итераций моделирования

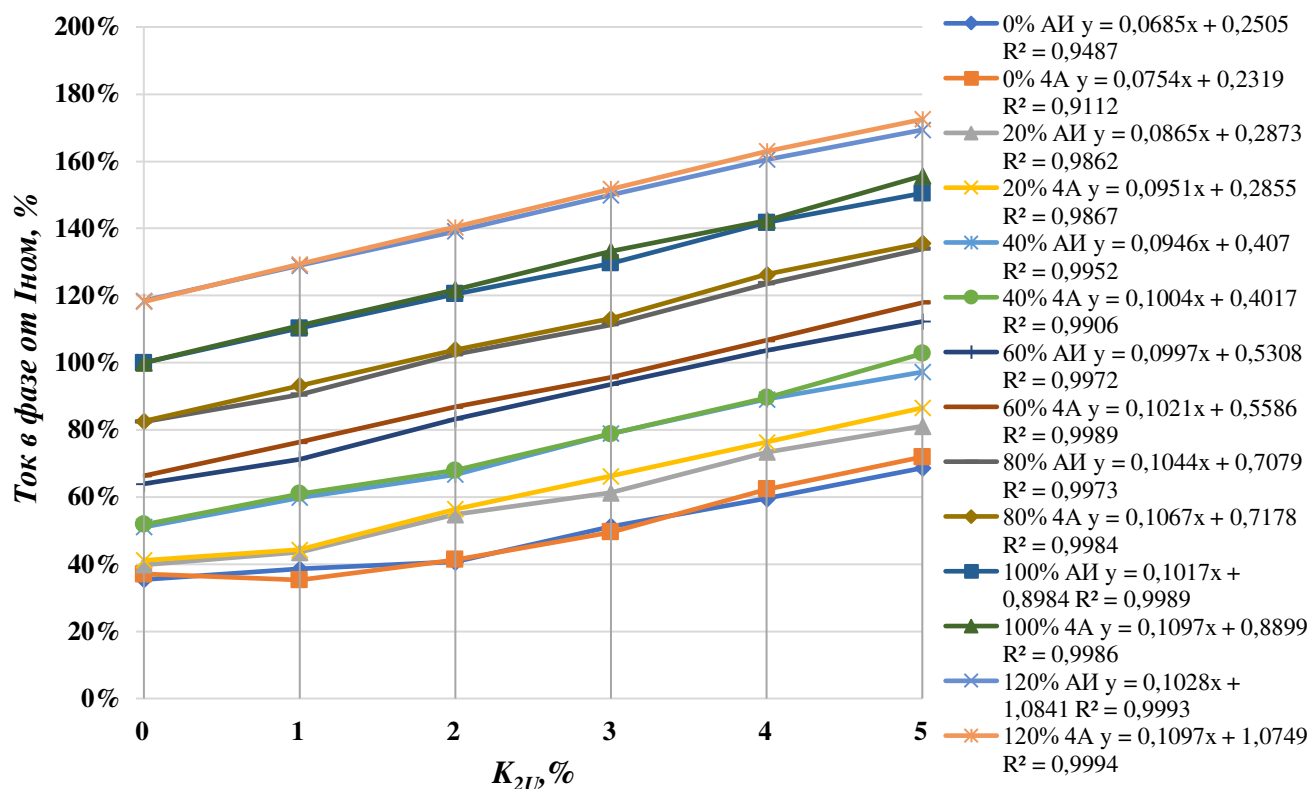


Рис.3.8 – Графическая интерпретация отношения значения фазных токов АД $P_n = 200$ кВт серий 4А, AI от величин параметров K_{2U} , K_3 нескольких итераций моделирования

Анализируя графическую интерпретацию полученных результатов исследования (рис. 3.6 – 3.8), отметим следующие закономерности:

1) общий вид и направление зависимостей одинаково, что говорит о схожем характере влияния K_{2U} на электродвигатели различных типоразмеров;

2) полученные зависимости имеют линейный характер, что доказано коэффициентами достоверности R^2 ;

3) вид зависимостей показывает, что чем больше нагрузка на валу АД, тем большее влияние оказывает K_{2U} на режим работы электродвигателей;

4) степень влияния K_{2U} на конкретные исследованные серии АД различна, при этом отмечены расхождения в значениях токов наиболее загруженной фазы. Так, при величине $K_{2U} = 4\%$ в режиме «Полная загрузка» АД, расхождения в значениях токов в наиболее загруженной фазе (между сериями АД) соответствуют следующим значениям: для АД $P_n = 200$ кВт – 1%, для АД $P_n = 75$ кВт – 11% и для АД $P_n = 7,5$ кВт – 8%.

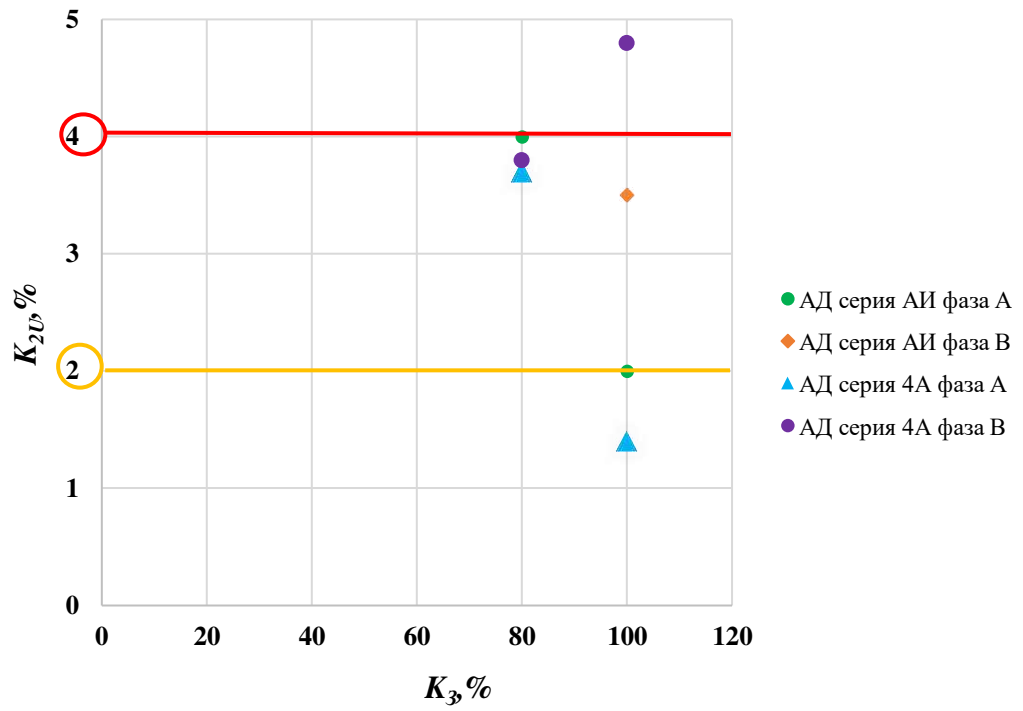
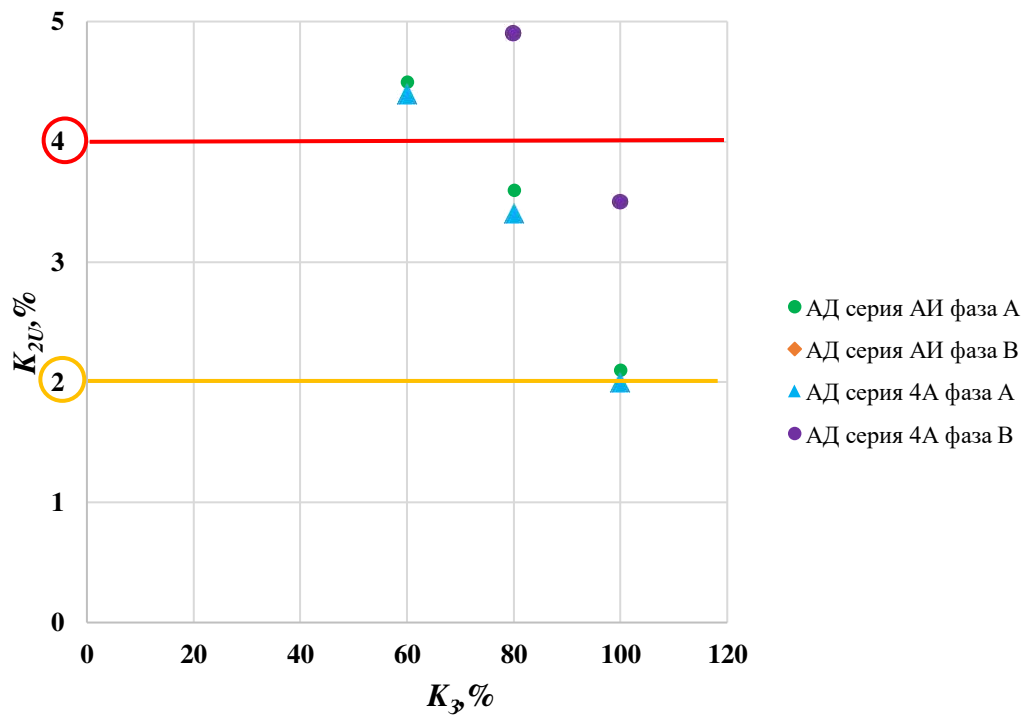
Интерпретирование результатов исследования представлено посредством сравнения значений фазных токов со значением номинального тока электродвигателя, при этом наибольшее расхождение в значениях токов прослеживается для двух серий в режиме «Холостой ход». Наиболее интересная ситуация прослеживается в режиме «Полная загрузка» АД. Так, например, значение тока в фазе «А» электродвигателя серии 4А мощностью $P_n = 7,5$ кВт превышает допустимое значение, соответствующее значению $1,1 I_{ном}$, когда величина $K_{2U} = 1,4\%$;

Наблюдая за характером изменения фазного тока АД в наиболее загруженной фазе (фаза «А») следует отметить, что при достижении значений величин исследуемых параметров – $K_{2U} = 2\%$ и $K_3 = 80\%$ для $P_n = 7,5; 75; 200$ кВт отслеживается начало перегрева изоляции обмоток электродвигателей.

Совокупность параметров, характеризующих момент начала превышения значения фазного тока над номинальным, отображена на точечных графиках, приведенных на (рис.3.9 – 3.11). Параметры (фаза АД, в которой отмечено превышение допустимого значения тока, K_{2U} и K_3), начало превышения значений фазного тока над номинальным приведены в (табл. 3.5).

Таблица 3.5 – Анализ полученных результатов исследования

Серия АД	$K_{2U}, \%$	$K_3, \%$	Фаза АД	Серия АД	$K_{2U}, \%$	$K_3, \%$	Фаза АД
Электродвигатели $P_n = 7,5$ кВт							
АИ	4	80	А	4А	3,7	80	А
АИ	2	100	А	4А	1,4	100	А
АИ	3,5	100	В	4А	3,8	80	В
-	-	-	-	4А	4,8	100	В
Электродвигатели $P_n = 75$ кВт							
АИ	4,5	60	А	4А	4,4	60	А
АИ	3,6	80	А	4А	3,4	80	А
АИ	2,1	100	А	4А	2	100	А
АИ	4,9	80	А	4А	4,9	80	В
АИ	3,5	100	В	4А	3,5	100	В
Электродвигатели $P_n = 200$ кВт							
АИ	4,6	60	А	4А	4,5	60	А
АИ	4,3	80	А	4А	4,1	80	А
АИ	2,1	100	А	4А	2,4	100	А
-	-	-	-	4А	4,5	100	В

Рис.3.9 – Точечный график АД с $P_n = 7,5$ кВтРис.3.10 – Точечный график АД с $P_n = 75$ кВт

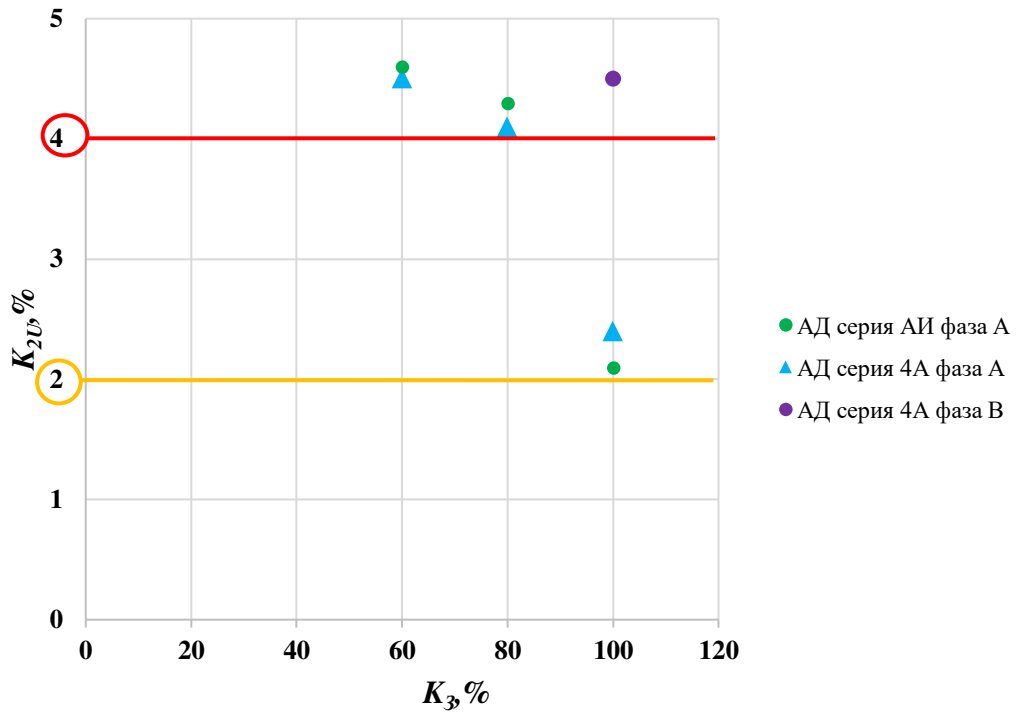


Рис.3.11 – Точечный график АД с P_н = 200 кВт

Выполним анализ результатов исследования (рис.3.9 – 3.11), отметим следующее, что:

1. Электродвигатели P_н = 7,5 кВт

1.1. Электродвигатели серии АИ имеют большую устойчивость к воздействию внешних факторов, чем АД серии 4А. Электродвигатели серии 4А подвержены значительному негативному воздействию даже при нормируемых [1] значениях K_{2U}.

Значение тока в фазе «А» исследуемых АД серии 4А превышает допустимое значение, соответствующее значению 1,1 I_{ном}, когда величина K_{2U} ≥ 1,4%, а для АД серии АИ превышение происходит при K_{2U} ≥ 2 %. Контрольные значения параметра, соответствующего началу перегрева, составляют K_з = 80% для серии 4А, и K_з = 100 % для серии АИ.

1.2. Токовая перегрузка АД возникает при значении параметров – для серии 4А K_{2U} ≥ 3,7%, K_з ≥ 60%, для серии АИ K_{2U} ≥ 4%, K_з ≥ 80%.

2. Электродвигатели $P_n = 75 \text{ кВт}$

2.1 Значение тока в фазе «А» исследуемых АД серии 4А превышает допустимое значение, соответствующее значению $1,1 I_{\text{ном}}$, когда величина $K_{2U} \geq 2\%$, а для электродвигателя серии АИ превышение происходит при $K_{2U} \geq 2,1 \%$. Контрольные значения параметра, соответствующего началу перегрева, составляют $K_3 = 60\%$ для серии 4А, и $K_3 = 80 \%$ для серии АИ.

2.2. Токовая перегрузка АД возникает при значении параметров – для АД серии 4А $K_{2U} \geq 4,5\%$, $K_3 \geq 60\%$, для серии АИ $K_{2U} \geq 4,4\%$, $K_3 \geq 80\%$.

3. Электродвигатели $P_n = 200 \text{ кВт}$

3.1 Значение тока в фазе «А» исследуемых АД серии 4А превышает допустимое значение, соответствующее значению $1,1 I_{\text{ном}}$, когда величина $K_{2U} \geq 2,1\%$, а для электродвигателя серии АИ превышение происходит при $K_{2U} \geq 2,4 \%$. Контрольные значения параметра, соответствующего началу перегрева, составляют $K_3 = 80\%$ для серии 4А, и $K_3 = 80 \%$ для серии АИ.

3.2. Токовая перегрузка АД возникает при значении параметров – для АД серии $K_{2U} \geq 4,1\%$, $K_3 \geq 80\%$, для серии АИ $K_{2U} \geq 4,3\%$, $K_3 \geq 80\%$.

С учётом всех вышеприведенных результатов исследования, следует, что при достаточном объёме экспериментальных данных появляется перспектива формирования математического выражения закономерности варьирования значений фазных токов АД, зависящих от совместного воздействия исследуемых факторов (K_{2U} , K_3).

3.3. Вывод аналитической зависимости токов в фазах асинхронных электродвигателей серии 4А, АИ

В результате экспериментальных исследований низковольтных асинхронных электродвигателей серии 4А, АИ с номинальной мощностью от 5,5 кВт до 200 кВт, при $n = 1500$ об/мин, получен большой объём данных исследования. Как следствие, для каждой фазы исследуемых электродвигателей построены графические

интерпретации отношений значений фазных токов АД от параметров K_{2U} и K_3 . В дальнейшем, при проведении исследований рассматриваем зависимость тока АД в наиболее загруженной фазе (фаза «А»).

Каждая построенная зависимость имеет соответствующее уравнение аппроксимируемой прямой линии. В качестве наглядности приведены уравнения зависимостей электродвигателей номинальной мощностью 7,5 кВт. Так, например, для электродвигателя серии 4А132S4У3, при $K_3 = 80\%$ зависимость описывается уравнением $y = 0,0735x + 0,7646$ с коэффициентом достоверности аппроксимации $R^2 = 0,9989$. Для электродвигателя серии АИР132S4, при $K_3 = 80\%$ зависимость описывается уравнением $y = 0,0611x + 0,7449$ с коэффициентом достоверности аппроксимации $R^2 = 0,9991$.

Уравнения, полученные в результате компьютерного моделирования, описывают зависимость тока от следующих параметров – K_{2U} , K_3 , кроме того, от мощности электродвигателя. В связи с этим, чтобы систематизировать полученные результаты исследований необходимо вывести зависимость тока АД в наиболее загруженной фазе в зависимости от вышеперечисленных параметров.

Поскольку зависимости токов в фазах АД от рассматриваемых параметров имеют линейный характер, то наиболее рациональным способом их описания является эмпирическая зависимость $\mu = f(X)$ с коэффициентами, которые учитывают параметры – K_{2U} , K_3 и мощность электродвигателя.

Для возможности дальнейшего решения зависимость необходимо представить в виде:

$$\mu = Ax + B, \quad (3.12)$$

где μ – I % от I ном, %;

A – эмпирический коэффициент, учитывающий влияние мощности АД;

B – эмпирический коэффициент, учитывающий изменение относительной нагрузки АД;

x – K_{2U} , %

Аппроксимация полученных результатов моделирования выполнена в среде

Microsoft Office Excel. После выполнения аппроксимации данных получаем выражения эмпирических коэффициентов A , B :

– коэффициент A для АД серии 4А имеет вид:

$$A = -0,0002 P_n + 0,1436;$$

– коэффициент A для АД серии АИ имеет вид:

$$A = -0,0003 P_n + 0,1535;$$

– коэффициент B для АД серии 4А имеет вид:

$$B = 0,7194 K_3 + 0,1631;$$

– коэффициент B для АД серии АИ имеет вид:

$$B = 0,7212 K_3 + 0,159.$$

Вычисленные результаты эмпирических коэффициентов A , B подставляем в исходную формулу (3.12).

В итоге, основываясь на результаты компьютерного моделирования, путём линейной аппроксимации данных, выведем аналитическую зависимость тока АД в наиболее загруженной фазе в зависимости от K_{2U} , K_3 , серии и мощности электродвигателя.

Аналитическая зависимость тока АД определяется выражением:

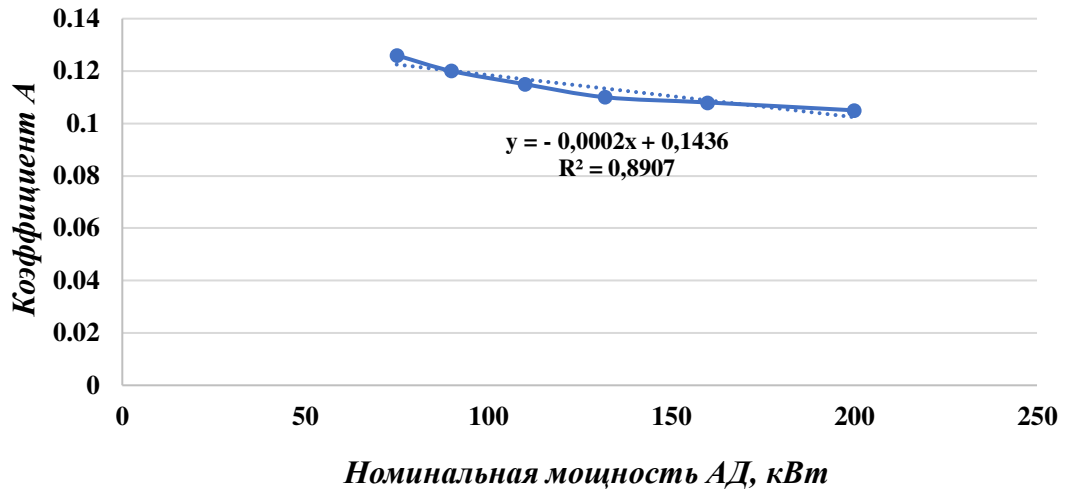
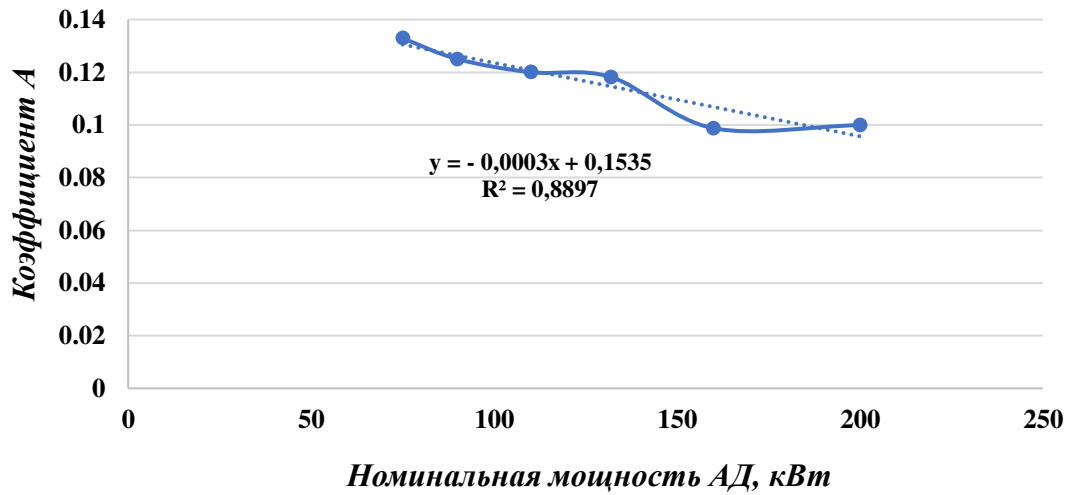
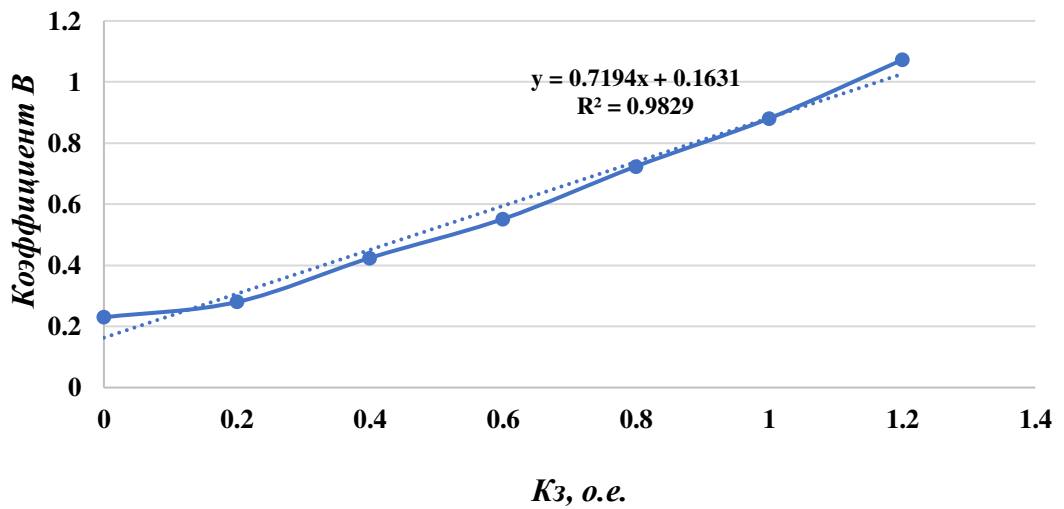
– для электродвигателя серии 4А:

$$I \% \text{ от } I_{ном} = ((-0,0002 P_n + 0,1436) K_{2U} + (0,7194 K_3 + 0,1631)) \cdot 100, \% \quad (3.13)$$

– для электродвигателя серии АИ:

$$I \% \text{ от } I_{ном} = ((-0,0003 P_n + 0,1535) K_{2U} + (0,7212 K_3 + 0,159)) \cdot 100, \% \quad (3.14)$$

Выполним математические операции для подтверждения достоверности полученной аналитической зависимости. При выводе эмпирических коэффициентов A , B , то есть аппроксимации линейных зависимостей получены графические отображения (рис.3.12 – 3.15) со следующими коэффициентами достоверности аппроксимации R^2 : для серии 4А $R^2 = 0,8907$, для серии АИ $R^2 = 0,8897$ (коэффициент A); для серии 4А $R^2 = 0,9829$, для серии АИ $R^2 = 0,9778$ (коэффициент B).

Рис. 3.12 – Эмпирический коэффициент A АД серии 4АРис. 3.13 – Эмпирический коэффициент A АД серии АИРис. 3.14 – Эмпирический коэффициент B АД серии 4А

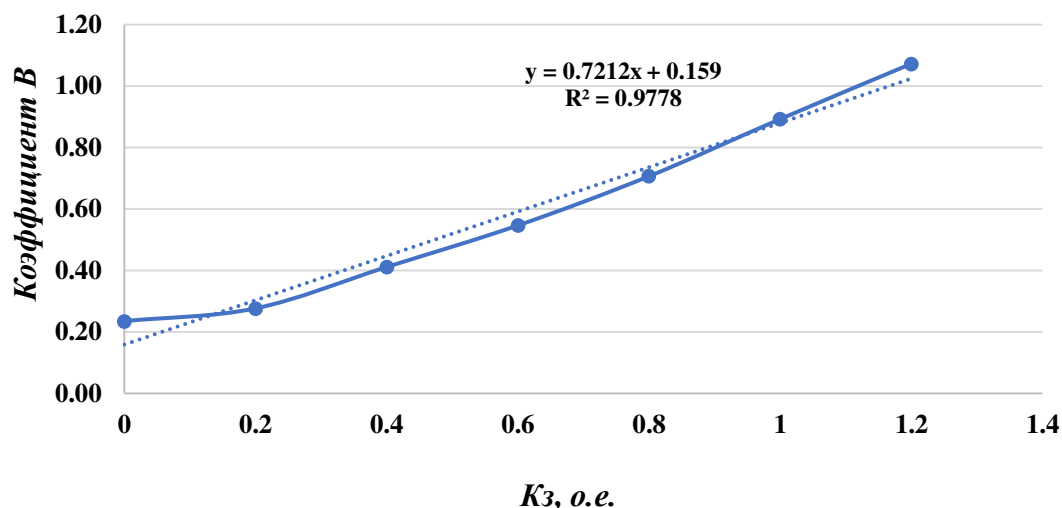


Рис.3.15 – Эмпирический коэффициент В АД серии АИ

Как известно [116], чем ближе R^2 к 1, тем точнее аппроксимация данных. Исходя из этого, аппроксимацию считаем достоверной, данное заключение, свидетельствует о корректности и обоснованности полученной аналитической зависимости, что даёт возможность использовать зависимость для расчёта рекомендуемых значений $K_{2Uрек}$ асинхронных электродвигателей.

Принимаем значение тока АД в наиболее загруженной фазе равное $I, I_{ном} \cdot 100\%$, тогда выражение для определения рекомендуемых значений $K_{2Uрек}$ АД, с учётом полученных формул (3.13), (3.14), имеет следующий вид:

– для электродвигателя серии 4А:

$$K_{2Uрек} = ((-I, I_{ном} + (0,7194 Kз + 0,1631)) / (0,0002 Pн - 0,1436)) \cdot 100, \% \quad (3.15)$$

– для электродвигателя серии АИ:

$$K_{2Uрек} = ((-I, I_{ном} + (0,7212 Kз + 0,159)) / (0,0003 Pн - 0,1535)) \cdot 100, \% \quad (3.16)$$

Уравнения (3.15), (3.16) являются основополагающей частью методики расчёта ЭТК, учитывающей внедрение технических средств симметрирования и вариантов мест их установки. Методика расчёта заложена в алгоритм вычислительной программы рационального выбора мест установки технических средств симметрирования в электротехническом комплексе с наличием электродвигательной нагрузки.

3.4. Выявление рекомендуемых эксплуатационных режимов работы асинхронных электродвигателей серии 4А, АИ

Ключевой целью исследования является выявление рекомендуемых эксплуатационных режимов работы асинхронных электродвигателей, способствующих продлению их срока службы, путём количественной оценки параметров эксплуатации (K_{2U} , K_3).

В процессе компьютерного моделирования получены выражения (3.15, 3.16) для определения рекомендуемых значений $K_{2Uрек}$ электродвигателей, данные формулы необходимы для расчётов, на основании которых установлены рекомендуемые эксплуатационные режимы АД.

Используя полученные выражения (3.15, 3.16) определим рекомендуемые значения $K_{2Uрек}$, для АД $P_n = 7,5; 75; 200$ кВт серии 4А, АИ при полной загрузке электродвигателей. Результаты вычислений сведены в (табл. 3.6).

Таблица 3.6 – Рекомендуемые значения $K_{2Uрек}$ АД серии 4А, АИ

Рекомендуемые $K_{2Uрек}$ АД серии 4А, АИ	Мощность АД, кВт		
	7,5	75	200
$K_{2Uрек}$ 4А	1,28%	1,39%	1,68%
$K_{2Uрек}$ АИ	1,36%	1,58%	2,21%

В результате экспериментальных исследований выявлено, что:

1. Рекомендуемый эксплуатационный режим работы электродвигателей зависит от следующих параметров – P_n , K_3 и K_{2U} .

Рассмотрим рекомендуемый режим работы АД, в соответствии с нормами ГОСТ 32144 – 2013:

– для АД серии 4А максимальная величина K_3 составляет 70%, для АД серии АИ максимальная величина 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 максимальная величина K_3 составляет 35%, при значениях K_{2U} от 2% до 4%.

Следственно, для соблюдения рекомендованного эксплуатационного режима работы АД требуется ограничение значения K_{2U} в соответствии с нормативными

показателями [1], кроме того необходимо регулировать значение параметра K_3 .

2. Рекомендуемое значение $K_{2Uрек}$ индивидуально для каждого типоразмера АД.

Допустимый диапазон K_{2U} , обеспечивающий нормальный режим работы АД, определяется значениями $K_{2Uрек}$, приведенными в (табл. 3.6).

3. Рекомендуемый режим работы АД по перегрузочной способности, индивидуален для каждого типоразмера АД.

В (табл. 3.7) приведены рекомендуемые значения коэффициента загрузки АД серии 4А, АИ при различных значениях K_{2U} .

Таблица 3.7 – Рекомендуемые значения K_3 АД серии 4А, АИ при различных значениях K_{2U}

Рекомендуемые значения K_3 АД серии 4А, АИ при различных K_{2U}	Мощность АД, кВт		
	7,5	75	200
K_3 4А, при $K_{2U} = 0\%$	110%	110%	110%
K_3 АИ, при $K_{2U} = 0\%$	110%	110%	110%
K_3 4А, при $K_{2U} = 1\%$	90%	92%	95%
K_3 АИ, при $K_{2U} = 1\%$	91%	93%	96%
K_3 4А, при $K_{2U} = 2\%$	70%	74%	80%
K_3 АИ, при $K_{2U} = 2\%$	73%	76%	82%
K_3 4А, при $K_{2U} = 3\%$	50%	55%	65%
K_3 АИ, при $K_{2U} = 3\%$	54%	59%	68%
K_3 4А, при $K_{2U} = 4\%$	31%	37%	49%
K_3 АИ, при $K_{2U} = 4\%$	35%	42%	54%
K_3 4А, при $K_{2U} = 5\%$	11%	19%	34%
K_3 АИ, при $K_{2U} = 5\%$	16%	25%	40%

На основании полученных значений рекомендуемых величин $K_{2Uрек}$, выполнен анализ изменения срока службы АД различного типоразмера при номинальной нагрузке и различных значениях несимметрии напряжений.

Согласно нормативной документации показатели надёжности регламентируются в зависимости от типоразмера электродвигателя. Например, для асинхронных электродвигателей серии 4А, АИ [27] регламентируемый срок службы (при наработке сорок тысяч часов) составляет пятнадцать лет, а средний срок службы до первого капитального ремонта (при наработке двадцать тысяч часов) восемь лет. При этом вероятность безотказной работы должна выдерживаться более 0,9 за десять тысяч часов наработки.

Величина срока службы электродвигателя напрямую зависит от срока службы изоляции его обмоток, следовательно, этот параметр требуется исследовать более подробно.

Рассмотрим динамику изменения срока службы обмоток статора АД (z), обусловленную наличием несимметрии и несинусоидальности в электрической сети, основываясь на методику расчёта А.К. Шидловского [129]:

$$z = e^{[-280(1,55 \cdot K_2 U^2) + 1,39 \sum_{v=2}^{\infty} \frac{U_v^2}{v}]}$$
 (3.17)

Стоит заметить, что выражение (3.17) целесообразно использовать при перемежающейся несимметрии напряжений. В результате исследований несимметрии напряжений в электрических сетях Забайкальского края установлено, что характер несимметрии напряжений является преимущественно неперемежающийся. Соответственно, исходя из вышеуказанного, требуется осуществить расчёт для случая неперемежающейся несимметрии.

Величина нагрева обмоток статора АД, вызванного воздействием несимметрии напряжений, рассчитывается согласно выражению:

$$\Delta\tau = \frac{\Delta P_{M1H} I_{\Pi}^2 \cdot 10^{-4}}{B} r_{иск}^2,$$
 (3.18)

где ΔP_{M1H} – потери в меди статора АД, кВт;

B – тепловой параметр электродвигателя;

I_{Π} – отношение пускового тока к номинальному;

$r_{иск}$ – коэффициент увеличения температуры нагрева обмоток статора АД от искажения напряжения.

Коэффициент увеличения температуры нагрева обмоток статора АД от искажения напряжения рассчитывается по формуле:

$$r_{иск} = \sqrt{K_{внес} \cdot K_{2U}^2 + \sum_{v=3}^{\infty} U_v^2 \frac{\sqrt{v+0.39\sqrt{v\pm 1}}}{v^2}},$$
 (3.19)

где v – порядковый номер высшей гармоники;

U_v – кратность напряжения соответствующей гармоники к номинальному;

$K_{внес}$ – коэффициент, характеризующий вид несимметрии напряжений, для перемежающейся несимметрии равен 1,55 [129], для неперемежающейся определяется расчётным путём.

Согласно [129] составляющая выражения (3.18) определяется как:

$$\frac{\Delta P_{M1H} I_{\Pi}^2 b}{B} = 280 \quad (3.20)$$

где b – статичный коэффициент изоляции обмоток статора электродвигателя (электроизоляционный лак), рассчитывается исходя из правила Монтзингера [119]: $\exp(-8b) = 0,5$, откуда $b = 0,0866$.

Следовательно, выражение (3.20) примет вид:

$$\frac{\Delta P_{M1H} I_{\Pi}^2}{B} = 3\,233,256 \quad (3.21)$$

Составляющая в (3.19) $\sum_{v=3}^{\infty} U_v^2 \frac{\sqrt{v+0.39\sqrt{v\pm 1}}}{v^2} = 0$, в силу того, что в рассматриваемой ситуации отсутствует несинусоидальность напряжения.

Используя выражения (3.18), (3.19), при этом учитывая, что допустимая величина K_{2U} для неперемежающейся несимметрии равна 2% [130], а величина нагрева обмотки статора электродвигателя в наиболее загруженной фазе $\Delta\tau = 10^\circ\text{C}$ [25], упростив выражение получим:

$$K_{внес} = 13,73$$

Тогда, уточнённая формула определения срока службы электродвигателя, обусловленная несимметрией напряжения, примет вид:

$$z = e^{[-280(13,73 \cdot K_{2U}^2)]} \quad (3.22)$$

В результате, (3.22) с учётом полученных ранее формул (3.15), (3.16), примет следующий вид:

– для электродвигателя серии 4А:

$$z = e^{-3844,4 \cdot [(-1,1I_{ном} + (0,7194 K_3 + 0,1631)) / (0,0002P_H - 0,1436)]^2} \quad (3.23)$$

– для электродвигателя серии АИ:

$$z = e^{-3844,4 \cdot [(-1,1I_{ном} + (0,7212 K_3 + 0,159)) / (0,0003P_H - 0,1535)]^2} \quad (3.24)$$

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

Следовательно, получим выражение уточнённой формулы определения срока службы электродвигателей:

$$z = e \left[-280 \left(13,73 (K_{2U} - K_{2U_{рек}})^2 \right) \right] \quad (3.25)$$

Рассмотрим изменение срока службы электродвигателей на примере следующих АД – серии 4А (4А132S4Y3 $P_H = 7,5$ кВт; 4А250S4Y3 $P_H = 75$ кВт; 4А315M4Y3 $P_H = 200$ кВт) и серии АИ (АИР132S4 $P_H = 7,5$ кВт; АИР250S4 $P_H = 75$ кВт; АИР355M6 $P_H = 200$ кВт).

Подставляя значения $K_{2U_{рек}}$ рассматриваемых АД в формулу (3.25), определим диапазоны изменения срока службы электродвигателей, графическая интерпретация которых изображена на диаграммах (рис. 3.16 – 3.21).

В результате, значение остаточного срока службы (Z') при наработке $T = 40000$ часов с расчётным средним сроком службы $Z = 15$ лет для электродвигателя серии АИР132S4 с $P_H = 7,5$ кВт, равно:

$$Z' = z \cdot Z = 8,07 \text{ лет}$$

Снижение срока службы АД рассчитывается согласно выражению:

$$\Delta Z' = Z - Z' \quad (3.26)$$

Алгоритм вычисления $\Delta Z'$ аналогичен для остальных электродвигателей.

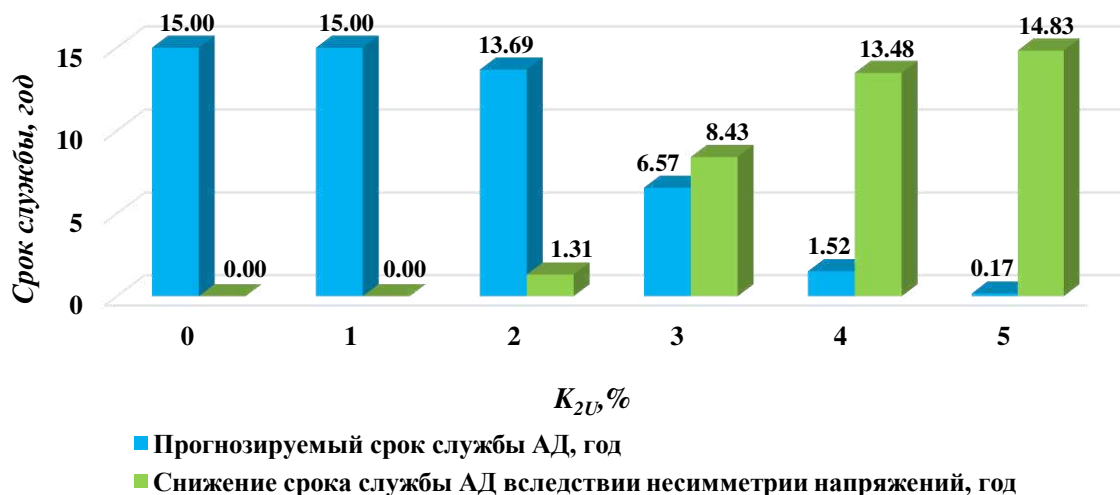


Рис.3.16 – Графическое отображение варьирования срока службы АД 4А132S4Y3 $P_H = 7,5$ кВт от величины K_{2U}

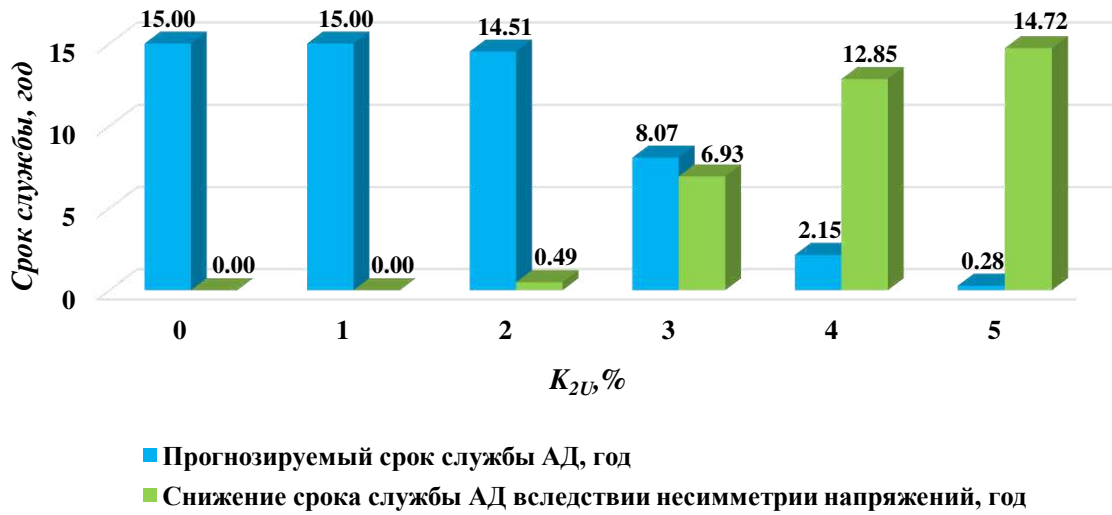


Рис.3.17 – Графическое отображение варьирования срока службы АД АИР132S4 P_n = 7,5 кВт от величины K_{2U}

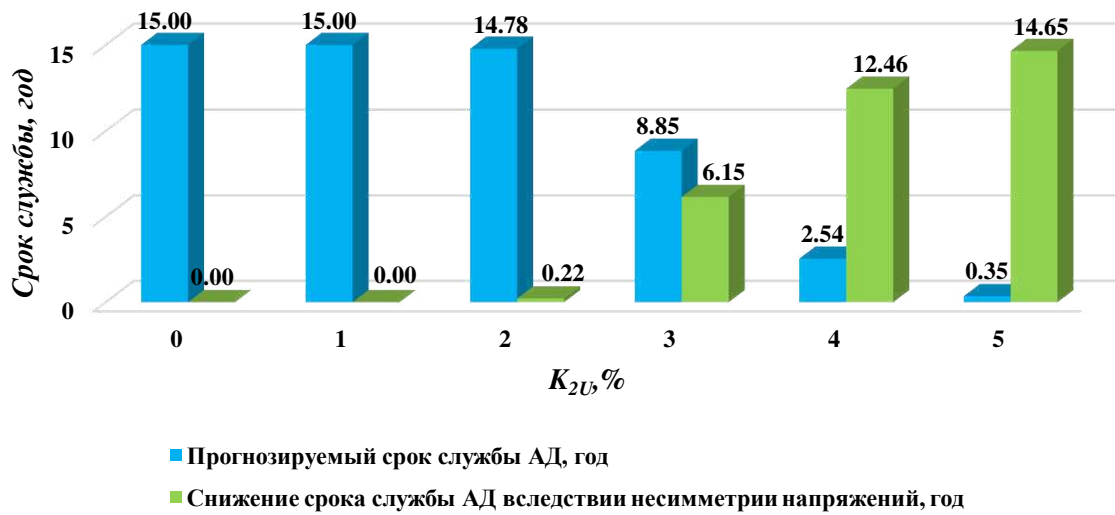


Рис.3.18 – Графическое отображение варьирования срока службы АД АИР132S4 P_n = 7,5 кВт от величины K_{2U}

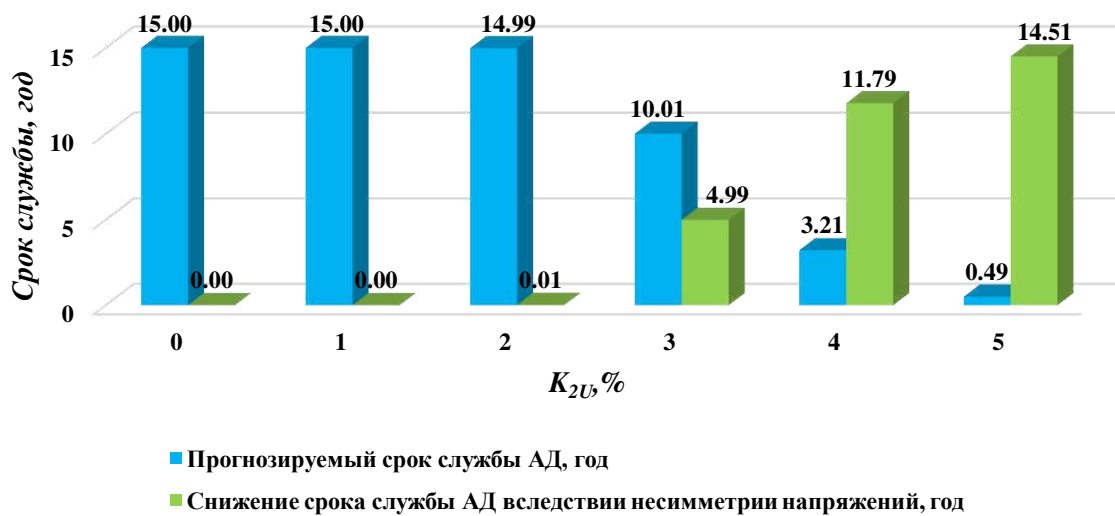


Рис.3.19 – Графическое отображение варьирования срока службы АД 4A250S4Y3 P_n = 75 кВт от величины K_{2U}

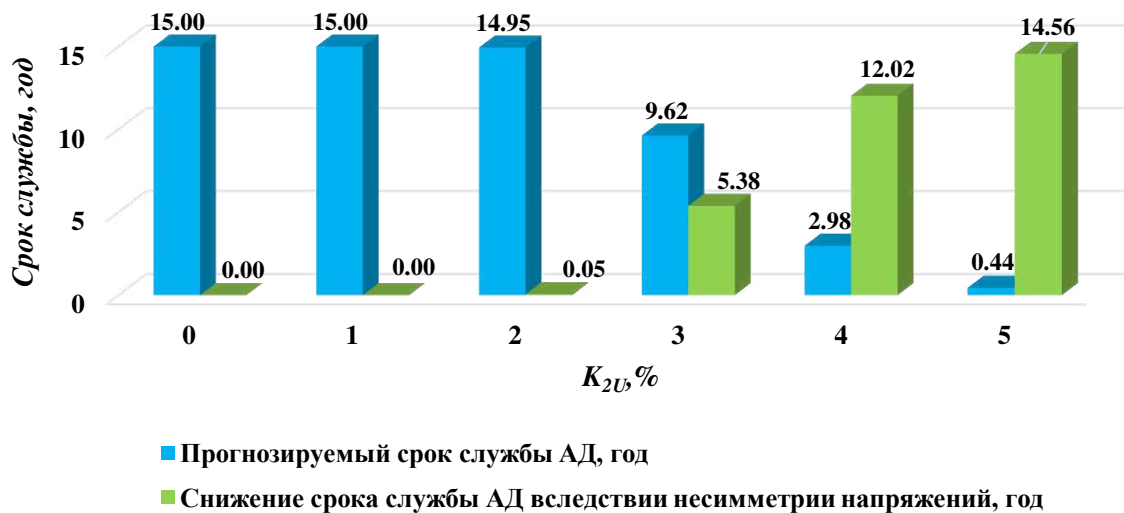


Рис.3.20 – Графическое отображение варьирования срока службы АД 4А315М4У3 $P_n = 200$ кВт от величины K_{2U}

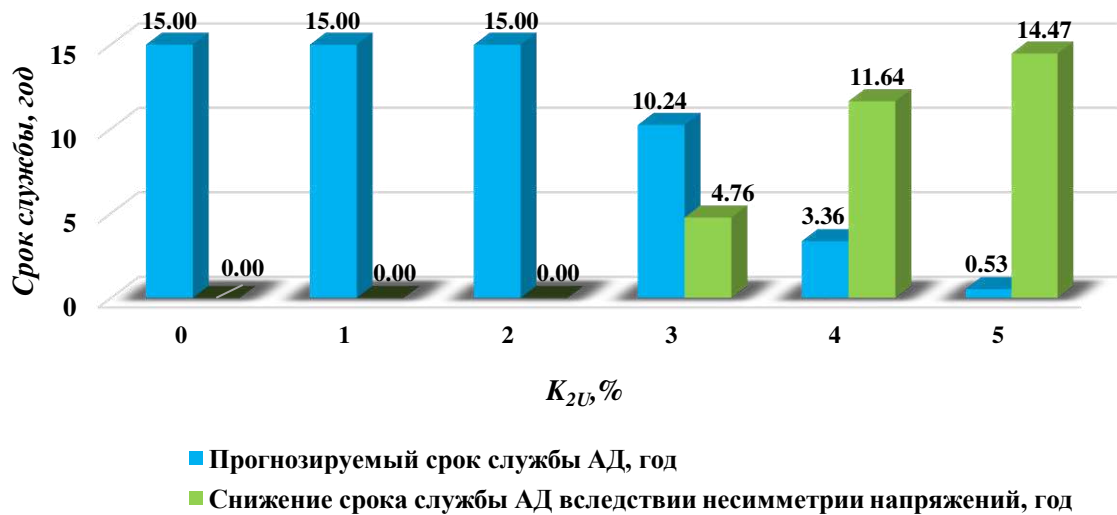


Рис.3.21– Графическое отображение варьирования срока службы АД АИР355М6 $P_n = 200$ кВт от величины K_{2U}

Изображённые на (рис. 3.16 – 3.21) диаграммы, представляют собой прямую зависимость варьирования срока службы АД от величины K_{2U} . Анализируя представленные диаграммы (рис. 3.16 – 3.21) отметим, что сокращение срока службы исследуемых электродвигателей отслеживается при значении $K_{2U} > 2\%$.

Важно заметить следующее, что:

– электродвигатели $P_n = 7,5$ кВт. При $K_{2U} = 3\%$ уменьшение срока службы электродвигателей серии 4А132S4У3 соответствует значению $\Delta Z' = 8,43$ года, серии АИР132S4 составило $\Delta Z' = 6,93$ года;

– *электродвигатели* $P_n = 75$ кВт. При $K_{2U} = 3\%$ уменьшение срока службы электродвигателей серии 4A250S4Y3 соответствует значению $\Delta Z' = 6,15$ года, серии АИР250S4 составило $\Delta Z' = 4,99$ года;

– *электродвигатели* $P_n = 200$ кВт. При $K_{2U} = 3\%$ уменьшение срока службы электродвигателей серии 4A315M4Y3 соответствует значению $\Delta Z' = 5,38$ года, серии АИР355M6 составило $\Delta Z' = 4,76$ года.

Значительное изменение срока службы АД происходит при $K_{2U} = 4\%$. Отметим, что:

– *электродвигатели* $P_n = 7,5$ кВт. При $K_{2U} = 4\%$ уменьшение срока службы электродвигателя серии 4A132S4Y3 составило $\Delta Z' = 13,48$ года, электродвигателя серии АИР132S4 $\Delta Z' = 12,85$ года;

– *электродвигатели* $P_n = 75$ кВт. При $K_{2U} = 4\%$ уменьшение срока службы электродвигателя серии 4A250S4Y3 составило $\Delta Z' = 12,46$ года, электродвигателя серии АИР250S4 $\Delta Z' = 11,79$ года;

– *электродвигатели* $P_n = 200$ кВт. При $K_{2U} = 4\%$ уменьшение срока службы электродвигателя серии 4A315M4Y3 составило $\Delta Z' = 12,02$ года, электродвигателя серии АИР355M6 $\Delta Z' = 11,64$ года.

Исходя из вышеуказанных результатов исследования необходимо подчеркнуть следующее, что при влиянии несимметрии напряжений наблюдается существенное изменение срока службы электродвигателей.

Как известно [27], заводом-изготовителем установлен нормативный срок службы АД, составляющий 15 лет, следовательно, прогнозируемый (остаточный) срок службы электродвигателей составляет:

– *электродвигатели* $P_n = 7,5$ кВт. При $K_{2U} = 3\%$ прогнозируемый (остаточный) срок службы электродвигателя серии 4A132S4Y3 соответствует значению $Z' = 6,57$ года, для электродвигателя серии АИР132S4 составил $Z' = 8,07$ года;

– *электродвигатели* $P_n = 75$ кВт. При $K_{2U} = 3\%$ прогнозируемый (остаточный) срок службы электродвигателя серии 4A250S4Y3 соответствует

значению $Z' = 8,85$ года, для электродвигателя серии АИР250S4 составил $Z' = 10,01$ года;

– электродвигатели $P_n = 200$ кВт. При $K_{2U} = 3\%$ прогнозируемый (остаточный) срок службы электродвигателя серии 4А315М4У3 соответствует значению $Z' = 9,62$ года, для электродвигателя серии АИР355М6 составил $Z' = 10,24$ года.

Динамику варьирования, прогнозируемого (остаточного) срока службы электродвигателей от K_{2U} наглядно отобразим на диаграммах (рис.3.22 – 3.24).

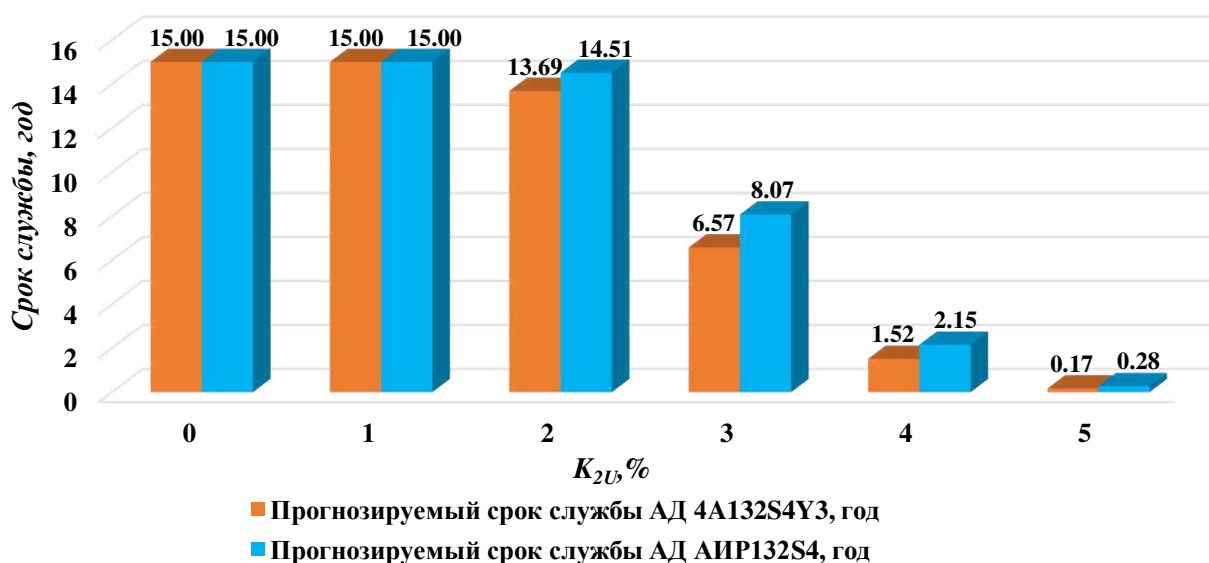


Рис.3.22 – Графическое отображение сравнения срока службы АД 4А132S4У3, АИР132S4 $P_n = 7,5$ кВт от величины K_{2U}

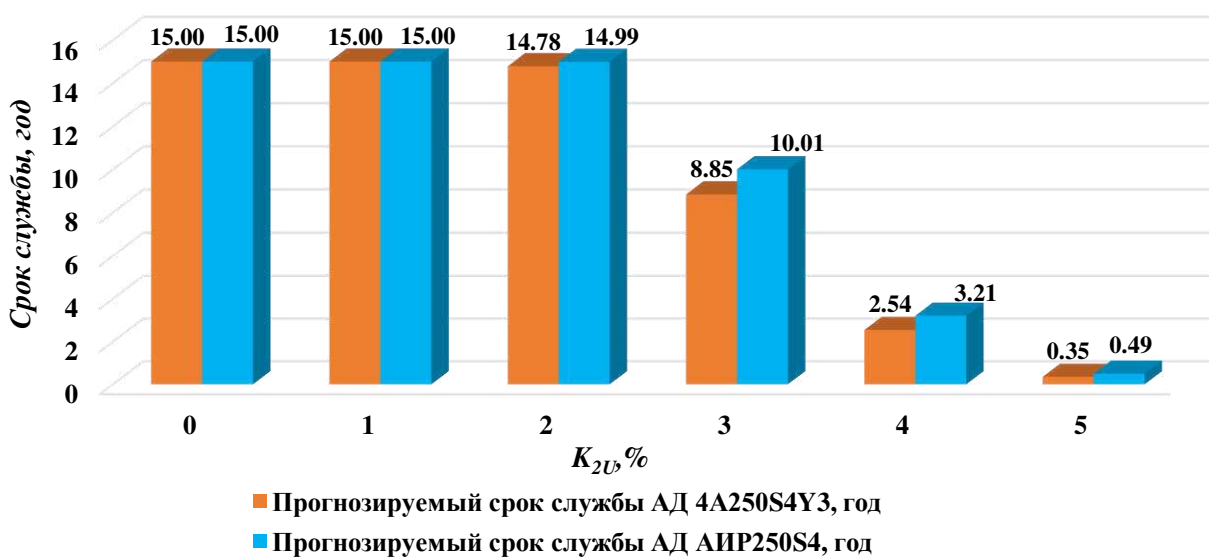


Рис.3.23 – Графическое отображение сравнения срока службы АД 4А250S4У3, АИР250S4 $P_n = 75$ кВт от величины K_{2U}

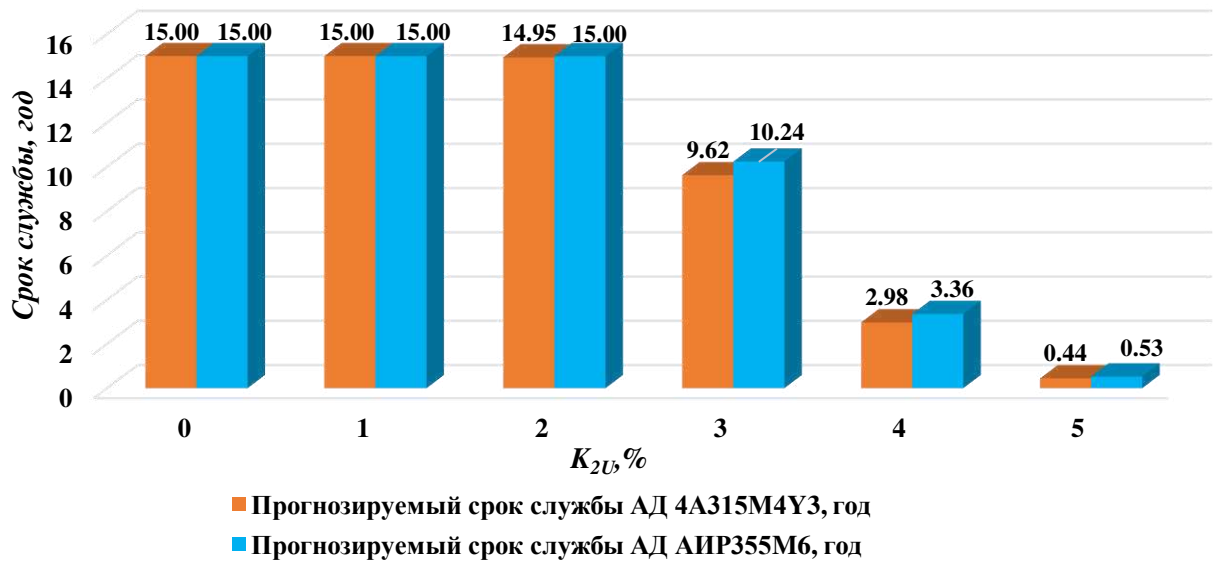


Рис.3.24 – Графическое отображение сравнения срока службы АД 4А315М4У3, АИР355М6 $P_H = 200$ кВт от величины K_{2U}

Анализируя изображённые на (рис.3.22 – 3.24) диаграммы отметим следующее, что разные по мощности одной той же серии АД подвержены влиянию несимметрии напряжений в разной степени. Заметим, что снижение срока службы электродвигателей серии 4А при величине $K_{2U} = 3\%$ составляет соответственно, АД серии 4А132S4Y3 с $P_H = 7,5$ кВт $\Delta Z' = 8,43$ года; 4А250S4Y3 с $P_H = 75$ кВт $\Delta Z' = 6,15$ года; 4А315М4Y3 с $P_H = 200$ кВт $\Delta Z' = 5,38$ года. Стоит отметить, что снижение срока службы электродвигателей серии АИ при величине $K_{2U} = 3\%$ составляет соответственно, АД серии АИР132S4 с $P_H = 7,5$ кВт $\Delta Z' = 6,93$ года; АИР250S4 с $P_H = 75$ кВт $\Delta Z' = 4,99$ года; АИР355М6 с $P_H = 200$ кВт $\Delta Z' = 4,76$ года. В результате, отслеживается следующая тенденция, что наибольшему влиянию K_{2U} подвержены электродвигатели малой мощности, в свою очередь воздействие несимметрии напряжений снижается при увеличении мощности АД.

Используя формулу (3.25) определим отношение z к наработке при ранее рассчитанном прогнозируемом сроке службы АД. Соответственно, исходя из нормативного срока службы электродвигателя равного $Z = 15$ лет при $T = 40000$ часов наработки получим следующее выражение:

$$z' = Z'/Z \cdot T \quad (3.27)$$

Рассмотрим динамику изменения значений z' при различных величинах K_{2U} :

– электродвигатели $P_n = 7,5$ кВт. Прогнозируемый (остаточный) срок службы электродвигателя серии 4A132S4Y3 при $K_{2U} = 3\%$ составляет $z' = 17520$ часов, при $K_{2U} = 4\%$ $z' = 4053$ часов; электродвигателя серии АИР132S4 при $K_{2U} = 3\%$ составляет $z' = 21520$ часов, при $K_{2U} = 4\%$ $z' = 5733$ часов;

– электродвигатели $P_n = 75$ кВт. Прогнозируемый (остаточный) срок службы электродвигателя серии 4A250S4Y3 при $K_{2U} = 3\%$ составляет $z' = 23600$ часов, при $K_{2U} = 4\%$ $z' = 6773$ часов; электродвигателя серии АИР250S4 при $K_{2U} = 3\%$ составляет $z' = 26693$ часов, при $K_{2U} = 4\%$ $z' = 8560$ часов;

– электродвигатели $P_n = 200$ кВт. Прогнозируемый (остаточный) срок службы электродвигателя серии 4A315M4Y3 при $K_{2U} = 3\%$ составляет $z' = 25653$ часов, при $K_{2U} = 4\%$ $z' = 7947$ часов; электродвигателя серии АИР355M6 при $K_{2U} = 3\%$ составляет $z' = 27306$ часов, при $K_{2U} = 4\%$ $z' = 8960$ часов.

Анализ результатов исследования показал, что с возрастанием K_{2U} , наблюдается уменьшение срока службы АД. При значении $K_{2U} = 3\%$ срок службы электродвигателя 4A132S4Y3 с $P_n = 7,5$ кВт сокращается на $\Delta z' = 22480$ часов; 4A250S4Y3 с $P_n = 75$ кВт $\Delta z' = 16400$ часов; 4A315M4Y3 с $P_n = 200$ кВт $\Delta z' = 14347$ часов; АИР132S4 с $P_n = 7,5$ кВт сокращается на $\Delta z' = 18480$ часов; АИР250S4 с $P_n = 75$ кВт $\Delta z' = 13307$ часов; АИР355M6 с $P_n = 200$ кВт $\Delta z' = 12694$ часов относительно номинального срока службы. Отметим, что наименьшему воздействию подвержены электродвигатели большей мощности. Кроме того, необходимо подчеркнуть, что низковольтные АД серии АИ обладают большей устойчивостью к воздействию несимметрии напряжений, чем АД серии 4А.

Основываясь на полученные результаты варьирования срока службы низковольтных АД от величины параметра K_{2U} , рассмотрим динамику изменения фактического остаточного срока службы электродвигателей. Согласно [137], фактический остаточный срок службы электродвигателя ($T_{ф.ост}$) – это срок службы АД в конкретных условиях эксплуатации с момента начала эксплуатации до перехода в предельное состояние (выхода из строя), определяемый по формуле:

$$T_{ф.ост} = Z - \Delta Z' \quad (3.28)$$

Стоит заметить, что, внедряя технические мероприятия по симметрированию напряжений в электрической сети стремимся приблизить срок службы электродвигателей к нормативному.

Выполним расчёт фактического остаточного срока службы электродвигателя 4A132S4Y3 с $P_n = 7,5$ кВт.

С целью корректного анализа изменения фактического остаточного срока АД необходимо провести оценку величины $T_{ф.ост}$ при различных условиях эксплуатации. Варианты условий эксплуатации, следующие:

а) условие 1 – до симметрирования (утяжелённый режим работы АД в условиях несимметрии, при значениях $K_{2U} = 3\%$ и $K_{2U} = 4\%$),

б) условие 2 – после симметрирования (режим работы АД близкий к нормативному, при значении $K_{2U} = 0\%$).

Соответственно, при $K_{2U} = 0\%$ $T_{ф.ост} (0\%) = 15$ лет.

Фактический остаточный срок службы электродвигателя определим согласно выражениям:

$$\Delta T_{ф.ост} (3\%) = T_{ф.ост} (0\%) - T_{ф.ост} (3\%) \quad (3.29)$$

$$\Delta T_{ф.ост} (4\%) = T_{ф.ост} (0\%) - T_{ф.ост} (4\%) \quad (3.30)$$

Исходя из (3.28) получим следующие значения:

при $K_{2U} = 3\%$ $T_{ф.ост} (3\%) = 6,57$ года

при $K_{2U} = 4\%$ $T_{ф.ост} (4\%) = 1,52$ года

Тогда увеличение фактического остаточного срока службы электродвигателя 4A132S4Y3 с $P_n = 7,5$ кВт после симметрирования составит:

$$\Delta T_{ф.ост} (3\%) = T_{ф.ост} (0\%) - T_{ф.ост} (3\%)$$

$$\Delta T_{ф.ост} (3\%) = 15 - 6,57 = 8,43 \text{ лет}$$

$$\Delta T_{ф.ост} (4\%) = T_{ф.ост} (0\%) - T_{ф.ост} (4\%)$$

$$\Delta T_{ф.ост} (4\%) = 15 - 1,52 = 13,48 \text{ лет}$$

Алгоритм вычисления $\Delta T_{ф.ост}$ аналогичен для остальных электродвигателей.

Обоснование вывода уточнённой формулы. Обоснованность корректировки уточнённой формулы (3.25) 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 (3.17) и уточненной формулы (3.25).

В результате анализа материалов эксплуатации АД получена информация изменения среднего срока службы электродвигателей при различных значениях параметра K_{2U} . Средний срок службы низковольтных асинхронных электродвигателей при $K_{2U} = 2\%$ составил $Z' = 13,7$ года; при $K_{2U} = 3\%$ составил $Z' = 6,6$ года; при $K_{2U} = 4\%$ составил $Z' = 3,5$ года.

Результаты исследования изменения срока службы АД представлены на (рис.3.25).

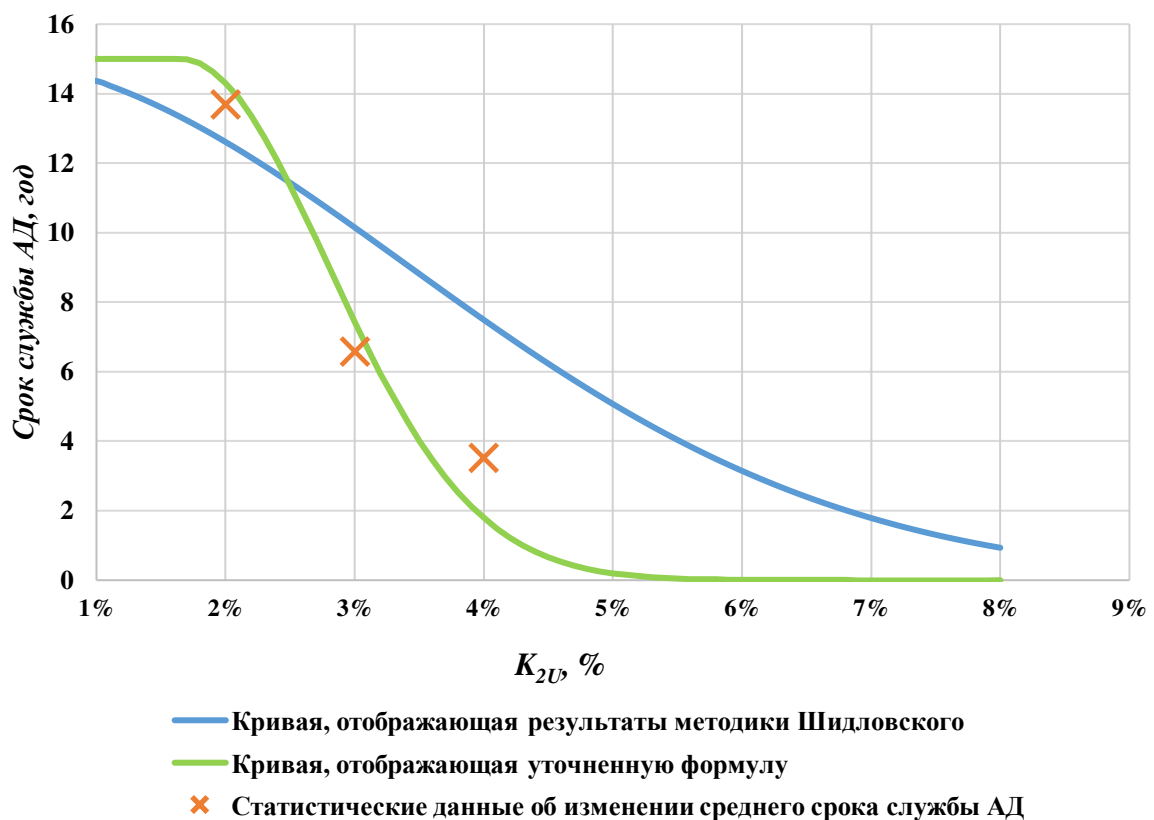


Рис. 3.25 – Результаты исследования изменения срока службы АД с наложенными экспериментальными данными

Качество выражений (3.17), (3.25) оценивалось по коэффициенту корреляции Пирсона (r), среднеквадратической ошибке (RMSE) и средней абсолютной ошибке (MAE). Результаты расчётов сведены в (табл. 3.8).

Анализ расчётов (табл. 3.8) показывает, что уточнённая формула (3.25) обладает более высоким уровнем корреляционной связи с экспериментальными данными, а также обладает меньшей ошибкой вычислений, как в среднеквадратическом, так и в абсолютном выражении.

Таблица 3.8 – Показатели качества вычислений

Формула зависимости	r	RMSE	MAE
$z = e^{[-280(1,55 \cdot K_{2U}^2) + 1,39 \sum_{v=2}^{\infty} \frac{U_v^2}{v\sqrt{v}}]} \quad (3.17)$	0,969	3,14	2,88
$z = e^{[-280(13,73 \cdot (K_{2U} - K_{2U_{дон}})^2)]} \quad (3.25)$	0,985	1,17	1,07

Полученные результаты позволяют сделать вывод о корректности внесенных изменений в формулу (3.25), а также необходимости перехода к (3.25) в случае оценки изменения срока службы АД в условиях неперемежающейся несимметрии.

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 технико-экономическим анализом целесообразности принятого решения, особенностями производственного процесса предприятия. Исходя из полученных данных допустимой величины K_3 для АД средства симметрирования вводятся при достижении $K_{2U} = 1,3\%$. В случае если K_{2U} превышает данное значение необходимо снижение загрузки АД. Например, для АД 4A132S4Y3 с $P_n = 7,5$ кВт при $K_{2U} = 3\%$, необходимо снизить загрузку на 50%; АД АИР132S4 с $P_n = 7,5$ кВт при $K_{2U} = 3\%$, необходимо снизить

загрузку на 46%; АД 4А250S4У3 с $P_n = 75$ кВт при $K_{2U} = 3\%$, необходимо снизить нагрузку на 45%; АД АИР250S4 с $P_n = 75$ кВт при $K_{2U} = 3\%$, необходимо снизить нагрузку на 41%; для 4А315М4У3 с $P_n = 200$ кВт при $K_{2U} = 3\%$, необходимо снизить нагрузку на 35%, АД АИР355М6 с $P_n = 200$ кВт при $K_{2U} = 3\%$, необходимо снизить нагрузку на 32%. В случае, если технологический процесс предприятия и приводные механизмы, подключенные к АД, позволяют снизить нагрузку, то такой способ может быть более экономически выгоден в краткосрочном периоде работы производства, чем установка средств симметрирования либо приобретение более мощных АД;

3) при проектировании ЭТК, содержащих электродвигательную нагрузку, необходимо учитывать влияние рекомендуемых в условиях эксплуатации АД величин K_{2U} , K_3 . Благодаря чему повысится эффективность работы асинхронных электродвигателей и ЭТК в целом.

Необходимо отметить, что надёжность АД напрямую зависит от уровня воздействия внешних факторов. В связи с чем, возникает вопрос о необходимости разработки технических мероприятий, ориентированных на обеспечение длительной безаварийной эксплуатации электродвигателей в электротехническом комплексе промышленных предприятий.

3.5. Выводы по третьей главе

1. Экспериментальные исследования КЭЭ позволили определить характер несимметрии напряжений в реальных условиях эксплуатации систем электроснабжения Забайкальского края. Несимметрия напряжений, в исследуемых сетях региона, имеет постоянно действующий характер.

Статистический метод анализа экспериментальных данных уровней напряжения в электрических сетях 0,4 кВ ЭЭС Забайкальского края, позволил определить закон распределения K_{2U} и его параметры. Массив значений K_{2U} соответствует логарифмически нормальному распределению теории вероятностей,

что подтверждено проведённой проверкой достоверности установленного закона распределения. Рассчитана величина вероятности, с которой K_{2U} входит в определённый рассматриваемый предел, в соответствии с нормами ГОСТ 32144 – 2013. Проведённые исследования характеризуют недопустимые значения параметра K_{2U} , приводящие к потенциальному технологическому риску отказов эксплуатируемого электрооборудования.

2. Экспериментальные исследования электродвигателей в разнообразных режимах работы выполнены используя сформированную имитационную модель на основе пакета «SimPowerSystems» в среде MATLAB/Simulink. На основании результатов компьютерного моделирования получены графические отображения фазных токов АД (серии 4А и АИ) в зависимости от эксплуатационных факторов – K_{2U} , K_3 и мощности электродвигателя. Проведённые эксперименты позволили выявить закономерности изменения исследуемых параметров АД в результате совместного воздействия эксплуатационных факторов.

3. Путём линейной аппроксимации данных, на основе результатов проведённого компьютерного моделирования, выведены аналитические зависимости тока АД (серии 4А и АИ) в наиболее загруженной фазе, характеризующие взаимосвязь эксплуатационных факторов.

4. Установлены рекомендуемые эксплуатационные режимы работы асинхронных электродвигателей серии 4А, АИ. Определены количественные значения эксплуатационных факторов, позволяющие обеспечить длительный безаварийный режим работы электродвигателей в электротехническом комплексе промышленных предприятий.

5. Выведена зависимость срока службы АД с учётом величины рекомендуемого значения $K_{2Uрек}$, позволяющая установить срок службы электродвигателей.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ МЕСТ УСТАНОВКИ СРЕДСТВ СИММЕТРИРОВАНИЯ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ С ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКОЙ

В рамках данной главы диссертационного исследования предлагается рассмотреть развитие методического подхода симметрирования напряжений посредством разработки алгоритмизированного метода определения рациональных мест установки симметрирующих устройств в электротехническом комплексе промышленных предприятий. Помимо этого, рассмотреть тенденции развития усовершенствованной методики технико-экономического обоснования внедрения устройств симметрирования в электротехническом комплексе с наличием электродвигательной нагрузки.

4.1. Разработка методики расчёта рационального размещения средств симметрирования в электротехническом комплексе с наличием электродвигательной нагрузки

Основной задачей исследования является разработка эффективных технических решений, снижающих уровень несимметрии напряжений до нормированных значений в ЭТК предприятий. Концепция такого подхода заключается в рациональном размещении технических средств симметрирования в зависимости от условий эксплуатации электродвигателей. Принятие решения по подбору наиболее предпочтительного средства симметрирования, помимо этого, определение экономически рационального места установки выбранного устройства, возможно реализовать основываясь на экспериментальные исследования ПКЭ в электрической сети, данных о потерях мощности в элементах ЭТК, при этом учитывая рекомендуемые эксплуатационные режимы работы АД.

На (рис. 4.1) наглядно проиллюстрирована архитектура построения

алгоритма расчёта рационального размещения устройств симметрирования в электротехническом комплексе с наличием электродвигательной нагрузки.

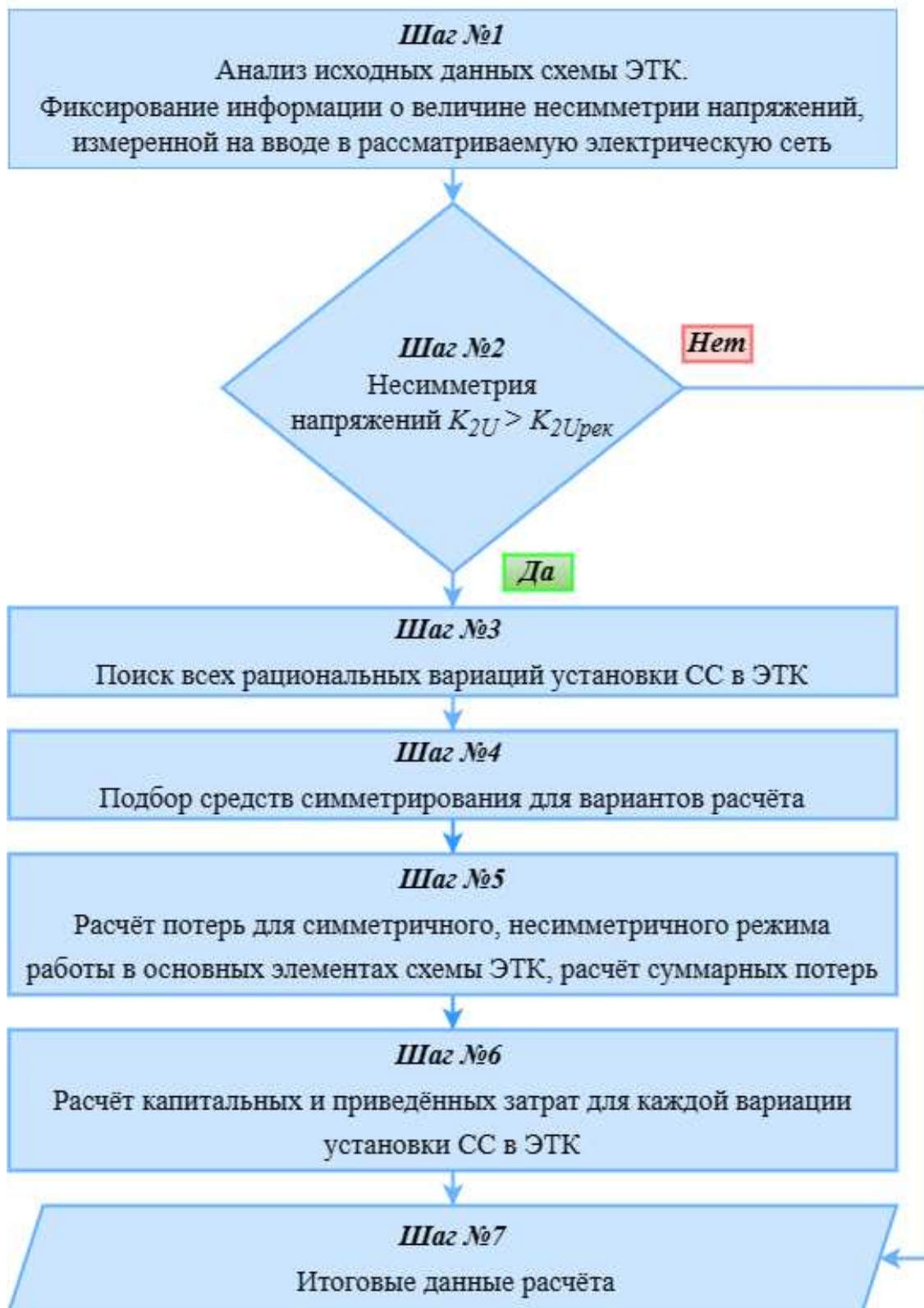


Рис. 4.1 – Архитектура построения алгоритма расчёта рационального размещения устройств симметрирования

Методика расчёта представлена в следующей последовательности:

1. **Шаг 1** – анализ исходных данных схемы ЭТК. Фиксирование информации о величине несимметрии напряжений, измеренной на вводе в рассматриваемую электрическую сеть.

Исходными данными являются:

- характеристика участка схемы ЭТК (общая информация об участке);
- параметры линий электропередачи (количество линий, длина линий; марка проводов и кабелей линий; нагрузка линий);
- параметры электродвигателей (количество и марка АД, значение рекомендуемой величины $K_{2U_{рек}}$);
- параметры силового трансформатора (количество и марка трансформатора);
- величина коэффициентов K_{2U} и K_{0U} в расчётной электрической сети;
- стоимость электроэнергии.

2. **Шаг 2** – переход к условию присутствия в электрической сети несимметрии напряжений. Если величина K_{2U} в расчётной схеме больше рекомендуемой величины $K_{2U_{рек}}$ АД, переходим к следующему шагу.

Если «НЕТ», завершение расчёта.

3. **Шаг 3** – поиск всех рациональных вариаций установки СС в ЭТК.

Рациональными местами установки СС являются такие варианты, как:

- а) первый вариант – представляет собой установку СС на вводе в ЭТК,
- б) второй вариант – представляет собой установку СС на каждую линию с электродвигательной нагрузкой.

В зависимости от конфигурации электрической схемы ЭТК может быть множество вариаций рациональных мест установки по первому и второму вариантам. В связи с этим, необходимо осуществить поиск всех существующих вариаций установки СС в ЭТК, примеры возможных конфигураций представлены на (рис. 4.2, 4.3). При этом, оптимальная вариация внедрения СС в электрическую схему ЭТК определяется показателем «Приведённые затраты».

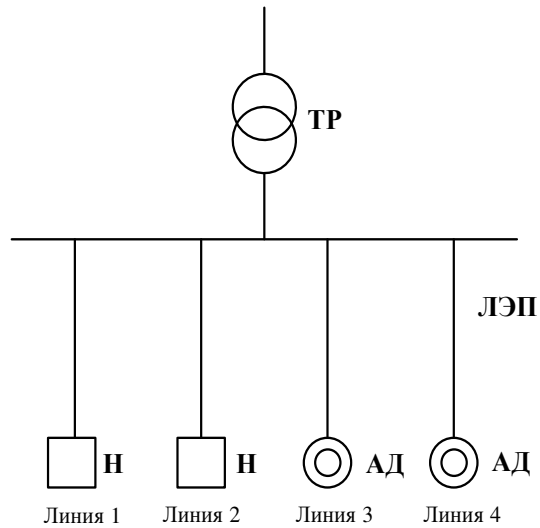


Рис. 4.2 – Пример первой конфигурации участка сети

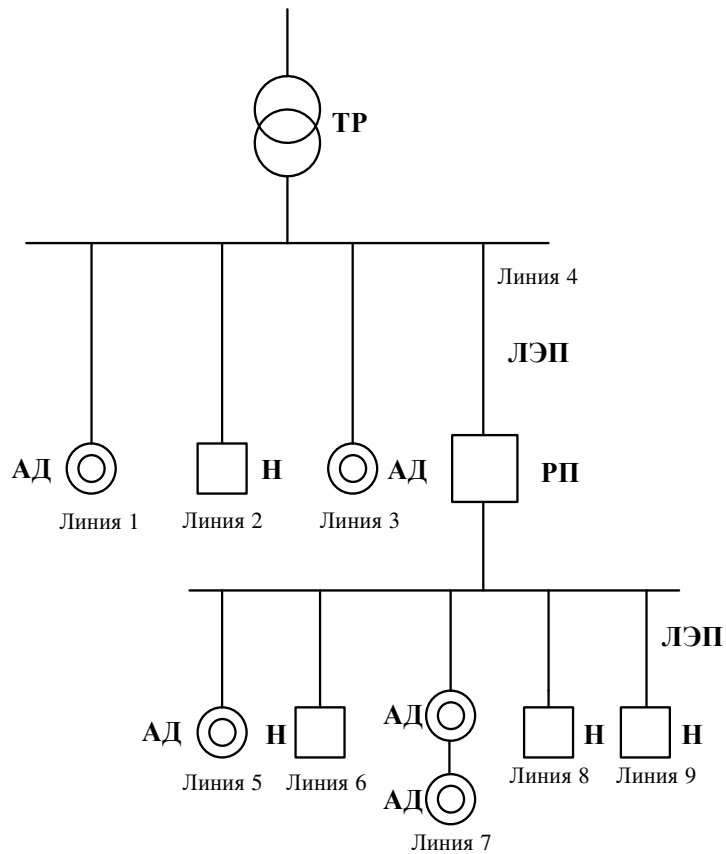


Рис. 4.3 – Пример второй конфигурации участка сети

4. **Шаг 4** – переходим к осуществлению подбора подходящих средств симметрирования. Основными параметрами при выборе СС являются мощность устройства, его стоимость, функциональные возможности, выражающиеся в симметрирующей способности устройства. В зависимости от данных параметров

производится расчёт различных вариантов расстановки СС.

Выбор параметров СС для каждой вариации мест установки определяется из условий:

а) в соответствии с первым вариантом – мощность симметрирующего устройства $P_{симм}$ должна быть больше или равна общей нагрузке S электрической схемы ЭТК:

$$P_{симм} \geq S \quad (4.1)$$

б) в соответствии со вторым вариантом – мощность симметрирующего устройства $P_{симм}$ должна быть больше или равна нагрузке P_i в каждой линии с электродвигателем:

$$P_{симм} \geq P_i \quad (4.2)$$

Стоит отметить, что выбор устройств симметрирования основан на особенностях конкретной сети, помимо этого, в зависимости от величины рекомендуемых значений $K_{2U_{рек}}$ для АД.

Из представленных в ЭТК электродвигателей выявляем наиболее чувствительный к несимметрии напряжений. Учитывая при этом, что величина K_{2U} после симметрирования не должна превышать величину $K_{2U_{рек}}$ наиболее чувствительного к несимметрии АД. По результатам вышеприведённых исследований рекомендуемых эксплуатационных режимов работы АД следует, что средства симметрирования вводятся при достижении $K_{2U_{рек}} \geq 1,3\%$.

5. Шаг 5 – расчёт потерь для симметричного, несимметричного режима работы в основных элементах ЭТК, расчёт суммарных потерь. Расчёт производится по исходным данным электрической схемы ЭТК.

Выполним расчёт потерь в основных элементах ЭТК.

Ток симметричного режима (ток прямой последовательности) определяется из выражения:

$$I_1 = S_{ts}/U_{ном}, \quad (4.3)$$

где S_{ts} – полная нагрузка подстанции, кВА;

$U_{ном}$ – номинальное напряжение сети, кВ.

Полная нагрузка подстанции (сумма нагрузок отдельных линий) определяется из выражения:

$$S_{ts} = \sum_{i=1}^n P_i, \quad (4.4)$$

где P_i – нагрузка линии, кВт;

n – количество линий.

$$P_i = \sum_{j=1}^{\text{count_dv}} P_{dv} + P_{line_i},$$

где P_{dv} – номинальная мощность электродвигателей, кВт;

P_{line_i} – нагрузка линий без электродвигателей, кВт;

count_dv – количество электродвигателей;

j – номер электродвигателя.

Выполним расчёт потерь для симметричного режима работы в основных элементах ЭТК.

Линии электропередачи. Потери мощности в линиях электропередачи определяются согласно формуле:

$$\Delta P_{лэп} = 3I_1^2 \cdot R_{\Phi}, \quad (4.5)$$

где I_1 – ток симметричного режима (ток прямой последовательности), А;

R_{Φ} – сопротивление фазного провода, Ом.

Величина сопротивления фазного провода определяется из выражения:

$$R_{\Phi} = r_0 \cdot L_i,$$

где r_0 – погонное сопротивление фазного провода, Ом/м;

L_i – длина линии, м.

Асинхронные низковольтные электродвигатели. Потери мощности в асинхронных электродвигателях определяются согласно формуле:

$$\Delta P_{ад} = \sum_{j=1}^{\text{count_dv}} P_{dv} \cdot \eta_i, \quad (4.6)$$

где P_{dv} – номинальная мощность электродвигателя, кВт;

count_dv – количество электродвигателей;

j – номер электродвигателя;

η_i – коэффициент полезного действия электродвигателя.

Трансформаторы. Потери активной $\Delta P'$ и реактивной $\Delta Q'$ мощностей для двухобмоточных трансформаторов определяются из выражения:

$$\Delta P' = \frac{\Delta P_k}{n} \cdot \left(\frac{S_{ts}}{S_{ном}} \right)^2 \quad (4.7)$$

$$\Delta Q' = \frac{U_k}{100 \cdot n} \cdot \frac{S_{ts}^2}{S_{ном}} \quad (4.8)$$

где $\Delta P_k, U_k, S_{ном}$ – паспортные данные отдельного трансформатора;

S_{ts} – полная нагрузка подстанции, кВА;

n – число однотипных трансформаторов на подстанции, работающих параллельно.

Выполним расчёт суммарных потерь для симметричного режима работы в основных элементах ЭТК.

Суммарные потери для симметричного режима работы определяются из выражения:

$$\Delta P_{сimm} = \sum_{i=1}^{n_line} \Delta P_{лэп} + \Delta P', \quad (4.9)$$

где n_line – количество линий;

i – номер линии;

$\Delta P_{лэп}$ – потери в линиях электропередачи, кВт;

$\Delta P'$ – потери активной мощности двухобмоточных трансформаторов, кВт.

Выполним расчёт дополнительных потерь для несимметричного режима работы в основных элементах ЭТК.

Линии электропередачи. Наличие в электрической сети различного типа несимметрии при расчёте дополнительных потерь мощности по отношению к симметричному режиму учитывается вводом коэффициента $K_{нес}$:

$$K_{нес} = 1 + K_{2I}^2 + K_{0I}^2 \cdot \left(1 + 3 \cdot \frac{R_H}{R_\Phi} \right), \quad (4.10)$$

где K_{2I}, K_{0I} – коэффициенты несимметрии токов по обратной и нулевой последовательности;

R_H, R_Φ – сопротивления нейтрального и фазного проводов, Ом.

Сопротивление нейтрального провода определяется из выражения:

$$R_H = r_0 \cdot L_i,$$

где r_0 – погонное сопротивление нейтрального провода, Омм;

L_i – длина линии, м.

Соответственно, выражение примет следующий вид:

$$\Delta P_{\text{доп.лэп}} = \Delta P_{\text{лэп}} \cdot K_{\text{нес}}, \quad (4.11)$$

где $\Delta P_{\text{доп.лэп}}$ – дополнительные потери в линиях электропередачи, кВт;

$\Delta P_{\text{лэп}}$ – потери в линиях электропередачи при симметричном режиме работы, кВт;

$K_{\text{нес}}$ – коэффициент наличия в электрической сети различного типа несимметрии.

Асинхронные низковольтные электродвигатели. Определение дополнительных потерь активной мощности в АД выполним согласно формуле:

$$\Delta P_{\text{доп.ад}} = 2,41 \cdot K_{\text{ад}} \cdot K_{2U}^2 \cdot P_H, \quad (4.12)$$

где $K_{\text{ад}}$ – коэффициент, учитывающий номинальные параметры электродвигателя, при расчётах принимается равным 1,85 [131].

Трансформаторы. Определение дополнительных потерь мощности в силовых трансформаторах выполним согласно формуле:

$$\Delta P_{\text{доп.тр}} = K_{2U}^2 \left(\Delta P_{xx} + \frac{\Delta P_{кз}}{U_K^2} \right), \quad (4.13)$$

где ΔP_{xx} – потери в режиме х.х., кВт;

$\Delta P_{кз}$ – потери в режиме к.з., кВт;

U_K – напряжение к.з., В.

Выполним расчёт суммарных потерь для несимметричного режима работы в основных элементах ЭТК.

Потери в несимметричном режиме состоят из двух составляющих: потери в симметричном режиме, дополнительные потери в несимметричном режиме. Следовательно, для несимметричного режима необходимо рассчитать только дополнительные потери, а потери в симметричном режиме достаточно вычислить

один раз для каждого основного элемента ЭТК.

Суммарные потери для несимметричного режима работы определяются из выражения:

$$\Delta P_{\text{несимм}} = \Delta P_{\text{симм}} + \sum_{i=1}^{n_{\text{line}}} \Delta P_{\text{доп.лэп}} + \sum_{j=1}^{n_{\text{dv}}} \Delta P_{\text{доп.ад}} + \Delta P_{\text{доп.тр}}, \quad (4.14)$$

где j – номер электродвигателя;

n_{dv} – количество электродвигателей;

$\Delta P_{\text{симм}}$ – потери для симметричного режима работы, кВт;

$\Delta P_{\text{доп.лэп}}$ – дополнительные потери в линиях электропередачи, кВт;

$\Delta P_{\text{доп.ад}}$ – дополнительные потери активной мощности в асинхронных электродвигателях, кВт;

$\Delta P_{\text{доп.тр}}$ – дополнительные потери мощности в силовых трансформаторах, возникаемые вследствие протекания токов обратной последовательности, кВт.

6. Шаг 6 – расчёт капитальных и приведённых затрат для каждой вариации установки СС в ЭТК.

Основным критерием оценки эффективности принимаемых решений при проектировании месторасположения технических СС в ЭТК принимается метод минимума приведенных затрат [132]. Сопоставление приведенных затрат по рассматриваемым вариантам и поиск их минимума позволяет определить наиболее рациональные, с технико-экономической точки зрения, места их установки и оптимальный состав электрооборудования.

Рассматриваемый метод относится к статистическим без учёта фактора времени. Благодаря своей простоте метод нашёл широкое применение в задачах и моделях, направленных на технико-экономическую оптимизацию проектных решений при большом количестве оптимизируемых параметров. Метод позволяет существенно сократить нагрузку на вычислительные мощности при сохранении адекватного результата технико-экономической оценки.

Использование метода минимума приведенных затрат в алгоритме расчёта рационального размещения устройств симметрирования в ЭТК также оправдано, поскольку позволит минимизировать количество исходных данных для алгоритма

расчёта с сохранением приемлемой точности.

Дополнительные потери без СС определяются из выражения:

$$\Delta S_{\text{допб}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{line}}} \Delta P_{\text{доп.лэп}} + \sum_{i=1}^{n_{\text{line}}} \sum_{j=1}^{n_{\text{dv}}} \Delta P_{\text{доп.ад}} + \Delta P_{\text{доп.тр}}, \quad (4.15)$$

при исходных значениях K_{2U} и K_{0U} .

Дополнительные потери со СС определяются из выражения:

$$\Delta S_{\text{дон}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{line}}} \Delta P_{\text{доп.лэп.сс}} + \sum_{j=1}^{n_{\text{dv}}} \Delta P_{\text{доп.ад.сс}} + \Delta P_{\text{доп.тр.сс}} \quad (4.16)$$

Дополнительные потери $\Delta S_{\text{дон}}$ рассчитываются для каждого варианта установки.

Капитальные затраты на СС определяются из выражения:

$$KЗ = K_{\text{сс}} + K_{\text{м}}, \quad (4.17)$$

где $K_{\text{сс}}$ – стоимость внедряемых технических средств симметрирования;

$K_{\text{м}}$ – стоимость дополнительных затрат, включающих в себя монтажные и наладочные работы, кроме того приобретение периферийных устройств (защитной, пусковой и регулирующей аппаратуры), доставка средств симметрирования.

Расчёт общей стоимости средств симметрирования определяется из выражения:

$$C = \sum_{k=1}^{k_d} C_d, \quad (4.18)$$

где C – общая стоимость установленных СС, руб;

C_d – стоимость каждого средства симметрирования, руб;

k_d – количество установленных СС.

Тогда капитальные затраты на СС:

$$KЗ = \sum_{k=1}^{k_d} C_d + K_{\text{м}}$$

Приведённые затраты на СС определяются из выражения:

$$ПЗ = E_n \cdot KЗ + \sum_{l=1}^q И_l, \quad (4.19)$$

где $ПЗ$ – приведенные затраты, тыс.руб;

$KЗ$ – капитальные затраты на СС, тыс.руб;

E_n – нормативный коэффициент капитальных вложений;

I_l – текущие издержки, тыс.руб.

7. **Шаг 7** – приводятся итоговые данные расчёта.

Выходными данными являются:

- суммарные потери для симметричного режима работы;
- дополнительные потери при несимметричном режиме работы (без средств симметрирования; при установке СС на вводе в ЭТК – 1 вариант; при установке симметрирующего устройства на линии с электродвигателями – 2 вариант);
- капитальные затраты (капитальные затраты – 1 вариант, капитальные затраты – 2 вариант);
- приведённые затраты (приведённые затраты – 1 вариант, приведённые затраты – 2 вариант).

Заключительным этапом методики является размещение СС в ЭТК. На основании анализа результатов расчёта выбираем наиболее рациональный вариант (наиболее экономически выгодное расположение СС в ЭТК). Вариация с наименьшим значением параметра «Приведённые затраты» будет являться оптимальной.

Разработанная методика расчёта является основой для реализации программного продукта рационального размещения устройств симметрирования в ЭТК с наличием электродвигательной нагрузки.

4.2. Программная реализация алгоритма расчёта рационального размещения средств симметрирования в электротехническом комплексе

Алгоритм расчёта рационального размещения технических средств симметрирования программно реализован на языке программирования С# в среде Microsoft Visual Studio 2012, с применением встраиваемой кроссплатформенной базы данных SQLite [133,134]. На (рис.4.4) наглядно проиллюстрирована обобщённая блок – схема алгоритма программы.

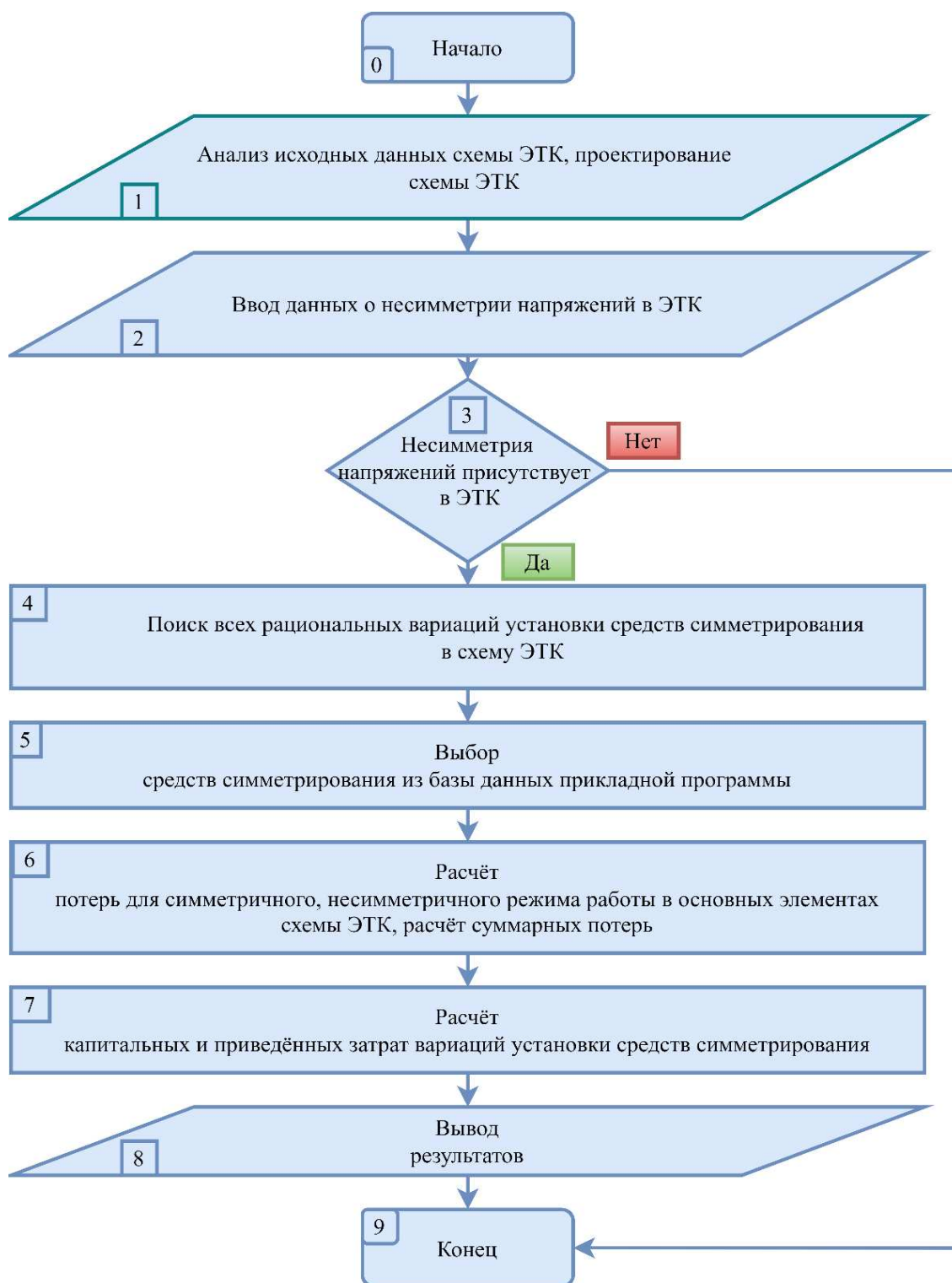


Рис. 4.4 – Архитектура построения алгоритма программы рационального размещения устройств симметрирования в ЭТК с наличием электродвигательной нагрузки

Разработанная программа обладает следующими функциональными возможностями: вводом и редактированием исходных, справочных и дополнительных данных об элементах схемы ЭТК, кроме того, графическим

построением топологии схемы электротехнического комплекса любой сложности. Программа реализует процедуру многовариантных расчётов установки и выбора оптимального состава технических СС в электротехническом комплексе, наглядно демонстрирует графическое отображение схем вариантов месторасположения СС на проектируемой электрической схеме ЭТК, и информацию технико-экономического содержания проектных решений.

Ключевой особенностью предлагаемого программного продукта является использование в алгоритме программы ранее полученного в исследованиях – рекомендуемого значения $K_{2U_{рек}}$ для асинхронных электродвигателей, главным образом, определяющего его допустимый эксплуатационный режим работы. Программа автоматически определяет $K_{2U_{рек}}$ электродвигателей, находящихся в исследуемом ЭТК, выявляя тем самым, чувствительный к несимметрии напряжений АД. В зависимости от величины $K_{2U_{рек}}$ самого чувствительного к несимметрии АД предусматриваются устройства симметрирования с величиной K_{2U} на выходе СС не более 1,3%.

Из этого следует, что на основании данных экспериментальных исследований ПКЭ исследуемого объекта и значениях $K_{2U_{рек}}$ для асинхронных электродвигателей выполняется автоматическое размещение средств симметрирования.

Важно отметить, что в программу заложена функциональная возможность – модификация параметров расчётной (проектируемой) схемы. Изменяя структуру расчётной схемы посредством замены СС (типа и их количества) возможно осуществить подбор оптимального состава средств симметрирования и предпочтительные места их установки с целью достижения максимальной симметрирующей способности при минимальных затратах.

Минимизация затрат достигается за счёт реализации в программе алгоритма технико-экономического сравнения вариантов по методу минимума приведенных затрат. Принятие решения, об наиболее эффективном варианте, основывается на сопоставлении технико-экономических показателей возможных вариантов.

Необходимым и важнейшим элементом разработанной программы является база данных средств симметрирования, в которую заложена информация о технических устройствах симметрирования, представленных в настоящее время на рынке электрооборудования.

База данных (БД) СС обновляемая и пользователь, в процессе выполнения проекта, имеет доступ для её изменения (дополнения и удаления параметров средств симметрирования). БД средств симметрирования содержит следующие устройства, приведённые в (табл.4.1).

Таким образом, при выполнении проектных процедур пользователь выбирает из БД прикладной программы средства симметрирования необходимые по – функциональным возможностям, мощности и стоимостным показателям.

Таблица 4.1 – Технические средства симметрирования, используемые в БД прикладной программы

Технические средства симметрирования				
Тип	Симметрирующие трансформаторы ТСТ2	Вольтодобавочные трансформаторы типа ТВМГ	Нормализаторы NORMEL серии ESSV-I	Трансформаторы серии ТМГСУ
Марка	ТСТ2 – 10	ТВМГ– 26/70	NORMEL ESSV-I	ТМГСУ – 25/10
	ТСТ2 – 16	ТВМГ– 52/125	3.200-050-02	ТМГСУ – 40/10
	ТСТ2 – 25	ТВМГ– 66/160	NORMEL ESSV-I	ТМГСУ – 63/10
	ТСТ2 – 40	ТВМГ– 105/250	3.200-080-02	ТМГСУ11–100/10
	ТСТ2 – 63		NORMEL ESSV-I	ТМГСУ11–160/10
	ТСТ2 – 100		3.200-130-02	ТМГСУ11–250/10
	ТСТ2 – 160		NORMEL ESSV-I	
	ТСТ2 – 200		3.200-160-02	
	ТСТ2 – 250		NORMEL ESSV-I	
	ТСТ2 – 300		3.200-205-02	
	ТСТ2 – 400			
	ТСТ2 – 630			
	ТСТ2 – 1000			

Исходя из вышеизложенного аргументируем следующее – реализованный программный продукт, как инструмент разработанного метода, предоставляет

возможность автоматизировать расчётные процедуры выявления рационального места установки технических СС в ЭТК предприятий, наглядно отображает места установки СС на проектируемой электрической схеме ЭТК, помимо этого, предоставляет информацию технико-экономического содержания мероприятий, направленных на обеспечение эффективного функционирования ЭТК с наличием электродвигательной нагрузки.

4.3. Апробация программы в действующем электротехническом комплексе Забайкальского края

Апробация программы проведена на примере электротехнического комплекса сельского поселения Таптугары Могочинского района Забайкальского края. Конфигурация электрической схемы рассматриваемого ЭТК наглядно проиллюстрирована на (рис.4.5).

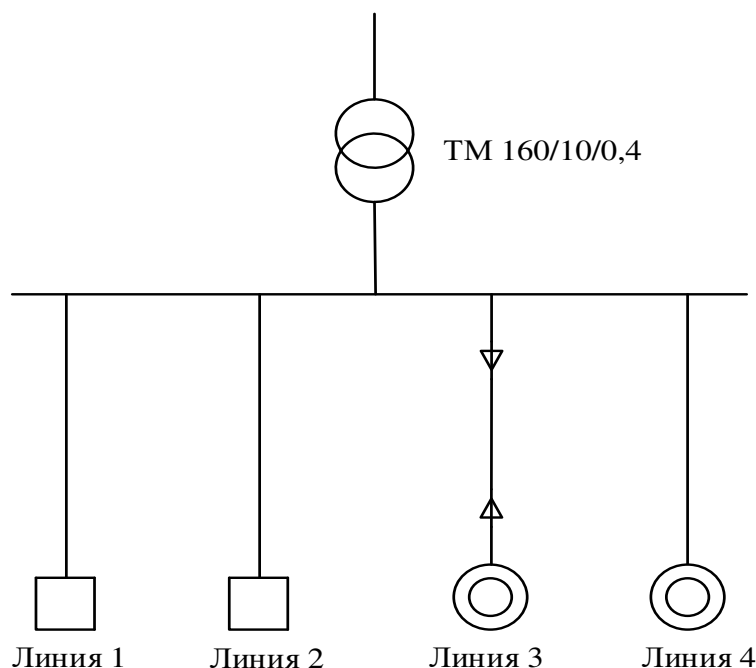


Рис. 4.5 – Электрическая схема ЭТК с. Таптугары

В процессе апробации программы использована исходная информация:

1) конфигурация электротехнического комплекса с. Таптугары, сведения о параметрах электропотребителей;

2) экспериментальные значения показателей качества электрической энергии в электрической сети 0,4 кВ с. Таптугары;

3) результаты исследований рекомендуемых эксплуатационных режимов работы низковольтных асинхронных электродвигателей (рекомендуемое значение $K_{2Uрек}$).

Проведённое инструментальное исследование ПКЭ в узлах электрической сети 0,4 кВ с. Таптугары выполнено сертифицированным прибором «Энергомонитор 3.3Т» в соответствии с действующим [3]. В ходе проведения эксперимента получены следующие значения коэффициентов – $K_{2U} = 4,65\%$, $K_{2I} = 5\%$, $K_{0I} = 4,6\%$.

Электрическая схема электротехнического комплекса с. Таптугары состоит из следующих элементов, приведённых в (табл. 4.2).

Таблица 4. 2 – Исходные данные электрической схемы ЭТК с.Таптугары

Элемент схемы	Мощность, кВА	Марка линии	Ток в линии, А	Длина линии, м	Потребители
Линия 1	30,4	АС 25	80	350	7 частных домов
Линия 2	49,4	АС 25	130	50	Детский сад, начальная школа, администрация, библиотека
Линия 3	20,9	АВВшв 4×50	55	70	Котельная с электродвигателями марки 4А132S4У3 с $P_n = 7,5$ кВт в количестве 2 штук; электродвигатель дымососа марки 4А80А2У3 с $P_n = 3$ кВт; электродвигатель вентилятора поддува марки 4А90L2У3 с $P_n = 1,5$ кВт
Линия 4	25	СИП 4×25	65,7	150	Две ленточные пилорамы с электродвигателями марки АИ132М4 с $P_n = 11$ кВт
ТП	160	-	330,7	-	-

Основным критерием при разработке технических решений, направленных на снижение уровня несимметрии напряжений, вместе с тем, обеспечение эффективного и стабильного функционирования электротехнического комплекса

содержащего электродвигательную нагрузку является рекомендуемое значение $K_{2Uрек}$.

При рассмотрении возможных вариаций установки СС исследуемой схемы участка системы электроснабжения с. Таптугары возможно предусмотреть две вариации мест установок: по первому варианту – на вводе в ЭТК; по второму варианту – на каждую линию с электродвигательной нагрузкой.

Участок схемы ЭТК с. Таптугары состоит из четырёх линий, две из которых, линии – 3,4 содержат электродвигательную нагрузку (асинхронные электродвигатели 4А132S4Y3 с $P_H = 7,5$ кВт и АИ132М4 с $P_H = 11$ кВ, $n = 1500$ об/мин; 4А80А2Y3 с $P_H = 3$ кВт и 4А90L2Y3 с $P_H = 1,5$ кВт, $n = 3000$ об/мин). В (табл. 4.3) представлены результаты исследования рекомендуемых величин $K_{2Uрек}$ для АД 4А132S4Y3 $P_H = 7,5$ кВт, 4А80А2Y3 $P_H = 3$ кВт, 4А90L2Y3 $P_H = 1,5$ кВт, АИ132М4 $P_H = 11$ кВ используемых в процессе тестирования программы.

Таблица 4.3 – Таблица рекомендуемых значений $K_{2Uрек}$

Марка электродвигателя	Мощность электродвигателя, P_H , кВт	Рекомендуемая величина $K_{2Uрек}$, %
4А132S4Y3	7,5	1,28
АИ132М4	11	1,37
4А80А2Y3	3	1,27
4А90L2Y3	1,5	1,26

Анализируя, представленные на (рис.4.6) результаты расчёта программой, отметим, что согласно показателю «Приведённые затраты» наиболее экономически предпочтительным вариантом размещения устройств симметрирования в ЭТК является индивидуальная установка ТСТ2 с $S_H = 25$ кВА на линии с электродвигательной нагрузкой.

Разработанный методический подход, на основе программного обеспечения, демонстрирует эффективность проектных решений нормализации напряжений. Так, применяя симметрирующие трансформаторы ТСТ2 с $S_H = 25$ кВА на примере

схемы электротехнического комплекса с. Таптугары, устранено искажение величины показателя K_{2U} .

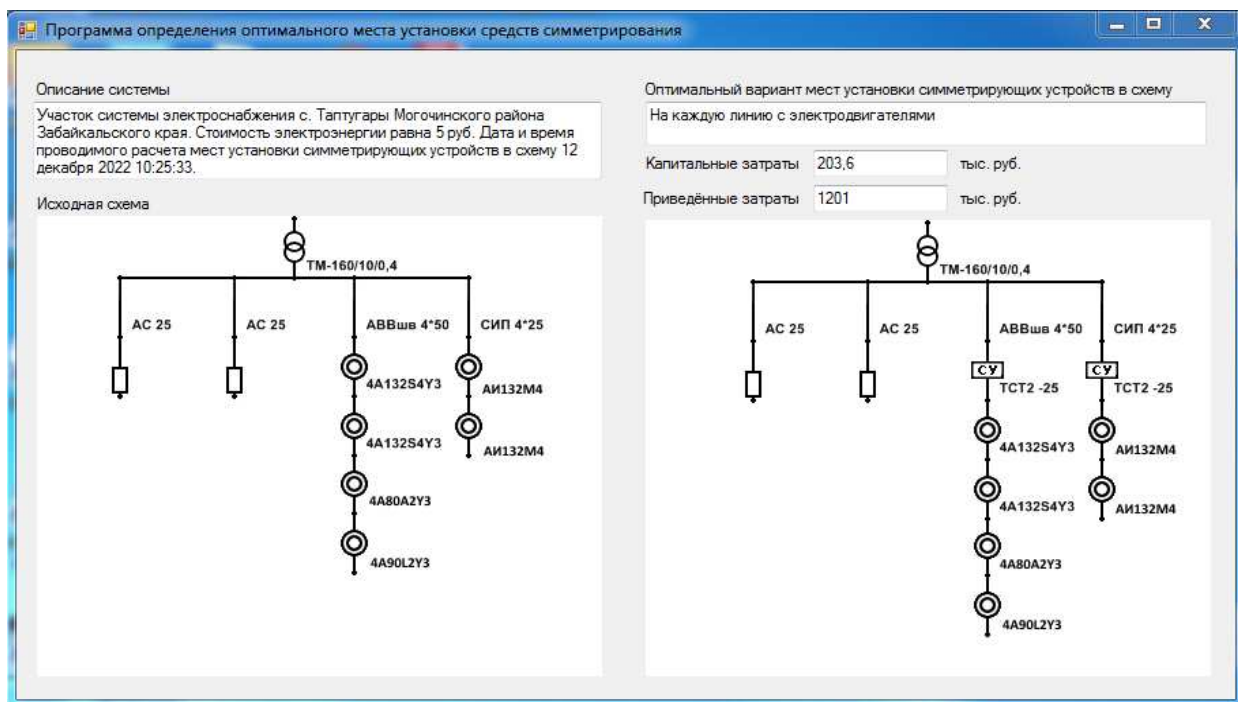


Рис. 4.6 – Результаты расчёта программы

Симметрирующие трансформаторы показали достаточную стабильность коррекции напряжения, снизили уровень несимметрии напряжений до нормированных значений, обеспечивающих длительную безаварийную эксплуатацию электрооборудования.

4.4. Реализация усовершенствованной методики технико-экономического обоснования внедрения технических средств симметрирования в электротехническом комплексе с наличием электродвигательной нагрузки

Методика расчёта ориентирована на комплексную оценку эффективности реализации технических мероприятий по симметрированию напряжений в электрической сети. В методике рассматриваются составляющие технико-экономического эффекта, кроме того, критерии оценки эффективности.

В разделе 4.3 настоящей работы выполнена процедура выбора рациональных

мест установки технических средств симметрирования в ЭТК. На основе полученных результатов проведем расчёт технико-экономического эффекта применения симметрирующих трансформаторов ТСТ2 $S_n = 25$ кВА, помимо этого, дополнительные варианты внедрения устройств симметрирования с рассмотрением возможных вариаций мест установок: по первому варианту – на вводе в ЭТК; по второму варианту – на каждую линию с электродвигательной нагрузкой в исследуемой схеме.

Рассмотрим 6 инвестиционных проектов внедрения технических средств симметрирования, варианты проектов приведены в (табл.4.4).

Таблица 4.4 – Варианты инвестиционных проектов

Вид технического средства симметрирования, место установки	Вариант проекта
Установка симметрирующего трансформатора ТСТ2 $S_n = 160$ кВА на вводе в ЭТК (1 вариант размещения)	1
Установка симметрирующих трансформаторов ТСТ2 $S_n = 25$ кВА на каждую линию с электродвигателями (2 вариант размещения)	2
Установка трансформатора ТМГСУ11 – 160/10 $S_n = 160$ кВА на вводе в ЭТК (1 вариант размещения)	3
Установка вольтодобавочных трансформаторов ТВМГ – 26/70 $S_n = 26$ кВА на каждую линию с электродвигателями (2 вариант размещения)	4
Установка нормализатора напряжения NORMEL ESSV-I 3,200-205-06 $S_n = 135$ кВА на вводе в ЭТК (1 вариант размещения)	5
Установка нормализаторов напряжения NORMEL ESSV-I 3,200-050-02 $S_n = 35$ кВА на каждую линию с электродвигателями (2 вариант размещения)	6

В ходе выполнения исследования, используя методику расчёта необходимо оценить эффективность и целесообразность разрабатываемых проектных решений, для этого потребуется решить основные задачи:

- оценить затраты на реализацию проектов;
- определить составляющие эффекта за счёт внедрения технических средств симметрирования в ЭТК;
- рассчитать показатели экономической эффективности вариантов проекта;

– провести анализ показателей экономической эффективности проектных решений для принятия оптимального и эффективного инвестиционного проекта.

Для выполнения расчётов принята следующая информация, в (табл.4.5) приведена стоимость технических средств симметрирования от компаний ОАО «МЭТЗ» им. В.И.Козлова [95], ООО «СКЭ-ЭЛЕКТРО» [96], ООО «Энергосберегающие технологии» [99], ООО «Компания Интер Электро» [100], АО «Тульский завод трансформаторов» [101].

Шаг 1. Выполним оценку затрат на реализацию проектов.

Капиталовложения для каждого варианта инвестиционного проекта приведены в (табл.4.5), в данном случае это первоначальные затраты, другие факторы, например, затраты на ежегодные эксплуатационные издержки, амортизационные отчисления считаем равноценными.

Таблица 4.5 – Расчёт текущих затрат на внедрение технических устройств симметрирования

Наименование затрат	Затраты, руб.
Покупка симметрирующего трансформатора ТСТ2 S _н = 160 кВА	274000
Периферийные устройства	20000
Монтаж, наладка средств симметрирования	20000
Доставка Санкт-Петербург-Могоча	30000
Итого по первому варианту	344000
Покупка симметрирующего трансформатора ТСТ2 S _н = 25 кВА (2 шт)	156600
Периферийные устройства	10000
Монтаж, наладка средств симметрирования	17000
Доставка Санкт-Петербург-Могоча	20000
Итого по второму варианту	203600
Покупка ТМГСУ11 – 160/10 S _н = 160 кВА	313200
Периферийные устройства	140000
Монтаж, наладка средств симметрирования	150000
Доставка Москва-Могоча	25000
Итого по третьему варианту	628200
Покупка ТВМГ 26/70-380 S _н = 26 кВА (2 шт)	472800

Продолжение Таблицы 4.5

Периферийные устройства	80000
Монтаж, наладка средств симметрирования	70000
Доставка Москва-Могоча	55000
Итого по четвёртому варианту	677800
Покупка NORMEL ESSV-I 3,200-205-06 S _н = 135 кВА	325000
Периферийные устройства	17000
Монтаж, наладка средств симметрирования	25000
Доставка Новосибирск-Могоча	16000
Итого по пятому варианту	383000
Покупка NORMEL ESSV-I 3,200-050-02 S _н = 35 кВА (2 шт)	310000
Периферийные устройства	16000
Монтаж, наладка средств симметрирования	17000
Доставка Новосибирск-Могоча	11000
Итого по шестому варианту	354000

Шаг 2. Определим составляющие технико-экономического эффекта от реализации мероприятий нормирования напряжения, путём установки устройств симметрирования в электрическую схему ЭТК.

Технико-экономический эффект от симметрирования напряжений в электрической сети за счёт внедрения устройств симметрирования включает составляющие:

- 1) уменьшение дополнительных потерь мощности в элементах электрической схемы ЭТК;
- 2) увеличение фактического остаточного срока службы электродвигателей ЭТК;
- 3) избавление от штрафов за плохое КЭЭ (надбавки и скидки);
- 4) уменьшение величины ущерба от повреждения и последующей остановки технологического оборудования ЭТК.

В результате, технико-экономический эффект от коррекции уровней напряжений, путём установки устройств симметрирования в электрическую схему

ЭТК примет вид:

$$\Delta W_{\text{общ}} = \Delta W_{\text{доп}} + \Delta W_{\text{сс}} + \Delta W_{\text{н}} + \Delta W_{\text{ущ}}, \quad (4.20)$$

где $\Delta W_{\text{доп}}$ – технико-экономический эффект от уменьшения дополнительных потерь мощности в элементах электрической схемы ЭТК, руб/год;

$\Delta W_{\text{сс}}$ – технико-экономический эффект от увеличения фактического остаточного срока службы электродвигателей ЭТК, руб/год;

$\Delta W_{\text{н}}$ – скидка по тарифу на электроэнергию для исследуемого объекта, руб/год;

$\Delta W_{\text{ущ}}$ – технико-экономический эффект от уменьшения величины ущерба в связи с повреждением и последующей остановкой технологического оборудования ЭТК, руб/год.

Причём слагаемые технико-экономического эффекта должны соответствовать ряду условий:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta W_{\text{доп}}, \Delta P_{\text{доп}j} \rightarrow \min, \\ \Delta W_{\text{сс}}, N_{\text{кр}i} \rightarrow N_{\text{норм}i}, \\ \Delta W_{\text{н}}, \Delta B \rightarrow \max, \\ \Delta W_{\text{ущ}}, k_{\text{ущ}k} \rightarrow \min \end{array} \right. \quad (4.21)$$

где $\Delta P_{\text{доп}j}$ – дополнительные потери со средством симметрирования, кВт;

$N_{\text{кр}i}$ – количество капитальных ремонтов, при наличии искажений напряжения, шт;

$N_{\text{норм}i}$ – нормативное количество капитальных ремонтов, шт;

ΔB – скидки к тарифу на электроэнергию, %;

$k_{\text{ущ}k}$ – коэффициент ущерба от повреждения и остановки технологического оборудования, %.

Подробно рассмотрим слагаемые технико-экономического эффекта установки технических средств симметрирования для второго варианта инвестиционного проекта.

Составляющая технико-экономического эффекта, обусловленная уменьшением дополнительных потерь мощности в элементах электрической схемы ЭТК.

Рассматриваемая электрическая схема ЭТК (рис.4.5) включает такие элементы как: асинхронные низковольтные электродвигатели, трансформатор, линии электропередачи.

Выполним вычисления дополнительных потерь мощности в основных элементах электрической схемы ЭТК, используя разработанную программу [135], данные результатов расчёта сведены в (табл. 4.6).

Таблица 4.6 – Результаты вычислений дополнительных потерь мощности в основных элементах электрической схемы ЭТК

Дополнительные потери мощности в основных элементах электрической схемы ЭТК			
Без технических средств симметрирования (до симметрирования)			После выполнения симметрирования техническими средствами
Название элемента электрической схемы ЭТК	Величина постоянных потерь в элементе электрической схемы ЭТК, кВт	Величина дополнительных потерь в элементе электрической схемы ЭТК, кВт	Величина дополнительных потерь в элементе электрической схемы ЭТК, кВт
Итого по ЛЭП	11,295	3,366	0,193
Итого по АД	4,802	0,253	0,019
Суммарные потери в элементах ЭТК	16,097	3,616	0,212

Относительное уменьшение дополнительных потерь мощности в элементах электрической схемы ЭТК, вследствие снижения значения K_{2U} , составляет:

$$\varepsilon = 100 - \frac{\Delta P_{\text{доп}}}{\Delta P_{\text{допб}}} \cdot 100 \%, \quad (4.22)$$

$$\varepsilon = 100 - \frac{0,212}{3,616} \cdot 100\% = 94,13 \%$$

Годовой технико-экономический эффект от снижения дополнительных потерь мощности в элементах электрической схемы ЭТК определяется как:

$$\Delta W_{\text{доп}} = \left(\sum_{i=1}^m \left(\sum_{j=1}^n t_j \cdot T_j \cdot \Delta P_{\text{допб}j} - \sum_{j=1}^n \Delta P_{\text{доп}j} \cdot t_j \cdot T_j \right) \right) \cdot C, \quad (4.23)$$

где $\Delta P_{\text{допб}j}$ – дополнительные потери мощности без учёта технических средств симметрирования, кВт;

$\Delta P_{\text{доп}j}$ – дополнительные потери мощности с техническими средствами симметрирования, кВт;

C – стоимость электрической энергии, руб/кВтч.;

t_j – время работы электроприёмников с заданной нагрузкой в день, час;

T_j – дни работы электроприёмников с заданной нагрузкой в год, ед.

$$\Delta W_{\text{доп}} = (3,616 \cdot 8 \cdot 218 - 0,212 \cdot 8 \cdot 218) \cdot 5 = 29\,709,04 \text{ руб/год}$$

Составляющая технико-экономического эффекта, обусловленная увеличением фактического остаточного срока службы электродвигателей ЭТК.

При определении технико-экономического эффекта ключевую роль играет величина изменения срока службы АД вследствие воздействия несимметрии напряжений. Следовательно, рассмотрим динамику изменения фактического остаточного срока службы АД, присутствующих в рассматриваемой электрической схеме ЭТК (рис.4.5), используя ранее полученные формулы (3.29, 3.30). Отметим, что расчёт $\Delta T_{\text{ф.ост}}$ выполнен при условии замены присутствующих электродвигателей на новые с аналогичными номинальными параметрами.

Величина изменения фактического остаточного срока службы АД при наработке $T = 40000$ часов с расчётным средним сроком службы $Z = 15$ лет при значениях $K_{2U} = 3\%$ и $K_{2U} = 4\%$ составляет:

– для электродвигателя серии 4A132S4Y3 с $P_n = 7,5$ кВт:

Исходя из (3.29) $T_{\text{ф.ост}} (3\%) = 6,57$ года, тогда $\Delta T_{\text{ф.ост}} (3\%) = 8,43$ года

Исходя из (3.30) $T_{\text{ф.ост}} (4\%) = 1,52$ года, тогда $\Delta T_{\text{ф.ост}} (4\%) = 13,48$ года

– для электродвигателя серии АИР132S4 с $P_n = 11$ кВт:

Исходя из (3.29) $T_{\text{ф.ост}} (3\%) = 9,57$ года, тогда $\Delta T_{\text{ф.ост}} (3\%) = 5,43$ года

Исходя из (3.30) $T_{\text{ф.ост}} (4\%) = 2,99$ года, тогда $\Delta T_{\text{ф.ост}} (4\%) = 12,01$ года

– для электродвигателя серии 4A80A2Y3 с $P_n = 3$ кВт:

Исходя из (3.29) $T_{\text{ф.ост}} (3\%) = 6,46$ года, тогда $\Delta T_{\text{ф.ост}} (3\%) = 8,54$ года

Исходя из (3.30) $T_{\text{ф.ост}} (4\%) = 1,21$ года, тогда $\Delta T_{\text{ф.ост}} (4\%) = 13,79$ года

– для электродвигателя серии 4A90L2Y3 с $P_n = 1,5$ кВт:

Исходя из (3.29) $T_{\text{ф.ост}} (3\%) = 6,25$ года, тогда $\Delta T_{\text{ф.ост}} (3\%) = 8,75$ года

Исходя из (3.30) $T_{\text{ф.ост}} (4\%) = 1,16$ года, тогда $\Delta T_{\text{ф.ост}} (4\%) = 13,84$ года

Согласно вышеизложенному отметим, что увеличение фактического остаточного срока службы электродвигателя серии 4A132S4Y3 с $P_n = 7,5$ кВт при

$K_{2U} = 3\%$ составило 8,43 года, при $K_{2U} = 4\%$ составило 13,48 года; электродвигателя серии АИР132S4 с $P_n = 11$ кВт при $K_{2U} = 3\%$ составило 5,43 года, при $K_{2U} = 4\%$ составило 12,01 года; электродвигателя серии 4А80А2У3 с $P_n = 3$ кВт при $K_{2U} = 3\%$ составило 8,54 года, при $K_{2U} = 4\%$ составило 13,79 года; электродвигателя серии 4А90L2У3 с $P_n = 1,5$ кВт при $K_{2U} = 3\%$ составило 8,75 года, при $K_{2U} = 4\%$ составило 13,84 года.

Анализируя выше представленные результаты расчёта отметим, что средний фактический остаточный срок службы электродвигателей рассматриваемой электрической схемы ЭТК (рис.4.5), вследствие улучшения КЭЭ, приблизился к номинальному сроку службы, его значение при $K_{2U} = 3\%$ составило 7 лет.

В дополнении, при расчёте технико-экономического эффекта следует принимать во внимание число капитальных ремонтов. Согласно [27] для низковольтных асинхронных электродвигателей число капитальных ремонтов составляет 1 раз за срок его службы ($N_{норм} = 1$), при номинальных параметрах эксплуатации. Исходя из этого, межремонтный интервал при одном капитальном ремонте составляет 7,5 лет со значением $T = 40000$ часов.

Технико-экономический эффект, обусловленный увеличением фактического остаточного срока службы электродвигателей ЭТК составляет:

$$\Delta W_{ссад} = \sum_{i=1}^r C_{кри} \cdot N_i, \quad (4.24)$$

где N_i – количество дополнительных капитальных ремонтов,

$C_{кри}$ – стоимость капитального ремонта АД, принимаем исходя из данных [136].

Согласно [137] число капитальных ремонтов определяется:

$$N_{капрем} = \frac{Z}{T_{межрем}} - 1 \quad (4.25)$$

Число дополнительных капитальных ремонтов рассчитывается как:

$$N_i = N_{капрем} - N_{норм} \quad (4.26)$$

Межремонтный интервал электродвигателя 4А132S4У3 $P_n = 7,5$ кВт при $\Delta Z = 8,43$ года составит:

$$T_{меж} = (15 - 8,43)/2 = 3,285 \text{ года}$$

Соответственно, количество дополнительных капитальных ремонтов равно:

$$N_{\text{капрем}} = \frac{15}{3,285} - 1 = 3,56$$

Тогда, примем целочисленное значение $N_{\text{капрем}} = 4$, следовательно, количество дополнительных капитальных ремонтов составит:

$$N = N_{\text{капрем}} - N_{\text{норм}} = 4 - 1 = 3$$

Алгоритм расчёта количества дополнительных капитальных ремонтов аналогичен для остальных электродвигателей, присутствующих в схеме ЭТК.

Электрическая схема ЭТК с.Таптугары содержит в своем составе шесть низковольтных асинхронных электродвигателей. Вследствие этого, при нахождении величины $\Delta W_{\text{ссад}}$ необходимо принимать во внимание технико-экономический эффект от каждого электродвигателя присутствующего в рассматриваемой электрической схеме ЭТК.

Технико-экономический эффект от увеличения фактического остаточного срока службы АД 4А132S4Y3 $P_n = 7,5\text{кВт}$ составляет:

$$\Delta W_{\text{ссад1}} = 8568,82 \cdot 3 = 25706,46 \text{ руб}$$

Технико-экономический эффект от увеличения фактического остаточного срока службы АД АИР132S4 $P_n = 11 \text{ кВт}$ составляет:

$$\Delta W_{\text{ссад2}} = 28\,455 \text{ руб}$$

Технико-экономический эффект от увеличения фактического остаточного срока службы АД 4А80А2Y3 $P_n = 3 \text{ кВт}$ составляет:

$$\Delta W_{\text{ссад3}} = 11490 \text{ руб}$$

Технико-экономический эффект от увеличения фактического остаточного срока службы АД 4А90L2Y3 $P_n = 1,5 \text{ кВт}$ составляет:

$$\Delta W_{\text{ссад4}} = 9360 \text{ руб}$$

Таким образом, годовой технико-экономический эффект от увеличения фактического остаточного срока службы всех асинхронных электродвигателей в ЭТК, составляет:

$$\Delta W_{\text{ссад}} = \sum_{i=1}^r \frac{\Delta W_{\text{ссад}i}}{Z} = \frac{(25706,46 \cdot 2) + (28455 \cdot 2) + 9360 + 11490}{15} = 8544,86 \text{ руб/год} \quad (4.27)$$

Технико-экономический эффект, полученный в выражении (4.27) объясняется только увеличением временных интервалов между ремонтами. Например, при наличии в электрической сети K_{2U} интервал между ремонтами АД 4A132S4Y3 $P_n = 7,5\text{кВт}$ составляет 3,285 года, а при исключении K_{2U} интервал возможно расширить до значения в 7,5 лет, при этом происходит закономерное уменьшение капитальных, планово-предупредительных ремонтов и эксплуатационных затрат.

В итоге, снижение затрат на капитальные, планово-предупредительные ремонты привело к сокращению эксплуатационных затрат до суммы в 8544,86 руб/год (при нормативном сроке службы 15 лет).

Составляющая технико-экономического эффекта, обусловленная установлением скидок (надбавок) к тарифу на электрическую энергию.

Отклонение ПКЭ от нормативных значений, установленных [1], приводит к снижению работоспособности и качеству функционирования электрооборудования электрических сетей. Снижение КЭЭ приводит к возникновению экономического ущерба, который несёт как потребитель, так и поставщик электрической энергии [10].

В настоящее время, экономические механизмы управления качеством электрической энергии, обязывающие относить качество поставляемой электроэнергии к товарно-денежным отношениям, основаны на нормативно-правовых документах [138 – 144].

Согласно Гражданскому кодексу РФ (ст.542 п. 2, ст. 547), п. 9 Приложения №1 [139], Ч.5 ст. 34 [142] в случае, если потребитель получает от поставщика электроэнергию ненадлежащего качества, то он имеет право получить возмещение нанесенного ущерба в денежном эквиваленте, либо оплачивать потреблённую электроэнергию по сниженному тарифу, снижение тарифа может составлять 0,15% размера платы. В случае, если потребитель является виновником нарушения КЭЭ, возможно введение надбавок на тариф для таких потребителей, надбавка может составлять от 0,025% до 9,2%.

Таким образом, экономическая ответственность поставщика и потребителя электрической энергии за КЭЭ устанавливается в виде скидок или надбавок к основному тарифу на электроэнергию.

В расчётном примере, который представлен в данной главе, принято, что нарушение КЭЭ происходит в результате присутствия несимметричных режимов работы сетей Забайкальской электроэнергетической системы. Исходя из этого факта и в соответствии с изложенными выше нормативными положениями, для потребителей Забайкальского края, в случае установления ими факта снижения КЭЭ, может быть установлена скидка к тарифу на электроэнергию.

Годовой технико-экономический эффект, с принятой величиной скидки на тариф $\Delta B = 0,15 \%$, при стоимости электрической энергии составляющей 5 рублей, определяется по следующей формуле:

$$\Delta W_{\text{н}} = \Delta B \cdot \sum_{j=1}^n t_j \cdot T_j \cdot P_j, \quad (4.28)$$

где ΔB – скидки к тарифу на электрическую энергию, %;

P_j – мощность электропотребителей, присутствующих в ЭТК, кВт;

t_j – время работы электроприёмников с заданной нагрузкой в день, час;

T_j – дни работы электроприёмников с заданной нагрузкой в год, ед.

$$\Delta W_{\text{н}} = 5864 \text{ руб/год}$$

Составляющая технико-экономического эффекта, обусловленная уменьшением величины ущерба от повреждения и последующей остановки технологического оборудования ЭТК.

Ущерб для технологического оборудования, связанный с его повреждением и последующей остановкой, составляет 2% от стоимости произведенной продукции [145], определяется по формуле:

$$\Delta W_{\text{ущ}} = \sum_{k=1}^m k_{\text{ущ}k} \cdot H_k, \quad (4.29)$$

где $k_{\text{ущ}k}$ – коэффициент ущерба от повреждения и остановки технологического оборудования на предприятии, %;

H_k – стоимость произведенной продукции за год на определённом предприятии, руб/год.

$$H_k = \sum_{t=1}^u K_t \cdot Y_t,$$

где K_t – количество произведенной продукции за год на предприятии, шт;

Y_t – стоимость единицы произведенной продукции за год на предприятии, руб.

Принимаем, согласно отчетной документации предприятия [146], значение общегодовой стоимости произведенной продукции $\sum_{k=1}^m H_k = 1800000$ руб/год.

Тогда, технико-экономический эффект от снижения величины ущерба повреждения и остановки технологического оборудования составит:

$$\Delta W_{\text{ущ}} = 0,02 \cdot 1800000 = 36000 \text{ руб/год}$$

Учитывая вышеизложенное, $\Delta W_{\text{общ}}$ от внедрения средств симметрирования в электрическую схему ЭТК составил:

$$\Delta W_{\text{общ}} = 29709,04 + 8544,86 + 5864 + 36000 = 80\,117,9 \text{ руб/год}$$

Шаг 3. Осуществим расчёт показателей экономической эффективности проектов.

Выполним расчёт показателей экономической эффективности проекта с целью последующей оценки эффективности разработанных мероприятий используя метод расчёта [147 – 149], при этом учитываем расчётный срок, составляющий 15 лет.

Для экономического анализа эффективности инвестиционного проекта (вариант 2) примем следующие показатели:

– дисконтированный срок окупаемости проекта по симметрированию напряжений в электрической сети (DPP):

$$DPP = \frac{80\,117,9}{(1+0,1)^t} \geq 203\,600 \text{ руб.}$$

$$DPP = 3,32 \text{ г} = 39,84 \text{ мес.}$$

– чистый дисконтированный доход проекта (NPV):

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{80\,117,9}{(1+0,1)^3} - 203600 = 368,7 \text{ тыс. руб.}$$

– индекс дисконтированной доходности (PI):

$$PI = \frac{572\,285,22}{203\,600} = 2,81$$

– внутренняя норма доходности (IRR):

$$IRR = 36,37\%$$

Выполнив анализ полученных показателей экономической эффективности предложенного проекта (вариант 2) по внедрению симметрирующих трансформаторов на примере электрической схемы ЭТК с. Таптугары Могочинского района Забайкальского края, сформулируем следующие выводы:

– дисконтированный срок окупаемости (DPP), то есть скорость возврата вложенного инвестиционного капитала составил 3,32 года;

– значение чистого дисконтированного дохода проекта (NPV) составило $NPV = 368,7$ тыс.руб., является положительным, что свидетельствует о привлекательности и целесообразности проекта;

– индекс дисконтированной доходности (PI) составил $PI = 2,81 > 1$, что свидетельствует об инвестиционной привлекательности предложенного проекта;

– значение внутренней нормы доходности (IRR) составило $IRR = 36,37\%$.

Аналогичным способом выполним расчёт экономической эффективности, с использованием программного обеспечения Microsoft Office Excel, остальных вариантов инвестиционного проекта.

Результаты расчёта показателей экономической эффективности представлены в (табл. 4.7).

Таблица 4.7 – Расчёт экономической эффективности вариантов инвестиционного проекта

Показатель	Варианты инвестиционного проекта					
	1	2	3	4	5	6
Дисконтированный срок окупаемости, год (DPP)	7,64	3,32	11,19	25,82	8,58	7,64
Чистый дисконтированный доход, тыс. руб. (NPV)	228,29	368,7	55,91	- 105,51	189,29	218,29
Индекс дисконтированной доходности (PI)	1,66	2,81	0,91	0,84	1,49	1,62
Внутренняя норма доходности, % (IRR)	20,06	36,37	7,68	6,42	17,47	19,35

Шаг 4. Выполним анализ показателей экономической эффективности проектных решений для принятия оптимального и эффективного инвестиционного проекта.

Анализируя приведенные результаты расчёта (табл. 4.7) экономической эффективности вариантов инвестиционного проекта констатируем следующее, самыми привлекательными инвестиционными проектами являются первый, второй и шестой варианты из рассмотренных вариаций.

Окончательное решение выбора наиболее привлекательного инвестиционного проекта основано на анализе значений показателя «Дисконтированный срок окупаемости» (DPP) вариаций проекта. Очевидно, что основным критерием экономической эффективности рассматриваемых инвестиционных проектов является значение минимума срока окупаемости инвестиций проектов.

Резюмируя вышеизложенное можно заключить, что в качестве наиболее эффективного инвестиционного проекта принимаем вариант 2, данный вариант имеет экономические преимущества по отношению к остальным вариантам. Все показатели, характеризующие экономическую привлекательность инвестиционного проекта по внедрению симметрирующих трансформаторов, свидетельствуют о выгодности и окупаемости проекта, соответственно, проект считаем целесообразным его необходимо внедрять.

Расчёты срока окупаемости инвестиционного проекта (вариант 2) выполнены в программной среде Microsoft Office Excel. График зависимости денежного потока от периода показан на (рис. 4.7).

Методика расчёта рассмотрена на примере электрической схемы ЭТК с. Таптугары Могочинского района Забайкальского края. При этом, получены следующие показатели:

- годовой технико-экономический эффект от внедрения симметрирующих трансформаторов ТСТ2 $S_H = 25$ кВА составил 80 тысяч рублей;
- окупаемость разработанных мероприятий соответствует 3,32 года.

Дополнительные потери мощности в основных элементах ЭТК, за счёт улучшения качества электрической энергии, снизились на 94 %, продление фактического остаточного срока службы АД составило 7 лет.

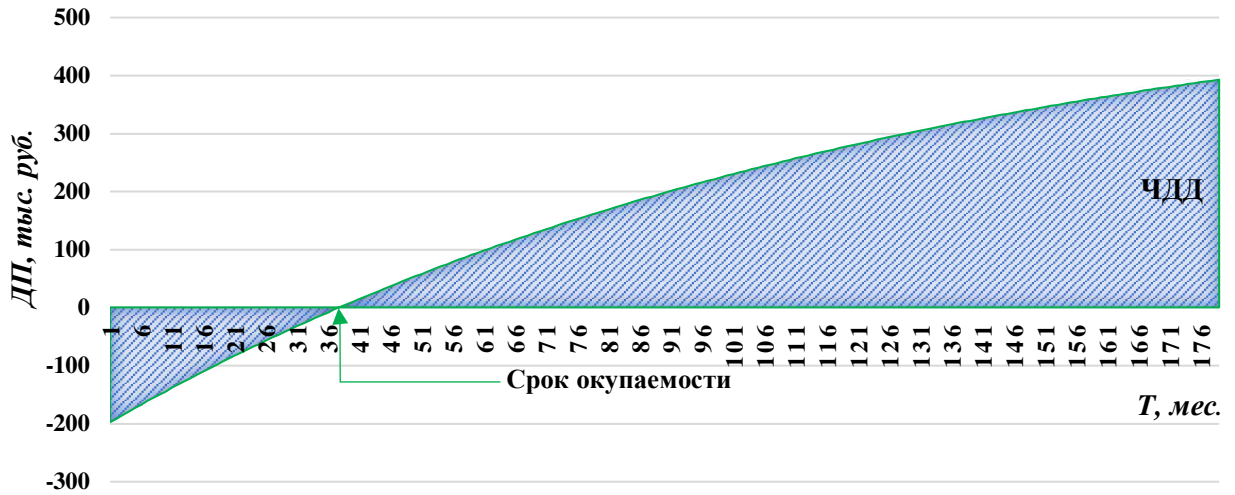


Рис. 4.7 – Графическая интерпретация окупаемости инвестиционного проекта

Технико-экономическая эффективность предложенных мероприятий позволяет сделать вывод о целесообразности внедрения технических средств симметрирования.

Следовательно, стоит заметить, что технико-экономический эффект, детерминированный применением технических СС в ЭТК промышленных предприятий, достигается посредством улучшения КЭЭ в электрической сети. В частности, устранением величины параметра K_{2U} , и как следствие, снижением дополнительных потерь мощности в элементах электрической сети, кроме того, увеличением времени наработки на отказ эксплуатируемого электрооборудования, снижением эксплуатационных затрат на планово-предупредительные ремонты электрооборудования, помимо этого, устранением экономического ущерба от аварийных ситуаций, обусловленных выходом из строя эксплуатируемого электрооборудования. Именно поэтому аргументируем следующее, что разработанные мероприятия способствуют повышению эффективности эксплуатации ЭТК с электродвигательной нагрузкой, наряду с тем, улучшению технико-экономических показателей работы.

4.5. Выводы по четвёртой главе

1. Разработана и реализована методика выбора мест установки технических СС в электротехническом комплексе с наличием электродвигательной нагрузки.

2. Разработана и апробирована на функционирующем электротехническом комплексе Забайкальского края «Программа для определения оптимального места установки средств симметрирования». Программа позволяет автоматизировать процедуру выбора рациональных мест установки технических средств симметрирования в ЭТК промышленных предприятий. Основана на выборе мест размещения устройств симметрирования в зависимости от условий эксплуатации электродвигателей.

Получено свидетельство о регистрации № 2018665997 (Приложение В).

Разработанный методический подход, на основе программного обеспечения, продемонстрировал полноту и достаточность проектных решений.

3. Разработана усовершенствованная методика технико-экономического обоснования внедрения технических средств симметрирования в ЭТК с наличием электродвигательной нагрузки. Методика предназначена для оценки целесообразности проектных решений, направленных на симметрирование напряжения в электрической сети.

4. Применяя разработанную методику расчёта выполнено технико-экономическое обоснование внедрения симметрирующих устройств на примере электрической схемы ЭТК с. Таптугары Могочинского района Забайкальского края. Получены следующие показатели:

- общегодовой технико-экономический эффект от установки симметрирующих трансформаторов ТСТ2 $S_n = 25$ кВА составил 80 тысяч рублей;
- окупаемость разработанных мероприятий соответствует 3,32 года.

Дополнительные потери мощности в основных элементах ЭТК, за счёт улучшения качества электрической энергии, снизились на 94 %, продление фактического остаточного срока службы АД составило 7 лет.

Оценка эффективности разработанных мероприятий, за счёт использования средств симметрирования, показала их высокую инвестиционную привлекательность.

Стоит заметить, что улучшение технико-экономических показателей работы электротехнического комплекса с электродвигательной нагрузкой и, кроме того, повышение его эффективности, достигается посредством уменьшения потерь мощности в элементах электрической сети, увеличения времени наработки на отказ эксплуатируемого электрооборудования, сопровождающееся уменьшением затрат на эксплуатацию и планово-предупредительные ремонты электрооборудования, помимо этого, устранением экономического ущерба от аварийных ситуаций, обусловленных выходом из строя электрооборудования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе, выполненных в диссертационной работе исследований сформулируем 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.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- АД – асинхронный электродвигатель;
- ЛЭП – линия электропередачи;
- ВЛ – воздушная линия электропередачи;
- СИП – самонесущий изолированный провод;
- Т – трансформатор;
- ЭТК – электротехнический комплекс;
- ЭЭС – электроэнергетическая система;
- РУ – распределительное устройство;
- ВРУ – вводно-распределительное устройство;
- ПС – подстанция;
- СС – средство симметрирования;
- СУ – симметрирующее устройство;
- ПО – программное обеспечение;
- КЭЭ – качество электрической энергии;
- ПКЭ – показатели качества электрической энергии;
- ФЗ – федеральный закон;
- K_{2U} – коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности,
%;
- K_{0U} – коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности,
%;
- K_z – коэффициент загрузки, %;
- MATLAB – (англ. Matrix Laboratory) пакет прикладных программ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 32144 – 2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 19 с.

2. EN 50160 – 2010 / A3:2019. Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks. European Committee for Standards – Electrical, 2019. – 34 p.

3. ГОСТ ИЕС 61000 – 4 – 27 – 2016. Электромагнитная совместимость. Часть 4-27. Методы испытаний и измерений. Испытание на устойчивость к несимметрии напряжений для оборудования с потребляемым током не более 16 А на фазу. – М.: Стандартинформ, 2016. – 21 с.

4. 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), p.6. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185803013>.

5. Жежеленко И.В. Влияние качества электроэнергии на сокращение срока службы и снижение надёжности электрооборудования / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко, А.В. Горпинич // Электрика, 2008, № 4, С. 14 – 21.

6. Kovernikova L.I., Ngo V. C. Analysis of the influence of nonsinusoidal and unbalanced voltages on a three-phase induction motor (on the instance of a ball mill induction motor JSC «Mine Alexandrovsky»). AIP Conference Proceedings, 2023, Vol. 2552 (070002), p.8. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0128386>.

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

8. Пинчук О. Г. Оценка теплового состояния асинхронных двигателей в повторно-кратковременных режимах при несимметрии напряжения сети / О. Г.

Пинчук // Вісник СевДТУ. Вип. 88: Механіка, енергетика, екологія: зб. наук. пр. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2008, С. 97 – 103.

9. Фёдоров М. М. Особенности теплового состояния асинхронных двигателей при несимметрии питающего напряжения / М.М. Фёдоров, Н.В. Ивченков, А.А. Ткаченко // Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии. – Краматорск: Издательский центр ДГМА, 2013, № 1, С. 164 – 170.

10. Коверникова Л.И., Шамонов Р.Г., Суднова В.В. Качество электрической энергии, современное состояние, проблемы, предложения по их решению: монография / отв. ред. Н.И. Воропай. – Новосибирск: Наука, 2017. – 219 с.

11. Вагин Г.Я., Куликов А.Л. Качество электрической энергии в системах электроснабжения. Анализ состояния методов нормирования и контроля // Электрические станции, 2019, № 6 (1055), С. 54 – 59. DOI: <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2019.1055.44184>.

12. Коверникова Л.И., Серков А.В., Шамонов Р.Г. Об управлении качеством электрической энергии в России в прошлом, настоящем и будущем // Энергетическая политика, 2018, №1, С. 75 – 85.

13. Nagata E., Ferreira D., Bollen M., et al. Real-Time Voltage Sag Detection and Classification for Power Quality Diagnostics. Measurement, 2020, Vol.164 (4), p.15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108097>.

14. Jayatunga U., Perera S., Ciufu P., Agalgaonkar A.P. Voltage Unbalance Emission Assessment in Interconnected Power Systems. IEEE Trans. Power Deliv, 2013, Vol. 28, pp.2383 – 2393.

15. Сариев Б.И., Абдиева З.Э., Куржумбаева Р.Б., Касмамбетов Х.Т. Влияние несимметрии напряжения на потери электроэнергии в системах электроснабжения // Автоматика и программная инженерия, ОАО «НИПС», 2017, №2(20), С. 46 – 51.

16. Fuchs E.F., Mohammad A.S. Masoum. Power Quality in Power Systems and Electrical Machines, 2nd Edition, Elsevier, 2015, 1123 p.

17. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1982. – 524 с.

18. Схема и программа развития электроэнергетики Забайкальского края на период 2015 – 2019 гг. Пояснительная записка 01.14 – ЭЭС, Чита, 2014. – 223 с.

19. ГОСТ 30804.4.30 – 2013 (IEC 61000-4-30:2008). Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. – М.: Стандартинформ, 2020. – 82 с.

20. Стратегия развития железнодорожного транспорта в РФ до 2030 года. Утверждена Распоряжением Правительства РФ от 17 июня 2008 г. № 877-р.

21. Кузнецов Н.Л. Надёжность электрических машин. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 432 с.

22. Гольдберг О. Д. Надёжность электрических машин / О. Д. Гольдберг, С. П. Хелемская. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 288 с.

23. ГОСТ IEC 60034-1-2014. Межгосударственный стандарт. Машины электрические вращающиеся. Часть 1. Номинальные значения параметров и эксплуатационные характеристики – М.: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации: М.: Стандартинформ, 2015. – 58 с.

24. ГОСТ Р 27.102 – 2021. Надёжность в технике. Надёжность объекта. Термины и определения – М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии: М.: Стандартинформ, 2021. – 40 с.

25. ГОСТ 27.310 – 95. Надёжность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. Введ. 1997-01-01. – М.: Межгосударственный совет по организации, метрологии и сертификации: Изд-во стандартов, 2002. – 12 с.

26. ГОСТ IEC 60034-26 – 2015. Межгосударственный стандарт. Машины электрические вращающиеся. Часть 26. Влияние несбалансированных напряжений на рабочие характеристики трехфазных асинхронных двигателей: Стандартинформ, 2016. – 6 с.

27. Копылов И. П. Проектирование электрических машин – М.: Издательство Юрайт, 2017. – 767 с.

28. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л., Горпинич А.В., Швецова И.А. Надёжность работы электрооборудования при пониженном качестве электроэнергии // Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць. – Маріуполь: Изд-во ПДТУ, 2005, Вып. 15, Ч. 2, С. 25 – 29.

29. Валянский А. В. Методика оценки влияния качества электрической энергии на надёжность работы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором / А.В. Валянский, И. И. Карташев, Ю. В. Шаров // Электричество, 2015, № 6, С. 24 – 29.

30. Пинчук О.Г. Энергетические показатели асинхронного двигателя при различных параметрах несимметрии питающего напряжения / О.Г. Пинчук // Наукові праці Донецького національного технічного університету, серія: «Електротехніка і енергетика». – Донецьк: Изд-во ДонНТУ, 2008, Вып.8 (140), С. 201 – 205.

31. 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.

32. Schemmel F., Bauer K., Kaufhold M. Reliability and statistical lifetime-prognosis of motor winding insulation in low-voltage power drive systems. IEEE Electrical Insulation Magazine. 2009, Vol. 25, №. 4, pp. 6 – 13. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEI.2009.5191411>.

33. Tabora J.M., de Matos E.O., Soares T.M., Tostes M.E. Voltage unbalance effect on the behavior of IE2, IE3 and IE4 induction motor classes // Proc. on VII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE). Santo André, São Paulo, Brazil. 2020, p.6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3029794>.

34. Mohammed J.A-K., Al-Sakini S.R., Hussein A.A. Assessment of disturbed voltage supply effects on steady-state performance of an induction motor // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). 2020, Vol. 10, № 3, pp. 2259 –

2270.DOI: <http://doi.org/10.11591/ijece.v10i3.pp2259-2270>.

35. Dekhandji F. Z., Refoufi L., Bentarzi H. Quantitative assessment of three phase supply voltage unbalance effects on induction motors // *International Journal of Systems Assurance Engineering and Management*, 2015, Vol. 8, no. S1, pp. 393 – 406. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13198-015-0401-3>.

36. Романова В.В., Хромов С.В. Эксплуатационная надёжность низковольтных асинхронных электродвигателей в условиях несимметрии напряжений // *Проблемы энерго - и ресурсосбережения*. – Ташкент: Изд-во ТашГТУ, 2019, № 4, С. 136 – 148.

37. Хомутов С.О. Анализ влияния внешних воздействующих факторов на состояние изоляции электродвигателей // *Ползуновский вестник*. – Барнаул: Издательский центр АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 2005, №4, Ч.3, С. 260 – 267.

38. Tabora J.M., Tostes M.E., de Matos E.O. et al. Assessing voltage unbalance conditions in IE2, IE3 and IE4 classes induction motors // *IEEE Access*, 2020, Vol.8, pp.186725 – 186739. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3029794>.

39. Sorin Deleanu, Mihai Iordache, Marilena Stanculescu, Dragos Niculae. The Induction Machine Operating from a Voltage Supply, Unbalanced and Polluted with Harmonics: A Practical Approach, 15th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES), Oradea, Romania, 2019, pp. 181 – 184.

40. 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), p.4. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601084>.

41. Федеральный закон «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 23.11.2009 № 261-ФЗ (последняя редакция).

42. Забайкальский рабочий. Чрезвычайное положение введено в Могочинском районе из-за отказа 17 двигателей в котельных [Электронный ресурс]

URL: <http://zabrabochy.rf/news/189133/>

43. Zapanov O.V., Kovernikova L.I. On the power quality of electrical energy supplied to joint stock company «Aleksandrovsky mine» / E3S Web of Conferences, 2020, Vol. 209 (07012), p.6. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020907012>.

44. Enrique C. Quispe, Ivan D. Lopez, Fernando J. T. E. Ferreira, Vladimir Sousa. Unbalanced Voltages Impacts on the Energy Performance of Induction Motors, International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). 2018, Vol. 8, № 3, pp. 1412 – 1422.

45. Усынин Ю.С. Энергосбережение в электроприводе: монография / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, С.М. Бутаков. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – 109 с.

46. Вагин Г.Я. Методы и средства повышения качества электроэнергии в распределительных электрических сетях низкого и среднего напряжения / Вагин Г.Я., Куликов А.Л., Севостьянов А.А., Соснина Е.Н., Бедретдинов Р.Ш. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2020, № 11, С. 399 – 407.

47. Воротницкий В.Э., Дементьев Ю.А., Лазарев Г.Б., Шакарян Ю.Г. Организация комплексного процесса управления качеством электроэнергии – приоритетная задача энергетической стратегии развития России // Электроэнергия. Передача и распределение, 2017, № 4(43), С. 40 – 52.

48. Папков Б.В., Илюшин П.В., Куликов А.Л. Надёжность и эффективность современного электроснабжения: монография. Нижний Новгород: Научно-издательский центр «XXI век», 2021. – 160 с.

49. Патент №1205523 СССР. Устройство для симметрирования токов и напряжений в электрических сетях / В.И. Федулов, А.Х. Хамидов, Н.Г. Ганихаджаев, Д.О. Османов, В.Г. Васильев. – Оpubл. в Б.И., 1986. – № 2.

50. Патент №2741269(13) С1 РФ, МПК G01R 19/00 (2006.01). Способ анализа качества электрической энергии в трёхфазной системе промышленного электроснабжения / Куликов А.Л., Севостьянов А.А., Илюшин П.В., Вагин Г.Я.

№2020122534, 08.07.2020, заявл. 08.07.2020; опубл. 22.01.2021. Бюл. №3. 13 с.

51. Патент №980211 СССР. Фильтросимметрирующее устройство / А.К. Шидловский, В.Г. Кузнецов, И.В. Мостовяк, Г.А. Москаленко, В.Б. Данилюк. – Оpubл. в Б.И., 1982. – № 45.

52. Патент №162639 РФ, МПК H02J 1/00 (2006.01). Устройство симметрирования нагрузки / Орлов А.И., Савельев А.А.; заявитель и патентообладатель Орлов А.И., Савельев А.А. № 2015146070/07, заявл. 26.10.2015; опубл. 20.06.2016 Бюл. № 17. 2 с.

53. Патент №2200364 РФ, МПК H02J 1/10 (2000.01). Устройство равномерного распределения электрической нагрузки по n-фазной сети распределения электроэнергии / Яир Д., Лупу В.; заявитель и патентообладатель ТАРДЖЕТ-ХАЙ-ТЕК ЭЛЕКТРОНИКС ЛТД. № 99115774/09, заявл. 05.12.1997; опубл. 10.03.2003. Бюл. № 7. 20 с.

54. Патент №2321133 РФ, МПК H02J 3/26 (2006.01). Симметрирующий трехфазно-однофазный трансформатор напряжения / Василенко В.Д., Евдокимов В.В.; патентообладатель ООО «Компания Интер Электро». № 2006121104/09, заявл. 16.06.2006; опубл. 27.03.2008. Бюл. № 9. 6 с.

55. Патент №2453965 РФ, МПК H02J 3/26 (2006.01). Трёхфазное симметрирующее устройство / Василенко В.Д.; заявитель и патентообладатель Василенко В.Д. № 2010139219/07, заявл. 23.09.2010; опубл. 20.06.2012. Бюл. № 17. 6 с.

56. Патент №2640571 РФ, МПК H01F 30/12 (2006.01) H02J 3/26 (2006.01). Трёхфазно-однофазный трансформатор Евсеева / Евсеев А. Н.; заявитель и патентообладатель Евсеев А. Н. № 2016140471, заявл. 14.10.2016; опубл. 10.01.2018 Бюл. № 1. 9 с.

57. Патент №2459337 РФ, МПК H02J 3/26 (2006.01). Трёхфазное фильтросимметрирующее устройство / Василенко В.Д.; заявитель и патентообладатель Василенко В.Д. № 2010151247/07, заявл. 13.12.2010; опубл. 20.08.2012 Бюл. № 23. 5 с.

58. Гамазин С. И., Пупин В. М., Марков Ю. В. Обеспечение надёжности электроснабжения потребителей и качества электроэнергии современными техническими средствами / С. И. Гамазин, В. М. Пупин, Ю. В. Марков // Электрика, 2006, №10, С. 22 – 26.

59. Патент №2618115 РФ, МПК G05F 1/24 (2006.01). Нормализатор переменного напряжения / Клавсуц А.Б., Трубин В.Г.; патентообладатель Клавсуц А.Б., Трубин В.Г. № 2015149626/07, заявл. 18.11.2015; опубл. 10.06.2016. Бюл. № 16. 14 с.

60. Mokhtari Hossein, Karimi-Ghartemani Masooid, Iravani M. Reza. Experimental performance evaluation of a wavelet-based on-line voltage detection method for power quality applications // IEEE Trans. Power. Deliv. 2002, Vol.17, № 1, pp.161 – 172.

61. Кобозев В. А. Качество электроэнергии и энергоэффективность систем электроснабжения потребителей / В. А. Кобозев, И. В. Лыгин. – М.: Инфра-Инженерия, 2022. – 356 с.

62. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях // 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.

63. Карташев И. И. Управление качеством электроэнергии / И. И. Карташев, В. Н. Тульский, Р. Г. Шамонов и др.; под ред. Ю. В. Шарова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2017. – 347 с.

64. Макашева С.И. Качество электрической энергии: мониторинг, прогноз, управление: моногр. / С. И. Макашева, П. С. Пинчуков. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2020. – 114 с.

65. Куско А. Качество энергии в электрических сетях / А. Куско, М. Томпсон; пер. с англ. А. Н. Рободзея. – М.: Изд-во Додэка-XXI, 2008. – 333 с.

66. Наумов И.В. Снижение потерь и повышение качества электрической энергии в сельских распределительных сетях 0,38 кВ с помощью симметрирующих устройств: дис. докт. техн. наук: 05.20.02 / Наумов Игорь Владимирович. –

Иркутск, 2002. – 387 с.

67. Sayenko Yu. L. Identification and assessment of the influence of unbalance voltage sources in three-phase three-wire electric networks / Yu. L. Sayenko, D. N. Kalyuzhniy, V. A. Bolgov // *Technical Electrodynamics*, 2019, № 6, pp. 65 – 73.

68. Самарин Г.Н., Ружьёв В.А., Егоров М.Ю. Способы коррекции уровней напряжения и несимметрии напряжений в сетях 0,4 кВ. *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. – СПб: Изд-во СПбГАУ, 2017, №1, С.279 – 286.

69. Патент №549857 (СССР). Филтросимметрирующее устройство / А.К. Шидловский и др. – Оpubл. в Б.И., 1977. – № 9.

70. Воротницкий В. Э. Методы и средства расчёта, анализа и снижения потерь электрической энергии при её передаче по электрическим сетям / В. Э. Воротницкий, С. В. Заслонов, М. А. Калинкина и др. М.: ДиалогЭлектро, 2006. – 167 с.

71. Веников В.А. Электрические сети. – М.: Высш. шк., 1998. – 511 с.

72. Kosoukhov F.D., Vasiliev N.V., Filippov A.O. Reducing losses from current unbalance and improving electric-energy quality in 0,38 kV networks with municipal loads, *Russian Electrical Engineering*, 2014, 85(6), С.350 – 353. DOI: <https://10.3103/S106837121406008X>.

73. Воротницкий В.Э., Могиленко А.В. Снижение потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях. Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик» – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2021, № 11-12, – 136 с.

74. Патент №Х2 764037 (СССР). Филтросимметрирующее устройство /А.К. Шидловский, В.Г. Кузнецов, И.В. Мостовяк, Г.А. Москаленко, Ю.С. Михалец. – Оpubл. в Б.И., 1980. – №34.

75. Naumov I. V., Podyachikh S. V. On the choosing the installation location the balancing devices in low-voltages distribution electric networks // *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, Vol. 2094, p. 052012. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742->

6596/2094/5/052012.

76. Федотов А.И., Чернова Н.В., Ахметшин А.Р. Специальные вопросы проектирования распределительных электрических сетей напряжением 6–10 кВ. – Казань: Изд-во Казан. гос. энерг. ун-та, 2015. – 120 с.

77. Патент №955361 (СССР). Устройство для симметрирования режима трёхфазной сети / Н.А. Мельник, Д.Б. Налбандян. – Оpubл. в Б.И., 1982. – №32.

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

79. Патент №801187 (СССР). Устройства для симметрирования токов в трёхфазной сети с нулевым проводом / А.К. Шидловский, В.Г. Кузнецов, И.В. Мостовяк, А.В. Самков – Оpubл. в Б.И., 1981. – № 4.

80. Горюнов И.Т. Проблемы обеспечения качества электрической энергии / И.Т. Горюнов, В.С. Мозгалев, В.А. Богданов. – Электрические станции, 2001, №1, С. 16 – 20.

81. Naumov I. V., Podeachikh S. V., Bastron A. V. The Power Quality Improving and its Losses Reducing with Balancing Devices // EESTE-2021 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2022, Vol. 979, p. 012160. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/979/1/012160>.

82. Патент №481100 (СССР). Устройство для автоматического подключения однофазного потребителя к трёхфазной сети / С.М. Рожавский, Ю.Ф. Свергун, Б.М. Ильченко – Оpubл. в Б.И., 1975. – № 30.

83. Патент №980211 (СССР). Фильтросимметрирующее устройство / А.К. Шидловский, В.Г. Кузнецов, И.В. Мостовяк, Г.А. Москаленко, В.Б. Данилюк. – Оpubл. в Б.И., 1982. – № 45.

84. Vinogradov A. V., Vinogradova A. V., Golikov I. O., Bolshev V. E. Adaptive Automatic Voltage Regulation in Rural 0,38 kV Electrical Networks // International Journal of Emerging Electric Power Systems, 2019, Vol. 20, № 3, p. 3.

85. Патент №572872 (СССР). Устройство для симметрирования токов и

напряжений / И.П. Белаш, В.Н. Имщенецкий, С.М. Рожавский. – Оpubл. в Б.И., 1977. – №34.

86. Шидловский А.К. Оптимизация несимметричных режимов систем электроснабжения / А.К. Шидловский, В.Г. Кузнецов, В.Г. Николаенко. – Киев: Наукова думка, 1987. – 173 с.

87. Теремецкий М.Ю. Снижение потерь и повышение качества электроэнергии в сельских распределительных сетях 0,38 кВ при несимметричной нагрузке с помощью трансформатора «звезда-звезда с нулем с симметрирующим устройством»: автореф. канд. техн. наук. СПб.: Пушкин, 2011. – 19 с.

88. Патент №586526 (СССР). Устройство для симметрирования токов и напряжений сети с неравномерной нагрузкой фаз / И.П. Белаш и др. – Оpubл. в Б.И., 1977. – №48.

89. Патент №2521864 РФ, МПК H02J 3/26(2006.01). Трёхфазное симметрирующее устройство / Василенко В.Д.; заявитель и патентообладатель Василенко В.Д. № 2012128075/07, заявл.03.07.2012; опубл. 10.07.2014 Бюл. № 19. 5 с.

90. Патент №1026234 (СССР). Устройство для автоматического переключения однофазных нагрузок в низковольтных распределительных сетях / А.К. Шидловский, В.А. Невский, Г.А. Москаленко – Оpubл. в Б.И., 1983. – № 24.

91. Наумов И. В. К вопросу управления несимметричными режимами работы распределительных электрических сетей 0,38 кВ // Промышленная энергетика, 2022, № 5, С. 2 – 14. DOI: <https://doi.org/10.34831/EP.2022.25.51.001>.

92. Патент №961043 (СССР). Устройство для симметрирования трёхфазных сетей / М.Я. Минц, В.Н. Чинков, О.Г. Гриб, В.Н. Анохин. – Оpubл. в Б.И., 1982, №35.

93. Железко Ю.С. Расчёт, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях. М.: НУ ЭНАС, 2002. – 280 с.

94. Патент №658654 (СССР). Симметрирующее устройство / Ф.Д. Косоухов. – Оpubл. в Б.И., 1979. – № 15.

95. Сайт компании ОАО «Минский электротехнический завод им. В.И. Козлова» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.metz.by>

96. Сайт компании ООО «СКЭ-ЭЛЕКТРО» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ske-electro.ru>

97. Патент №1206881 (СССР). Фальтросимметрирующее устройство для трёхфазных сетей с нулевым проводом / А.К. Шидловский и др. – Опубл.в Б.И.,1986. – №3.

98. Патент №2314620 РФ, МПК H02J 3/26 (2006.01) H02H 3/253 (2006.01). Трёхфазное симметрирующее устройство / Василенко В.Д., Евдокимов В.В.; патентообладатель ООО «Интер Электро-XXI век» (RU) № 2003119569/09, заявл. 02.07.2003; опубл. 10.01.2008. Бюл. № 1. 5 с.

99. Сайт компании ООО «Энергосберегающие Технологии» [Электронный ресурс]. URL: <https://et-spb.ru/>

100. Сайт компании ООО «Компания Интер Электро» [Электронный ресурс]. URL: <https://kompaniya-inter-elektro.tiu.ru/>

101. Сайт компании АО «Тульский завод трансформаторов» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.tula-transformator.ru/prod.html>

102. Патент №2591040 РФ, МПК H02J 3/26 (2006.01). Устройство равномерного распределения однофазной нагрузки по фазам трёхфазной сети / Евсеев А. Н.; заявитель и патентообладатель Евсеев А. Н. № 2015119728/07, заявл. 26.05.2015; опубл. 10.07.2016 Бюл. № 19. 7 с.

103. Патент RU 2641649 С1, кл. H02J3/26. Устройство симметрирования и стабилизации трёхфазного напряжения / Егоров М.Ю.; опубл. 19.01.2018 Бюл.№ 2.

104. Ахметшин А.Р. Выбор оптимального технического решения для обеспечения нормативного уровня напряжения в распределительных сетях 0,4 – 10 кВ / А.Р. Ахметшин, Э.Ю. Абдуллазянов // Вестник ИрГТУ, 2011, № 6, С. 113 – 118.

105. Стрельбицкий Э.К. Исследование надёжности и качества электрических машин: автореф. дис. докт. техн. наук. – Томск, 1967. – 44 с.

106. Гольдберг О.Д. Качество и надёжность асинхронных двигателей. – М.:

Энергия, 1968. – 202 с.

107. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Наука, 2001. – 327 с.

108. Воропай Н.И., Назарычев А.Н. Концепция обеспечения надёжности в электроэнергетике / Воропай Н.И., Ковалёв Г.Ф., Кучеров Ю.Н., Назарычев А.Н. и др. – М.: ООО ИД «ЭНЕРГИЯ», 2013. – 304 с.

109. Харлампыева С.С., Горелов С.В., Сахнова Н.Н., Булыгина А.В., Масунов И.Г. Анализ методов повышения энергоэффективности систем энергоснабжения // Актуальные вопросы энергетики. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Омск, 2021, С. 14 – 18.

110. Назарычев А.Н. Контроль и управление качеством электроэнергии, диагностика и надёжность оборудования энергетических систем: монография / А.Н. Назарычев, А.И. Потапов, А.В. Майоров и др. – Т. 1: Диагностика, ресурс, надёжность объектов энергетики. СПб.: Политехника Сервис, 2022. – 612 с.

111. Иерархическое моделирование систем энергетики: монография / отв. ред. Н.И. Воропай, В.А. Стенников; Рос.акад.наук, Сиб.отд-ние, Ин-т систем энергетики им. Л.А. Мелентьева. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2020. – 314 с.

112. Ежова М. С., Полевой В. Е. Анализ методов расчёта показателей надёжности асинхронных двигателей // Известия ТулГУ. Технические науки. 2013, №9-1, С. 31 – 35.

113. A. Ruf, J. Paustenbach, D. Franck, K. Hameyer. A methodology to identify electrical ageing of winding insulation systems. IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC 2017). 2017, pp. 1 – 7. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2017.8002305>

114. Андреев Д.А., Назарычев А.Н., Таджибаев А.И. Определение вероятности отказа оборудования электросетевых предприятий на основе оценки технического состояния / Под ред. А.Н. Назарычева: ФГАОУ «ПЭИПК». – СПб., 2017. – 194 с

115. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
116. Кравченко Н.С. Методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей / Н.С. Кравченко, О.Г. Ревинская. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2017. – 121 с.
117. Lemeshko V.Yu, Lemeshko S.B., Postovalov S.N. Statistic Distribution Models for Some Nonparametric Goodness-of-Fit Tests in Testing Composite Hypotheses // Communications in Statistics - Theory and Methods. 2010, Vol. 39, №. 3, pp. 460 – 471.
118. Nick T.T. Statistical Distributions: Applications and Parameter Estimates. Springer Cham. 2017, Vol.1, p.172.
119. Villaseñor J. Three-Parameters Log-Normal Distribution Frequency // Analyses of Natural Extreme Events. 2021, pp. 83 – 109.
120. Rossi Riccardo et al. Upgrading Model Selection Criteria with Goodness of Fit Tests for Practical Applications // Entropy (Basel, Switzerland). 2020, Vol. 22(4), pp. 447 – 453.
121. Ushanov S.V., Ogurtsov D.A. Estimation of the Frocini criteria and omega square criteria statistics by the statistical tests method for a mixture of normal distributions // Siberian Aerospace Magazine, 2019, №1, pp.28 – 34.
122. Вероятность и математическая статистика: Энциклопедия. Под ред. Прохорова Ю.В. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1999, 910 с.
123. Kalemkerian J. Truncated Cramer-von Mises test of normality // Communications in Statistics - Theory and Methods. 2019, Vol.48, №4, pp.3956 – 3975.
124. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. – М.: Наука. Главная редакция физико – математической литературы, 1983. – 416 с.
125. Технические данные асинхронных электродвигателей переменного тока с к.з. ротором серии АИ [Электронный ресурс]. URL: [http:// principact.ru/content/view/166/72/](http://principact.ru/content/view/166/72/)

126. Технические характеристики асинхронных электродвигателей серии 4А. Номинальная частота вращения 1500 об/мин [Электронный ресурс]. URL: <http://www.elektrikii.ru/publ/6-1-0-55>

127. Гондуров С.А., Михалев С.В., Пирогов М.Г., Захаров О.Г. Расчёт уставок для цифровых устройств релейной защиты. Часть 5. Защита электродвигателей от перегрузки [Электронный ресурс]. URL:<http://www.bmrzzakharov.narod.ru/raschet/overload.html>

128. Cardenas J. Relay Protection, Control, and Information Management in the Modern Power Systems. Adneli Consultant. 2021, Vol.1, p.562.

129. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества энергии в электрических сетях. – Киев: Наук.думка, 1985. – 268 с.

130. Церазов А. Л. Исследование влияния несимметрии и несинусоидальности напряжения на работу трёхфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором: Автореферат дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук / М-во высш. и сред. спец. образования РСФСР. Моск. ордена Ленина энергет. ин-т. – М., 1963. – 27 с.

131. Шведов Г.В. Потери электроэнергии при её транспорте по электрическим сетям: расчёт, анализ, нормирование и снижение / Г.В. Шведов, О.В. Сипачева, О.В. Савченко; под ред. Ю.С. Железко. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – 424 с.

132. Loseva O. Value-Based Approach To Evaluating Investment Projects // Proceedings of the II International Scientific Conference GCPMED. 2020, pp.1056 – 1065.

133. Неполное Руководство по SQLite для пользователей Windows [Электронный ресурс] // Руководство по SQLite: сайт URL: <http://er.nau.edu.ua/bitstream/NAU/10100/1/SQLite.Allow.pdf>.

134. Зиборов В.В. Visual C# 2012 на примерах. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2013. – 480 с.

135. Романова В.В., Балбекина К.С. Свидетельство №2018665997 Российская

Федерация. Свидетельство об официальной государственной регистрации программ для ЭВМ. Программа для определения оптимального места установки средств симметрирования. Реестр программ для ЭВМ. 1 с.

136. Прейскурант цен на капитальный ремонт электродвигателей [Электронный ресурс]. URL: http://www.megom.ru/remont_more1/

137. Назарычев А.Н. Надёжность и оценка технического состояния оборудования систем электроснабжения / А.Н. Назарычев, Д.С. Крупенёв. – Новосибирск: Наука, 2020. – 224 с.

138. Гражданский кодекс Российской Федерации. Часть 2 от 26 января 1996 г. №14-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. – М.: Ось-89, 1996.

139. Постановление Правительства РФ от 06.05.2011 №354 (ред. от 12.04.2023) «О предоставлении коммунальных услуг собственникам и пользователям помещений в многоквартирных домах и жилых домов» [Электронный ресурс]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_114247/40033c283166de1f163f769bdb51232795c05336/

140. Правила присоединения потребителей к сети общего назначения по условиям влияния на качество электроэнергии. Инструктивные материалы по компенсации реактивной мощности и качеству электрической энергии [Электронный ресурс]. URL: <https://linvit.ru/documents.html>

141. Инструкция о порядке расчётов за электрическую и тепловую энергию. Рег. № 449 от 28.12.93 г. Минюста России.

142. Федеральный закон «О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд» от 05.04.2013 №44-ФЗ [Электронный ресурс]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_144624/?ysclid=lgu8637vg3551893589

143. Серков А.В. Правовая ответственность за нарушение требований к качеству энергии // Коммунальный комплекс России. Научный журнал. – М: Изд-во «Информ», №3 (51), 2015, С.81 – 84.

144. Сендерович Г.А., Дяченко А.В. Актуальность определения ответственности за нарушение качества электроэнергии по показателям колебаний напряжения // Электротехника и электромеханика, 2016, №2, С.54 – 60.

145. Непомнящий В.А. Экономические потери от нарушений электроснабжения потребителей. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 188 с.

146. Бухгалтерский баланс за 2018 год. 2019. – 178 с.

147. Shaturaev J. The Main Indicator of Efficiency of Investment Projects – Calculation of Net Current Value. The scientific heritage. 2021, Vol 3, pp. 8 – 14.

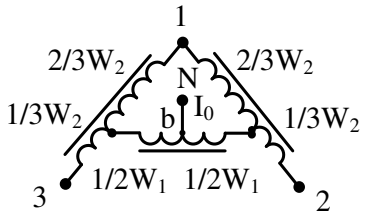
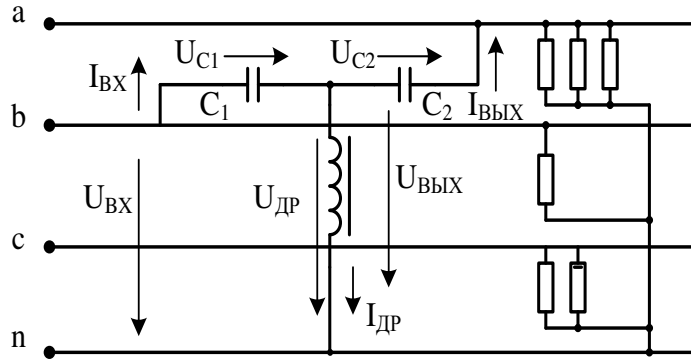
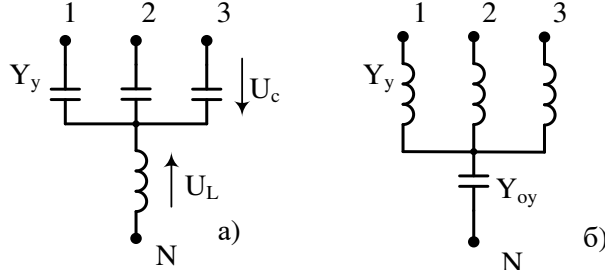
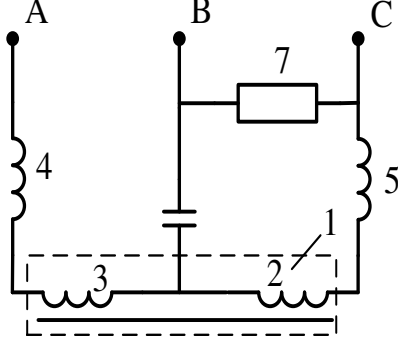
148. Ковалев В.В. Методы оценки инвестиционных проектов / В.В. Ковалев. – М.: Финансы и статистика, 2015. – 284 с.

149. Ivanov S.A., Alekseev A.E., Seregin S.N. Modern methods for evaluating investment projects, programs and policies in Russia // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2018, Vol. 9, pp. 2375 – 2379.

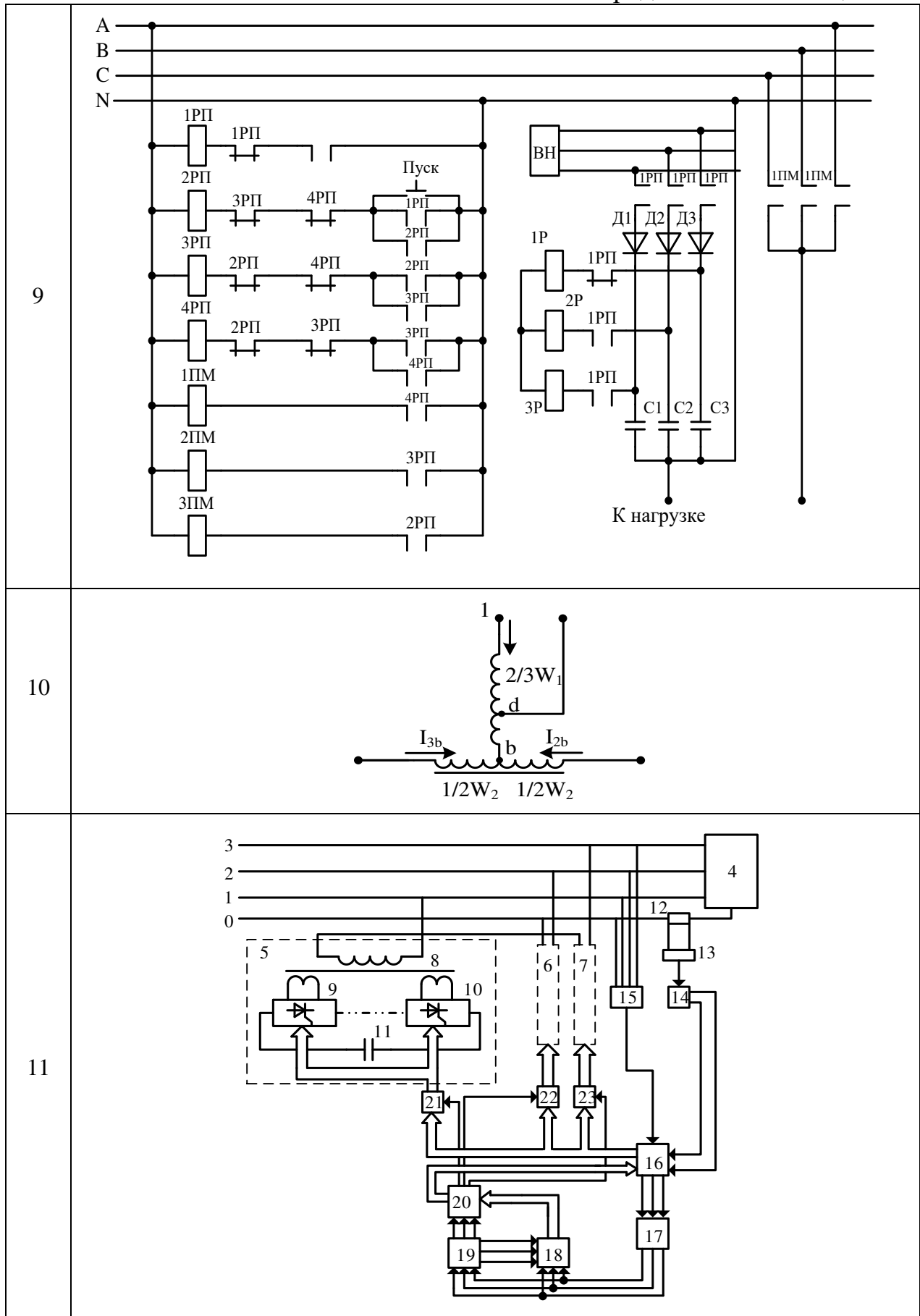
ПРИЛОЖЕНИЕ А

ПЕРЕЧЕНЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ КОРРЕКЦИИ ВЕЛИЧИНЫ
НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЙ

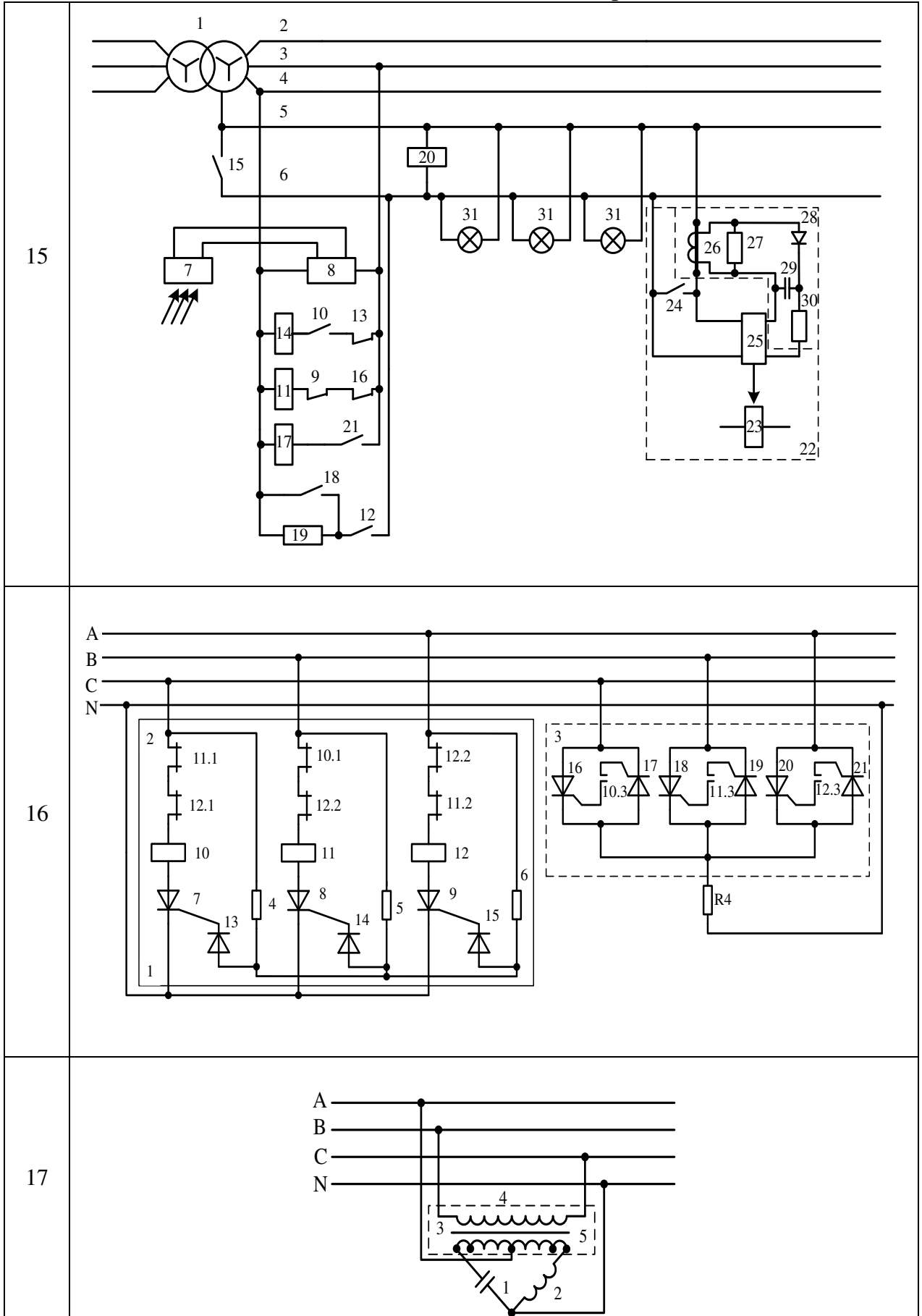
Таблица А.1 – Схемы технических средств коррекции величины несимметрии напряжений

№	Схемы технических устройств снижения несимметрии напряжений
1	
2	
3	
4	

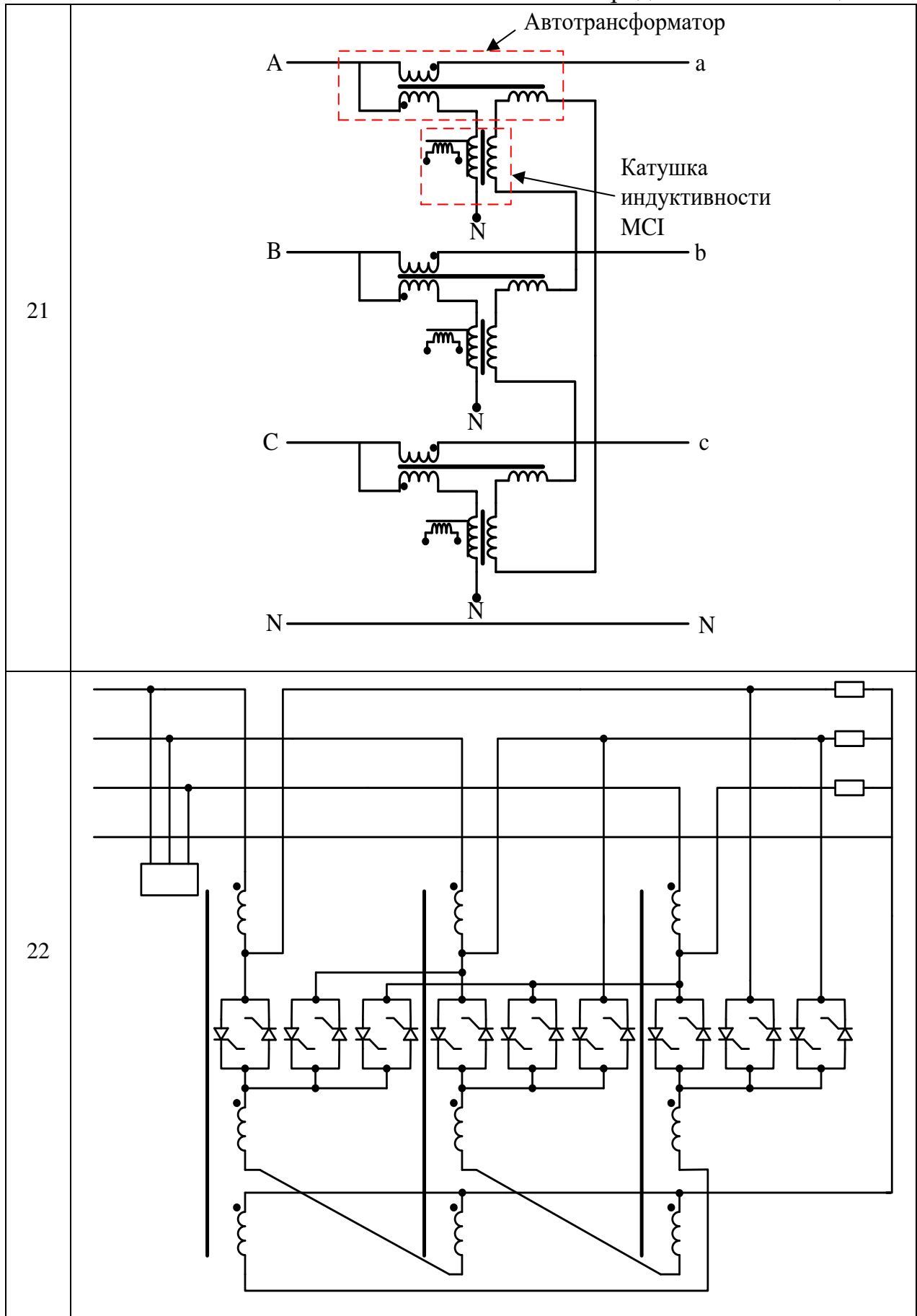
<p>5</p>	
<p>6</p>	
<p>7</p>	
<p>8</p>	

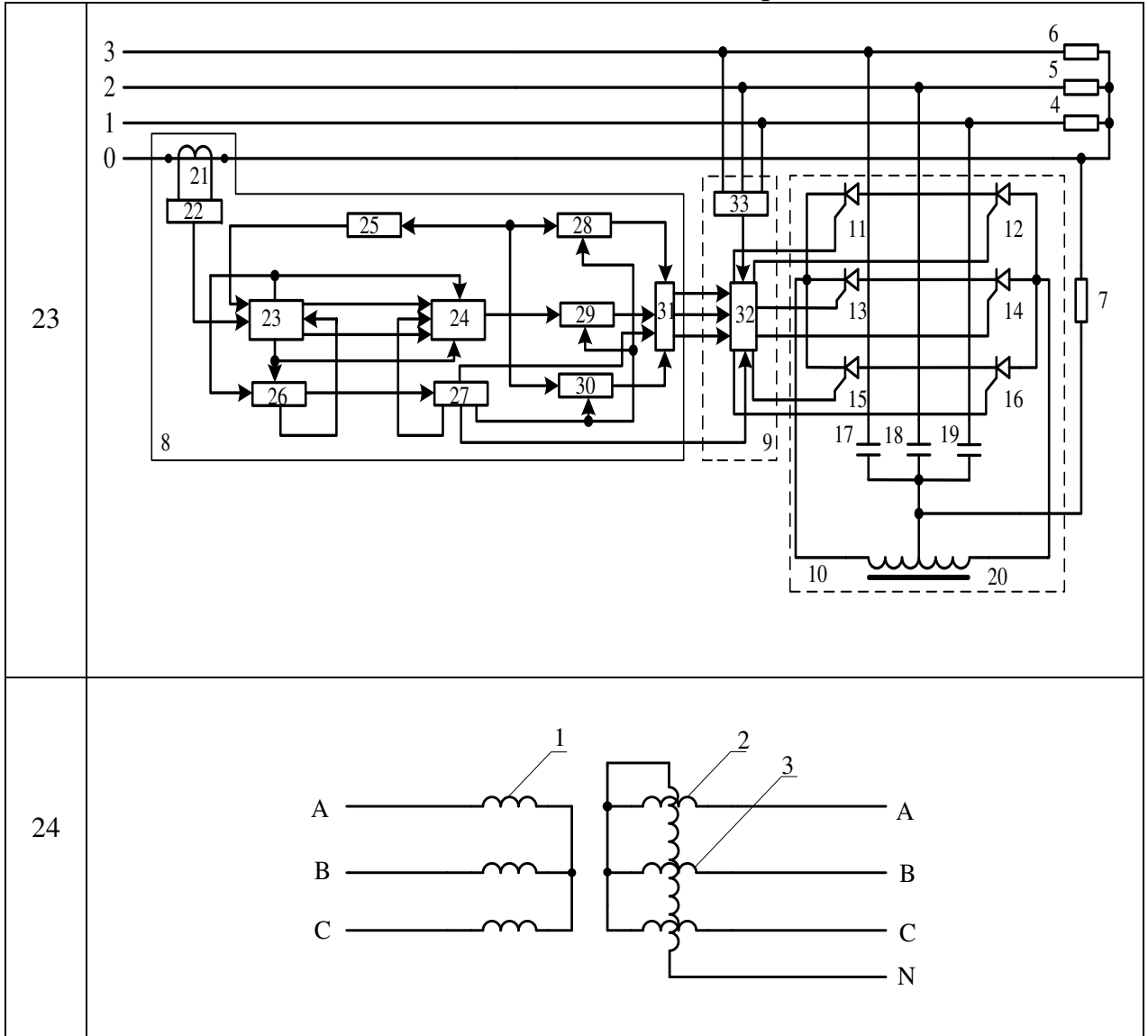


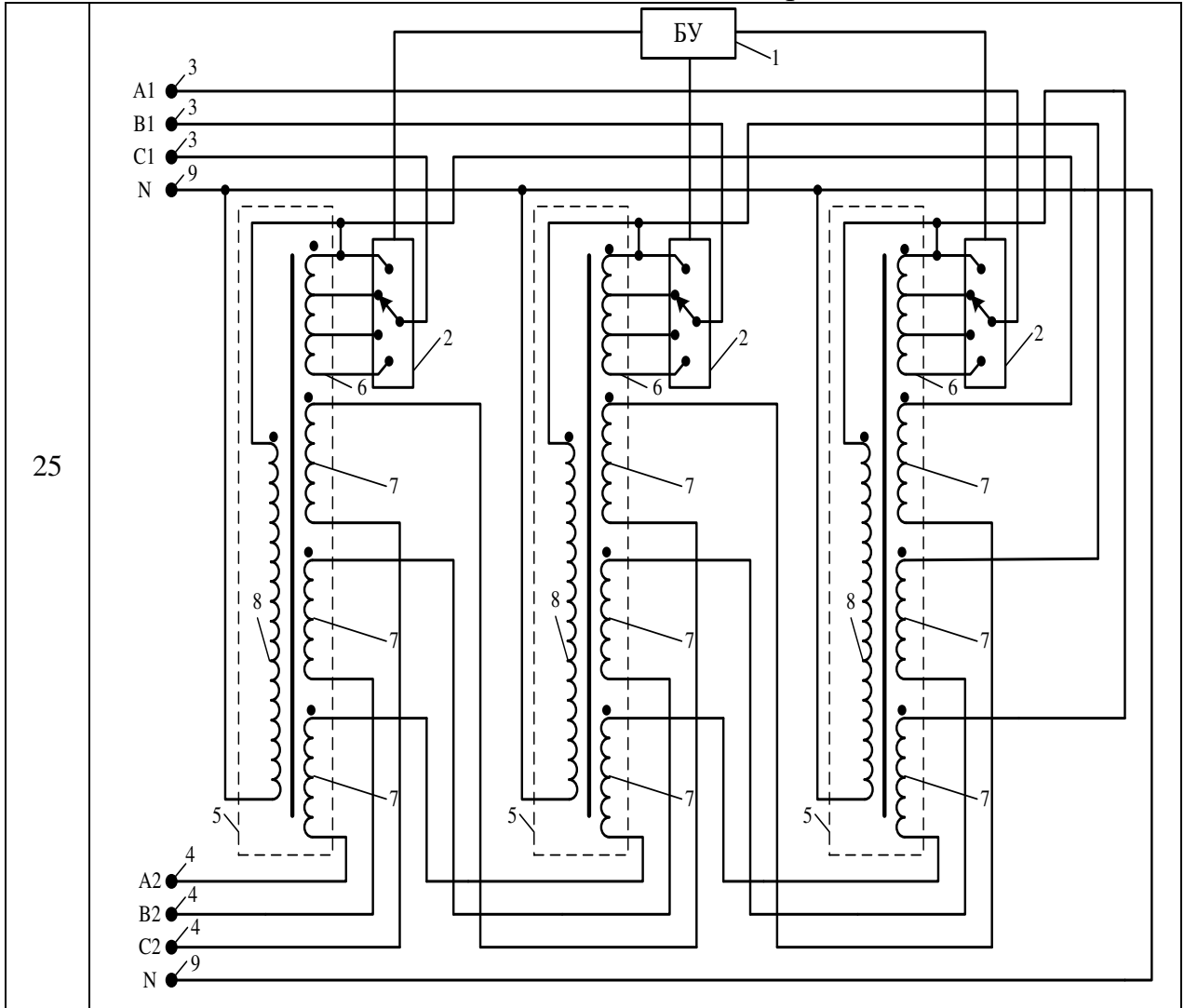
<p>12</p>	
<p>13</p>	
<p>14</p>	



<p>18</p>	<p>10 9 БОТ 11 12 13 14 Ш 15 1 БЛОК УПРАВЛЕНИЯ Управление коммутаторами 5,6,7,8,10 5 6 7 3 4 8 2</p>
<p>19</p>	<p>1 2 3 4 5 6 7 8</p>
<p>20</p>	<p>A 5 B C 6 1 2 2 2 2 2 2 7 4 N1 N2</p>







ПРИЛОЖЕНИЕ Б

**РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ АСИНХРОННЫХ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ СЕРИИ 4А, АИ с $P_H = 7,5; 75; 200$ кВт**

Таблица Б.1 – Результаты моделирования АД серии 4А $P_H = 7,5$ кВт

Линейные напряжения, В			Фазные напряжения, В			Фазные токи, А			K_{2U}	Фазные токи, в % от $I_{ном}$		
U_{AB}	U_{AC}	U_{BC}	U_A	U_B	U_C	I_A	I_B	I_C	%	I_A	I_B	I_C
Холостой ход												
379,6	379,9	379,8	220	220	220	7,358	7,369	7,355	0	51,56%	51,64%	51,54%
383,3	378,2	378	221,49	221,28	215,1	6,842	8,738	6,537	1	47,95%	61,23%	45,81%
387,1	376,4	376,1	223,58	223,48	210,79	6,716	10,15	5,98	2	47,06%	71,13%	41,91%
391	374,4	374,3	225,78	225,79	206,3	6,937	11,7	5,798	3	48,61%	81,99%	40,63%
394,7	372,7	372,5	228,1	228	201,9	7,451	13,2	5,995	4	52,21%	92,50%	42,01%
398,5	370,9	370,8	230,2	230,1	197,6	7,907	14,15	6,311	5	55,41%	99,16%	44,23%
20%												
379,6	379,9	379,8	220	220	220	7,206	7,198	7,177	0	50,50%	50,44%	50,29%
383,3	378,2	378	221,49	221,28	215,1	7,607	8,922	6,481	1	53,31%	62,52%	45,42%
387,1	376,4	376,1	223,58	223,48	210,79	7,927	10,29	5,476	2	55,55%	72,11%	38,37%
391	374,4	374,3	225,78	225,79	206,3	8,504	11,75	4,706	3	59,59%	82,34%	32,98%
394,7	372,7	372,5	228,1	228	201,9	9,303	13,22	4,355	4	65,19%	92,64%	30,52%
398,5	370,9	370,8	230,2	230,1	197,6	10,25	14,69	4,498	5	71,83%	102,94%	31,52%
40%												
379,6	379,9	379,8	220	220	220	8,71	8,696	8,678	0	61,04%	60,94%	60,81%
383,3	378,2	378	221,49	221,28	215,1	8,719	9,391	6,898	1	61,10%	65,81%	48,34%
387,1	376,4	376,1	223,58	223,48	210,79	9,673	11,03	6,012	2	67,79%	77,30%	42,13%
391	374,4	374,3	225,78	225,79	206,3	10,48	12,38	4,778	3	73,44%	86,76%	33,48%
394,7	372,7	372,5	228,1	228	201,9	11,43	13,73	3,074	4	80,10%	96,22%	21,54%
398,5	370,9	370,8	230,2	230,1	197,6	12,45	15,08	3,032	5	87,25%	105,68%	21,25%
60%												
379,6	379,9	379,8	220	220	220	9,987	9,959	9,947	0	69,99%	69,79%	69,71%
383,3	378,2	378	221,49	221,28	215,1	10,92	11,19	8,924	1	76,52%	78,42%	62,54%
387,1	376,4	376,1	223,58	223,48	210,79	11,72	12,26	7,429	2	82,13%	85,91%	52,06%
391	374,4	374,3	225,78	225,79	206,3	12,47	13,08	5,645	3	87,39%	91,66%	39,56%
394,7	372,7	372,5	228,1	228	201,9	13,7	14,67	4,568	4	96,01%	102,80%	32,01%
398,5	370,9	370,8	230,2	230,1	197,6	14,83	15,94	3,247	5	103,92%	111,70%	22,75%
80%												
379,6	379,9	379,8	220	220	220	12	12	12	0	84,09%	84,09%	84,09%
383,3	378,2	378	221,49	221,28	215,1	13,05	13,07	10,9	1	91,45%	91,59%	76,38%
387,1	376,4	376,1	223,58	223,48	210,79	14	13,92	9,389	2	98,11%	97,55%	65,80%
391	374,4	374,3	225,78	225,79	206,3	15,03	14,94	7,892	3	105,33%	104,70%	55,30%
394,7	372,7	372,5	228,1	228	201,9	16,13	16,05	6,442	4	113,03%	112,47%	45,14%
398,5	370,9	370,8	230,2	230,1	197,6	17,29	17,19	5,012	5	121,16%	120,46%	35,12%
100%												
379,6	379,9	379,8	220	220	220	14,27	14,27	14,27	0	100,00%	100,00%	100,00%
383,3	378,2	378	221,49	221,28	215,1	15,25	14,88	12,87	1	106,87%	104,27%	90,19%
387,1	376,4	376,1	223,58	223,48	210,79	16,44	15,91	11,69	2	115,21%	111,49%	81,92%
391	374,4	374,3	225,78	225,79	206,3	17,37	16,45	9,982	3	121,72%	115,28%	69,95%
394,7	372,7	372,5	228,1	228	201,9	18,69	17,75	8,776	4	130,97%	124,39%	61,50%
398,5	370,9	370,8	230,2	230,1	197,6	19,86	18,79	7,377	5	139,17%	131,67%	51,70%
120%												
379,6	379,9	379,8	220	220	220	16,8	16,73	16,77	0	117,73%	117,24%	117,52%
383,3	378,2	378	221,49	221,28	215,1	17,81	17,31	15,39	1	124,81%	121,30%	107,85%
387,1	376,4	376,1	223,58	223,48	210,79	18,86	17,91	14	2	132,17%	125,51%	98,11%
391	374,4	374,3	225,78	225,79	206,3	20,03	18,64	12,57	3	140,36%	130,62%	88,09%
394,7	372,7	372,5	228,1	228	201,9	21,37	19,81	11,35	4	149,75%	138,82%	79,54%
398,5	370,9	370,8	230,2	230,1	197,6	22,56	20,73	9,986	5	158,09%	145,27%	69,98%

Таблица Б.2 – Результаты моделирования АД серии АИ Р_н = 7,5 кВт

Линейные напряжения, В			Фазные напряжения, В			Фазные токи, А			K _{2U}	Фазные токи, в % от I _{ном}		
U _{AB}	U _{AC}	U _{BC}	U _A	U _B	U _C	I _A	I _B	I _C		%	I _A	I _B
Холостой ход												
379,6	379,9	379,8	220	220	220	5,115	5,332	5,043	0	36,51%	38,06%	36,00%
383,3	378,2	378	221,49	221,28	215,1	4,866	6,033	4,181	1	34,73%	43,06%	29,84%
387,1	376,4	376,1	223,58	223,48	210,79	5,111	7,666	4,433	2	36,48%	54,72%	31,64%
391	374,4	374,3	225,78	225,79	206,3	5,354	8,805	4,208	3	38,22%	62,85%	30,04%
394,7	372,7	372,5	228,1	228	201,9	5,804	10,04	4,434	4	41,43%	71,66%	31,65%
398,5	370,9	370,8	230,2	230,1	197,6	6,364	11	4,653	5	45,42%	78,52%	33,21%
20%												
379,6	379,9	379,8	220	220	220	5,907	5,878	5,885	0	42,16%	41,96%	42,01%
383,3	378,2	378	221,49	221,28	215,1	6,056	6,797	4,954	1	43,23%	48,52%	35,36%
387,1	376,4	376,1	223,58	223,48	210,79	6,39	7,81	4,083	2	45,61%	55,75%	29,14%
391	374,4	374,3	225,78	225,79	206,3	6,97	8,885	3,315	3	49,75%	63,42%	23,66%
394,7	372,7	372,5	228,1	228	201,9	7,499	9,69	2,563	4	53,53%	69,16%	18,29%
398,5	370,9	370,8	230,2	230,1	197,6	8,389	11	2,664	5	59,88%	78,52%	19,01%
40%												
379,6	379,9	379,8	220	220	220	7,089	7,079	7,065	0	50,60%	50,53%	50,43%
383,3	378,2	378	221,49	221,28	215,1	7,735	7,954	6,195	1	55,21%	56,77%	44,22%
387,1	376,4	376,1	223,58	223,48	210,79	8,296	8,802	5,134	2	59,21%	62,83%	36,65%
391	374,4	374,3	225,78	225,79	206,3	8,909	9,466	3,819	3	63,59%	67,57%	27,26%
394,7	372,7	372,5	228,1	228	201,9	9,709	10,4	2,768	4	69,30%	74,23%	19,76%
398,5	370,9	370,8	230,2	230,1	197,6	10,66	11,6	2,05	5	76,09%	82,80%	14,63%
60%												
379,6	379,9	379,8	220	220	220	9,21	9,174	9,192	0	65,74%	65,48%	65,61%
383,3	378,2	378	221,49	221,28	215,1	9,835	9,738	8,134	1	70,20%	69,51%	58,06%
387,1	376,4	376,1	223,58	223,48	210,79	10,4	10,16	6,867	2	74,23%	72,52%	49,01%
391	374,4	374,3	225,78	225,79	206,3	11,23	10,88	5,753	3	80,16%	77,66%	41,06%
394,7	372,7	372,5	228,1	228	201,9	12,19	11,91	4,812	4	87,01%	85,01%	34,35%
398,5	370,9	370,8	230,2	230,1	197,6	13,08	12,75	3,744	5	93,36%	91,01%	26,72%
80%												
379,6	379,9	379,8	220	220	220	11,3	11,31	11,3	0	80,66%	80,73%	80,66%
383,3	378,2	378	221,49	221,28	215,1	12,21	11,91	10,45	1	87,15%	85,01%	74,59%
387,1	376,4	376,1	223,58	223,48	210,79	12,94	12,4	9,439	2	92,36%	88,51%	67,37%
391	374,4	374,3	225,78	225,79	206,3	13,82	13	8,25	3	98,64%	92,79%	58,89%
394,7	372,7	372,5	228,1	228	201,9	14,71	13,67	7,19	4	105,00%	97,57%	51,32%
398,5	370,9	370,8	230,2	230,1	197,6	15,62	14,38	6,163	5	111,49%	102,64%	43,99%
100%												
379,6	379,9	379,8	220	220	220	14,01	14,01	14,01	0	100,00%	100,00%	100,00%
383,3	378,2	378	221,49	221,28	215,1	14,66	14,18	12,84	1	104,64%	101,21%	91,65%
387,1	376,4	376,1	223,58	223,48	210,79	15,51	14,56	11,82	2	110,71%	103,93%	84,37%
391	374,4	374,3	225,78	225,79	206,3	16,4	15,08	10,77	3	117,06%	107,64%	76,87%
394,7	372,7	372,5	228,1	228	201,9	17,39	15,78	9,822	4	124,13%	112,63%	70,11%
398,5	370,9	370,8	230,2	230,1	197,6	18,31	16,41	8,825	5	130,69%	117,13%	62,99%
120%												
379,6	379,9	379,8	220	220	220	16,74	16,71	16,74	0	119,49%	119,27%	119,49%
383,3	378,2	378	221,49	221,28	215,1	17,44	16,87	15,6	1	124,48%	120,41%	111,35%
387,1	376,4	376,1	223,58	223,48	210,79	18,39	17,34	14,69	2	131,26%	123,77%	104,85%
391	374,4	374,3	225,78	225,79	206,3	19,3	17,73	13,64	3	137,76%	126,55%	97,36%
394,7	372,7	372,5	228,1	228	201,9	20,21	18,22	12,63	4	144,25%	130,05%	90,15%
398,5	370,9	370,8	230,2	230,1	197,6	21,14	18,76	11,65	5	150,89%	133,90%	83,15%

Таблица Б.3 – Результаты моделирования АД серии 4А Р_н = 75 кВт

Линейные напряжения, В			Фазные напряжения, В			Фазные токи, А			K_{2U}	Фазные токи, в % от $I_{ном}$		
U _{AB}	U _{AC}	U _{BC}	U _A	U _B	U _C	I _A	I _B	I _C	%	I _A	I _B	I _C
Холостой ход												
379,6	379,9	379,8	220	220	220	50,25	50,25	50,25	0	37,61%	37,61%	37,61%
383,3	378,2	378	221,49	221,28	215,1	58,16	70,68	44	1	43,53%	52,90%	32,93%
387,1	376,4	376,1	223,58	223,48	210,79	63,48	85	33,94	2	47,51%	63,62%	25,40%
391	374,4	374,3	225,78	225,79	206,3	72,48	100,5	29,51	3	54,25%	75,22%	22,09%
394,7	372,7	372,5	228,1	228	201,9	84,15	116,6	33,46	4	62,99%	87,28%	25,04%
398,5	370,9	370,8	230,2	230,1	197,6	96,77	132,4	43,23	5	72,43%	99,10%	32,36%
20%												
379,6	379,9	379,8	220	220	220	55,42	55,42	55,42	0	41,48%	41,48%	41,48%
383,3	378,2	378	221,49	221,28	215,1	68,37	72,01	45,74	1	34,24%	53,90%	34,24%
387,1	376,4	376,1	223,58	223,48	210,79	77,81	84,05	30,54	2	58,24%	62,91%	22,86%
391	374,4	374,3	225,78	225,79	206,3	90,3	98,57	16,08	3	67,59%	73,78%	12,04%
394,7	372,7	372,5	228,1	228	201,9	102,6	112,5	10,35	4	76,80%	84,21%	7,75%
398,5	370,9	370,8	230,2	230,1	197,6	113,7	120,4	26,32	5	85,10%	90,12%	19,70%
40%												
379,6	379,9	379,8	220	220	220	69,45	69,45	69,45	0	51,98%	51,98%	51,98%
383,3	378,2	378	221,49	221,28	215,1	84,79	81,32	58,84	1	63,47%	60,87%	44,04%
387,1	376,4	376,1	223,58	223,48	210,79	92,45	83,65	38,32	2	69,20%	62,61%	28,68%
391	374,4	374,3	225,78	225,79	206,3	110	101,6	28,14	3	82,34%	76,05%	21,06%
394,7	372,7	372,5	228,1	228	201,9	124	114,4	14,29	4	92,81%	85,63%	10,70%
398,5	370,9	370,8	230,2	230,1	197,6	138,9	128	12,41	5	103,97%	95,81%	9,29%
60%												
379,6	379,9	379,8	220	220	220	92,89	92,89	92,89	0	69,53%	69,53%	69,53%
383,3	378,2	378	221,49	221,28	215,1	105	96,76	78,23	1	78,59%	72,43%	58,56%
387,1	376,4	376,1	223,58	223,48	210,79	114,2	96,91	60,33	2	85,48%	72,54%	45,16%
391	374,4	374,3	225,78	225,79	206,3	132,5	111,4	50,67	3	99,18%	83,38%	37,93%
394,7	372,7	372,5	228,1	228	201,9	146,8	121,5	38,8	4	109,88%	90,94%	29,04%
398,5	370,9	370,8	230,2	230,1	197,6	161,6	132,8	31,88	5	120,96%	99,40%	23,86%
80%												
379,6	379,9	379,8	220	220	220	113	113	113	0	84,58%	84,58%	84,58%
383,3	378,2	378	221,49	221,28	215,1	127,2	115,7	100,1	1	95,21%	86,60%	74,93%
387,1	376,4	376,1	223,58	223,48	210,79	141,1	119,9	87,25	2	105,61%	89,75%	65,31%
391	374,4	374,3	225,78	225,79	206,3	155,8	126,2	74,65	3	116,62%	94,46%	55,88%
394,7	372,7	372,5	228,1	228	201,9	170,2	133,7	63,19	4	127,40%	100,07%	47,30%
398,5	370,9	370,8	230,2	230,1	197,6	183,4	136,6	56,47	5	137,28%	102,25%	42,27%
100%												
379,6	379,9	379,8	220	220	220	133,6	133,6	133,6	0	100,00%	100,00%	100,00%
383,3	378,2	378	221,49	221,28	215,1	150,9	137,3	123,9	1	112,95%	102,77%	92,74%
387,1	376,4	376,1	223,58	223,48	210,79	162	134,8	108,7	2	121,26%	100,90%	81,36%
391	374,4	374,3	225,78	225,79	206,3	180	143,9	99,65	3	134,73%	107,71%	74,59%
394,7	372,7	372,5	228,1	228	201,9	194,6	149,9	88,14	4	145,66%	112,20%	65,97%
398,5	370,9	370,8	230,2	230,1	197,6	210,2	157,2	79,83	5	157,34%	117,66%	59,75%
120%												
379,6	379,9	379,8	220	220	220	161	161	161	0	120,51%	120,51%	120,51%
383,3	378,2	378	221,49	221,28	215,1	176	161,3	149	1	131,74%	120,73%	111,53%
387,1	376,4	376,1	223,58	223,48	210,79	190,2	162,4	137,2	2	142,37%	121,56%	102,69%
391	374,4	374,3	225,78	225,79	206,3	202,8	159,9	123,2	3	151,80%	119,69%	92,22%
394,7	372,7	372,5	228,1	228	201,9	220,4	169,1	114,4	4	164,97%	126,57%	85,63%
398,5	370,9	370,8	230,2	230,1	197,6	235,7	174,8	105,5	5	176,42%	130,84%	78,97%

Таблица Б.4 – Результаты моделирования АД серии АИ Р_н = 75 кВт

Линейные напряжения, В			Фазные напряжения, В			Фазные токи, А			K _{2U}	Фазные токи, в % от I _{ном}		
U _{AB}	U _{AC}	U _{BC}	U _A	U _B	U _C	I _A	I _B	I _C		%	I _A	I _B
Холостой ход												
379,6	379,9	379,8	220	220	220	59,41	59,41	59,41	0	44,74%	44,74%	44,74%
383,3	378,2	378	221,49	221,28	215,1	56,41	68,65	36,11	1	42,48%	51,69%	27,19%
387,1	376,4	376,1	223,58	223,48	210,79	71,65	92,39	30,37	2	53,95%	69,57%	22,87%
391	374,4	374,3	225,78	225,79	206,3	84,4	110,8	26,5	3	63,55%	83,43%	19,95%
394,7	372,7	372,5	228,1	228	201,9	98,61	128,7	35,6	4	74,25%	96,91%	26,81%
398,5	370,9	370,8	230,2	230,1	197,6	115,4	148	50,47	5	86,90%	111,45%	38,00%
20%												
379,6	379,9	379,8	220	220	220	63,91	63,91	63,91	0	48,13%	48,13%	48,13%
383,3	378,2	378	221,49	221,28	215,1	73,7	75,97	44,95	1	33,85%	57,21%	33,85%
387,1	376,4	376,1	223,58	223,48	210,79	86,41	90,19	26,34	2	65,07%	67,91%	19,83%
391	374,4	374,3	225,78	225,79	206,3	102	106,7	8,179	3	76,81%	80,35%	6,16%
394,7	372,7	372,5	228,1	228	201,9	115	116,9	20,53	4	86,60%	88,03%	15,46%
398,5	370,9	370,8	230,2	230,1	197,6	133,9	142,7	33,41	5	100,83%	107,45%	25,16%
40%												
379,6	379,9	379,8	220	220	220	76,43	76,43	76,43	0	57,55%	57,55%	57,55%
383,3	378,2	378	221,49	221,28	215,1	85,22	77,69	52,7	1	64,17%	58,50%	39,68%
387,1	376,4	376,1	223,58	223,48	210,79	105	94,54	40,22	2	79,07%	71,19%	30,29%
391	374,4	374,3	225,78	225,79	206,3	122	108,1	23,7	3	91,87%	81,40%	17,85%
394,7	372,7	372,5	228,1	228	201,9	139,1	122,8	16,26	4	104,74%	92,47%	12,24%
398,5	370,9	370,8	230,2	230,1	197,6	157,3	139,1	27,18	5	118,45%	104,74%	20,47%
60%												
379,6	379,9	379,8	220	220	220	93,94	93,94	93,94	0	70,74%	70,74%	70,74%
383,3	378,2	378	221,49	221,28	215,1	109,4	97,69	76,86	1	82,38%	73,56%	57,88%
387,1	376,4	376,1	223,58	223,48	210,79	125,7	104,8	61,12	2	94,65%	78,92%	46,02%
391	374,4	374,3	225,78	225,79	206,3	143,4	115,1	47,14	3	107,98%	86,67%	35,50%
394,7	372,7	372,5	228,1	228	201,9	161,2	127,3	38,11	4	121,39%	95,86%	28,70%
398,5	370,9	370,8	230,2	230,1	197,6	179,5	141,2	38,5	5	135,17%	106,33%	28,99%
80%												
379,6	379,9	379,8	220	220	220	110,5	110,5	110,5	0	83,21%	83,21%	83,21%
383,3	378,2	378	221,49	221,28	215,1	127	110,8	95,15	1	95,63%	83,43%	71,65%
387,1	376,4	376,1	223,58	223,48	210,79	148,1	119,9	84,28	2	111,52%	90,29%	63,46%
391	374,4	374,3	225,78	225,79	206,3	166,4	127,2	71,48	3	125,30%	95,78%	53,83%
394,7	372,7	372,5	228,1	228	201,9	182,2	130	63	4	137,20%	97,89%	47,44%
398,5	370,9	370,8	230,2	230,1	197,6	203	148,2	58,12	5	152,86%	111,60%	43,77%
100%												
379,6	379,9	379,8	220	220	220	132,8	132,8	132,8	0	100,00%	100,00%	100,00%
383,3	378,2	378	221,49	221,28	215,1	153,8	135,9	121,6	1	115,81%	102,33%	91,57%
387,1	376,4	376,1	223,58	223,48	210,79	171,3	137,9	108,2	2	128,99%	103,84%	81,48%
391	374,4	374,3	225,78	225,79	206,3	189,5	142,8	95,83	3	142,70%	107,53%	72,16%
394,7	372,7	372,5	228,1	228	201,9	207,9	149,6	85,88	4	156,55%	112,65%	64,67%
398,5	370,9	370,8	230,2	230,1	197,6	224,5	151,9	82,62	5	169,05%	114,38%	62,21%
120%												
379,6	379,9	379,8	220	220	220	159,36	159,36	159,36	0	120%	120%	120%
383,3	378,2	378	221,49	221,28	215,1	184,56	163,08	145,92	1	139%	123%	110%
387,1	376,4	376,1	223,58	223,48	210,79	205,56	165,48	129,84	2	155%	125%	98%
391	374,4	374,3	225,78	225,79	206,3	227,4	171,36	114,996	3	171%	129%	87%
394,7	372,7	372,5	228,1	228	201,9	249,48	179,52	103,056	4	188%	135%	78%
398,5	370,9	370,8	230,2	230,1	197,6	269,4	182,28	99,144	5	203%	137%	75%

Таблица Б.5 – Результаты моделирования АД серии 4А Р_н = 200 кВт

Линейные напряжения, В			Фазные напряжения, В			Фазные токи, А			K _{2U} %	Фазные токи, в % от I _{ном}		
U _{AB}	U _{AC}	U _{BC}	U _A	U _B	U _C	I _A	I _B	I _C		I _A	I _B	I _C
Холостой ход												
379,6	379,9	379,8	220	220	220	131,3	131,3	131,3	0	37,02%	37,02%	37,02%
383,3	378,2	378	221,49	221,28	215,1	125,2	147,2	77,8	1	35,30%	41,50%	21,93%
387,1	376,4	376,1	223,58	223,48	210,79	146,6	182,4	48,96	2	41,33%	51,42%	13,80%
391	374,4	374,3	225,78	225,79	206,3	175,9	220,5	45,79	3	49,59%	62,17%	12,91%
394,7	372,7	372,5	228,1	228	201,9	221,1	275,9	63,83	4	62,33%	77,78%	18,00%
398,5	370,9	370,8	230,2	230,1	197,6	255,2	314,5	94,51	5	71,95%	88,67%	26,65%
20%												
379,6	379,9	379,8	220	220	220	145,9	145,9	145,9	0	41,13%	41,13%	41,13%
383,3	378,2	378	221,49	221,28	215,1	157,3	150,5	90,28	1	25,45%	42,43%	25,45%
387,1	376,4	376,1	223,58	223,48	210,79	200,1	193,7	66,19	2	56,41%	54,61%	18,66%
391	374,4	374,3	225,78	225,79	206,3	235	226,8	26,38	3	66,25%	63,94%	7,44%
394,7	372,7	372,5	228,1	228	201,9	270,7	260,5	19,66	4	76,32%	73,44%	5,54%
398,5	370,9	370,8	230,2	230,1	197,6	307	295,6	58,11	5	86,55%	83,34%	16,38%
40%												
379,6	379,9	379,8	220	220	220	183,7	183,7	183,7	0	51,79%	51,79%	51,79%
383,3	378,2	378	221,49	221,28	215,1	216,3	193,7	147,4	1	60,98%	54,61%	41,56%
387,1	376,4	376,1	223,58	223,48	210,79	241	194,3	104,6	2	67,94%	54,78%	29,49%
391	374,4	374,3	225,78	225,79	206,3	279,5	216,9	80,38	3	78,80%	61,15%	22,66%
394,7	372,7	372,5	228,1	228	201,9	317,8	243,6	74,59	4	89,60%	68,68%	21,03%
398,5	370,9	370,8	230,2	230,1	197,6	364,3	291,8	74,91	5	102,71%	82,27%	21,12%
60%												
379,6	379,9	379,8	220	220	220	235,2	235,2	235,2	0	66,31%	66,31%	66,31%
383,3	378,2	378	221,49	221,28	215,1	270,9	236,7	202,6	1	76,37%	66,73%	57,12%
387,1	376,4	376,1	223,58	223,48	210,79	308	245,5	173,4	2	86,83%	69,21%	48,89%
391	374,4	374,3	225,78	225,79	206,3	339,1	244	144,5	3	95,60%	68,79%	40,74%
394,7	372,7	372,5	228,1	228	201,9	378,2	262,6	132,9	4	106,63%	74,03%	37,47%
398,5	370,9	370,8	230,2	230,1	197,6	418,2	286,5	133,7	5	117,90%	80,77%	37,69%
80%												
379,6	379,9	379,8	220	220	220	293	293	293	0	82,61%	82,61%	82,61%
383,3	378,2	378	221,49	221,28	215,1	330,7	289,6	263,5	1	93,23%	81,65%	74,29%
387,1	376,4	376,1	223,58	223,48	210,79	368,6	291,8	236,8	2	103,92%	82,27%	66,76%
391	374,4	374,3	225,78	225,79	206,3	401,4	285,1	209,7	3	113,17%	80,38%	59,12%
394,7	372,7	372,5	228,1	228	201,9	448	312,7	195,6	4	126,30%	88,16%	55,15%
398,5	370,9	370,8	230,2	230,1	197,6	481,1	313	189,9	5	135,64%	88,24%	53,54%
100%												
379,6	379,9	379,8	220	220	220	354,7	354,7	354,7	0	100,00%	100,00%	100,00%
383,3	378,2	378	221,49	221,28	215,1	393,9	348,4	327,4	1	111,05%	98,22%	92,30%
387,1	376,4	376,1	223,58	223,48	210,79	432,2	346,8	302,1	2	121,85%	97,77%	85,17%
391	374,4	374,3	225,78	225,79	206,3	472,8	349,9	279,2	3	133,30%	98,65%	78,71%
394,7	372,7	372,5	228,1	228	201,9	505,2	341,4	259,2	4	142,43%	96,25%	73,08%
398,5	370,9	370,8	230,2	230,1	197,6	552,2	368,2	249,2	5	155,68%	103,81%	70,26%
120%												
379,6	379,9	379,8	220	220	220	419,2	419,2	419,2	0	118,18%	118,18%	118,18%
383,3	378,2	378	221,49	221,28	215,1	458,9	411,3	393,5	1	129,38%	115,96%	110,94%
387,1	376,4	376,1	223,58	223,48	210,79	498,1	406,5	369,3	2	140,43%	114,60%	104,12%
391	374,4	374,3	225,78	225,79	206,3	538,2	405,3	346,5	3	151,73%	114,27%	97,69%
394,7	372,7	372,5	228,1	228	201,9	578,3	409,1	327,5	4	163,04%	115,34%	92,33%
398,5	370,9	370,8	230,2	230,1	197,6	611,9	400,4	313,4	5	172,51%	112,88%	88,36%

Таблица Б.6 – Результаты моделирования АД серии АИ Р_н = 200 кВт

Линейные напряжения, В			Фазные напряжения, В			Фазные токи, А			K _{2U}	Фазные токи, в % от I _{ном}		
U _{AB}	U _{AC}	U _{BC}	U _A	U _B	U _C	I _A	I _B	I _C		%	I _A	I _B
Холостой ход												
379,6	379,9	379,8	220	220	220	124,9	124,9	124,9	0	35,43%	35,43%	35,43%
383,3	378,2	378	221,49	221,28	215,1	135,9	154,4	90,87	1	38,55%	43,80%	25,78%
387,1	376,4	376,1	223,58	223,48	210,79	143,4	173,4	48,25	2	40,68%	49,19%	13,69%
391	374,4	374,3	225,78	225,79	206,3	180,8	220,6	41,87	3	51,29%	62,58%	11,88%
394,7	372,7	372,5	228,1	228	201,9	209,9	255,5	52,38	4	59,55%	72,48%	14,86%
398,5	370,9	370,8	230,2	230,1	197,6	242	291,5	80,47	5	68,65%	82,70%	22,83%
20%												
379,6	379,9	379,8	220	220	220	140,3	140,3	140,3	0	39,80%	39,80%	39,80%
383,3	378,2	378	221,49	221,28	215,1	153,6	144,4	91,35	1	43,57%	40,96%	25,91%
387,1	376,4	376,1	223,58	223,48	210,79	193,1	181,4	67,83	2	54,78%	51,46%	19,24%
391	374,4	374,3	225,78	225,79	206,3	216,1	195,3	25,54	3	61,30%	55,40%	7,25%
394,7	372,7	372,5	228,1	228	201,9	209,9	255,5	52,38	4	59,55%	72,48%	14,86%
398,5	370,9	370,8	230,2	230,1	197,6	286	258,6	66,98	5	81,13%	73,36%	19,00%
40%												
379,6	379,9	379,8	220	220	220	179,9	179,9	179,9	0	51,04%	51,04%	51,04%
383,3	378,2	378	221,49	221,28	215,1	210,8	186,2	147,2	1	59,80%	52,82%	41,76%
387,1	376,4	376,1	223,58	223,48	210,79	235,3	186,5	110,4	2	66,75%	52,91%	31,32%
391	374,4	374,3	225,78	225,79	206,3	278	216,8	91,93	3	78,87%	61,50%	26,08%
394,7	372,7	372,5	228,1	228	201,9	314	242,6	78,07	4	89,08%	68,82%	22,15%
398,5	370,9	370,8	230,2	230,1	197,6	342,8	254,3	90,59	5	97,25%	72,14%	25,70%
60%												
379,6	379,9	379,8	220	220	220	225,4	225,4	225,4	0	63,94%	63,94%	63,94%
383,3	378,2	378	221,49	221,28	215,1	251,4	214,9	188,8	1	71,32%	60,96%	53,56%
387,1	376,4	376,1	223,58	223,48	210,79	293,3	231,1	170,3	2	83,21%	65,56%	48,31%
391	374,4	374,3	225,78	225,79	206,3	329,6	243	148,1	3	93,50%	68,94%	42,01%
394,7	372,7	372,5	228,1	228	201,9	365,4	259,5	133,4	4	103,66%	73,62%	37,84%
398,5	370,9	370,8	230,2	230,1	197,6	395,8	265,8	133,8	5	112,28%	75,40%	37,96%
80%												
379,6	379,9	379,8	220	220	220	290,5	290,5	290,5	0	82,41%	82,41%	82,41%
383,3	378,2	378	221,49	221,28	215,1	318,8	276,9	258,2	1	90,44%	78,55%	73,25%
387,1	376,4	376,1	223,58	223,48	210,79	361,2	285,2	241,3	2	102,47%	80,91%	68,45%
391	374,4	374,3	225,78	225,79	206,3	392,3	277,4	217,7	3	111,29%	78,70%	61,76%
394,7	372,7	372,5	228,1	228	201,9	435,5	299,2	205,7	4	123,55%	84,88%	58,35%
398,5	370,9	370,8	230,2	230,1	197,6	471,9	311,7	197,1	5	133,87%	88,43%	55,91%
100%												
379,6	379,9	379,8	220	220	220	352,5	352,5	352,5	0	100,00%	100,00%	100,00%
383,3	378,2	378	221,49	221,28	215,1	388,8	345	328,7	1	110,30%	97,87%	93,25%
387,1	376,4	376,1	223,58	223,48	210,79	424,7	341,4	306,7	2	120,48%	96,85%	87,01%
391	374,4	374,3	225,78	225,79	206,3	457	331	283,4	3	129,65%	93,90%	80,40%
394,7	372,7	372,5	228,1	228	201,9	499,7	344,7	271,5	4	141,76%	97,79%	77,02%
398,5	370,9	370,8	230,2	230,1	197,6	530,5	339,93	260,2	5	150,50%	96,43%	73,82%
120%												
379,6	379,9	379,8	220	220	220	417,6	417,6	417,6	0	118,47%	118,47%	118,47%
383,3	378,2	378	221,49	221,28	215,1	454,5	408,2	394,8	1	128,94%	115,80%	112,00%
387,1	376,4	376,1	223,58	223,48	210,79	490,7	402	373,8	2	139,21%	114,04%	106,04%
391	374,4	374,3	225,78	225,79	206,3	528,4	398,4	354,1	3	149,90%	113,02%	100,45%
394,7	372,7	372,5	228,1	228	201,9	565,8	398,9	337,9	4	160,51%	113,16%	95,86%
398,5	370,9	370,8	230,2	230,1	197,6	597	390,4	324,1	5	169,36%	110,75%	91,94%

ПРИЛОЖЕНИЕ В
СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ
ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018665997

Программа для определения оптимального места установки
средств симметрирования

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Забайкальский государственный университет» (ФГБОУ ВО
«ЗабГУ») (RU)*

Авторы: *Балбекина Кристина Сергеевна (RU),
Романова Виктория Викторовна (RU)*

Заявка № 2018663343

Дата поступления 26 ноября 2018 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 11 декабря 2018 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



ПРИЛОЖЕНИЕ Г
АКТЫ О ВНЕДРЕНИИ

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Забайкальский государственный университет»

УТВЕРЖДАЮ



Проректор по образовательной

деятельности ФГБОУ ВО «ЗабГУ»

д-р пед. наук, доцент

С.Е. Старостина

2023 г.

АКТ

о внедрении и использовании в учебном процессе
ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет»
результатов диссертационной работы

Романовой Виктории Викторовны

на тему «СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СРОКА СЛУЖБЫ
НИЗКОВОЛЬТНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА»

Комиссией в составе проректора по образовательной деятельности ФГБОУ ВО «ЗабГУ» С.Е. Старостиной, заведующего кафедрой «Энергетики» энергетического факультета М.С. Басса, начальника учебно-методического управления И.М. Лисовской, составлен настоящий акт, подтверждающий, что на основании результатов исследований, выполненных в рамках диссертационной работы Романовой Виктории Викторовны на тему «Совершенствование методов оценки срока службы низковольтных асинхронных электродвигателей электротехнического комплекса», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы» разработана программа для ЭВМ (Свидетельство № 2018665997). Программа используется в учебном процессе кафедры «Энергетики» Забайкальского государственного университета:

- при проведении практических занятий в рамках курсов «Перспективные направления развития электротехнических комплексов», «Оптимизация режимов работы электроэнергетических систем» для студентов Энергетического факультета, обучающихся по направлению подготовки 13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника» направленность (профиль) «Энергосбережение и энергоэффективность»;

– в научно-исследовательской работе студентов бакалавриата и магистратуры.

Использование результатов диссертационной работы позволяет повысить качество подготовки специалистов в области электроэнергетики и расширяет диапазон знаний студентов.

Начальник учебно-методического управления



Лисовская И.М.

Заведующий кафедрой «Энергетики»,
к.т.н., доцент



Басе М.С.

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий ЭТЛ ОУКЭ
РУП «Белэнергосетьпроект»
М.А. Драко
« 02 » 2023 г.

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

Результатов диссертационного исследования Романовой Виктории Викторовны на тему «Совершенствование методов оценки срока службы низковольтных асинхронных электродвигателей электротехнического комплекса»

Диссертационная работа Романовой В.В. «Совершенствование методов оценки срока службы низковольтных асинхронных электродвигателей электротехнического комплекса» посвящена решению актуальной научно-технической задачи повышения эффективности эксплуатации электротехнического комплекса с промышленной электродвигательной нагрузкой за счёт улучшения качества напряжения в электрической сети.

Результаты, представленные в диссертационном исследовании Романовой В.В., представляют практический интерес и приняты к использованию в проектной деятельности электротехнической лаборатории отдела учета и качества электроэнергии (ЭТЛ ОУКЭ) научно-исследовательского и проектно-изыскательского республиканского унитарного предприятия «Белэнергосетьпроект» (г. Минск, Республика Беларусь). В частности, разработанная прикладная программа «Программа для определения оптимального места установки средств симметрирования» (свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2018665997 Российской Федерации), нашла применение при решении задач нормализации напряжения в электрических сетях Белорусской энергосистемы. Внедрение разработанной Романовой В.В. программы позволило сократить временные интервалы проектных работ.

Заведующий ЭТЛ ОУКЭ
РУП «Белэнергосетьпроект»,
м.т.н, инженер-исследователь



Драко М.А.

УТВЕРЖДАЮ
 Генеральный директор
 АО «ТАТЭЛЕКТРОМОНТАЖ»
 Солюянов Д.Ю.


«17» 04




АКТ

**Внедрения в производственную деятельность результатов
 диссертационной работы
 Романовой Виктории Викторовны
 на тему «Совершенствование методов оценки срока службы низковольтных
 асинхронных электродвигателей электротехнического комплекса»**

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы, выполненные Романовой Викторией Викторовной в ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет» в виде разработанного программного обеспечения «Программа для определения оптимального места установки средств симметрирования», свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2018665997 внедрены и используются техническими специалистами АО «Татэлектромонтаж» в производственной и инжиниринговой деятельности предприятия при проектировании, модернизации действующих систем электроснабжения в случае преобладания низкого качества питающего напряжения. Представленный программный продукт позволяет автоматизировать проектные процедуры нормализации напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий.

И.п.п. УП АО «ТАТЭМ» 
 (должность)




 (Ф.И.О.)