

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«ТЮМЕНСКИЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



ЛОСЕВ Федор Алексеевич

**ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
ОБЪЕКТОВ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ С ВЫСОКОВОЛЬТНЫМИ
АСИНХРОННЫМИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
д-р техн. наук, профессор
Сушков В. В.

Тюмень, 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 УСТОЙЧИВОСТЬ ПО НАПРЯЖЕНИЮ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОБЪЕКТОВ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ С ВЫСОКОВОЛЬТНЫМИ АСИНХРОННЫМИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ	11
1.1 Особенности электротехнических систем объектов нефтяных месторождений	11
1.2 Статистика нарушений электроснабжения нефтяного месторождения	13
1.3 Взаимозависимость источников питания непрерывных производств	19
1.4 Литературный обзор проблемы устойчивости электротехнических систем	26
1.5 Обзор технических средств для повышения устойчивости электротехнических систем с высоковольтными асинхронными электродвигателями	31
1.6 Выводы по главе 1	36
2 ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОБЪЕКТОВ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ПРОВАЛАХ НАПРЯЖЕНИЯ	37
2.1 Общие принципы построения математической модели электротехнической системы с высоковольтными асинхронными электродвигателями	37
2.2 Математические модели элементов электротехнической системы	38
2.3 Моделирование возмущающих воздействий	43
2.4 Разработка методики оценки влияния несимметричных провалов напряжения на устойчивость электротехнических систем объектов нефтяных месторождений	45
2.5 Оценка устойчивости электротехнической системы кустовой насосной станции	47
2.5.1 Математическая модель электротехнической системы кустовой насосной станции	47

2.5.2 Оценка устойчивости при несимметрии напряжения в пределах ГОСТ 32144	55
2.5.3 Оценка устойчивости при однофазных провалах напряжения	56
2.5.4 Оценка устойчивости при одноступенчатым провалам напряжения	57
2.5.5 Оценка устойчивости при двухступенчатым провалам напряжения	59
2.6 Выводы по главе 2	62
3 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫБОРА ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОБЪЕКТОВ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ.....	63
3.1 Методика выбора технических средств для повышения устойчивости электротехнических систем объектов нефтяных месторождений.....	63
3.2 Разработка коэффициента запаса устойчивости по напряжению.....	72
3.3 Выводы по главе 3	80
4 РАЗРАБОТКА И ВЫБОР ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОБЪЕКТОВ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ	81
4.1 Разработка технического средства для повышения устойчивости на основе искусственной нейронной сети	81
4.2 Выбор технических средств для повышения устойчивости электротехнических систем объектов нефтяного месторождения	92
4.3 Выводы по главе 4	97
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	98
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	100
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	101
ПРИЛОЖЕНИЕ А. ПАТЕНТ НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ.....	119
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. СВИДЕТЕЛЬСТВА РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММ.....	120
ПРИЛОЖЕНИЕ В. АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ	122

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Электроснабжение нефтяных месторождений представляет собой сложную задачу из-за следующих факторов: распределенность электрической нагрузки по территории месторождения; наличие электродвигателей большой единичной мощности; необходимость бесперебойного электроснабжения из-за непрерывности технологического процесса. Из-за этих особенностей электротехнические системы (ЭТС) нефтяных месторождений уязвимы к провалам и прерываниям напряжения, что может привести к потере устойчивости электродвигателей.

Нарушение устойчивости вызывает простой технологического оборудования и, следовательно, недоотпуск продукции предприятия и экономический ущерб. Анализ статистики нарушений электроснабжения одного из крупнейших нефтяных месторождений Западной Сибири за 2012-2014 годы показал, что количество аварийных ситуаций возрастает в среднем на 50% в год, при этом недоотпуск нефти из-за простоя технологического оборудования увеличивается в среднем на 123% ежегодно.

Основными потребителями электрической энергии на нефтяном месторождении являются высоковольтные асинхронные электродвигатели (ВАД), особым видом которых выступают погружные асинхронные электродвигатели (ПЭД). Их особенность заключается в малом значении электрохимической постоянной времени, что обуславливается конструктивными особенностями двигателями. Из-за этого ПЭД могут потерять устойчивость при провалах напряжения длительностью в несколько десятых секунды, что делает их наиболее уязвимым звеном ЭТС. Кроме того, наличие мощных ВАД влияет на устойчивость ЭТС из-за больших токов самозапуска.

Электроснабжение объектов нефтяных месторождений осуществляется от двух независимых источников питания для обеспечения бесперебойности технологического процесса. При этом в нормативных документах регламентируется только количество источников питания и допустимое время

перерыва электроснабжения, но не учитывается степень их взаимозависимости, оказывающая существенное влияние на надежность электроснабжения. При высокой степени взаимозависимости источников питания возможен отказ автоматического ввода резерва (АВР) на подстанции, что может привести к нарушению электроснабжения потребителей и к потере устойчивости ЭТС.

Таким образом, повышение устойчивости ЭТС представляет собой комплексную задачу, которая требует рассмотрения следующих аспектов: первый – структура системы внешнего электроснабжения, а именно, степень взаимозависимости источников питания; второй – провалы напряжения, включая их форму, глубину и длительность; третий – экономическая эффективность применения различных технических средств.

Степень изученности проблемы. Исследованиям устойчивости ЭТС с ВАД посвящены работы ведущих ученых: Абрамовича Б.Н., Важнова А.И., Веникова В.А., Гамазина С.И., Егорова А.В., Ершова М.С., Жданова П.С., Заславца Б.И., Игуменцева В.А., Копылова И.П., Костенко М.П., Меньшова Б.Г., Пупина В.М., Трифонова А.А. и других.

Несмотря на большое количество исследований по данной тематике, ученые в основном используют в качестве возмущающего воздействия симметричный провал напряжения, несмотря на преобладание в электрических сетях несимметричных коротких замыканий, вызывающих несимметричные провалы напряжения. Этому вопросу посвящены работы Егорова А.В., Ершова М.С., Комкова А.Н., Корнилова Г.П., Мударисова Р.М., Федотова А.И., Храмшина Т.Р. и других.

Также остается актуальной проблема выбора и сравнения эффективности технических средств для повышения устойчивости при несимметричных провалах напряжения, которая рассматривалась в работах Анцифорова В.А., Ершова М.С., Мартыанова А.С., Пупина В.М., Репиной Ю.В., Сушкова В.В. и других.

Таким образом, решение проблемы повышения устойчивости ЭТС объектов нефтяных месторождений с ВАД при несимметричных провалах напряжения с

учетом степени взаимозависимости источников питания является актуальной научно-технической задачей.

Исходя из проведенного анализа состояния и технического уровня разработок в области повышения устойчивости ЭТС с ВАД, сформулированы цель и задачи, выбран объект и предмет диссертационного исследования.

Цель работы заключается в повышении устойчивости электротехнических систем объектов нефтяных месторождений с высоковольтными асинхронными электродвигателями при несимметричных провалах напряжения путем обоснованного выбора технических средств для снижения числа аварийных простоев технологического оборудования.

Реализация сформулированной цели требует решения следующих **основных задач** исследования:

1. Произвести оценку устойчивости электротехнической системы объектов нефтяных месторождений с высоковольтными асинхронными электродвигателями при несимметричных провалах напряжения.

2. Разработать критерий оценки запаса устойчивости по напряжению электротехнических систем с высоковольтными асинхронными электродвигателями, который позволит учитывать степень взаимозависимости источников питания.

3. Разработать методику обоснованного выбора технических средств для повышения устойчивости по напряжению электротехнических систем объектов нефтяных месторождений с высоковольтными асинхронными электродвигателями.

4. Разработать техническое устройство для повышения устойчивости электротехнической системы с высоковольтными асинхронными электродвигателями, адаптирующееся к режиму работы потребителя, и программный комплекс, который позволит рассчитать границы динамической устойчивости при несимметричных провалах напряжения.

Объектом исследования являются электротехнические системы объектов нефтяных месторождений, содержащие высоковольтные асинхронные электродвигатели.

Предметом исследования является устойчивость электротехнических систем объектов нефтяных месторождений с высоковольтными асинхронными электродвигателями.

Методы исследования: в работе использованы положения и методы теории системного анализа, теории устойчивости, теории электрических цепей, теории электрических машин и электропривода, математического моделирования переходных процессов в системах электроснабжения.

Научная новизна:

1. Получена зависимость допустимой общей длительности двухступенчатого провала напряжения от длительности его первой ступени по условию сохранения устойчивости, отличающаяся тем, что позволяет оценивать запас динамической устойчивости электротехнической системы с высоковольтными асинхронными электродвигателями при переходе несимметричных провалов напряжения в симметричные.

2. Получено аналитическое выражение для определения допустимой длительности второй ступени провала напряжения от длительности его первой ступени по условию сохранения устойчивости, отличающееся тем, что учитывает запасы устойчивости электротехнической системы с высоковольтными асинхронными электродвигателями при двухфазном и трехфазном провалах напряжения.

3. Предложен коэффициент запаса устойчивости по напряжению для электротехнических систем с высоковольтными асинхронными электродвигателями, отличающийся тем, что учитывает напряжение статической устойчивости, запас динамической устойчивости при прерывании напряжения и коэффициент зависимости источников питания.

4. Разработана методика обоснованного выбора технических средств для повышения устойчивости электротехнических систем объектов нефтяных

месторождений с высоковольтными асинхронными электродвигателями, отличающаяся тем, что учитывает как границу динамической устойчивости, коэффициент экономической эффективности капитальных вложений, так и коэффициент зависимости источников питания.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Зависимость допустимой общей длительности двухступенчатого провала напряжения от длительности его первой ступени по условию сохранения устойчивости, отличающаяся тем, что позволяет оценивать запас динамической устойчивости электротехнической системы с высоковольтными асинхронными электродвигателями при переходе несимметричных провалов напряжения в симметричные.

2. Аналитическое выражение для определения допустимой длительности второй ступени провала напряжения от длительности его первой ступени по условию сохранения устойчивости, отличающееся тем, что учитывает запасы устойчивости электротехнической системы с высоковольтными асинхронными электродвигателями при двухфазном и трехфазном провалах напряжения.

3. Коэффициент запаса устойчивости по напряжению для электротехнических систем с высоковольтными асинхронными электродвигателями, отличающийся тем, что учитывает напряжение статической устойчивости, запас динамической устойчивости при прерывании напряжения и коэффициент зависимости источников питания.

4. Методика обоснованного выбора технических средств для повышения устойчивости электротехнических систем объектов нефтяных месторождений с высоковольтными асинхронными электродвигателями, отличающаяся тем, что учитывает как границу динамической устойчивости, коэффициент экономической эффективности капитальных вложений, так и коэффициент зависимости источников питания.

Практическая ценность работы:

1. Разработано устройство защиты асинхронного электродвигателя от потери устойчивости, новизна и приоритет которого подтверждены патентом на

полезную модель №183312, разработаны программы для ЭВМ «Оценка устойчивости АД при сложных провалах напряжения» и «Voltage stability of electromotive load» (свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ №2019667309 и №2019667724).

2. Разработанные методика обоснованного выбора технических средств для повышения устойчивости электротехнических систем объектов нефтяных месторождений с высоковольтными асинхронными электродвигателями и коэффициент запаса устойчивости по напряжению внедрены в производственную деятельность ПАО «Гипротюменнефтегаз».

3. Результаты диссертационной работы используются при подготовке обучающихся по направлениям 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» и 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» в Тюменском индустриальном университете.

Достоверность результатов подтверждается корректностью исходных предположений и допущений и проведенных расчетов, базирующихся на использовании известных положений теории устойчивости, теории электрических машин, электропривода, а также достаточной сходимостью теоретических результатов и результатов численного моделирования режимов электротехнических систем.

Соответствие исследовательской работы паспорту научной специальности. Область исследования устойчивости электротехнических систем объектов нефтяных месторождений с высоковольтными асинхронными электродвигателями соответствует паспорту специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы, а именно: п. 2 «Обоснование совокупности технических, технологических, экономических, экологических и социальных критериев оценки принимаемых решений в области проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов и систем»; п. 4 «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях».

Личный вклад автора заключается в формулировке и выполнении основных задач исследования, анализе статистических данных, определении основных положений научной новизны и практической значимости, создании коэффициента запаса устойчивости по напряжению, выполнении расчетов, создании и описании методики обоснованного выбора технических средств для повышения устойчивости электротехнических систем объектов нефтяных месторождений, разработке защитного устройства и программ для ЭВМ.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях: Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов «Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе» (Тюмень, 2016 г., 2017 г.); Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы энергетики» (Омск, 2017 г.); Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Новые технологии - нефтегазовому региону» (Тюмень, 2017 г.); Национальная с международным участием научно-практическая конференция студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов «Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе» (Тюмень, 2018 г.); 73-я Международная молодежная научная конференция «Нефть и газ - 2019» (Москва, 2019 г.); XIII Международная научно-техническая конференция «Динамика систем, механизмов и машин» (Омск, 2019 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ, в том числе 2 статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 3 статьи в изданиях, входящих в базы Scopus и Web of Science, 1 патент РФ на полезную модель и 2 свидетельства РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и 3 приложений, содержит 37 рисунков, 8 таблиц, список литературы из 128 наименований. Общий объем диссертации 123 страницы.

1 УСТОЙЧИВОСТЬ ПО НАПРЯЖЕНИЮ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОБЪЕКТОВ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ С ВЫСОКОВОЛЬТНЫМИ АСИНХРОННЫМИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ

1.1 Особенности электротехнических систем объектов нефтяных месторождений

Нефтяное месторождение представляет собой совокупность технологических систем, направленных на добычу, подготовку и перекачку нефти.

Основными технологическими объектами нефтяного месторождения являются [8]: буровые установки; установки добычи нефти; объекты сбора и перекачки внутри месторождения; объекты подготовки нефти; объекты поддержания пластового давления; объекты для обработки попутного нефтяного газа; вспомогательные объекты.

Для функционирования отдельных объектов и всего месторождения в целом необходимо обеспечить качественное и надежное электроснабжение. Сейчас используют три основных источника электроснабжения [5, 8, 67]: подключение месторождения к объединенной энергосистеме по высоковольтным линиям электропередачи (ЛЭП), организация собственной электростанции на базе газопоршневых или газотурбинных установок и комбинированный вариант, когда есть подключение к энергосистеме, но в качестве резервных источников питания (ИП) используются собственные генераторы.

Основными факторами, влияющими на электроснабжение нефтяного месторождения, являются: большая распределенность электрической нагрузки по территории месторождения; наличие электродвигателей большой единичной мощности; необходимость бесперебойного электроснабжения из-за непрерывности технологического процесса.

В качестве дополнительного фактора можно выделить отсутствие четкого распределения объектов нефтяного месторождения по категориям надежности электроснабжения.

В настоящее время категории электроприемников по надежности электроснабжения определяются «Правилами устройства электроустановок» [76], но они дают только общие рекомендации по разделению объектов на категории. Определение категорийности электроприемников объектов нефтедобычи осуществляется по нормам технологического проектирования объектов нефтяных месторождений [72], либо по ГОСТ 58367-2019 «Обустройство месторождений нефти на суше. Технологическое проектирование» [21], либо по стандартам предприятий [97]. Для первой категории по надежности электроснабжения согласно [21, 72, 76] питание осуществляется от двух независимых ИП, а перерыв электроснабжения допустим на время действия автоматики.

В диссертационной работе рассматривались нефтяные месторождения, электроснабжение которых осуществляется от Единой энергосистемы. Для объектов таких месторождений в работе принималась максимально возможная категория по надежности электроснабжения, в основном первая, потому что для этого случая предъявляются наиболее жесткие требования к надежности.

Подключение к Единой энергосистеме таких объектов, как правило, осуществляется по воздушным ЛЭП напряжением 110 кВ или 220 кВ. На месторождении располагается одна или несколько подстанций напряжением 110/35/10(6) кВ или 220/110/10(6) кВ, количество подстанций зависит от электрической нагрузки и её распределения по месторождению, при этом номинальные напряжения могут отличаться от рассмотренных, если это обоснованно проектом [5, 8, 67].

Электроснабжение отдельных технологических объектов, имеющих большую электрическую нагрузку, осуществляется по схеме глубокого ввода, т.е. непосредственно на объекте строится подстанция напряжением 35/10(6) кВ. Если на объекте нет крупных потребителей электрической энергии, то

электроснабжение осуществляется по ЛЭП напряжением 10(6) кВ от ближайшей подстанции [5, 8, 67].

Основными потребителями электрической энергии на нефтяном месторождении являются высоковольтные электродвигатели, как правило, применяются синхронные и асинхронные, выбор которых зависит от требуемой мощности [5, 8, 67]. Особым видом потребителя на нефтяном месторождении выступают ПЭД. Их особенность заключается в малом значении электромеханической постоянной времени, что обуславливается конструктивными особенностями двигателей. Из-за этого ПЭД могут потерять устойчивость при провалах напряжения длительностью в несколько десятых секунды, что делает их наиболее уязвимым звеном ЭТС. С другой стороны, синхронные электродвигатели нечувствительны к нарушениям электропитания, длительность которых меньше времени выпадения из синхронизма [13].

Таким образом, в качестве объекта исследования в диссертационной работе были выбраны ЭТС объектов нефтяных месторождений, содержащие ВАД. Далее в работе под термином ЭТС понимается совокупность асинхронных электродвигателей и распределительной сети электрической энергии на объекте. Входом ЭТС будем считать вводы обмотки высшего напряжения понижающего трансформатора подстанции технологического объекта.

1.2 Статистика нарушений электропитания нефтяного месторождения

Аварийные ситуации в распределительных сетях являются основной причиной нарушений электропитания потребителей, проявляющихся в ЭТС в виде провалов и прерываний напряжения длительностью от десятых долей секунды до нескольких часов [51]. Такие возмущения могут привести к нарушению устойчивости электродвигательной нагрузки и к значительному ущербу нефтедобывающего предприятия.

Для анализа была использована статистика нарушений электропитания одного из крупнейших нефтяных месторождений Западной Сибири за 2012-2014

годы, см. таблицу 1.1. Данная статистика была использована в статье [62], где была исследована взаимосвязь количества нарушений электроснабжения с критическими атмосферными явлениями, такими как ветер, гроза, гололед. Авторы Мартьянов А.С., Сушков В.В., Небилович И.С. в работе [62] установили, что «всплески аварий в апреле и октябре совпадают с всплесками числа дней с порывами ветра более 10 м/ч, повышенная аварийность летних месяцев повторяется днями с грозой». Недостаток рассмотренной работы заключается в отсутствии поиска других закономерностей в распределении количества нарушений электроснабжения нефтяного месторождения.

Таблица 1.1 – Статистика нарушений электроснабжения [62]

Критерий	2012	2013	2014	Итого
Количество нарушений, ед.	118	157	263	538
Потери нефти, т	1961,4	2780,7	8468,8	13210,9
Средняя продолжительность аварии, ч	29,1	11,5	0,8	10,2
Средняя величина потерь нефти на одно отключение, т	16,6	17,7	32,2	24,5

Статистика нарушений электроснабжения представляет собой набор данных распределенных по конкретным временным промежуткам, т.е. является временным рядом. Анализ таких рядов состоит из следующих этапов [25, 91]:

1. Предварительный анализ данных.
2. Выявление тренда и сезонных компонент (при наличии).
3. Формирование математической модели временного ряда.
4. Оценка адекватности полученной модели.
5. Расчет точечного и интервального прогнозов (при необходимости).

Для предварительного анализа данных было построено распределение числа нарушений электроснабжения по времени года, которое показано на рисунке 1.1. Наибольшее число нарушений возникает летом, основными причинами, приводящими к этому, являются природно-климатические факторы: грозы, ветер и деятельность человека, связанная с полевыми и ремонтными работами [52]. Весной 2014 года в районе рассматриваемого месторождения был отмечен

аномальный ураганный ветер, который существенно повлиял на число нарушений.

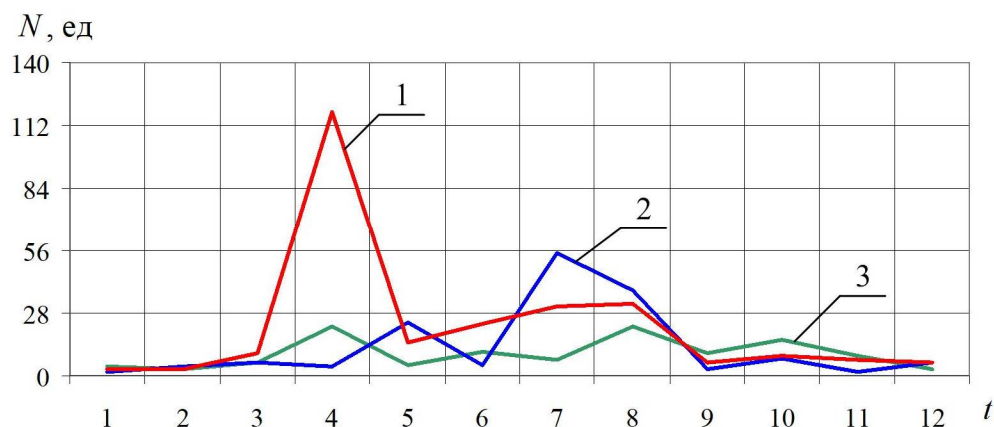


Рисунок 1.1 - Распределение числа аварийных ситуаций по месяцам года: 1 – 2014 год, 2 – 2013 год; 3 – 2012 год

Для дальнейшего анализа все нарушения электроснабжения были разделены на кратковременные (длительность не более 3 мин) и длительные (длительность более 3 мин) согласно [19]. Для 2013 года было построено распределение общего числа нарушений электроснабжения по месяцам, а также распределение кратковременных нарушений электроснабжения (КНЭ) и длительных нарушений электроснабжения (ДНЭ), см. рисунок 1.2 [52]. Установлено, что формы кривых КНЭ и ДНЭ совпадают друг с другом и с кривой общего числа нарушений электроснабжения. Таким образом, все полученные закономерности для распределения общего числа нарушений электроснабжения по времени года могут применяться и для отдельных видов по длительности. Для дальнейшего анализа было принято использовать только зависимость общего числа нарушений электроснабжения от месяца года.

Зависимость числа нарушений электроснабжения от времени – это случайная выборка, которая может обладать аномальными данными, поэтому для временного ряда были рассчитаны критерии по методу Ирвина согласно [91]. Это позволило установить, что значения для летних месяцев 2013 года и октябрь и декабрь 2014 года являются аномальными, их пришлось скорректировать. На

рисунке 1.3 представлены исходный временной ряд и сглаженный временной ряд без аномальных отклонений.

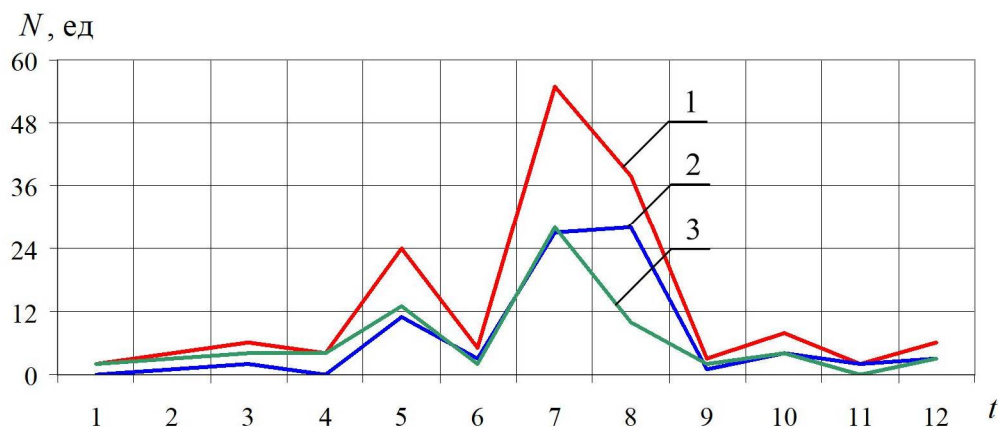


Рисунок 1.2 - Распределение числа аварийных ситуаций по месяцам в 2013 году:

1 – общее, 2 – КНЭ; 3 – ДНЭ

Для выявления закономерностей в количестве нарушений электроснабжения были рассчитаны коэффициенты автокорреляции, при этом сдвиг по времени (лаг) брался равным одному месяцу, см. рисунок 1.4. Расчеты показали, что в данном временном ряду имеется тренд (т.к. $r(1)=0,65 \rightarrow 1$) и колебания с периодом равным 12 (т.к. $r(12)=0,72 \rightarrow 1$). В результате анализа установлено, что распределение числа аварийных ситуаций по времени года имеет циклические колебания, период которых равен 12 месяцам. Согласно вышесказанному, аналогичные колебания также будут наблюдаться для КНЭ и ДНЭ.

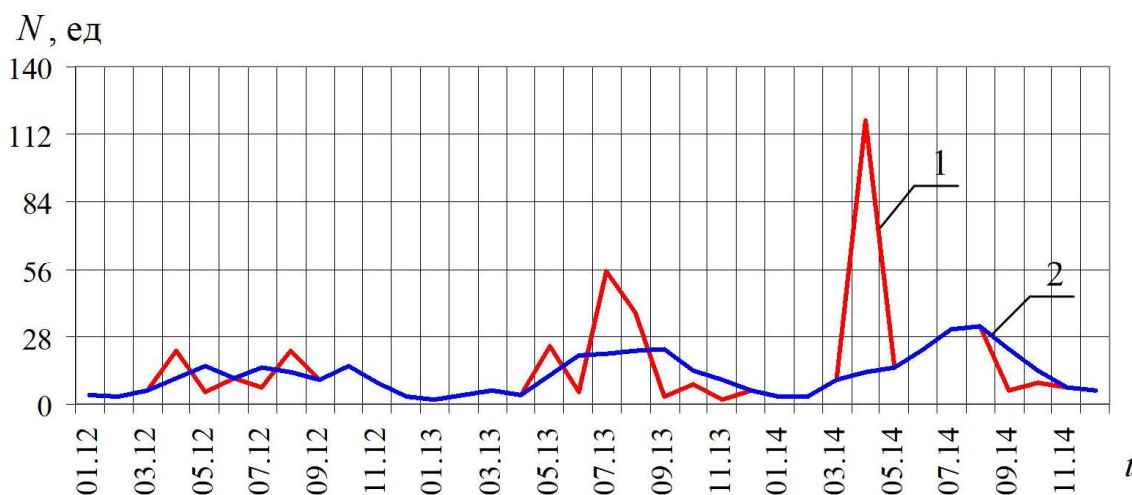


Рисунок 1.3 - Распределение числа аварийных ситуаций по месяцам года:

1 – исходные данные, 2 – сглаженный ряд

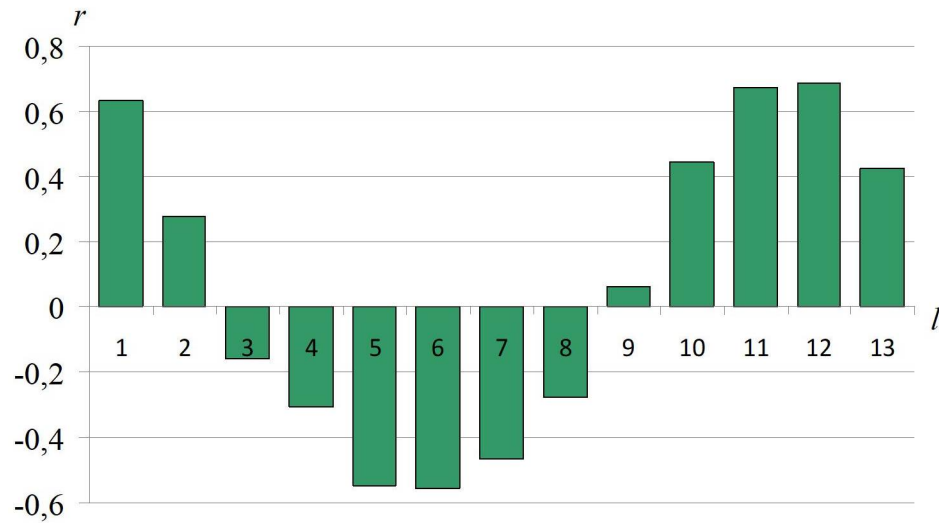


Рисунок 1.4 – Коррелограмма

Для построения математической модели распределения количества нарушений электроснабжения было использовано преобразование Фурье, которое позволяет выделить тригонометрические составляющие, за основу была взята мультипликативная модель временного ряда [91]. Для определения количества гармоник был рассчитан дискретный спектр, см. рисунок 1.5. Спектр показал, что наибольший вклад в итоговую функцию осуществляют нулевая (тренд) и первая гармоники, затем происходит резкое уменьшение влияния высших гармоник.

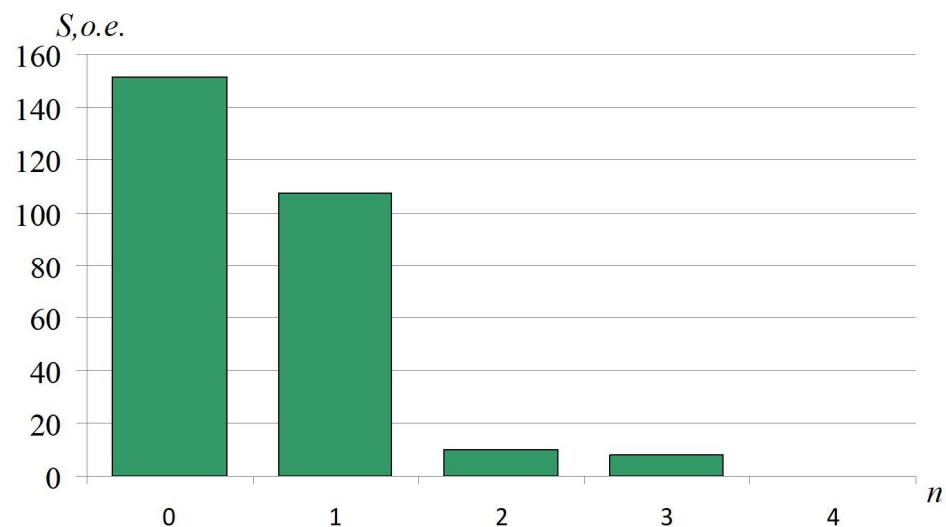


Рисунок 1.5 - Дискретный спектр

Для повышения точности было решено оставить вторую гармонику в математической модели, откинув все остальные высшие гармоники:

$$p(\tau) = 12,47 - 8,32 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{12} \cdot \tau\right) - 6,74 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{12} \cdot \tau\right) - 1,53 \cdot \cos\left(\frac{4\pi}{12} \cdot \tau\right) + 2,93 \cdot \sin\left(\frac{4\pi}{12} \cdot \tau\right) \quad (1.1)$$

На рисунке 1.6 представлены два графика зависимости числа нарушений электроснабжения от времени: сглаженный временной ряд без аномальных наблюдений и рассчитанные по математической модели значения. Из сравнения зависимостей видно достаточно хорошее соответствие модели исходным данным, но часть точек имеют серьезные расхождения, значит надо проверить адекватность построенной модели реальному процессу.

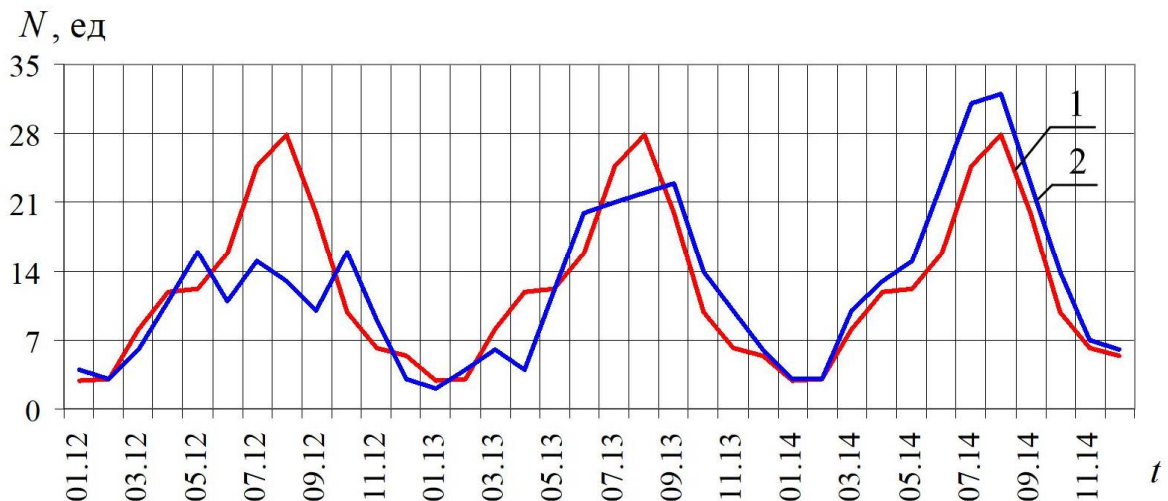


Рисунок 1.6 - Распределение числа аварийных ситуаций по месяцам года:

1 – значения математической модели, 2 – сглаженный ряд

Исходными данными для такой проверки является ряд остатков, который представляет собой разность между вычисленным и исходным значениями. Сначала производим проверку случайности ряда остатков по критериям пиков и серий [91]. Далее проводим проверку математического ожидания ряда остатков и проверку нормальности распределения ряда остатков по RS-критерию [91]. Как видно из таблицы 1.2, математическая модель соответствует всем заданным критериям и является адекватной реальному процессу.

Таблица 1.2 – Проверка адекватности математической модели

№ п/п	Название критерия	Значения критерия	Вычисленное значение	Проверка критерия	Вывод
1	Критерий пиков	17	22	$22 > 17$	Модель адекватна
2	Критерий серий	8 и 12	6 и 15	$8 > 6$ и $12 < 15$	Модель адекватна
3	Математическое ожидание ряда остатков	$(-\infty; -2,03]$ и $[2,03; +\infty)$	0,01	0,01 не входит в область	Модель адекватна
4	RS-критерий	От 3,65 до 5,11	4,69	$3,65 < 4,69 < 5,11$	Модель адекватна
5	Критерий Дарбина-Уотсона	$d_1=1,21$ $d_2=1,73$	1,38	$1,21 < 1,38 < 1,73$	Нельзя сделать вывод об автокорреляции остатков

Таким образом, была получена математическая модель, которая позволяет прогнозировать число нарушений электроснабжения нефтяного месторождения методом перспективной экстраполяции. Однако эта модель не может учитывать все факторы, влияющие на надежность электроснабжения, она отражает только общие закономерности, такие как наличие постоянной составляющей (тренда) и циклических колебаний с периодом 12 месяцев. Анализ показал, что количество аварийных ситуаций возрастает в среднем на 50% из года в год, при этом потери нефти из-за простоя технологического оборудования увеличиваются в среднем на 123% ежегодно, что показывает необходимость повышения надежности системы электроснабжения [52, 62].

1.3 Взаимозависимость источников питания непрерывных производств

Многие объекты нефтяного месторождения относятся к потребителям первой категории по надежности электроснабжения и их питание осуществляется от двух независимых ИП, которыми могут выступать двухтрансформаторные подстанции [76]. При этом в нормативных документах [76] регламентируется только количество ИП и допустимое время перерыва электроснабжения, но не учитывается степень их взаимозависимости, оказывающая существенное влияние на надежность электроснабжения [4, 24, 34]. При питании нефтяного месторождения от централизованной сети не существует четких требований к

конфигурации системы внешнего электроснабжения, которая должна обеспечивать независимость ИП для срабатывания противоаварийной автоматики.

Независимость ИП подразумевает обеспечение требуемого качества электрической энергии на резервном источнике питания при нарушении электроснабжения на основном. Если это условие не выполняется, то не сработает автоматический ввод резерва на подстанции, что приведет к нарушению электроснабжения потребителей и может привести к потере устойчивости электродвигательной нагрузки. Длительное нарушение электроснабжения потребителей первой категории может привести к нарушению технологического процесса, большим экономическим потерям.

Взаимозависимость ИП обуславливается замкнутостью системы внешнего электроснабжения, которая возникает из-за необходимости резервирования, то есть повышение резервирования сети ведет к уменьшению независимости источников питания и наоборот. На практике абсолютно независимых источников питания не существует [24], наиболее близким решением является постройка двух генерирующих узлов для электроснабжения нефтяного месторождения, но это не выгодно экономически.

Для количественной оценки степени взаимозависимости ИП существуют методики, позволяющие рассчитать коэффициент зависимости, рассмотрим основные из них.

Авторы Ершов М.С., Егоров А.В. и Анцифоров В.А. предлагают использовать коэффициент зависимости ИП, который определяется по выражению [34]:

$$k_z = \frac{N_{1,2}}{N_1 + N_2 - N_{1,2}}, \quad (1.2)$$

где N_1 - число критических провалов напряжения на первом ИП за время наблюдения T ; N_2 - число критических провалов напряжения на втором ИП за время наблюдения T ; $N_{1,2}$ - число одновременных критических провалов напряжения на обоих ИП за время наблюдения T .

Определение коэффициента существенно отличается для проектируемого и действующего объектов. При эксплуатации объекта производят анализ аварийных осциллограмм напряжения для определения количества критических провалов на каждом ИП. Критическими считаются провалы, глубина которых превышает напряжение статической устойчивости ЭТС. Далее производится расчет по выражению (1.2).

При проектировании объектов определение коэффициента зависимости ИП осуществляется на основе расчета аварийных режимов. Во всех узлах системы внешнего электроснабжения моделируются трехфазные короткие замыкания (КЗ), при этом определяется остаточное напряжение на рассматриваемом вводе ЭТС. Далее все узлы разделяются на три категории: 1 - остаточное напряжение на первом ИП меньше критического значения, 2 - остаточное напряжение на втором ИП меньше критического значения, 3 - остаточное напряжение двух ИП меньше критического.

На следующем этапе производится расчет частоты аварий, обусловленных отказом линий электропередачи, подключенных к узлам системы внешнего электроснабжения [34]:

$$\omega = T \sum_{i=0}^n \omega_{0i} \cdot \frac{L_i}{2}, \quad (1.3)$$

где T - период наблюдения, ω_{0i} - параметр потока отказов i -й линии электропередачи, L_i - длина i -й линии электропередачи, n - количество линий электропередачи, подключенных к узлу системы внешнего электроснабжения.

Затем производится суммирование числа аварийных отключений для каждой категории, которые позволяют определить коэффициент зависимости ИП по выражению (1.2).

Преимущество этой методики заключается в повышении точности определения коэффициента зависимости, недостаток - большое количество расчетов.

Гуревич Ю.Е. и Кабиков К.В. предлагают определять коэффициент зависимости как отношение глубин снижения напряжения на неповрежденном ИП и на поврежденном ИП [24]:

$$k_{zij} = \frac{\Delta U_i}{\Delta U_j} = \frac{(U_{i\text{норм}} - U_{i\text{КЗ}}) \cdot U_{j\text{норм}}}{U_{i\text{норм}} \cdot (U_{j\text{норм}} - U_{j\text{КЗ}})}, \quad (1.4)$$

где $U_{i\text{норм}}$ и $U_{j\text{норм}}$ - нормальные напряжения на i -м и j -м ИП, $U_{i\text{КЗ}}$ и $U_{j\text{КЗ}}$ - напряжения на i -м и j -м ИП при КЗ на j -м и i -м источниках соответственно.

Основным преимуществом данной методики является быстрота расчетов, недостатки - значение зависит от нумерации ИП, не учитываются показатели устойчивости ЭТС.

Исходя из результатов сравнения, для анализа взаимозависимости ИП была выбрана методика, предложенная Ершовым М.С., Егоровым А.В. и Анцифоровым В.А., которая имеет более высокую точность и позволяет учитывать напряжение статической устойчивости ЭТС.

Для расчетов коэффициента зависимости ИП была использована упрощенная схема, основанная на системе электроснабжения севера Западной Сибири, см. рисунок 1.7. В каждом узле сети было смоделировано трехфазное короткое замыкание в программном комплексе EnergyCS ТКЗ. По результатам моделирования были получены значения остаточного напряжения на источниках питания рассматриваемого узла нагрузки 35/10 кВ и сведены в таблицу 1.3.

На следующем этапе была рассчитана частота аварий, обусловленных отказом линий электропередачи, подключенных к узлам системы внешнего электроснабжения по выражению (1.3) на основе данных справочника [43].

Далее провалы напряжения разбивались на три группы: одновременное сильное снижение напряжения $N_{(T1,T2)}$, сильное снижение напряжения на первом ИП $N_{(T1)}$ и сильное снижение напряжения на втором ИП $N_{(T2)}$. За сильное снижение была принята глубина провала больше 0,7 о.е., что соответствует наиболее частому значению напряжения статической устойчивости электродвигательной нагрузки [1-3, 35, 36, 39, 55, 56]. Результаты выявления сильных провалов напряжения приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.3 - Значения остаточного напряжения на вводах трансформаторов узла нагрузки 35/10 кВ при коротких замыканиях в системе внешнего электроснабжения

№ п/п	Место КЗ	Значение остаточного напряжения на вводах трансформаторов при КЗ в указанных узлах		Параметр потока отказов, ω_n , 1/год
		U_{T1} , о.е	U_{T2} , о.е	
1	ПС "Уренгой" СШ-1 110 кВ	0	1,05	3,24
2	ПС "Уренгой" СШ-2 110 кВ	0	1,05	3,24
3	ПС "Уренгой" СШ-1 220 кВ	0,36	0	7,06
4	ПС "Уренгой" СШ-2 220 кВ	0,36	0	7,06
5	ПС "Надым" СШ-1 220 кВ	1,1	1,1	5,1
6	ПС "Надым" СШ-2 220 кВ	1,1	1,1	5,1
7	ПС "Оленья" СШ-1 110 кВ	1,1	0	4,1
8	ПС "Оленья" СШ-2 110 кВ	1,1	0	4,1
9	ПС "Ямбург" СШ-1 110 кВ	1,1	0,54	2,34
10	ПС "Ямбург" СШ-2 110 кВ	1,1	0,54	2,34
11	ПС "УГП-13" СШ-1 110 кВ	1,1	0,47	0,7
12	ПС "УГП-13" СШ-2 110 кВ	1,1	0,47	0,7
13	ПС "Буран" СШ-1 110 кВ	0,95	1,1	2,85
14	ПС "Буран" СШ-2 110 кВ	0	1,1	4,06
15	ПС "УГП-10" СШ-1 110 кВ	1,03	1,1	1,17
16	ПС " УГП-10 " СШ-2 110 кВ	0,01	1,1	2,42
17	ПС "Табьяха" СШ-1 110 кВ	0	1,1	2,4
18	ПС "Табьяха" СШ-2 110 кВ	1,1	0	1,05

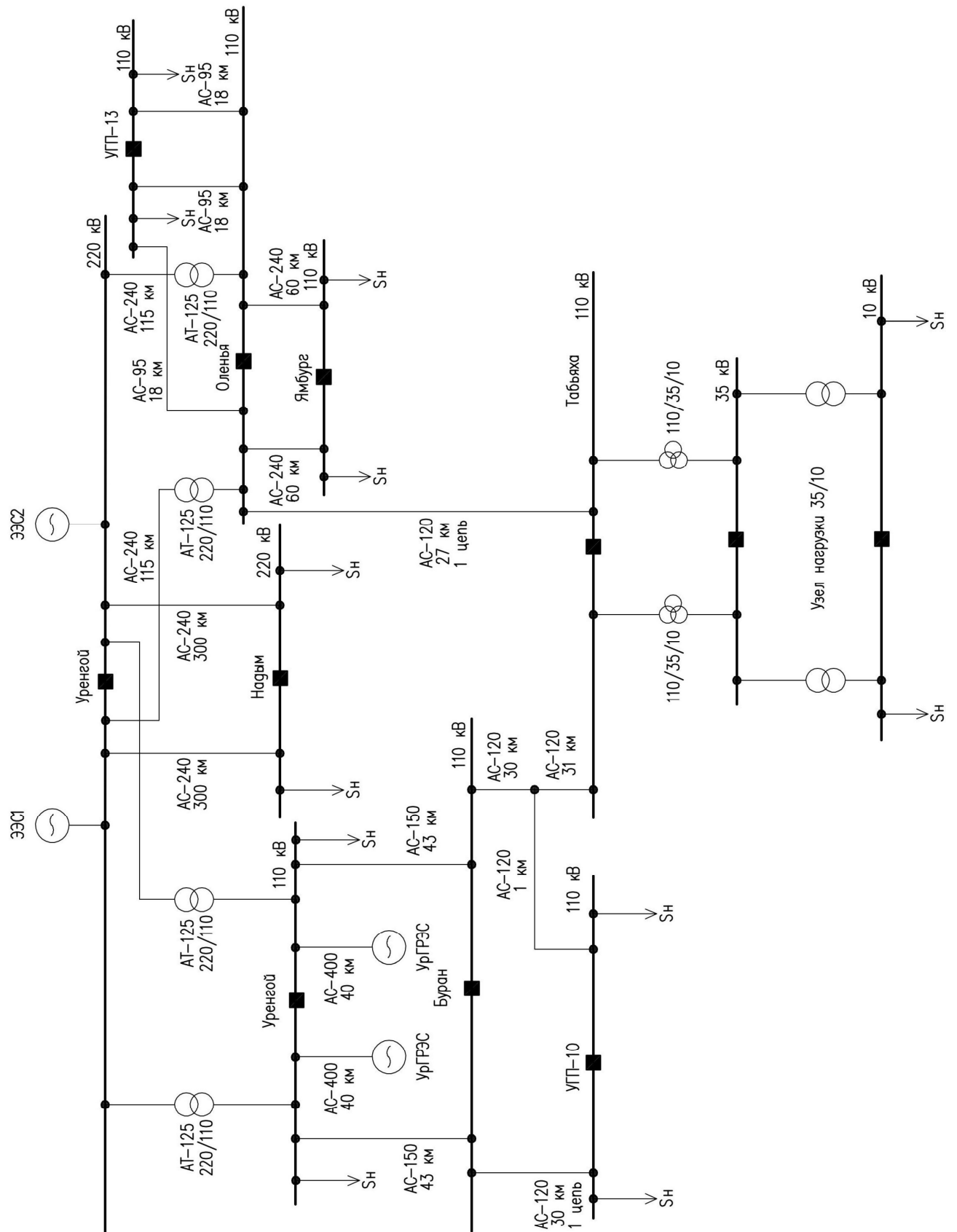


Рисунок 1.7 - Упрощенная схема сети внешнего электроснабжения

Таблица 1.4. - Показатели сильных провалов напряжения на вводах трансформаторов узла нагрузки 35/10 кВ

№ п/п	Место КЗ	Провал напряжения ниже 0,7 о.е. при КЗ в указанных узлах		
		Одновременно на Т1 и Т2	Только на Т1	Только на Т2
1	ПС "Уренгой" СШ-1 110 кВ		+	
2	ПС "Уренгой" СШ-2 110 кВ		+	
3	ПС "Уренгой" СШ-1 220 кВ	+		
4	ПС "Уренгой" СШ-2 220 кВ	+		
5	ПС "Надым" СШ-1 220 кВ			
6	ПС "Надым" СШ-2 220 кВ			
7	ПС "Оленья" СШ-1 110 кВ			+
8	ПС "Оленья" СШ-2 110 кВ			+
9	ПС "Ямбург" СШ-1 110 кВ			+
10	ПС "Ямбург" СШ-2 110 кВ			+
11	ПС "УГП-13" СШ-1 110 кВ			+
12	ПС "УГП-13" СШ-2 110 кВ			+
13	ПС "Буран" СШ-1 110 кВ			
14	ПС "Буран" СШ-2 110 кВ		+	
15	ПС "УГП-10" СШ-1 110 кВ			
16	ПС " УГП-10 " СШ-2 110 кВ		+	
17	ПС "Табьяха" СШ-1 110 кВ		+	
18	ПС "Табьяха" СШ-2 110 кВ			+

Затем было найдено ожидаемое количество отключений, приводящих к различным группам провалов напряжения:

$$N_{(T1,T2)} = 14,12 \text{ отк/год}$$

$$N_{(T1)} = 29,28 \text{ отк/год}$$

$$N_{(T2)} = 29,35 \text{ отк/год}$$

Тогда коэффициент зависимости источников питания по выражению (1.2) равен:

$$k_3 = \frac{14,12}{29,28 + 29,35 - 14,12} = 0,32$$

Следовательно, при коротких замыканиях во внешних сетях, приводящих к снижению напряжения на вводах трансформаторов, с вероятностью 32 %

остаточное напряжение одновременно на обоих вводах рассматриваемого узла нагрузки будет меньше напряжения статической устойчивости электродвигательной нагрузки. Значит устранение такой аварии невозможно путем переключения нагрузки на резервный ИП, что приведет к останову производства, несмотря на достаточный запас устойчивости ЭТС, с вероятностью 32%.

Полученный результат подтверждается работами других авторов. Абрамович Б.Н. в работе [4] установил, что коэффициент зависимости ИП для Ашальчинского месторождения ПАО «Татнефть» находится в пределах от 0 до 0,7, что не позволяет использовать устройства быстродействующего автоматического ввода резерва (БАВР). Ершов М.С., Егоров А.В. и Анцифоров В.А. в работе [34] установили, что «на этапе эксплуатации независимость и надежность источников питания промышленных потребителей можно признать удовлетворительной, если годовые показатели не превышают следующих значений: коэффициента зависимости источников – 0,25; одновременного числа критических провалов напряжения – 5 год^{-1} »

Таким образом, взаимозависимость источников питания является важной характеристикой системы электроснабжения нефтяного месторождения. Учет данного параметра позволяет обеспечить бесперебойное питание потребителей, что ведет к увеличению эффективности предприятия и к повышению надежности технологического процесса в целом.

1.4 Литературный обзор проблемы устойчивости электротехнических систем

Устойчивость энергосистемы – это «способность энергосистемы сохранять синхронную работу электрических станций после различного рода возмущений» [20]. В диссертационной работе рассматривалась устойчивость не энергосистемы в целом, а только электротехнической системы потребителя электроэнергии. Для этого случая под устойчивостью понималась способность потребителей

электрической энергии возвращаться к исходному режиму работы после провалов и прерываний напряжения.

Впервые о проблеме устойчивости заговорили в контексте равновесия и движения механических систем в конце 19 века, в результате решения этих проблем Ляпунов А. М. создал теорию устойчивости [60]. Спустя несколько десятилетий в 1930-е годы стала развиваться теория устойчивости электрических систем, основоположником которой считается Жданов П. С. Он занимался вопросами устойчивости параллельной работы генераторов, изучением асинхронных режимов, возникающих после выхода из синхронизма генераторов. Также он изучал вопросы устойчивости сложных энергетических систем и передачи большой мощности на дальние расстояния [42]. В последующих работах Жданов П. С. также уделил внимание устойчивости как синхронных, так и асинхронных электродвигателей [42].

Параллельно с этим развивалось математическое моделирование электрических машин, без которого невозможен расчет переходных процессов и оценка устойчивости энергосистем. Особый вклад в моделирование внесли Горев А. А. и Robert H. Park, они предложили математическое описание обобщенной электрической машины, которое стало называться «уравнения Парка-Горева» [18]. Также развитием моделей электрических машин для оценки устойчивости занимались Костенко М. П. [48, 49], Веников В. А. [13, 14, 99, 100], Постников И. М. [75], Важнов А. И. [11, 12], Копылов И. П. [46, 47] и др.

Сейчас можно выделить несколько научных школ, занимающихся проблемами устойчивости электротехнических систем: первая - на базе РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, основателем которой можно считать Меньшова Б. Г. [7, 65, 66], основные ученые, развившие теорию устойчивости: Ершов М. С., Егоров А. В. и др. [9, 27-41]; вторая – на базе НИУ «МЭИ», которая ведет свою историю с 1930-х годов, основные ученые: Веников В. А. [13, 14, 99, 100], Гамазин С. И., Цырук С. А. [16, 17] и др.; третья – на базе МГТУ им. Г. И. Носова, основные ученые: Заславец Б. И., Игуменцев В. А., Малафеев, А. В., Корнилов Г. П., Храмшин Т. Р., Храмшин В. Р. и др. [61, 73, 77, 85, 86]; четвертая

– на базе СПГУ, основателем которой можно считать Абрамовича Б. Н. [1-5], основные ученые: Сычев Ю. А., Устинов Д. А. и др. [1-5].

Благодаря разработкам, связанным с проблемой устойчивости электродвигательной нагрузки, были получены различные критерии устойчивости, выявлены закономерности границ устойчивости как асинхронных, так и синхронных электродвигателей. Однако большинство авторов при исследованиях используют в качестве возмущающего воздействия симметричный провал напряжения [1-3, 35-36], несмотря на то, что в электрических сетях преобладают несимметричные короткие замыкания [70]. В последнее десятилетие ученые обратили внимание на несимметричные провалы напряжения и на несимметрию питающего напряжения в целом.

Одним из направлений исследований стало нормирование характеристик несимметрии напряжения. Куренный Э.Г., Дмитриева Е.Н., Лютый А.П., Сидоренко О.А. в работе [50] предлагают использовать моделирование воздействий возмущений на электрооборудование для оценки несимметрии напряжений. Они вводят понятие «дозы несимметрии», которое связано с тепловым износом и превышением рабочей температуры из-за искажений напряжения. Суворов И. Ф., Романова В. В., Хромов С. В. в работе [88] установили, что загрузка асинхронного электродвигателя оказывает существенное влияние на допустимые значения коэффициента несимметрии питающего напряжения, метод их исследования основан на имитационном моделировании в среде MatLab Simulink. В работах [50, 88] авторы рассматривают несимметрию в контексте качества электрической энергии, делая основной упор на тепловые процессы, при этом не обращая внимание на электромеханические переходные процессы в электродвигателях. В работе [41] Ершов М.С. и Валов Н.В. рассматривают различные несимметричные короткие замыкания и возникающие в электротехнической системе провалы напряжения. Они определили «наиболее реальный диапазон коэффициента несимметрии остаточных напряжений» [41], при этом основной упор в работе сделан на моделирование трансформаторов и их типы.

Вторым направлением исследований можно выделить анализ режимов работы электродвигателей при несимметрии питающего напряжения. Данное направление наиболее полно раскрыто в работах [81, 87, 89] Суворова И. Ф., Романовой В. В., Хромова С. В. и др. В этих работах [81, 87, 89] исследование проводится в среде имитационного моделирования MatLab Simulink, особое внимание уделяется несимметрии напряжения в пределах, допускаемых стандартами [19], также исследуется влияние загрузки асинхронных электродвигателей при несимметричном напряжении.

В качестве третьего направления выделим непосредственную оценку устойчивости электротехнических систем при несимметрии питающего напряжения. В работе [86] Храмшин Т.Р., Корнилов Г.П. и др. исследуют влияние несимметричного напряжения на устойчивость электропривода с активным выпрямителем. Они установили, что вид провала напряжения влияет на устойчивость работы электропривода, для уменьшения негативных эффектов предлагают ввести дополнительный корректирующий сигнал на входе активного выпрямителя [86]. Влияние несимметрии питающего напряжения на устойчивость синхронных электродвигателей исследовали Ершов М.С., Егоров А.В., Комков А.Н. в работе [31]. Они выявили, что «устойчивость синхронного двигателя зависит только от значения напряжения прямой последовательности» и «значение коэффициента несимметрии на устойчивость синхронного двигателя не влияет» [31]. Также вопросами устойчивости синхронных электродвигателей при несимметрии питающего напряжения занимались Федотов А. И. и Мударисов Р. М. в работах [93, 94]. Они исследовали устойчивость синхронных электродвигателей при однофазных КЗ на имитационной модели, включающей энергосистему, ЛЭП, трансформатор и синхронный электродвигатель, это позволило определить критические параметры линии (длина, сечение), при которых нарушается устойчивость синхронных электродвигателей [94].

Таким образом, проблема устойчивости электротехнических систем при несимметричных провалах напряжения раскрыта недостаточно полно, рассмотрены только некоторые случаи несимметрии и типы двигателей. Остается

открытым вопрос выбора мероприятий по повышению устойчивости при несимметричных провалах напряжения.

Этот момент был затронут в диссертационной работе Анцифорова В.А. [6], он предложил методику оценки взаимозависимости источников питания, которая учитывает устойчивость электротехнических систем при несимметричных провалах напряжения, на основании полученного коэффициента зависимости ИП выбирается устройство для повышения устойчивости. Он предложил алгоритм, который позволяет учитывать как характеристики устойчивости, так и характеристику взаимозависимости ИП при выборе мероприятий по повышению устойчивости [6]. Недостатки этого алгоритма заключаются в невозможности непосредственно сравнивать различные технические устройства и в ограниченном наборе таких устройств.

Для сравнения влияния различных устройств на устойчивость узлов электродвигательной нагрузки существует коэффициент запаса статической устойчивости [92], его недостаток – учет только напряжения статической устойчивости. В диссертационной работе Репиной Ю. В. [80] предложен коэффициент устойчивости, который рассчитывается по границе динамической устойчивости (ГДУ). Мартьянов А.С. в диссертационной работе [64] предложил многомерный показатель устойчивости узла электрических нагрузок, который учитывает распределение провалов напряжений по длительности и глубине. Несмотря на исследования в области количественной оценки устойчивости электротехнических систем, проблема выбора и сравнения эффективности технических средств для повышения устойчивости остается актуальной. Данный вопрос рассматривался в работах Ершова М. С., Репиной Ю. В., Анцифорова В. А. Сушкова В. В., Мартьянова А. С., Пупина В. М. [37, 39, 63, 64, 79, 80].

Таким образом, проблема устойчивости электротехнических систем при провалах и прерываниях напряжения исследуется на протяжении многих лет и до сих пор остается актуальной. Анализ литературных источников показал необходимость разработки методики выбора технических средств для повышения устойчивости, учитывающей как технические, так и экономические аспекты.

Кроме того, в рассмотренной литературе не приводится количественный критерий устойчивости, позволяющий оценить эффективность применения современных устройств, таких как БАВР.

1.5 Обзор технических средств для повышения устойчивости электротехнических систем с высоковольтными асинхронными электродвигателями

Как было отмечено выше, провалы и прерывания напряжения являются наиболее частыми нарушениями электроснабжения на нефтяных месторождениях, также их негативное влияние усугубляется из-за высокой степени взаимозависимости источников питания. Провалы и прерывания напряжения могут привести к нарушению устойчивости электродвигательной нагрузки, особенно уязвимы их влиянию ПЭД и мощные асинхронные электродвигатели. Известно [39], что запас устойчивости зависит от кинетической энергии электроприводов ЭТС, увеличение которой позволяет повысить режимную надежность системы электроснабжения. На основании этого все технические средства были разделены на четыре категории: первая – улучшение условий работы ВАД, вторая – снижение зависимости ИП, третья – снижение предельного времени возмущения, четвертая – повышение запаса энергии ЭТС, см. рисунок 1.8.

В качестве первого направления повышения устойчивости ЭТС было рассмотрено улучшение условий работы ВАД, а именно, разгрузка приводного механизма и последовательный самозапуск. Уменьшение загрузки электродвигателей способствует увеличению допустимого времени провала напряжения по условию сохранения устойчивости, однако, такое мероприятие сложно реализуемо, так как режим работы механизма зависит от требований технологии. Устойчивость ЭТС может нарушиться из-за больших токов самозапуска электродвигателей, возникающих после восстановления уровня напряжения. Избежать этого позволяет последовательный самозапуск ВАД, при

этом на первом этапе запускаются наиболее важные электроприводы с точки зрения технологии, остальные отключаются. Реализация этого подхода требует наличия специальных устройств автоматики, которые будут контролировать ток самозапуска и, соответственно, отключать часть потребителей. Данное мероприятие сложно осуществить на непрерывных производствах, к которым и относится нефтедобыча.

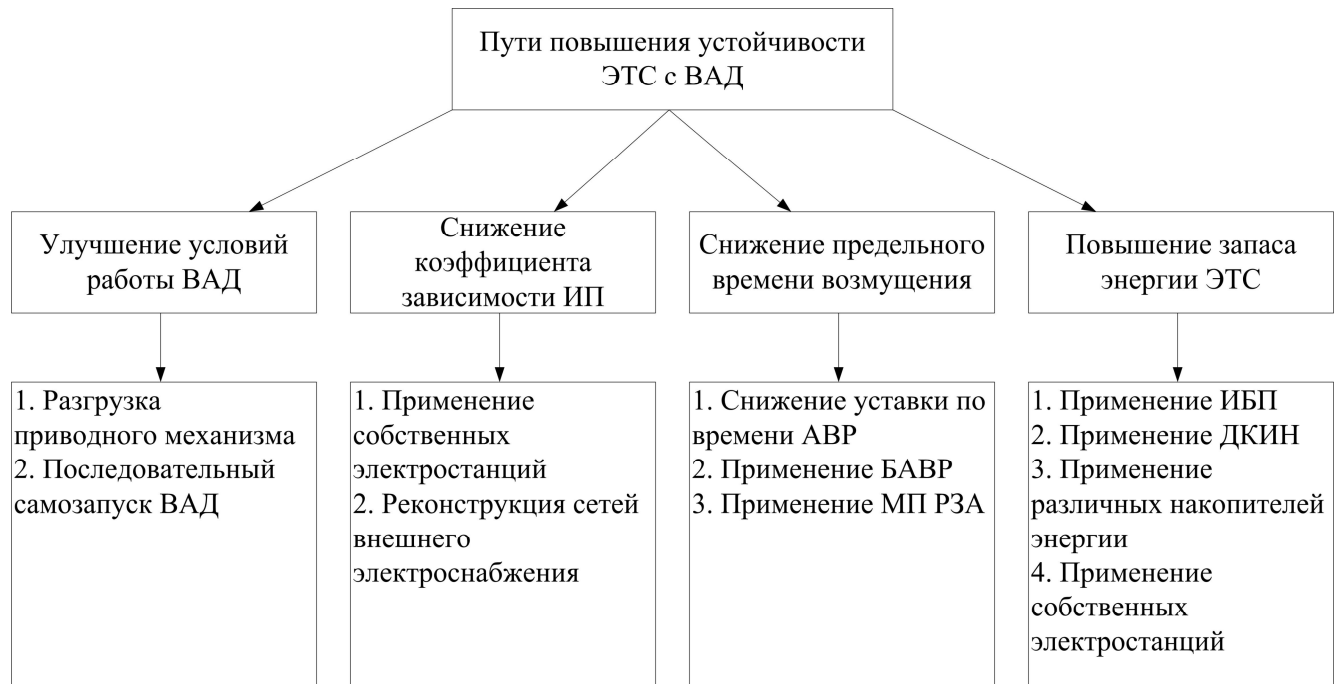


Рисунок 1.8 – Структура технических средств для повышения устойчивости ЭТС с ВАД

Наиболее сложным и дорогостоящим направлением повышения устойчивости является снижение коэффициента зависимости ИП. Большинство способов потребитель электрической энергии (нефтяное месторождение) не может осуществить самостоятельно, так как нужна реконструкция сетей внешнего электроснабжения. В этом случае основным способом для потребителя выступает строительство собственной электростанции на базе газотурбинных, газопоршневых или дизельных установок [24]. Применение для электроснабжения централизованного ИП и собственной генерации позволит исключить их взаимозависимость и повысить устойчивость ЭТС нефтяного месторождения. Однако данное мероприятие будет экономически эффективно только для новых месторождений, но для точной оценки эффективности будет

необходимо проводить технико-экономический анализ в каждом конкретном случае.

Следующим направлением повышения устойчивости ЭТС было выделено снижение предельного времени возмущения, к нему относятся: снижение уставки АВР и снижение уставки релейных защит.

Традиционное устройство АВР осуществляет переключение потребителей с основного ИП на резервный при снижении напряжения. Уставка АВР по времени выбирается для реле минимального напряжения, входящего в его состав, при этом уставка реле по напряжению может варьироваться в диапазоне 30-70 % от номинального напряжения, что оказывает влияние на допустимое время провала напряжения ЭТС [95]. Выдержка времени АВР выбирается из двух основных условий: первое – «согласование с релейными защитами присоединений, короткие замыкания в которых приводят к снижению напряжения ниже уставки пускового органа», второе – «согласование с другими устройствами противоаварийной автоматики» [96]. Эти факторы приводят к выдержкам времени АВР равным от 1 секунды до 10 секунд, и требования селективности не позволяют уменьшить уставку для сохранения устойчивости ЭТС [96].

Для устранения этих недостатков было разработано устройство БАВР [22, 78]. БАВР измеряет линейные напряжения на основном и резервном ИП, мгновенные значения фазных токов на вводе основного ИП, затем производит их преобразование в цифровые сигналы. Далее по алгоритму, заложенному в устройство, производятся расчеты для определения направления тока. Это позволяет отказаться от согласования уставок БАВР с релейными защитами смежных участков и обеспечивает время переключения 27–34 мс при наличии быстродействующих выключателей [22, 78].

Снижение уставок смежных релейных защит позволит снизить выдержку времени АВР, хорошие результаты в этом направлении демонстрируют микропроцессорные релейные защиты. Однако имеются ограничения связанные с селективностью работы релейных защит, чем сложнее и протяженнее электрическая сеть, тем больше будет их выдержка времени [95].

Четвертое направление повышения устойчивости – это увеличение запаса энергии ЭТС, к таким устройствам можно отнести: источники бесперебойного питания (ИБП), динамические компенсаторы искажений напряжения (ДКИН), инерционные и емкостные накопители энергии и собственные электростанции.

ИБП запасают электрическую энергию в аккумуляторных батареях в нормальных режимах работы и расходуют её в аварийных режимах. Выделяют основные виды ИБП: резервный, линейно-интерактивный и с двойным преобразованием [23]. ИБП резервного типа работают только в аварийных режимах. Это напрямую влияет на их особенности: простота устройства, низкая цена, отсутствие коррекции напряжения и частоты, наличие бестоковой паузы. ИБП линейно-интерактивного типа представляют собой улучшенную версию резервных ИБП, их основное конструктивное отличие – наличие регулятора напряжения. ИБП с двойным преобразованием являются наиболее современными и дорогими. Они обеспечивают коррекцию питающего напряжения не только по величине, но и по частоте [23, 26]. Главным недостатком ИБП всех типов является необходимость обеспечивать полную мощность потребителей за счет аккумуляторных батарей, что ведет к большим затратам промышленного предприятия.

ДКИН состоит из вольтодобавочного трансформатора, выпрямителя, инвертора, емкостных элементов и системы переключателей [79, 109, 111-113]. ДКИН предназначены для устранения искажений напряжения, таких как провалы напряжения, перенапряжения, при этом они имеют технические ограничения: невозможность компенсации при остаточных напряжениях меньше 30% от номинального значения, ограниченное время работы при глубоких провалах напряжения [111]. Компенсация провала напряжения осуществляется за счет последовательного нагружения включения вольтодобавочного трансформатора, а при глубоких провалах за счет энергии запасенной в емкостных накопителях. Из этого вытекает недостаток в виде ограниченного времени работы по сравнению с ИБП, но при этом отпадает необходимость в аккумуляторных батареях. ДКИН

имеют меньшую стоимость относительно ИБП, а также требуют меньше затрат на обслуживание [112].

Инерционные и емкостные накопители энергии наиболее часто используются для электроприводов с преобразователями частоты (ПЧ) [85, 86, 104]. Это связано с удобством интеграции таких накопителей в преобразователи частоты, а именно в звено постоянного тока. В работе [86] авторы предлагают принцип работы ПЧ с инерционным накопителем, для этого каждый ПЧ должен подключаться к двум выпрямителям: основному и резервному, при этом резервный выпрямитель получает энергию не от резервного ввода, а от инерционного накопителя энергии. Применение емкостных накопителей осуществляется путем замены стандартного конденсатора в ПЧ [104]. Основное ограничение этих средств повышения устойчивости – наличие электропривода с преобразователями частоты.

Строительство собственной электростанции позволит обеспечить резервный источник энергии, который может использоваться при искажениях напряжения в энергосистеме. Для максимальной эффективности устранения искажений генераторы будут вынуждены работать в горячем резерве. Основным недостатком этого способа является высокая стоимость как капитальных затрат, так и обслуживания, хотя он может подойти для новых нефтяных месторождений, которые удалены от энергосистемы.

Таким образом, для снижения времени возмущающего воздействия наиболее перспективными представляются устройства быстродействующего автоматического ввода резерва, а для повышения запаса энергии электротехнических систем динамические компенсаторы искажений напряжения. Для новых нефтяных месторождений выглядит перспективным строительство собственной электростанции.

Анализ технических средств показал большое разнообразие, как устройств, так и принципов повышения устойчивости. Это говорит о необходимости разработки методики выбора технических средств, которая позволит учитывать всё разнообразие устройств и их влияние на устойчивость ЭТС.

1.6 Выводы по главе 1

1. Проведен анализ литературных источников по проблеме устойчивости электротехнических систем, который показал необходимость разработки методики выбора технических средств для повышения устойчивости, учитывающей как технические, технологические, так и экономические факторы.

2. Проведена оценка степени взаимозависимости источников питания для одного из месторождений Западной Сибири, которая показала, что учет данного параметра позволяет обеспечить бесперебойное питание потребителей, что ведет к увеличению эффективности предприятия и к повышению надежности технологического процесса в целом

3. Сформулированы задачи, требующие решения:

3.1. Произвести оценку устойчивости электротехнической системы объектов нефтяных месторождений с высоковольтными асинхронными электродвигателями при несимметричных провалах напряжения.

3.2. Разработать критерий оценки запаса устойчивости по напряжению электротехнических систем с высоковольтными асинхронными электродвигателями, который позволит учитывать степень взаимозависимости источников питания.

3.3. Разработать методику обоснованного выбора технических средств для повышения устойчивости по напряжению электротехнических систем объектов нефтяных месторождений с высоковольтными асинхронными электродвигателями.

3.4. Разработать техническое устройство для повышения устойчивости электротехнической системы с высоковольтными асинхронными электродвигателями, адаптирующееся к режиму работы потребителя, и программный комплекс, который позволит рассчитать границы динамической устойчивости при несимметричных провалах напряжения.

2 ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОБЪЕКТОВ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ПРОВАЛАХ НАПРЯЖЕНИЯ

2.1 Общие принципы построения математической модели электротехнической системы с высоковольтными асинхронными электродвигателями

Оценка устойчивости ЭТС с ВАД базируется на расчете электромагнитных и электромеханических переходных процессов. Для этого используются различные математические модели элементов ЭТС, которые учитывают одни факторы и пренебрегают другими. Наиболее точные результаты дает расчет переходных процессов в мгновенных значениях для каждой фазы ЭТС, но при этом он достаточно сложен из-за большого числа дифференциальных уравнений с изменяющимися коэффициентами [13]. Для упрощения расчетов используют переход к двухфазной системе координат, которая может быть жестко связана со статором, с ротором или с произвольно вращающейся осью.

Для расчета переходных процессов в работе была использована вращающаяся с произвольной частотой ω_k двухфазная система координат (далее d-q). Эта система позволяет моделировать как синхронные генераторы и двигатели, так и асинхронные, что позволяет считать её универсальной, основной недостаток – увеличение числа уравнений при наличии одного источника питания.

В работе рассматриваются ЭТС, в состав которых входят трансформаторы, кабельные и воздушные линии электропередачи, асинхронные электродвигатели, также при расчете переходных процессов необходимо учитывать систему внешнего электроснабжения. Исходя из вышесказанного, математическая модель ЭТС должна включать математические описания каждого элемента: энергосистемы, трансформатора, кабельной и воздушной линии электропередачи, электродвигателей. Еще одним фактором, оказывающим существенное влияние

на математическую модель ЭТС, являются несимметричные режимы работы, которые могут быть вызваны несимметрией фаз электрооборудования и электрических машин или несимметрией питающего напряжения.

При составлении математических моделей были использованы следующие допущения: электрические машины симметричны и имеют равномерный воздушный зазор; линии электропередачи симметричны; магнитопроводы электрических машин ненасыщенны; частота напряжения энергосистемы не изменяется.

Для учета несимметричных провалов напряжения был использован метод симметричных составляющих, который позволяет выделить систему напряжений с прямым порядком чередования фаз (прямая последовательность), систему напряжений с обратным порядком чередования фаз (обратная последовательность) и систему напряжений нулевой последовательности. Таким образом, математическая модель будет включать в себя уравнения для прямой последовательности и уравнения для обратной последовательности, а нулевая последовательность не учитывается, потому что «составляющие нулевой последовательности в токах обмоток асинхронных двигателей обычно не возникают, так как нулевые точки этих обмоток, если обмотки соединены в «звезду», обычно изолированы» [15].

2.2 Математические модели элементов электротехнической системы

Основным элементом рассматриваемых в работе ЭТС являются ВАД. Они оказывают существенное влияние на переходные процессы в ЭТС за счет большой единичной мощности и больших пусковых токов. Для моделирования асинхронных электродвигателей была использована Т-образная схема замещения [12, 15, 39], см. рисунок 2.1, которая достаточно точно отражает процессы в электродвигателях, и её элементы могут быть рассчитаны по каталожным данным электродвигателей.

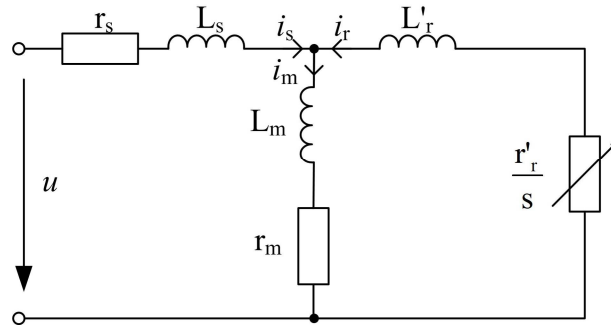


Рисунок 2.1 – Т-образная схема замещения асинхронного электродвигателя

Математическая модель асинхронного двигателя была составлена на основе полных уравнений Парка-Горева [13, 42], что позволяет рассчитывать не только электрохимические переходные процессы, но и электромагнитные. Для учета симметричных составляющих модель включает системы уравнений для прямой и обратной последовательностей.

Математическая модель прямой последовательности асинхронного электродвигателя:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{d1} = \frac{d\Psi_{sd1}}{dt} + \Psi_{sq1} \cdot \omega_k + I_{sd1} \cdot (r_s + r_m) + I_{rd1} \cdot r_m \\ U_{q1} = \frac{d\Psi_{sq1}}{dt} - \Psi_{sd1} \cdot \omega_k + I_{sq1} \cdot (r_s + r_m) + I_{rq1} \cdot r_m \\ 0 = \frac{d\Psi_{rd1}}{dt} + \Psi_{rq1} \cdot (\omega_k - \omega) + I_{rd1} \cdot \left(\frac{r'_r}{\omega_0 - \omega} + r_m \right) + I_{sd1} \cdot r_m \\ 0 = \frac{d\Psi_{rq1}}{dt} - \Psi_{rd1} \cdot (\omega_k - \omega) + I_{rq1} \cdot \left(\frac{r'_r}{\omega_0 - \omega} + r_m \right) + I_{sq1} \cdot r_m \\ \Psi_{sd1} = (L_s + L_m) \cdot I_{sd1} + L_m \cdot I_{rd1} \\ \Psi_{sq1} = (L_s + L_m) \cdot I_{sq1} + L_m \cdot I_{rq1} \\ \Psi_{rd1} = (L'_r + L_m) \cdot I_{rd1} + L_m \cdot I_{sd1} \\ \Psi_{rq1} = (L'_r + L_m) \cdot I_{rq1} + L_m \cdot I_{sq1} \end{array} \right. , \quad (2.1)$$

где I – ток, о.е.; Ψ – потокосцепление, о.е.; индекс d относится к продольной оси, q – к поперечной оси, s – к обмотке статора, r – к обмотке ротора; m – к контуру намагничивания; L – индуктивность рассеяния, о.е.; r – активное сопротивление, о.е.; t – время переходного процесса; U – напряжение статора, о.е.; ω – частота вращения ротора, о.е.; ω_k – частота вращения осей d-q, о.е.; ω_0 – синхронная частота, о.е.

Математическая модель обратной последовательности асинхронного электродвигателя:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{d2} = \frac{d\Psi_{sd2}}{dt} + \Psi_{sq2} \cdot \omega_k + I_{sd2} \cdot (r_s + r_m) + I_{rd2} \cdot r_m \\ U_{q2} = \frac{d\Psi_{sq2}}{dt} - \Psi_{sd2} \cdot \omega_k + I_{sq2} \cdot (r_s + r_m) + I_{rq2} \cdot r_m \\ 0 = \frac{d\Psi_{rd2}}{dt} + \Psi_{rq2} \cdot (\omega_k + \omega) + I_{rd2} \cdot \left(\frac{r'_r}{\omega_0 + \omega} + r_m \right) + I_{sd2} \cdot r_m \\ 0 = \frac{d\Psi_{rq2}}{dt} - \Psi_{rd2} \cdot (\omega_k + \omega) + I_{rq2} \cdot \left(\frac{r'_r}{\omega_0 + \omega} + r_m \right) + I_{sq2} \cdot r_m \\ \Psi_{sd2} = (L_s + L_m) \cdot I_{sd2} + L_m \cdot I_{rd2} \\ \Psi_{sq2} = (L_s + L_m) \cdot I_{sq2} + L_m \cdot I_{rq2} \\ \Psi_{rd2} = (L'_r + L_m) \cdot I_{rd2} + L_m \cdot I_{sd2} \\ \Psi_{rq2} = (L'_r + L_m) \cdot I_{rq2} + L_m \cdot I_{sq2} \end{array} \right. \quad (2.2)$$

При несимметрии питающего напряжения создается дополнительный тормозящий момент на валу электродвигателя из-за наличия токов обратной последовательности, тогда уравнение движения ротора с учетом симметричных составляющих примет вид:

$$T_j \cdot \frac{d\omega}{dt} = 1,5 \cdot (\Psi_{q1} \cdot I_{d1} - \Psi_{d1} \cdot I_{q1} - (\Psi_{q2} \cdot I_{d2} - \Psi_{d2} \cdot I_{q2})) - M_c, \quad (2.3)$$

где T_j - электрохимическая постоянная времени электрического привода, о.е.; индекс 1 относится к прямой последовательности, 2 - к обратной последовательности; M_c - момент сопротивления механизма, о.е.

Основным рабочим механизмом на многих объектах нефтяного месторождения является насос. Момент сопротивления насоса был представлен вентиляторной характеристикой:

$$M_c = M_0 + (M_n - M_0) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2, \quad (2.4)$$

где M_n - момент сопротивления при номинальной нагрузке, о.е.; M_0 - момент сопротивления при трогании, о.е.; ω - частота вращения насоса, о.е.; ω_n - номинальная частота вращения насоса, о.е.

Как правило, система распределения электрической энергии включает в себя трансформаторы. Для их описания была использована Т-образная схема замещения [12, 15, 39], см. рисунок 2.2.

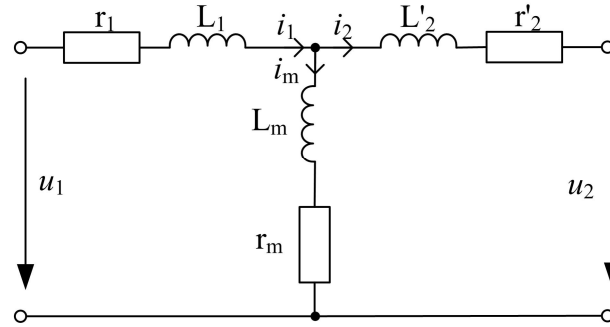


Рисунок 2.2 – Т-образная схема замещения трансформатора

Трансформатор является статичным устройством, поэтому его математические модели для прямой и обратной последовательностей будут идентичны. При составлении уравнений для трансформатора в осях d-q появляются дополнительные слагаемые (ЭДС вращения), обусловленные вращением осей. Математическая модель трансформатора:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{1d} = \frac{d\Psi_{1d}}{dt} + \Psi_{1q} \cdot \omega_k + I_{1d} \cdot (r_1 + r_m) - I_{2d} \cdot r_m \\ U_{1q} = \frac{d\Psi_{1q}}{dt} - \Psi_{1d} \cdot \omega_k + I_{1q} \cdot (r_1 + r_m) - I_{2q} \cdot r_m \\ U_{2d} = \frac{d\Psi_{2d}}{dt} + \Psi_{2q} \cdot \omega_k - I_{2d} \cdot (r'_2 + r_m) + I_{1d} \cdot r_m \\ U_{2q} = \frac{d\Psi_{2q}}{dt} - \Psi_{2d} \cdot \omega_k - I_{2q} \cdot (r'_2 + r_m) + I_{1q} \cdot r_m \end{array} \right. , \quad (2.5)$$

$$\begin{array}{l} \Psi_{1d} = (L_1 + L_m) \cdot I_{1d} - L_m \cdot I_{2d} \\ \Psi_{1q} = (L_1 + L_m) \cdot I_{1q} - L_m \cdot I_{2q} \\ \Psi_{2d} = -(L'_2 + L_m) \cdot I_{2d} + L_m \cdot I_{1d} \\ \Psi_{2q} = -(L'_2 + L_m) \cdot I_{2q} + L_m \cdot I_{1q} \end{array}$$

где I – ток, о.е.; Ψ – потокосцепление, о.е.; индекс d относится к продольной оси, q – к поперечной оси, 1 – к первичной обмотке трансформатора, 2 – к вторичной обмотки трансформатора, m – к контуру намагничивания; L – индуктивность, о.е.; r – активное сопротивление, о.е.; t – время переходного процесса; U – напряжение обмоток, о.е.; ω_k – частота вращения осей d-q, о.е.

Вторым обязательным элементом сети распределения электрической энергии являются кабельные и воздушные линии. ЭТС включает в себя линии электропередачи для подключения обмотки низшего напряжения трансформатора и нагрузки к распределительному устройству, на подстанциях глубокого ввода длина таких линий составляет менее километра, что позволяет пренебречь их активной и емкостной проводимостью. Таким образом, для линий электропередачи была использована упрощенная схема замещения, включающая активное и индуктивное сопротивления, соединенные последовательно, см. рисунок 2.3.

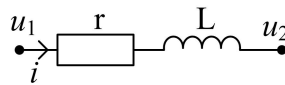


Рисунок 2.3 – Упрощенная схема замещения кабельной линии

Математические модели прямой и обратной последовательностей будут идентичны для линий электропередачи из-за равенства соответствующих сопротивлений. Математическая модель активно-индуктивной ветви в осях d-q примет вид:

$$\begin{cases} U_{1d} - U_{2d} = L \cdot \frac{dI_d}{dt} + r \cdot I_d + \omega_k I_q \\ U_{1q} - U_{2q} = L \cdot \frac{dI_q}{dt} + r \cdot I_q - \omega_k I_d \end{cases}, \quad (2.6)$$

где I – ток, о.е.; индекс d относится к продольной оси, q – к поперечной оси; L – индуктивность ветви, о.е.; r – активное сопротивление ветви, о.е.; t – время переходного процесса; U_1 и U_2 – напряжения в начале и в конце ветви, о.е.; ω_k – частота вращения осей d-q, о.е.

При расчете переходных процессов часть энергосистемы, как правило, заменяется эквивалентным устройством. Важным фактором при эквивалентировании является мощность заменяемой части энергосистемы и её соотношение с мощностью электродвигателей ЭТС: если мощность системы соизмерима с общей мощностью всех электродвигателей, то она должна моделироваться в виде эквивалентного синхронного генератора; если мощность

системы во много раз больше мощности электродвигателей, то допускается её моделировать эквивалентным источником напряжения, обладающим ЭДС и внутренним сопротивлением [13].

При централизованном электроснабжении нефтяного месторождения система внешнего электроснабжения представляет собой шины бесконечной мощности с постоянным сопротивлением, см. рисунок 2.4.

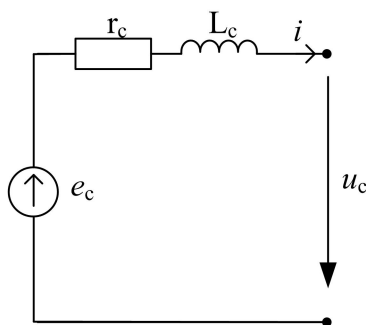


Рисунок 2.4 – Схема замещения системы внешнего электроснабжения

По схеме замещения были составлены уравнения в осях d-q, которые позволяют рассчитать напряжение на шинах ЭТС:

$$\begin{cases} U_{cd} = E_{cd} - I_{cd} \cdot r_c - L_c \cdot \frac{dI_d}{dt} + L_c \cdot i_q \cdot \omega_k \\ U_{cq} = E_{cq} - I_{cq} \cdot r_c - L_c \cdot \frac{dI_q}{dt} - L_c \cdot i_d \cdot \omega_k \end{cases}, \quad (2.7)$$

где U_c – напряжение на входе ЭТС, о.е.; индекс d относится к продольной оси, q – к поперечной оси; E_c – эквивалентная ЭДС системы внешнего электроснабжения, о.е.; L_c , r_c – эквивалентные индуктивность и активное сопротивление системы внешнего электроснабжения, о.е.; I – ток, потребляемый из системы внешнего электроснабжения, о.е.; ω_k – частота вращения осей d-q, о.е.

2.3 Моделирование возмущающих воздействий

Большая часть коротких замыканий в электрических сетях среднего напряжения – однофазные [70], что приводит к несимметричным провалам напряжения на шинах потребителя. Провалы и прерывания напряжения наиболее

опасны для узлов электродвигательной нагрузки, так как могут привести к нарушению их устойчивости и системной аварии.

Для оценки устойчивости ЭТС применяют одноступенчатые провалы напряжения, которые формируются следующим образом: эквивалентная ЭДС системы электроснабжения скачкообразно изменяется до значения остаточного напряжения и остается неизменной на протяжении всего возмущения, после чего мгновенно принимает первоначальное значение. Воздействия такого типа моделируются независимо в каждой фазе электрической сети для получения несимметричного провала напряжения с учетом следующих ограничений [31, 39]:

1. Напряжение послеаварийного режима не превысит доаварийное значение.
2. Напряжение обратной последовательности не превысит значение напряжения прямой последовательности.

Однако на практике возможны случаи перехода однофазного короткого замыкания в двухфазное или трехфазное, что ведет к изменению напряжения на шинах потребителя, и, следовательно, к изменению запаса устойчивости. При этом провал напряжения на шинах потребителя будет состоять из нескольких отрезков с разными значениями остаточного напряжения. В работе такие возмущения формируются следующим образом: в начале возмущения эквивалентная ЭДС системы электроснабжения двух фаз мгновенно изменяется до значения остаточного напряжения, в третьей фазе остается номинальное значение. Через промежуток времени t_1 эквивалентная ЭДС третьей фазы мгновенно уменьшается до значения остаточного напряжения равного напряжению двух других фаз. Через промежуток времени t_2 эквивалентная ЭДС всех фаз мгновенно восстанавливается до номинального значения. Это соответствует двум провалам напряжения: на первом отрезке – двухфазный несимметричный, на втором – трехфазный симметричный, см. рисунок 2.5, далее подобные провалы напряжения будем называть двухступенчатыми.

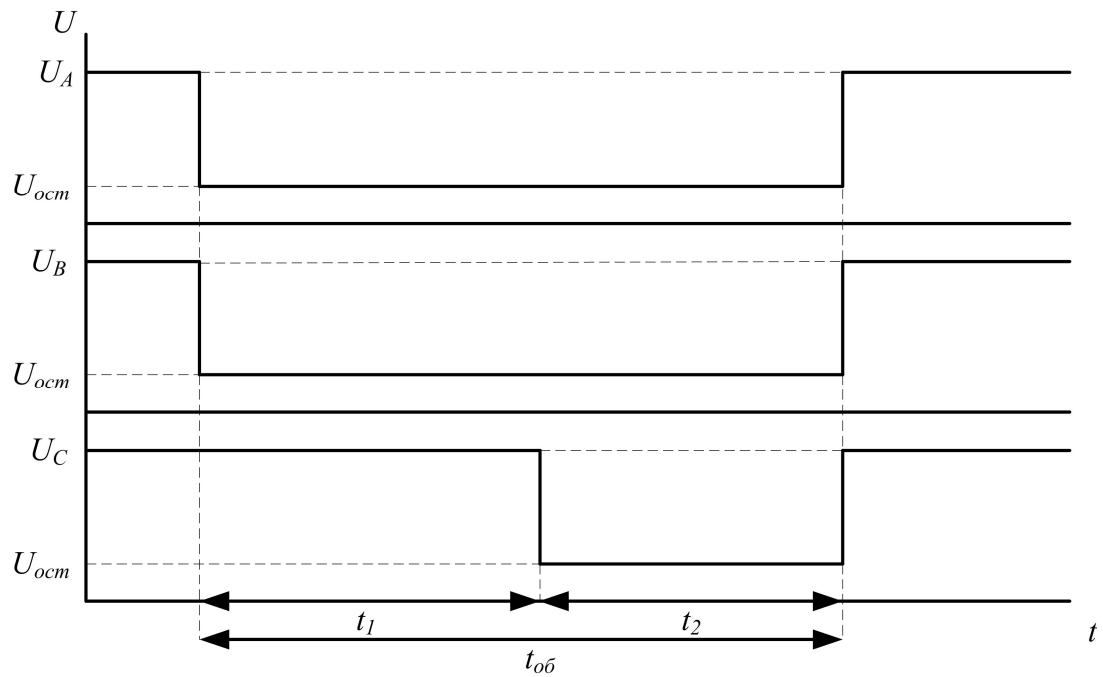


Рисунок 2.5 – Моделируемое фазное напряжение при двухступенчатом провале

2.4 Разработка методики оценки влияния несимметричных провалов напряжения на устойчивость электротехнических систем объектов нефтяных месторождений

Основными характеристиками устойчивости ЭТС являются границы статической и динамической устойчивости и коэффициент устойчивости по напряжению [39]. Граница статической устойчивости показывает зависимость напряжения статической устойчивости прямой последовательности от напряжения обратной последовательности. ГДУ представляет собой зависимость допустимой длительности провала напряжения от его глубины.

Для оценки влияния несимметричных провалов напряжения на устойчивость ЭТС объектов нефтяных месторождений необходимо определить границу статической устойчивости, затем найти ГДУ, которая позволит рассчитать коэффициент устойчивости по напряжению.

1. Для построения границы статической устойчивости ЭТС рассчитывается напряжение статической устойчивости при симметричном провале напряжения. Далее в системе внешнего электроснабжения моделируется несимметричное

возмущающее воздействие с напряжением прямой последовательности равным напряжению статической устойчивости при симметричном провале напряжения и небольшим значением напряжения обратной последовательности, которое зависит от требуемой точности расчета, с учетом ограничений, рассмотренных в параграфе 2.3. На следующем этапе с помощью математической модели ЭТС определяется поведение электродвигателей при заданном возмущении. Если статическая устойчивость нарушается, то значение напряжения прямой последовательности увеличивается, если статическая устойчивость не нарушается, то параметры возмущающего воздействия сохраняются, затем увеличивается напряжение обратной последовательности и расчет повторяется.

2. Для определения ГДУ ЭТС в системе внешнего электроснабжения моделируется несимметричный одноступенчатый провал напряжения заданной глубины и длительности. По математической модели ЭТС рассчитывается выбег асинхронных двигателей при заданном провале напряжения, затем при восстановлении напряжения определяется возможность самозапуска электродвигателей. Если самозапуск успешный, то увеличивается длительность провала напряжения и расчет повторяется. Если самозапуск не успешный, то параметры возмущающего воздействия сохраняются, и изменяется глубина провала напряжения, расчет повторяется до тех пор, пока не будет получена ГДУ ЭТС.

3. Коэффициент устойчивости по напряжению определяется по выражению [28, 80]:

$$k = \frac{S_{уст}}{S_{общ}}, \quad (2.8)$$

где $S_{уст}$ – площадь области устойчивой работы, ограниченная ГДУ и единицей по оси напряжения; $S_{общ}$ – площадь области, ограниченная единицей по оси напряжения и предельным временем $t_{пр}$ по оси длительности провала напряжения.

На основании предложенной методики было создано две программы для ЭВМ «Voltage stability of electromotive load» и «Оценка устойчивости АД при сложных провалах напряжения» [82, 83].

2.5 Оценка устойчивости электротехнической системы кустовой насосной станции

2.5.1 Математическая модель электротехнической системы кустовой насосной станции

Для апробации предложенной методики оценки устойчивости при несимметричных провалах напряжения был выбрана типовая кустовая насосная станция, включающая семь асинхронных двигателей типа АРМ мощностью 315 кВт напряжением 6 кВ, один из которых резервный. Питание узла нагрузки осуществляется от трансформаторов ТМН-2500/35, двигатели подключены с помощью кабеля АПвВнг(А)-LS 3х25-6 длиной 250 метров. Схема электроснабжения КНС приведена на рисунке 2.6.

Рассматриваемый объект относится к первой категории по надежности электроснабжения, поэтому имеет два независимых источника питания. В нормальном режиме работы секции шин ЭТС работают независимо друг от друга (секционный выключатель отключен). Исходя из этого, была составлена схема замещения, которая включает в себя только трансформатор, кабельные линии и 3 асинхронных электродвигателя, см. рисунок 2.7. Для упрощения схемы замещения были исключены трансформаторы собственных нужд из-за их незначительного влияния на потребляемый ток из системы внешнего электроснабжения, также не учитывались измерительные и коммутационные аппараты. Энергосистема была представлена эквивалентным источником напряжения с индуктивным сопротивлением, активная составляющая сопротивления была исключена из-за её небольшого значения для систем бесконечной мощности. При необходимости аналогичным образом может быть составлена схема замещения для второй секции шин, она будет идентична рисунку 2.7. Параметры схемы замещения были рассчитаны на основе каталожных данных электрооборудования.

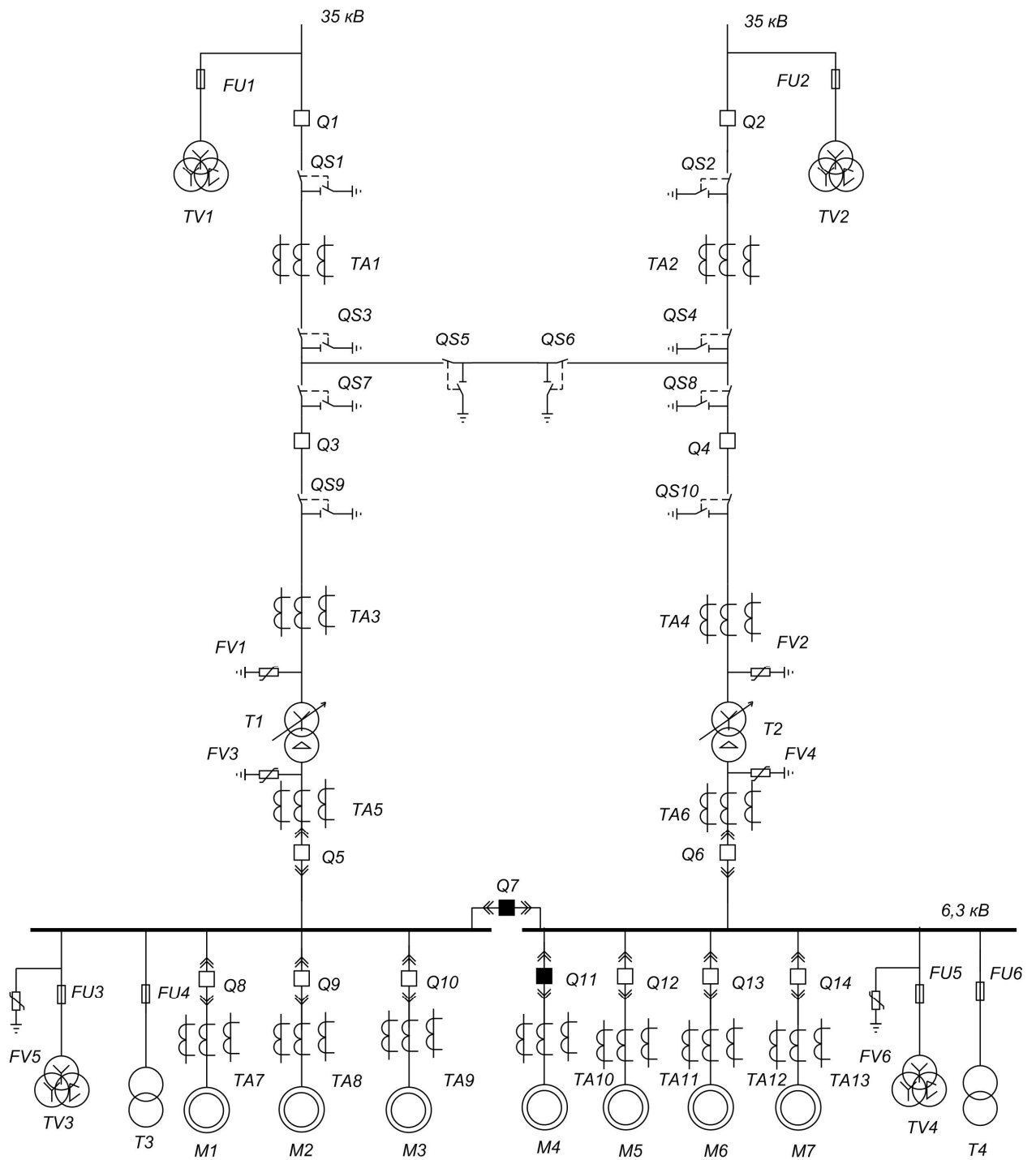


Рисунок 2.6 - Однолинейная схема электроснабжения рассматриваемой КНС

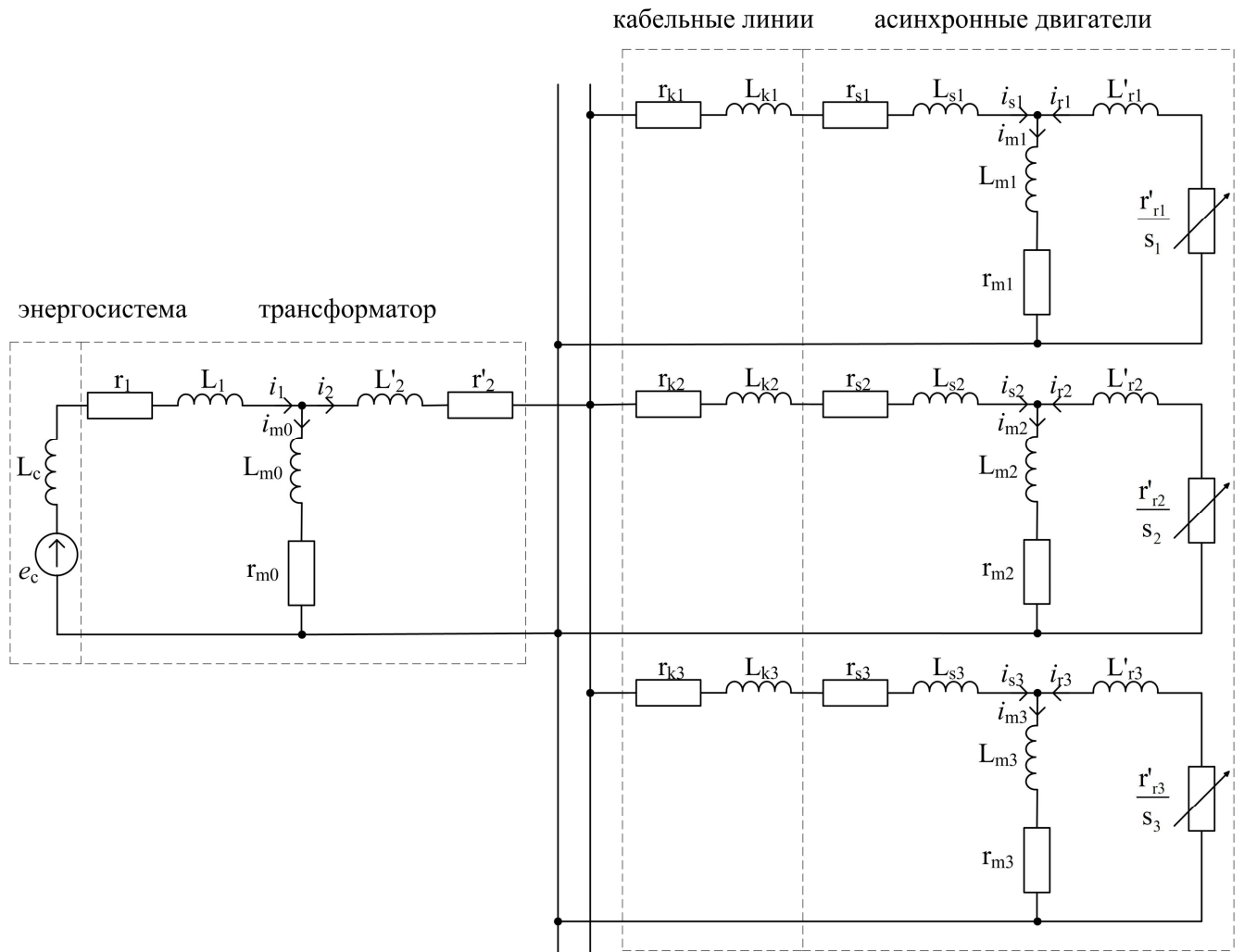


Рисунок 2.7 - Схема замещения одной секции шин ЭТС КНС

На основании схемы замещения была составлена математическая модель ЭТС КНС, которая состоит из уравнений для прямой последовательности и уравнений для обратной последовательности. Подробно математические модели элементов ЭТС были рассмотрены в параграфе 2.2.

Для упрощения математической модели были выполнены следующие преобразования схемы замещения: индуктивное сопротивление энергосистемы и индуктивное сопротивление первичной обмотки трансформатора было представлено как эквивалентное индуктивное сопротивление ветви из-за последовательного сопротивления; сопротивления кабельных линий и статора асинхронных электродвигателей были включены в одно уравнение с учетом их последовательного соединения. Все уравнения были составлены относительно осей вращающихся с синхронной частотой энергосистемы ω_0 , которая была

принята неизменной при любых видах провалов напряжения. Обозначение всех величин используемых в уравнениях приведено в параграфе 2.2. Индексы величин расшифровываются следующим образом: последняя цифра показывает порядок чередования фаз переменной (1 – прямой, 2 –обратный); предпоследний символ показывает проекцию переменной на соответствующую ось; оставшиеся начальные символы указывают на принадлежность переменной элементу ЭТС согласно схеме замещения на рисунке 2.7. Во всех уравнениях U_2 – напряжение в узле подключения кабельных линий к трансформатору. Все математические модели были записаны в относительных единицах.

Математическая модель прямой последовательности трансформатора:

$$E_{cd1} = \frac{d\Psi_{1d1}}{dt} + \Psi_{1q1} \cdot \omega_0 + I_{1d1} \cdot (r_1 + r_{m0}) - I_{2d1} \cdot r_{m0}, \quad (2.9)$$

$$E_{cq1} = \frac{d\Psi_{1q1}}{dt} - \Psi_{1d1} \cdot \omega_0 + I_{1q1} \cdot (r_1 + r_{m0}) - I_{2q1} \cdot r_{m0}, \quad (2.10)$$

$$U_{2d1} = \frac{d\Psi_{2d1}}{dt} + \Psi_{2q1} \cdot \omega_0 - I_{2d1} \cdot (r'_2 + r_{m0}) + I_{1d1} \cdot r_{m0}, \quad (2.11)$$

$$U_{2q1} = \frac{d\Psi_{2q1}}{dt} - \Psi_{2d1} \cdot \omega_0 - I_{2q1} \cdot (r'_2 + r_{m0}) + I_{1q1} \cdot r_{m0}, \quad (2.12)$$

$$\Psi_{1d1} = (L_1 + L_c + L_{m0}) \cdot I_{1d1} - L_{m0} \cdot I_{2d1}, \quad (2.13)$$

$$\Psi_{1q1} = (L_1 + L_c + L_{m0}) \cdot I_{1q1} - L_{m0} \cdot I_{2q1}, \quad (2.14)$$

$$\Psi_{2d1} = -(L'_2 + L_{m0}) \cdot I_{2d1} + L_{m0} \cdot I_{1d1}, \quad (2.15)$$

$$\Psi_{2q1} = -(L'_2 + L_{m0}) \cdot I_{2q1} + L_{m0} \cdot I_{1q1}, \quad (2.16)$$

Математическая модель прямой последовательности асинхронных электродвигателей:

$$U_{2d1} = \frac{d\Psi_{s1d1}}{dt} + \Psi_{s1q1} \cdot \omega_0 + I_{s1d1} \cdot (r_{s1} + r_{k1} + r_{m1}) + I_{r1d1} \cdot r_{m1}, \quad (2.17)$$

$$U_{2q1} = \frac{d\Psi_{s1q1}}{dt} - \Psi_{s1d1} \cdot \omega_0 + I_{s1q1} \cdot (r_{s1} + r_{k1} + r_{m1}) + I_{r1q1} \cdot r_{m1}, \quad (2.18)$$

$$0 = \frac{d\Psi_{r1d1}}{dt} + \Psi_{r1q1} \cdot (\omega_0 - \omega_1) + I_{r1d1} \cdot \left(\frac{r'_{r1}}{\omega_0 - \omega_1} + r_{m1} \right) + I_{s1d1} \cdot r_{m1}, \quad (2.19)$$

$$0 = \frac{d\Psi_{r1q1}}{dt} - \Psi_{r1d1} \cdot (\omega_0 - \omega_1) + I_{r1q1} \cdot \left(\frac{r'_{r1}}{\omega_0 - \omega_1} + r_{m1} \right) + I_{s1q1} \cdot r_{m1}, \quad (2.20)$$

$$\Psi_{s1d1} = (L_{s1} + L_{k1} + L_{m1}) \cdot I_{s1d1} + L_{m1} \cdot I_{r1d1}, \quad (2.21)$$

$$\Psi_{s1q1} = (L_{s1} + L_{k1} + L_{m1}) \cdot I_{s1q1} + L_{m1} \cdot I_{r1q1}, \quad (2.22)$$

$$\Psi_{r1d1} = (L'_{r1} + L_{m1}) \cdot I_{r1d1} + L_{m1} \cdot I_{s1d1}, \quad (2.23)$$

$$\Psi_{r1q1} = (L'_{r1} + L_{m1}) \cdot I_{r1q1} + L_{m1} \cdot I_{s1q1}, \quad (2.24)$$

$$U_{2d1} = \frac{d\Psi_{s2d1}}{dt} + \Psi_{s2q1} \cdot \omega_0 + I_{s2d1} \cdot (r_{s2} + r_{k2} + r_{m2}) + I_{r2d1} \cdot r_{m2}, \quad (2.25)$$

$$U_{2q1} = \frac{d\Psi_{s2q1}}{dt} - \Psi_{s2d1} \cdot \omega_0 + I_{s2q1} \cdot (r_{s2} + r_{k2} + r_{m2}) + I_{r2q1} \cdot r_{m2}, \quad (2.26)$$

$$0 = \frac{d\Psi_{r2d1}}{dt} + \Psi_{r2q1} \cdot (\omega_0 - \omega_2) + I_{r2d1} \cdot \left(\frac{r'_{r2}}{\omega_0 - \omega_2} + r_{m2} \right) + I_{s2d1} \cdot r_{m2}, \quad (2.27)$$

$$0 = \frac{d\Psi_{r2q1}}{dt} - \Psi_{r2d1} \cdot (\omega_0 - \omega_2) + I_{r2q1} \cdot \left(\frac{r'_{r2}}{\omega_0 - \omega_2} + r_{m2} \right) + I_{s2q1} \cdot r_{m2}, \quad (2.28)$$

$$\Psi_{s2d1} = (L_{s2} + L_{k2} + L_{m2}) \cdot I_{s2d1} + L_{m2} \cdot I_{r2d1}, \quad (2.29)$$

$$\Psi_{s2q1} = (L_{s2} + L_{k2} + L_{m2}) \cdot I_{s2q1} + L_{m2} \cdot I_{r2q1}, \quad (2.30)$$

$$\Psi_{r2d1} = (L'_{r2} + L_{m2}) \cdot I_{r2d1} + L_{m2} \cdot I_{s2d1}, \quad (2.31)$$

$$\Psi_{r2q1} = (L'_{r2} + L_{m2}) \cdot I_{r2q1} + L_{m2} \cdot I_{s2q1}, \quad (2.32)$$

$$U_{2d1} = \frac{d\Psi_{s3d1}}{dt} + \Psi_{s3q1} \cdot \omega_0 + I_{s3d1} \cdot (r_{s3} + r_{k3} + r_{m3}) + I_{r3d1} \cdot r_{m3}, \quad (2.33)$$

$$U_{2q1} = \frac{d\Psi_{s3q1}}{dt} - \Psi_{s3d1} \cdot \omega_0 + I_{s3q1} \cdot (r_{s3} + r_{k3} + r_{m3}) + I_{r3q1} \cdot r_{m3}, \quad (2.34)$$

$$0 = \frac{d\Psi_{r3d1}}{dt} + \Psi_{r3q1} \cdot (\omega_0 - \omega_3) + I_{r3d1} \cdot \left(\frac{r'_{r3}}{\omega_0 - \omega_3} + r_{m3} \right) + I_{s3d1} \cdot r_{m3}, \quad (2.35)$$

$$0 = \frac{d\Psi_{r3q1}}{dt} - \Psi_{r3d1} \cdot (\omega_0 - \omega_3) + I_{r3q1} \cdot \left(\frac{r'_{r3}}{\omega_0 - \omega_3} + r_{m3} \right) + I_{s3q1} \cdot r_{m3}, \quad (2.36)$$

$$\Psi_{s3d1} = (L_{s3} + L_{k3} + L_{m3}) \cdot I_{s3d1} + L_{m3} \cdot I_{r3d1}, \quad (2.37)$$

$$\Psi_{s3q1} = (L_{s3} + L_{k3} + L_{m3}) \cdot I_{s3q1} + L_{m3} \cdot I_{r3q1}, \quad (2.38)$$

$$\Psi_{r3d1} = (L'_{r3} + L_{m3}) \cdot I_{r3d1} + L_{m3} \cdot I_{s3d1}, \quad (2.39)$$

$$\Psi_{r3q1} = (L'_{r3} + L_{m3}) \cdot I_{r3q1} + L_{m3} \cdot I_{s3q1}, \quad (2.40)$$

Для связи уравнений трансформатора и электродвигателей был использован первый закон Кирхгофа, для прямой последовательности он примет вид:

$$I_{2d1} = I_{s1d1} + I_{s2d1} + I_{s3d1}, \quad (2.41)$$

$$I_{2q1} = I_{s1q1} + I_{s2q1} + I_{s3q1}, \quad (2.42)$$

Математическая модель обратной последовательности трансформатора:

$$E_{cd2} = \frac{d\Psi_{1d2}}{dt} + \Psi_{1q2} \cdot \omega_0 + I_{1d2} \cdot (r'_1 + r_{m0}) - I_{2d2} \cdot r_{m0}, \quad (2.43)$$

$$E_{cq2} = \frac{d\Psi_{1q2}}{dt} - \Psi_{1d2} \cdot \omega_0 + I_{1q2} \cdot (r'_1 + r_{m0}) - I_{2q2} \cdot r_{m0}, \quad (2.44)$$

$$U_{2d2} = \frac{d\Psi_{2d2}}{dt} + \Psi_{2q2} \cdot \omega_0 - I_{2d2} \cdot (r'_2 + r_{m0}) + I_{1d2} \cdot r_{m0}, \quad (2.45)$$

$$U_{2q2} = \frac{d\Psi_{2q2}}{dt} - \Psi_{2d2} \cdot \omega_0 - I_{2q2} \cdot (r'_2 + r_{m0}) + I_{1q2} \cdot r_{m0}, \quad (2.46)$$

$$\Psi_{1d2} = (L_1 + L_c + L_{m0}) \cdot I_{1d2} - L_{m0} \cdot I_{2d2}, \quad (2.47)$$

$$\Psi_{1q2} = (L_1 + L_c + L_{m0}) \cdot I_{1q2} - L_{m0} \cdot I_{2q2}, \quad (2.48)$$

$$\Psi_{2d2} = -(L'_2 + L_{m0}) \cdot I_{2d2} + L_{m0} \cdot I_{1d2}, \quad (2.49)$$

$$\Psi_{2q2} = -(L'_2 + L_{m0}) \cdot I_{2q2} + L_{m0} \cdot I_{1q2}, \quad (2.50)$$

Математическая модель обратной последовательности асинхронных электродвигателей:

$$U_{2d2} = \frac{d\Psi_{s1d2}}{dt} + \Psi_{s1q2} \cdot \omega_0 + I_{s1d2} \cdot (r_{s1} + r_{k1} + r_{m1}) + I_{r1d2} \cdot r_{m1}, \quad (2.51)$$

$$U_{2q2} = \frac{d\Psi_{s1q2}}{dt} - \Psi_{s1d2} \cdot \omega_0 + I_{s1q2} \cdot (r_{s1} + r_{k1} + r_{m1}) + I_{r1q2} \cdot r_{m1}, \quad (2.52)$$

$$0 = \frac{d\Psi_{r1d2}}{dt} + \Psi_{r1q2} \cdot (\omega_0 + \omega_1) + I_{r1d2} \cdot \left(\frac{r'_{r1}}{\omega_0 + \omega_1} + r_{m1} \right) + I_{s1d2} \cdot r_{m1}, \quad (2.53)$$

$$0 = \frac{d\Psi_{r1q2}}{dt} - \Psi_{r1d2} \cdot (\omega_0 + \omega_1) + I_{r1q2} \cdot \left(\frac{r'_{r1}}{\omega_0 + \omega_1} + r_{m1} \right) + I_{s1q2} \cdot r_{m1}, \quad (2.54)$$

$$\Psi_{s1d2} = (L_{s1} + L_{k1} + L_{m1}) \cdot I_{s1d2} + L_{m1} \cdot I_{r1d2}, \quad (2.55)$$

$$\Psi_{s1q2} = (L_{s1} + L_{k1} + L_{m1}) \cdot I_{s1q2} + L_{m1} \cdot I_{r1q2}, \quad (2.56)$$

$$\Psi_{r1d2} = (L'_{r1} + L_{m1}) \cdot I_{r1d2} + L_{m1} \cdot I_{s1d2}, \quad (2.57)$$

$$\Psi_{r1q2} = (L'_{r1} + L_{m1}) \cdot I_{r1q2} + L_{m1} \cdot I_{s1q2}, \quad (2.58)$$

$$U_{2d2} = \frac{d\Psi_{s2d2}}{dt} + \Psi_{s2q2} \cdot \omega_0 + I_{s2d2} \cdot (r_{s2} + r_{k2} + r_{m2}) + I_{r2d2} \cdot r_{m2}, \quad (2.59)$$

$$U_{2q2} = \frac{d\Psi_{s2q2}}{dt} - \Psi_{s2d2} \cdot \omega_0 + I_{s2q2} \cdot (r_{s2} + r_{k2} + r_{m2}) + I_{r2q2} \cdot r_{m2}, \quad (2.60)$$

$$0 = \frac{d\Psi_{r2d2}}{dt} + \Psi_{r2q2} \cdot (\omega_0 + \omega_2) + I_{r2d2} \cdot \left(\frac{r'_{r2}}{\omega_0 + \omega_2} + r_{m2} \right) + I_{s2d2} \cdot r_{m2}, \quad (2.61)$$

$$0 = \frac{d\Psi_{r2q2}}{dt} - \Psi_{r2d2} \cdot (\omega_0 + \omega_2) + I_{r2q2} \cdot \left(\frac{r'_{r2}}{\omega_0 + \omega_2} + r_{m2} \right) + I_{s2q2} \cdot r_{m2}, \quad (2.62)$$

$$\Psi_{s2d2} = (L_{s2} + L_{k2} + L_{m2}) \cdot I_{s2d2} + L_{m2} \cdot I_{r2d2}, \quad (2.63)$$

$$\Psi_{s2q2} = (L_{s2} + L_{k2} + L_{m2}) \cdot I_{s2q2} + L_{m2} \cdot I_{r2q2}, \quad (2.64)$$

$$\Psi_{r2d2} = (L'_{r2} + L_{m2}) \cdot I_{r2d2} + L_{m2} \cdot I_{s2d2}, \quad (2.65)$$

$$\Psi_{r2q2} = (L'_{r2} + L_{m2}) \cdot I_{r2q2} + L_{m2} \cdot I_{s2q2}, \quad (2.66)$$

$$U_{2d2} = \frac{d\Psi_{s3d2}}{dt} + \Psi_{s3q2} \cdot \omega_0 + I_{s3d2} \cdot (r_{s3} + r_{k3} + r_{m3}) + I_{r3d2} \cdot r_{m3}, \quad (2.67)$$

$$U_{2q2} = \frac{d\Psi_{s3q2}}{dt} - \Psi_{s3d2} \cdot \omega_0 + I_{s3q2} \cdot (r_{s3} + r_{k3} + r_{m3}) + I_{r3q2} \cdot r_{m3}, \quad (2.68)$$

$$0 = \frac{d\Psi_{r3d2}}{dt} + \Psi_{r3q2} \cdot (\omega_0 + \omega_3) + I_{r3d2} \cdot \left(\frac{r'_{r3}}{\omega_0 + \omega_3} + r_{m3} \right) + I_{s3d2} \cdot r_{m3}, \quad (2.69)$$

$$0 = \frac{d\Psi_{r3q2}}{dt} - \Psi_{r3d2} \cdot (\omega_0 + \omega_3) + I_{r3q2} \cdot \left(\frac{r'_{r3}}{\omega_0 + \omega_3} + r_{m3} \right) + I_{s3q2} \cdot r_{m3}, \quad (2.70)$$

$$\Psi_{s3d2} = (L_{s3} + L_{k3} + L_{m3}) \cdot I_{s3d2} + L_{m3} \cdot I_{r3d2}, \quad (2.71)$$

$$\Psi_{s3q2} = (L_{s3} + L_{k3} + L_{m3}) \cdot I_{s3q2} + L_{m3} \cdot I_{r3q2}, \quad (2.72)$$

$$\Psi_{r3d2} = (L'_{r3} + L_{m3}) \cdot I_{r3d2} + L_{m3} \cdot I_{s3d2}, \quad (2.73)$$

$$\Psi_{r3q2} = (L'_{r3} + L_{m3}) \cdot I_{r3q2} + L_{m3} \cdot I_{s3q2}, \quad (2.74)$$

Аналогично прямой последовательности для узла запишем первый закон Кирхгофа:

$$I_{2d2} = I_{s1d2} + I_{s2d2} + I_{s3d2}, \quad (2.75)$$

$$I_{2q2} = I_{s1q2} + I_{s2q2} + I_{s3q2}, \quad (2.76)$$

Для связи электрических и механических параметров электродвигателей были использованы уравнения движения роторов:

$$T_{j1} \cdot \frac{d\omega_1}{dt} = 1,5 \cdot (\Psi_{s1q1} \cdot I_{s1d1} - \Psi_{s1d1} \cdot I_{s1q1} - (\Psi_{s1q2} \cdot I_{s1d2} - \Psi_{s1d2} \cdot I_{s1q2})) - M_{c1}, \quad (2.77)$$

$$M_{c1} = M_{01} + (M_{n1} - M_{01}) \cdot \left(\frac{\omega_1}{\omega_{n1}} \right)^2, \quad (2.78)$$

$$T_{j2} \cdot \frac{d\omega_2}{dt} = 1,5 \cdot \left(\Psi_{s2q1} \cdot I_{s2d1} - \Psi_{s2d1} \cdot I_{s2q1} - \left(\Psi_{s2q2} \cdot I_{s2d2} - \Psi_{s2d2} \cdot I_{s2q2} \right) \right) - M_{c2}, \quad (2.79)$$

$$M_{c2} = M_{02} + (M_{n2} - M_{02}) \cdot \left(\frac{\omega_2}{\omega_{n2}} \right)^2, \quad (2.80)$$

$$T_{j3} \cdot \frac{d\omega_3}{dt} = 1,5 \cdot \left(\Psi_{s3q1} \cdot I_{s3d1} - \Psi_{s3d1} \cdot I_{s3q1} - \left(\Psi_{s3q2} \cdot I_{s3d2} - \Psi_{s3d2} \cdot I_{s3q2} \right) \right) - M_{c3}, \quad (2.81)$$

$$M_{c3} = M_{03} + (M_{n3} - M_{03}) \cdot \left(\frac{\omega_3}{\omega_{n3}} \right)^2, \quad (2.82)$$

Таким образом, была составлена математическая модель ЭТС КНС, которая включает 74 уравнения, из них 35 дифференциальные.

Для оценки устойчивости необходимо рассчитать переходные процессы в ЭТС при заданном возмущающем воздействии. Для этого необходимо знать значения всех токов и напряжений в предшествующем режиме работы узла нагрузки, эти параметры могут быть рассчитаны по схеме замещения любым из известных методов расчета электрических цепей [10].

Затем начинается расчет переходных процессов при провале напряжения, принцип формирования которого описан в параграфе 2.3. Система уравнений (2.9)-(2.82) решается итерационным методом путем использования методов численного интегрирования. На работу асинхронных электродвигателей основное влияние оказывает напряжение питания U_2 , поэтому на каждой итерации необходимо определять это напряжение для прямой последовательности по выражениям (2.11) и (2.12), для обратной – (2.45) и (2.46). В эти выражения входит дифференциал потокосцепления по времени, который предварительно рассчитывается по значениям дифференциалов токов, найденных из уравнений для асинхронных электродвигателей. Затем любым методом численного интегрирования определяются приращения потокосцеплений электрических машин и изменение скорости вращения роторов электродвигателей, и расчет повторяется до окончания переходного процесса.

Описанный принцип расчета электромагнитных и электромеханических переходных процессов был реализован в программном пакете Mathcad 14 с помощью встроенных функций программирования. Дифференциальные уравнения решались методом Рунге-Кутты четвертого порядка для обеспечения высокой точности. Алгебраические уравнения решались матричным методом на каждом шаге интегрирования.

2.5.2 Оценка устойчивости при несимметрии напряжения в пределах ГОСТ 32144

На первом этапе была рассмотрена несимметрия напряжения в допускаемых пределах, т.е. уменьшение напряжения в пределах допускаемых ГОСТ 32144 [19]. Согласно стандарту допускается отклонение напряжения на 10% на шинах потребителя, поэтому были рассмотрены несимметричные режимы работы электродвигателей при различных напряжениях, затем определялся запас устойчивости ЭТС, см. таблицу 2.1.

Таблица 2.1 - Оценка коэффициента устойчивости при несимметричном режиме работы ЭТС КНС

Напряжение на вводе ЭТС КНС, о.е.			Коэффициент устойчивости
Фаза А	Фаза В	Фаза С	
1	1	1	0,6062
0,9	1	1	0,6060
0,9	0,9	1	0,6057
0,9	0,9	0,9	0,6054

Согласно результатам моделирования однофазная несимметрия в пределах установленных ГОСТ 32144 [19] уменьшает коэффициент устойчивости на 0,03%, двухфазная несимметрия – на 0,07%, трехфазное снижение напряжения – на 0,13%. Следовательно, снижение питающего напряжения ЭТС в допустимых пределах приводит к незначительному снижению коэффициента устойчивости,

этим снижением можно пренебречь, так как оно находится на уровне погрешности расчета.

2.5.3 Оценка устойчивости при однофазных провалах напряжения

На втором этапе были рассмотрены однофазные провалы напряжения. Возмущение моделировалось одноступенчатым провалом напряжения: ЭДС системы электроснабжения мгновенно уменьшалось до значения остаточного напряжения и сохранялось неизменным на протяжении всего возмущения, затем мгновенно восстанавливалось до номинального значения. Провал моделировался в одной из фаз, в двух других фазах напряжение принималось номинальным. При таком возмущении напряжение прямой последовательности в узле нагрузки изменялось незначительно, поэтому провалы небольшой глубины не приводили к нарушению устойчивости электродвигательной нагрузки. Тогда было решено моделировать однофазные обрывы в системе электроснабжения, которые сопровождаются полным исчезновением напряжения в одной из фаз.

Было произведено моделирование при различных коэффициентах загрузки асинхронных электродвигателей КНС, см. рисунок 2.8 (загрузка всех электродвигателей была принята одинаковой и изменялась совместно). Для рассматриваемой КНС были определены запасы динамической устойчивости при различных напряжениях статической устойчивости при симметричных провалах напряжения, которые регулировались с помощью коэффициента загрузки. Изменение коэффициента загрузки ведет к изменению напряжения статической устойчивости ЭТС и к изменению допустимой длительности провала напряжения по условию сохранения устойчивости [1-3, 55, 59]. Таким образом, было установлено, что уменьшение напряжения статической устойчивости при симметричных провалах напряжения на 21% приводит к увеличению запаса динамической устойчивости при исчезновении напряжения в одной из фаз в 3 раза. Также было определено граничное значение напряжения статической

устойчивости, равное 0,58 о.е., при котором устойчивость ЭТС рассматриваемой КНС не нарушалась.

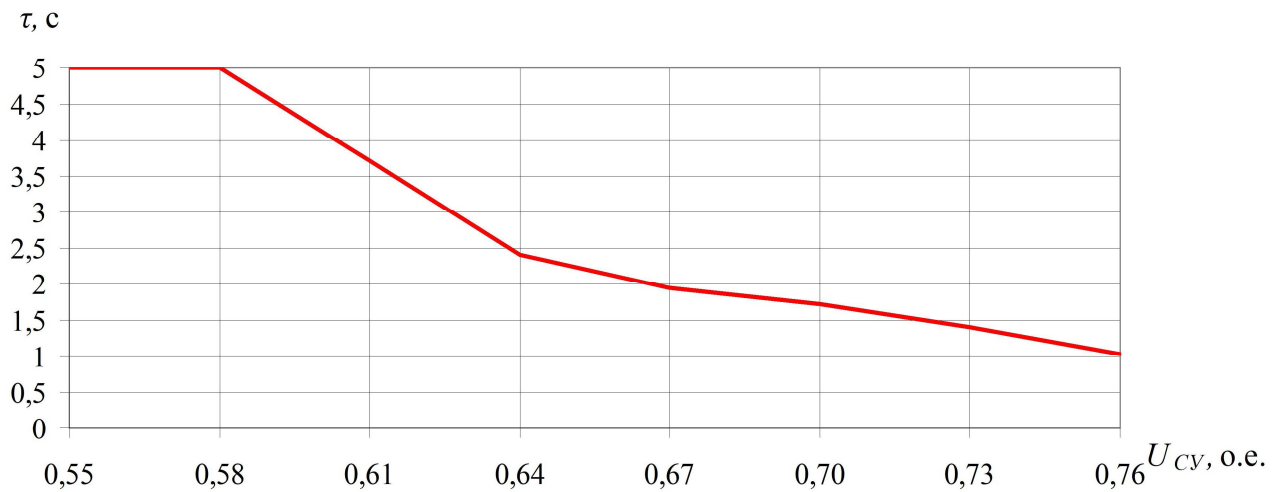


Рисунок 2.8 - Зависимость запаса динамической устойчивости от напряжения статической устойчивости при исчезновении напряжения в одной из фаз для ЭТС КНС

2.5.4 Оценка устойчивости при одноступенчатых провалах напряжения

Далее на вход ЭТС КНС подавались одноступенчатые провалы напряжения, процесс формирования которых был рассмотрен в параграфе 2.2.

Для ЭТС КНС была получена граница статической устойчивости, см. таблицу 2.2, которая показывает, что при увеличении напряжения обратной последовательности на 10% увеличивается напряжение статической устойчивости прямой последовательности в среднем на 3,5%. Данное явление связано с увеличением момента сопротивления обратной последовательности.

Таблица 2.2 - Граница статической устойчивости для рассматриваемой ЭТС КНС

Напряжение обратной последовательности, о.е.	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Напряжение статической устойчивости прямой последовательности, о.е.	0,623	0,631	0,655	0,692	0,741	0,8

По рассмотренной выше методике были построены ГДУ ЭТС КНС при различных значениях напряжения обратной последовательности, см. рисунок 2.9. Увеличение напряжения обратной последовательности на 10% приводит не только к увеличению напряжения статической устойчивости прямой последовательности в среднем на 3,5%, но и к уменьшению допустимой длительности провала напряжения в среднем на 8,6%. Данное явление снижает коэффициент устойчивости по напряжению, при симметричном провале напряжения коэффициент максимален k_m , при напряжении обратной последовательности равном 0,1 о.е. - $0,98k_m$, при 0,2 о.е. - $0,94k_m$, при 0,3 о.е. - $0,87k_m$.

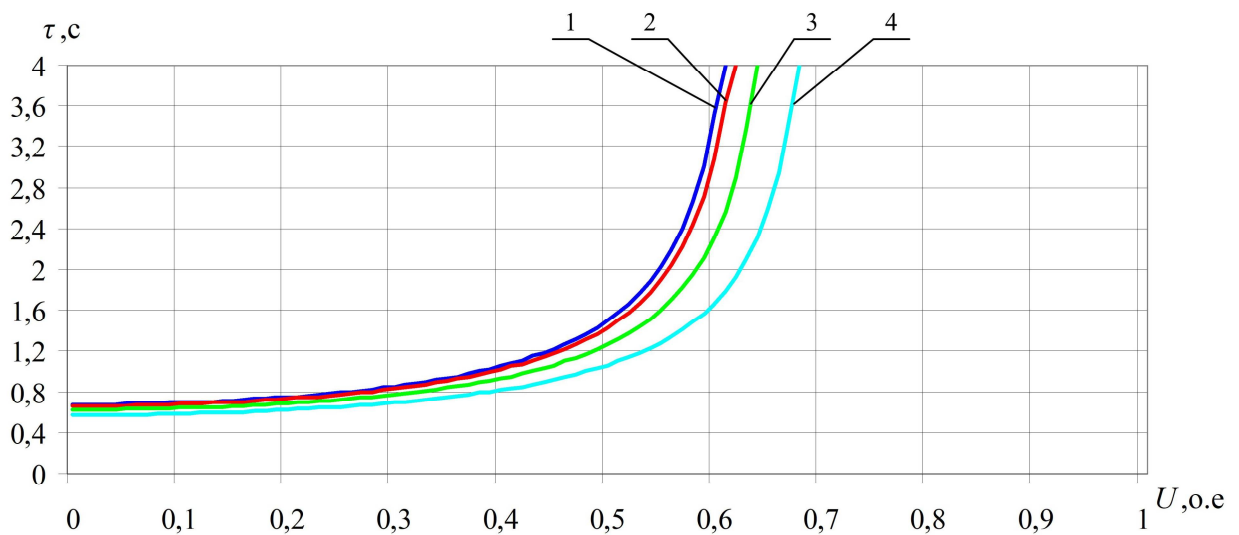


Рисунок 2.9 - ГДУ рассматриваемой ЭТС КНС: 1 - при симметричном провале напряжения, 2 - при напряжении обратной последовательности 0,1 о.е., 3 - при напряжении обратной последовательности 0,2 о.е., 4 - при напряжении обратной последовательности 0,3 о.е.

При симметричных провалах напряжения нагрузка асинхронного двигателя влияет на ГДУ: уменьшение нагрузки двигателя приводит к уменьшению напряжения статической устойчивости и увеличению допустимой длительности провала напряжения по условию сохранения динамической устойчивости [1-3, 55, 59]. Для оценки влияния нагрузки на ГДУ при несимметричных возмущающих воздействиях было проведено моделирование для ЭТС КНС при различных

значениях коэффициента загрузки и напряжении обратной последовательности $U_{06}=0,2$ о.е., см. рисунок 2.10. При моделировании загрузка всех двигателей изменялась одинаково.

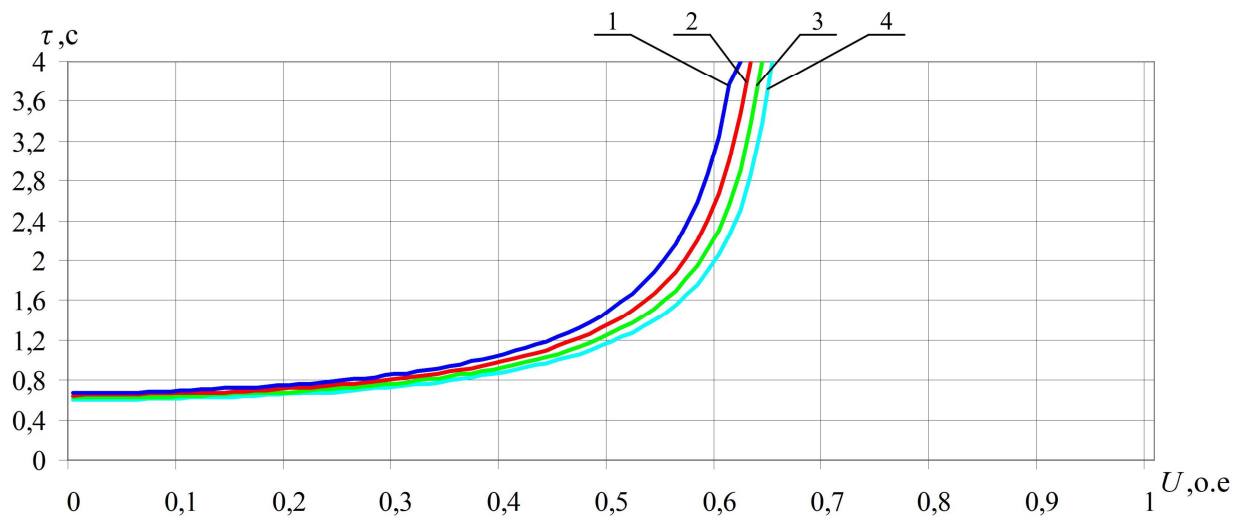


Рисунок 2.10 - ГДУ ЭТС КНС при $U_{06}=0,2$ о.е.: 1 - при загрузке 70%, 2 - при загрузке 80%, 3 - при загрузке 90%, 4 - при загрузке 100%.

Полученные ГДУ показывают, что увеличение загрузки ВАД на 10% при несимметричном провале напряжения приводит к увеличению напряжения статической устойчивости в среднем на 0,8% и к уменьшению допустимой длительности провала напряжения в среднем на 5,8%. Следовательно, загрузка ВАД влияет на расходование запасенной кинетической энергии электрического привода вне зависимости от вида возмущающего воздействия.

2.5.5 Оценка устойчивости при двухступенчатых провалах напряжения

В следующем опыте было произведено моделирование двухступенчатых провалов для рассматриваемой ЭТС КНС с различными значениями остаточного напряжения, возмущающие воздействия формировались по принципу, описанному в параграфе 2.3. На рисунке 2.11 представлены зависимости допустимой длительности второй ступени провала напряжения по условию сохранения устойчивости ЭТС от длительности его первой ступени. На рисунке

2.12 представлены зависимости допустимой длительности двухступенчатого провала напряжения от длительности его первой ступени.

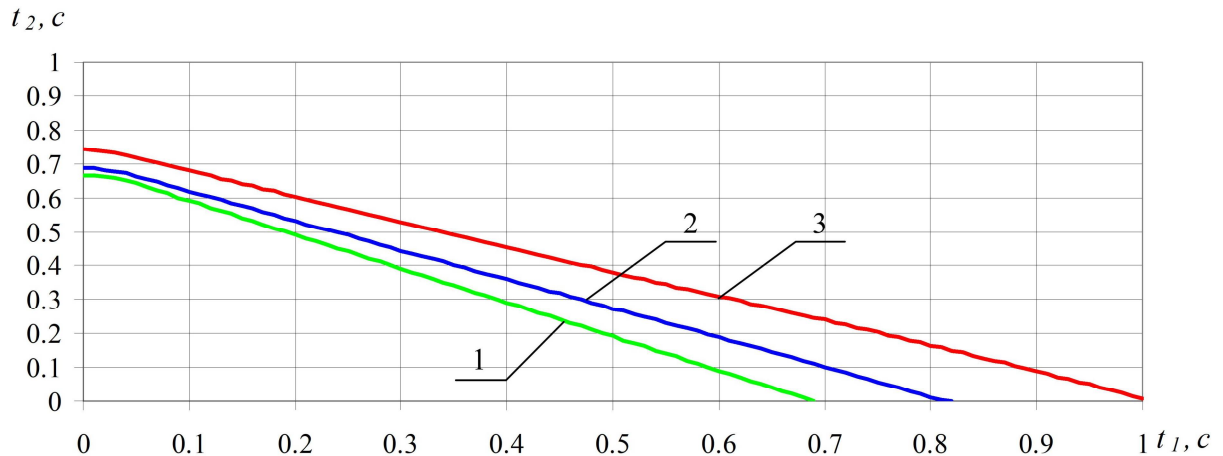


Рисунок 2.11 - Графики зависимостей допустимой длительности второй ступени провала напряжения t_2 от длительности первой ступени провала t_1 : 1 – при $U_{ост}=0$; 2 – при $U_{ост}=0,1$ о.е.; 3 – при $U_{ост}=0,2$ о.е.

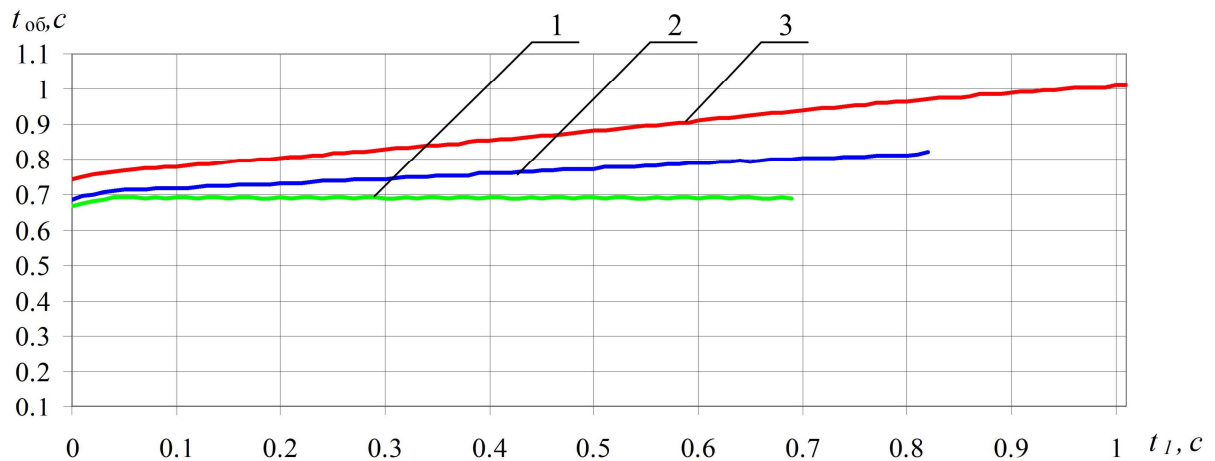


Рисунок 2.12 - Графики зависимостей допустимой длительности двухступенчатого провала напряжения $t_{об}$ от длительности первой ступени провала t_1 : 1 – при $U_{ост}=0$; 2 – при $U_{ост}=0,1$ о.е.; 3 – при $U_{ост}=0,2$ о.е.

Результаты моделирования показали, что при $U_{ост}=0,2$ о.е. увеличение длительности первой ступени провала напряжения на 10% приводит к уменьшению допустимой длительности второй ступени провала на 7,4% и к увеличению общей допустимой длительности двухступенчатого провала на 2,7%. При $U_{ост}=0,1$ о.е. увеличение первой ступени на 10% приводит к уменьшению

второй ступени на 8,4% и к увеличению общей длительности на 1,6%; при $U_{\text{ост}}=0$ – к уменьшению второй ступени на 9,7% и к увеличению общей длительности на 0,3%. Также установлено, что вид данных зависимостей близок к линейному.

Оценка устойчивости при двухступенчатых провалах напряжения требует больших вычислительных ресурсов – для каждого значения остаточного напряжения необходимо находить зависимость допустимой длительности второй ступени провала напряжения от длительности первой ступени провала. Анализ таких кривых показал, что они близки к линейным зависимостям, значит, можно получить выражение для интерполяции промежуточных значений на основании информации о допустимой длительности трехфазного симметричного провала напряжения и допустимой длительности двухфазного несимметричного провала с постоянным значением напряжения обратной последовательности.

Допустили, что скорость вращения электродвигателей изменяется линейно в течение всего процесса: выбега и самозапуска. Тогда длительность второй ступени провала напряжения примет вид:

$$t_2 = \frac{t_3 \cdot (t_1' - t_1)}{t_1'}, \quad (2.83)$$

где t_1 – длительность первой ступени провала напряжения; t_3 – допустимая длительность симметричного провала напряжения; t_1' – допустимая длительность двухфазного провала с постоянным значением напряжения обратной последовательности.

Апробация предложенного выражения (2.83) была проведена для рассматриваемой ЭТС КНС при значениях остаточного напряжения 0,2 о.е., 0,1 о.е. и 0 о.е. от номинального напряжения, полученные зависимости приведены на рисунке 2.13.

Анализ полученных значений показал, что погрешность предложенного выражения (2.83) составляет 2,5 % при остаточном напряжении 0,2 о.е., 2,7 % при остаточном напряжении 0,1 о.е. и 3,6 % при исчезновении напряжения. Таким образом, предложенное выражение (2.83) может быть использовано для

ускорения оценки устойчивости ЭТС, если не требуется большая точность, т.е. электромеханическая постоянная времени электродвигателей более 0,5 секунды.

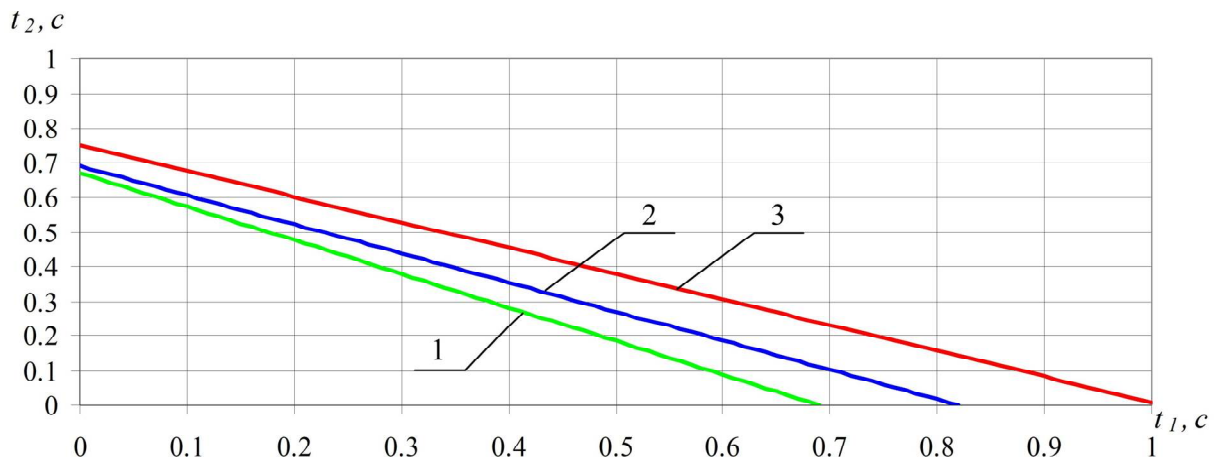


Рисунок 2.13 - Графики зависимостей допустимой длительности второй ступени провала напряжения t_2 от длительности первой ступени провала t_1 , полученные по предложенному выражению: 1 – при $U_{ост}=0$; 2 – при $U_{ост}=0,1$ о.е.; 3 – при $U_{ост}=0,2$ о.е.

2.6 Выводы по главе 2

1. Описаны принципы построения математической модели ЭТС объектов нефтяного месторождения с ВАД. Предложена методика оценки устойчивости ЭТС объектов нефтяных месторождений с ВАД при несимметричных провалах напряжения. Проведена её апробация на ЭТС КНС при одноступенчатых и двухступенчатых провалах напряжения.

3. Получена зависимость допустимой общей длительности двухступенчатого провала напряжения от длительности его первой ступени по условию сохранения устойчивости, позволяющая оценивать запас динамической устойчивости ЭТС с ВАД при переходе несимметричных провалов напряжения в симметричные.

4. Получено аналитическое выражение для определения допустимой длительности второй ступени провала напряжения от длительности его первой ступени по условию сохранения устойчивости, учитывающее запасы устойчивости ЭТС с ВАД при двухфазном и трехфазном провалах напряжения.

3 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫБОРА ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОБЪЕКТОВ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

3.1 Методика выбора технических средств для повышения устойчивости электротехнических систем объектов нефтяных месторождений

Нефтяное месторождение включает ряд взаимозависимых технологических систем, которые обеспечивают нефтедобычу, например, систему добычи, сбора, подготовки и транспорта нефти, систему поддержания пластового давления [68]. Каждая технологическая система электрифицирована и зависит от работоспособности системы электроснабжения.

Одним из наиболее частых нарушений электроснабжения являются провалы и прерывания напряжения [62], которые могут привести к потере устойчивости ЭТС и к большому недоотпуску продукции и, соответственно, к экономическим потерям предприятия. Для предотвращения нарушения устойчивости ЭТС применяют различные устройства, например, ДКИН, ИБП и другие, подробно устройства рассмотрены в параграфе 1.5. ДКИН обладает высокой скоростью срабатывания, но время его работы ограничено. ИБП лишен технических ограничений ДКИН по времени работы, но имеет большую стоимость.

При оценке устойчивости ЭТС необходимо также учитывать степень взаимозависимости источников питания и надежность срабатывания устройств восстановления питания потребителей путем автоматического присоединения резервного источника питания при отключении рабочего источника питания, таких как АВР и БАВР.

Таким образом, проблема повышения устойчивости ЭТС имеет три аспекта — технический, технологический и экономический, значит, разработка методики выбора технических средств для повышения устойчивости ЭТС объектов нефтяных месторождений является актуальной.

Для выбора наилучшего технического средства предлагается определять коэффициент экономической эффективности капитальных вложений в модернизацию ЭТС, затем сравнивать полученные значения для разных вариантов. Вначале определяется вероятное годовое число отключений потребителей, вызванных провалами и прерываниями напряжения, с учетом коэффициента зависимости источников питания.

Методика выбора состоит из следующих этапов:

1. Рассчитывается ГДУ ЭТС с учетом несимметричных провалов напряжения. Для этого составляется схема замещения в неподвижной относительно ротора электродвигателя системе координат $d-q$, состоящая из: схем замещения электродвигателей, схем замещения линий электропередачи, схем замещения трансформаторов и схемы замещения внешней системы электроснабжения. Для оценки влияния несимметричных провалов напряжения производится их разложение на симметричные составляющие, затем моделируется выбег электродвигателей под воздействием напряжения прямой и обратной последовательностей в течение длительности провала напряжения. Далее моделируется самозапуск электродвигателей при восстановлении напряжения системы до номинального значения. Если самозапуск успешный, то увеличивается длительность провала напряжения, если неуспешный, то значение длительности и глубины определяют точку на ГДУ и цикл повторяется. Подробно методика описана в параграфе 2.4.

2. Определяется распределение количества провалов и прерываний напряжения в координатах глубины и длительности на основании измерений на рассматриваемом энергетическом объекте. Если такая информация недоступна, то может быть использовано статистическое распределение провалов и прерываний напряжения для смешанных (кабельных и воздушных) сетей приведенное в ГОСТ 32144 [19].

3. Определяется вероятное количество провалов напряжения N_0 , приводящих к нарушению устойчивости ЭТС согласно статистическим данным.

Для этого может быть использован любой метод вероятностного прогнозирования по статистике нарушения электроснабжения объекта.

4. Определяется вероятное годовое количество отключений потребителей N_n , вызванных провалами и прерываниями напряжения с заданным распределением их количества в координатах глубины и длительности на основе метода [54, 123]. Полученное распределение строится в виде поверхности нормированного среднегодового количества возмущений, затем рассчитывается объем, ограниченный поверхностью нормированного количества возмущений и плоскостями времени ввода резерва и ГДУ.

5. Рассчитывается коэффициент зависимости ИП по известным методикам, рассмотренным в параграфе 1.3. На первом этапе создается математическая модель сети внешнего электроснабжения, затем во всех узлах схемы моделируются трехфазные короткие замыкания и фиксируются значения остаточных напряжений на шинах низшего напряжения, рассматриваемой ЭТС. Далее определяются узлы, короткие замыкания в которых привели к глубоким провалам напряжения (остаточное напряжение меньше напряжения статической устойчивости ЭТС) на первой секции шин, на второй секции шин и на двух секциях шин одновременно. На следующем этапе по параметрам потока отказа линий электропередачи определяется количество отказов для каждого узла электрической сети внешнего электроснабжения и рассчитывается коэффициент зависимости источников питания по выражению (1.2) [34].

6. Учитывается влияние степени взаимозависимости ИП на вероятное годовое количество отключений потребителей из-за потери устойчивости ЭТС. Коэффициент зависимости источников питания представляет собой вероятность провала напряжения на двух источниках питания одновременно, следовательно, чем меньше коэффициент зависимости ИП, тем больше вероятность срабатывания АВР и БАВР и наоборот. Также, для непрерывных производств коэффициент зависимости источников питания относительно трехфазных коротких замыканий не должен превышать 0,5 [34].

При применении на подстанции БАПР возможны ситуации, при которых все виды провалов напряжения устраняются за счет переключения на резервный ИП за доли секунды, тогда количество отключений потребителя из-за потери устойчивости, определенное по многомерному показателю устойчивости, будет равно нулю. Это условие выполнится только в случае стопроцентного срабатывания БАПР и при полной независимости источников питания, что на практике не встречается [24].

Таким образом, для определения вероятного годового количества отключений потребителей, вызванных провалами напряжения с заданным распределением их количества в координатах глубины и длительности, с учетом степени взаимозависимости источников питания на основе теории вероятности было предложено следующее выражение:

$$N = \begin{cases} N_0 K_z, & \text{если } N_n = 0 \text{ или } K_z > 0,5 \\ \frac{N_n}{1 - K_z}, & \text{если } K_z \leq 0,5 \end{cases}, \quad (3.1)$$

где N_0 – вероятное количество провалов напряжения, приводящих к нарушению устойчивости ЭТС согласно статистическим данным; N_n – количество отключений ЭТС, рассчитанное по многомерному показателю устойчивости; K_z – коэффициент зависимости источников питания.

7. Задается первое техническое средство для повышения устойчивости ЭТС, которое планируется к использованию на нефтяном месторождении.

8. Выполняются повторно пункты 1-6 методики с учетом выбранного технического средства.

9. Определяется экономический эффект от применения технического устройства для повышения устойчивости ЭТС.

Потеря устойчивости ЭТС приводит к полному или частичному простою потребителей, что приводит к недоотпуску продукции (нефти), простою основных фондов. Для устранения негативных последствий простоя применяют форсированные режимы работы технологического оборудования (включение резервных насосных агрегатов для выполнения плана по закачке воды в нефтяной

пласт, например, на КНС). Снижение времени форсировки ведет к снижению повышенного потребления электроэнергии за время форсирования режима работы насосных агрегатов [67]. Таким образом, можно принять, что экономический эффект в данном случае будет равен величине снижения ущерба при проведении мероприятий по повышению устойчивости ЭТС. В общем виде примем, что экономический эффект имеет следующие составляющие: снижение упущенной прибыли из-за недоотпуска продукции \mathcal{E}_{i1} , снижение потребления электроэнергии за счет уменьшения времени работы оборудования в форсированных режимах \mathcal{E}_{i2} и снижение условно-постоянных расходов в себестоимости нефти \mathcal{E}_{i3} :

$$\mathcal{E}_i = \mathcal{E}_{i1} + \mathcal{E}_{i2} + \mathcal{E}_{i3} \quad (3.2)$$

Снижение упущенной прибыли из-за недоотпуска продукции определяется разностью ущербов от остановки технологии при базовом и предлагаемом вариантах электроснабжения (с средствами для повышения устойчивости). При строительстве новых объектов за базовый вариант принимаются типовые схемы подстанций, типовое оборудование. При модернизации объектов базовым вариантом выступает существующая система электроснабжения. Тогда первая составляющая экономического эффекта равна:

$$\mathcal{E}_{i1} = Y_{i6} - Y_{ii}, \quad (3.3)$$

где Y_{i6} – ущерб от остановки производства при базовом варианте электроснабжения; Y_{ii} – ущерб от остановки производства при предлагаемом варианте электроснабжения с устройствами по повышению устойчивости.

Тогда ущерб, обусловленный потерей прибыли нефтедобывающего предприятия за год, равен:

$$V_i = Q(C - C_n), \quad (3.4)$$

где Q – потери продукции за год, м^3 ; C – оптовая цена нефти, $\text{руб}/\text{м}^3$; C_n – себестоимость нефти, $\text{руб}/\text{м}^3$

Расчет экономических ущербов основан на технологическом подходе оценки последствий, связанных с остановом нефтепромыслового оборудования.

Годовые потери продукции, вызванные потерей устойчивости ЭТС, определяются [45]:

- для насосных скважин:

$$Q = t_n \sum_{i=1}^n q_i, \quad (3.5)$$

где t_n – время простоя за год по причине потери устойчивости, ч; q_i – дебит отдельных скважин по нефти, м³/ч; n – количество эксплуатационных скважин.

- для КНС, водозабора:

$$Q = \frac{Q_{\Sigma} t_n (1 - b_{cp})}{K_{zc} K}, \quad (3.6)$$

где b_{cp} – средняя обводненность продукции по способам эксплуатации; K_{zc} – коэффициент учета замороженных скважин; K – отношение объема закачиваемой воды к объему добываемой жидкости.

Экономический эффект, обусловленный снижением потребления электроэнергии за счет уменьшения времени работы оборудования в форсированных режимах, определяется разницей затрат на электрическую энергию при базовом и предлагаемом вариантах электроснабжения:

$$\mathcal{E}_{t2} = \mathcal{Z}_{16} - \mathcal{Z}_{li}, \quad (3.7)$$

где \mathcal{Z}_{16} – затраты на электроэнергию в форсированных режимах работы оборудования при базовом варианте электроснабжения; \mathcal{Z}_{li} – затраты на электроэнергию в форсированных режимах работы оборудования при предлагаемом варианте электроснабжения с повышением устойчивости ЭТС.

Расчет потребления электроэнергии, например для КНС, основан на определении продолжительности работы насосного блока в форсированном режиме по следующей методике [45]:

1. Время простоя за год:

$$t_n = T_{np} N, \quad (3.8)$$

где N – вероятное количество отключений КНС; T_{np} – время простоя при отключении КНС.

2. Потери продукции при закачке, перекачке:

$$Q_{prod} = Q_{\Sigma} t_n, \quad (3.9)$$

где Q – суммарная производительность насосного блока в нормальном режиме.

3. Производительность насосного блока при включении резервных насосов в послеаварийном режиме:

$$Q_{n.a.} = Q_n (n_{осн} + K_u n_{рез}) K_{пр}, \quad (3.10)$$

где Q_n – производительность насоса в нормальном режиме; $n_{осн}$ – число рабочих насосов; $n_{рез}$ – число резервных насосов; K_u – коэффициент использования резервных насосов; $K_{пр}$ – коэффициент, учитывающий снижение производительности насоса при включении дополнительных агрегатов.

4. Продолжительность работы насосного блока для ликвидации последствий отключения КНС:

$$t_{n.a.} = \frac{Q_{prod}}{Q_{n.a} - Q_{\Sigma}}, \quad (3.11)$$

5. Дополнительные энергозатраты:

$$W = K_u n_{рез} P_n K_z t_{n.a.}, \quad (3.12)$$

где P_n – номинальная мощность электродвигателей насосов; K_z – коэффициент загрузки электродвигателей насосов.

Далее определяются экономические затраты на электроэнергию, например, для двухставочного тарифа:

$$Z_1 = W \left(\frac{\alpha}{T_m} + \beta \right), \quad (3.13)$$

где α – тариф за максимум заявленной мощности, руб./кВт; β – тариф за потребленную электроэнергию, руб./кВт·час; T_m – число часов использования максимума нагрузки, час/год.

Экономический эффект от снижения условно-постоянных расходов в себестоимости нефти будет намного меньше, чем эффект от снижения упущенной прибыли и эффект от снижения потребления электроэнергии в форсированных режимах работы. Уменьшение времени простоя оборудования из-за потери устойчивости ЭТС позволит уменьшить условно-постоянные расходы, но они в большей степени обусловлены следующими факторами: амортизация скважин и

прочих основных средств, цеховые и общепромысловые расходы, заработная плата, расходы на освоение и подготовку новых скважин [84]. Таким образом, при оценке экономического эффекта от повышения устойчивости ЭТС объектов нефтяных месторождений не учитывалось снижение условно-постоянных расходов в себестоимости нефти из-за его малого влияния на общий экономический эффект.

10. Определяются капитальные затраты на средства для повышения устойчивости ЭТС по выражению:

$$З = З_i - З_6, \quad (3.14)$$

где $З_6$ – капитальные вложения при базовом варианте электроснабжения; $З_i$ – капитальные вложения при предлагаемом варианте электроснабжения с повышением устойчивости ЭТС.

11. Для оценки эффективности мероприятий по повышению устойчивости ЭТС рассчитывается коэффициент экономической эффективности капитальных вложений [71]:

$$K_э = \frac{\mathcal{E}_t}{З}, \quad (3.15)$$

где $З$ – капитальные вложения в мероприятия по повышению устойчивости; \mathcal{E}_t – экономический эффект от повышения устойчивости, достигаемый в течение 1 года.

Мероприятия по повышению устойчивости представляют собой инвестиционный проект, одним из основных критериев которого является дисконтированный срок окупаемости. Это период возврата денежных средств с учетом временной стоимости денег (ставки дисконта) [84]. В электроэнергетике дисконтированный срок окупаемости для эффективных проектов составляет 5-8 лет [43]. При повышении устойчивости ЭТС экономический эффект достигается за счет сокращения времени простоя оборудования из-за аварийных отключений, возникающих при потере устойчивости [115, 117]. Таким образом, выражение для определения экономического эффекта повышения устойчивости ЭТС с учетом дисконтирования имеет вид:

$$\mathcal{E} = \sum_{t=1}^T (\mathcal{E}_t - Z_t) \frac{1}{(1+E)^t}, \quad (3.16)$$

где \mathcal{E}_t – экономический эффект в t -м году; Z_t – затраты, осуществляемые в t -м году; T – количество лет; E – ставка дисконта.

Для объектов электроэнергетики затраты в первом расчетном году состоят из капитальных и эксплуатационных затрат, в последующие годы остаются только эксплуатационные затраты, которые включают расходы на ремонт и обслуживание оборудования, а также амортизационные отчисления. Согласно [43] ежегодные издержки на ремонты и обслуживание элементов электрической сети напряжением 6-35 кВ составляют 4% капитальных затрат, амортизационные отчисления для электрических сетей напряжением 6-35 кВ в среднем составляют 6%. С учетом вышесказанного упростили выражение (3.16):

$$\mathcal{E} = -Z + \sum_{t=1}^T (\mathcal{E}_t - 0,1 \cdot Z) \frac{1}{(1+E)^t} \quad (3.17)$$

Подставили (3.15) в (3.17) и упростили, получили выражение для экономического эффекта повышения устойчивости, включающее только капитальные вложения и коэффициент их экономической эффективности:

$$\mathcal{E} = -Z + Z \sum_{t=1}^T (K_s - 0,1) \frac{1}{(1+E)^t} \quad (3.18)$$

Для определения граничных значений коэффициента экономической эффективности капитальных вложений в мероприятия по повышению устойчивости ЭТС ставка дисконта была принята равной 0,1, дисконтированный срок окупаемости 5 лет:

$$\begin{cases} \mathcal{E} = -Z + Z \sum_{t=1}^5 (K_s - 0,1) \frac{1}{1,1^t} \\ \mathcal{E} > 0 \end{cases} \quad (3.19)$$

$$-Z + Z(K_s - 0,1) \cdot 3,79 > 0 \quad (3.20)$$

После математических преобразований получено следующее неравенство:

$$K_s > 0,364 \quad (3.21)$$

Следовательно, при значении коэффициента экономической эффективности капитальных вложений больше 0,364 мероприятия по повышению устойчивости ЭТС окупятся за срок не более 5 лет при ставке дисконта 0,1, следовательно, их можно рекомендовать к внедрению.

12. Если необходимо сравнить несколько технических средств для повышения устойчивости ЭТС, то задается следующее из них и выполняются пункты методики, начиная с 8. Если расчеты выполнены для всех предлагаемых устройств, то производится сравнение коэффициентов экономической эффективности капитальных вложений. Наилучшим вариантом будет устройство с максимальным значением коэффициента.

Таким образом, предложена методика выбора технических средств для повышения устойчивости ЭТС объектов нефтяных месторождений, учитывающая как ГДУ, коэффициент экономической эффективности капитальных вложений, так и коэффициент зависимости источников питания.

3.2 Разработка коэффициента запаса устойчивости по напряжению

Большинство объектов нефтяных месторождений Западной Сибири относятся к первой категории по надежности электроснабжения согласно ВНТП 3-85 [72]. Оценка запаса устойчивости особенно актуальна для таких потребителей, потому что перерыв электропитания допускается только на время действия автоматики [76]. Для оценки запаса устойчивости нормативные документы предлагают коэффициент запаса статической устойчивости по напряжению в узле нагрузки, который определяется по выражению [92]:

$$K_U = \frac{U - U_{кр}}{U_{кр}}, \quad (3.22)$$

где U - напряжение в узле нагрузки в рассматриваемом режиме, кВ; $U_{кр}$ - критическое напряжение в узле нагрузки, кВ.

Согласно «Методическим указаниям по устойчивости» [92] критическое напряжение в узле нагрузки соответствует границе статической устойчивости

электродвигателей. Из этого следует основной недостаток коэффициента (3.22) - невозможность учитывать динамическую устойчивость электродвигательной нагрузки.

В работах Егорова А.В. и Репиной Ю.В. [28, 80] предложен коэффициент устойчивости для количественной оценки запаса устойчивости ЭТС - выражение (2.8). Он представляет собой отношение площадей устойчивой работы $S_{уст}$, ограниченной ГДУ и единицей по оси напряжения, к общей площади фигуры $S_{общ}$, ограниченной по оси абсцисс относительной единицей, по оси ординат предельным временем, см. рисунок 3.1, которое приравнивается к времени срабатывания резервных релейных защит системы внешнего электроснабжения.

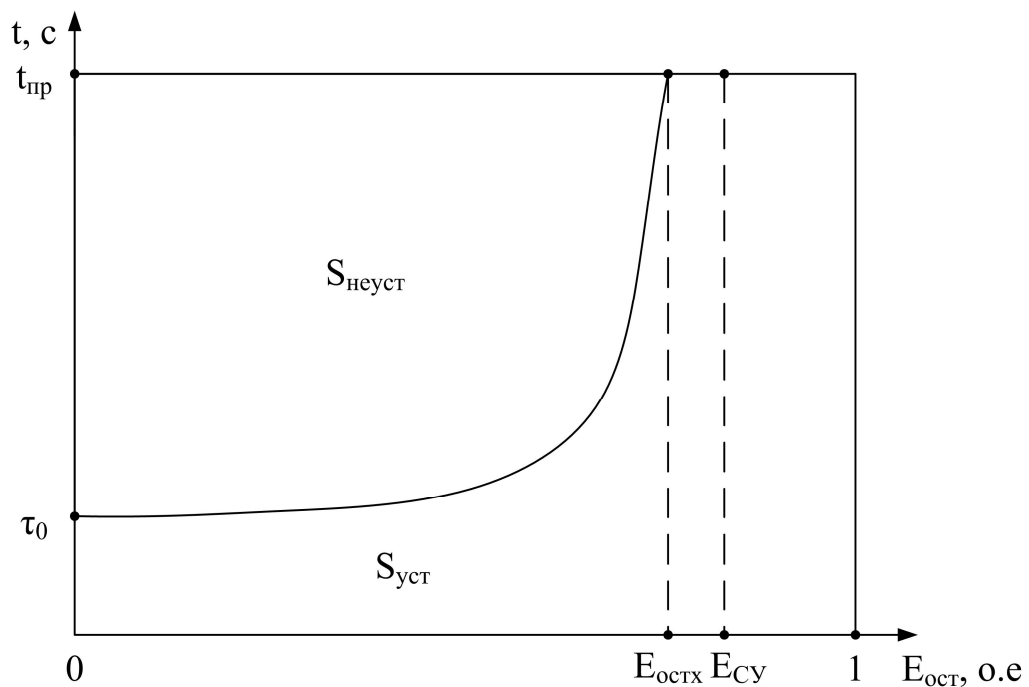


Рисунок 3.1 - Области устойчивой и неустойчивой работы ЭТС

Основным недостатком этого коэффициента является наличие области по оси абсцисс между напряжением статической устойчивости $E_{су}$ и остаточным напряжением $E_{остх}$ при пересечении ГДУ и предельного времени. При длительности провала напряжения, соответствующей этой области, сохранение устойчивости должно обеспечиваться действием релейных защит системы внешнего электроснабжения или автоматики, при этом не учитывается вероятность их срабатывания.

Источники питания всех потребителей первой категории по надежности электроснабжения оборудованы устройствами автоматического переключения на резервный источник питания при выходе из строя основного источника питания. Сейчас для этих целей применяют АВР и БАВР. Основное отличие этих устройств заключается в быстродействии: уставка по времени АВР составляет 1-10 с, уставка по времени у БАВР отсутствует, время его срабатывания составляет 0,05-0,2 с и зависит от быстродействия коммутационного оборудования [95,96]. БАВР обеспечивает минимальный перерыв в питании потребителей при аварийных отключениях. При этом невозможно оценить устойчивость ЭТС при использовании БАВР по выражению (2.8), так как предельное время становится меньше допустимого значения длительности провала напряжения и коэффициент устойчивости всегда равен 1.

Электроснабжение потребителей первой категории по надежности осуществляется от двух независимых ИП, при этом степень независимости никак не регламентируется. Для характеристики степени взаимозависимости ИП известен коэффициент зависимости [24, 34], который показывает вероятность возникновения одновременных критических провалов напряжения на двух ИП одновременно. Согласно работе [34] этот коэффициент принимает значения в пределах 0.2...0.5 для газоперерабатывающих заводов. Следовательно, коэффициент зависимости ИП оказывает существенное влияние на вероятность срабатывания устройств АВР и БАВР.

Таким образом, разработка коэффициента запаса устойчивости по напряжению для ЭТС объектов нефтяных месторождений с ВАД, учитывающего напряжение статической устойчивости, запас динамической устойчивости при прерывании напряжения и коэффициент зависимости ИП, является актуальной задачей.

Разработка коэффициента запаса устойчивости по напряжению была основана на методе площадей, применяемом для оценки устойчивости [42]. Основные результаты представлены в работе [122].

Во-первых, были рассмотрены ограничения по оси времени. Для ЭТС было принято предельное время равным времени срабатывания автоматического ввода резерва.

Во-вторых, ось абсцисс была разбита на три отрезка: первый - от 1 до E_{CY} , второй - от E_{CY} до E_{OCTX} и третий - от E_{OCTX} до 0, соответственно, получим разбиение области устойчивой работы на три части, см. рисунок 3.2: первая S_{CY} - площадь статической устойчивости, вторая S_x - искомая площадь, третья $S_{ГДУ}$ - площадь под ГДУ.

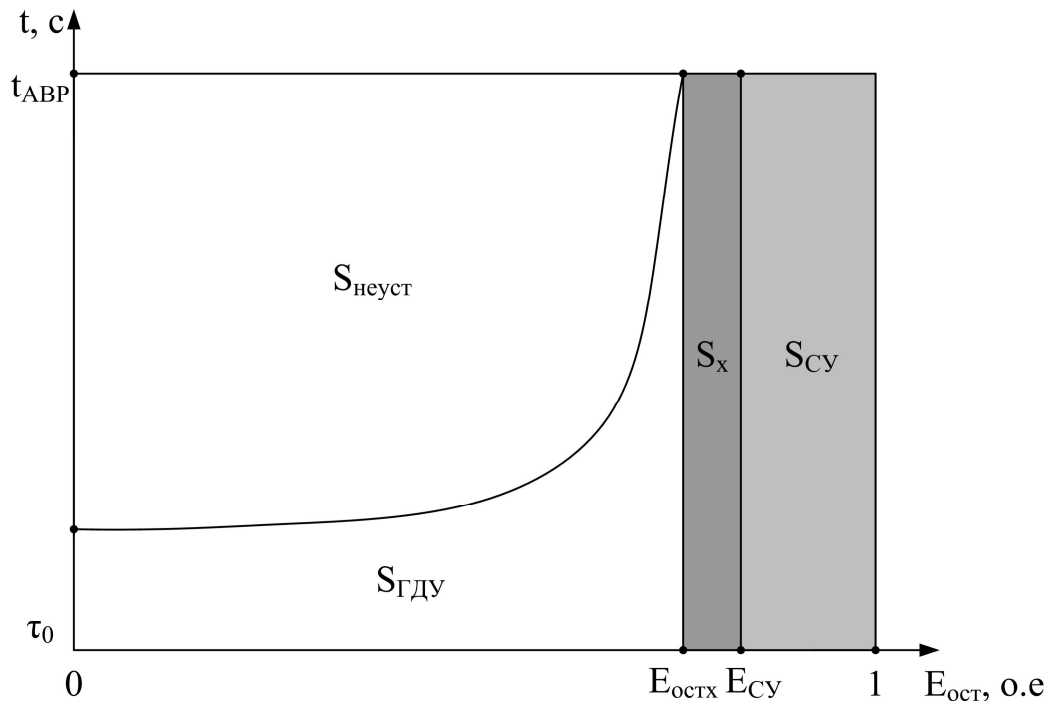


Рисунок 3.2 - Области устойчивой и неустойчивой работы ЭТС

Далее было рассмотрено поведение ЭТС при возникновении провалов напряжения, соответствующих каждому выбранному отрезку времени.

Провал напряжения на первом отрезке $E_{CY}1$: длительность провала не влияет на устойчивость ЭТС, так как его глубина меньше напряжения статической устойчивости, тогда вероятность сохранения устойчивости ЭТС на этом отрезке равна:

$$P_{CY} = \frac{S_{CY}}{S_{общ}}. \quad (3.23)$$

Провал напряжения на втором отрезке $E_{\text{остх}}E_{\text{СУ}}$: при увеличении длительности не приводит к нарушению устойчивости, если сработал АВР с уставкой $t_{\text{АВР}}$, значит на этом отрезке устойчивость ЭТС обеспечивается только действием автоматики. Успешное срабатывание АВР напрямую связано со степенью взаимозависимости ИП. Таким образом, за вероятность срабатывания АВР была принята величина:

$$P_{\text{АВР}} = 1 - K_3, \quad (3.24)$$

где K_3 - коэффициент зависимости ИП.

Следовательно, для обеспечения устойчивости ЭТС на втором отрезке $E_{\text{остх}}E_{\text{СУ}}$ необходимо, чтобы глубина провала входила в этот отрезок и АВР сработал успешно, тогда вероятность, соответствующая этим двум условиям:

$$P_x = \frac{S_x}{S_{\text{общ}}} \cdot (1 - K_3). \quad (3.25)$$

Провал напряжения на третьем отрезке $0E_{\text{остх}}$: не приводит к нарушению устойчивости ЭТС пока длительность провала лежит ниже ГДУ, если длительность выше ГДУ - устойчивость нарушается, тогда вероятность сохранения устойчивости ЭТС на этом отрезке равна:

$$P_{\text{ГДУ}} = \frac{S_{\text{ГДУ}}}{S_{\text{общ}}}. \quad (3.26)$$

Таким образом, вероятность устойчивой работы ЭТС с учетом влияния степени взаимозависимости ИП равна сумме вероятностей, так как любое из событий позволит сохранить устойчивость:

$$P_{\text{уст}} = P_{\text{СУ}} + P_{\text{ГДУ}} + P_x. \quad (3.27)$$

Подставили в выражение (3.27) найденные ранее выражения (3.23), (3.25) и (3.26) и упростили:

$$P_{\text{уст}} = \frac{S_{\text{СУ}} + S_{\text{уст}} + S_x \cdot (1 - K_3)}{S_{\text{общ}}}. \quad (3.28)$$

Тогда коэффициент запаса устойчивости по напряжению для ЭТС объектов нефтяных месторождений с ВАД, учитывающий показатели устойчивости ЭТС и коэффициент зависимости источников питания, равен:

$$K_{\text{зв}} = P_{\text{уст}} = \frac{S_{\text{св}} + S_{\text{уст}} + S_{\text{х}} \cdot (1 - K_{\text{з}})}{S_{\text{общ}}} \quad (3.29)$$

Для определения связи между разработанным коэффициентом и известным коэффициентом устойчивости подставили в выражение (3.29) выражение (2.8) и упростили:

$$K_{\text{зв}} = K_{\text{у}} - \frac{S_{\text{х}}}{S_{\text{общ}}} \cdot K_{\text{з}} \quad (3.30)$$

При абсолютно независимых источниках питания (возможно только в теории) коэффициент зависимости ИП равен нулю и выражение (3.30) преобразуется в коэффициент устойчивости выражение (2.8), что говорит о корректности используемых методов при разработке коэффициента запаса устойчивости.

Для апробации разработанного коэффициента были использованы ГДУ ЭТС кустовой насосной станции, рассмотренной в параграфе 2.2 и ГДУ куста скважин с погружными асинхронными электродвигателями ПЭД-90 117М, рассмотренными в работе [120], см. рисунок 3.3.

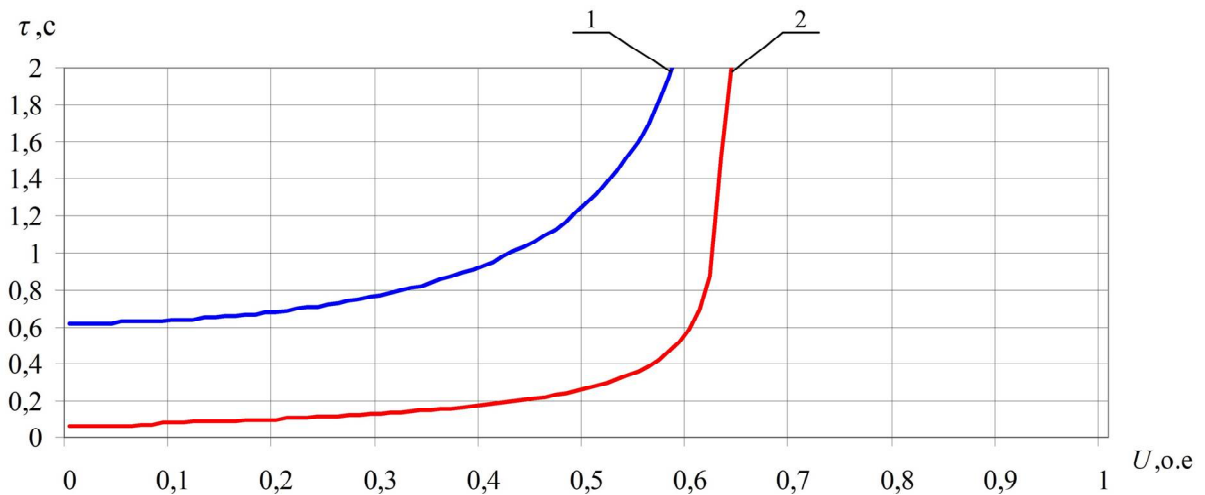


Рисунок 3.3 - ГДУ ЭТС: 1 - КНС, 2 – куста скважин

Для рассматриваемых ЭТС была принята уставка АВР равная 2 секундам, коэффициент зависимости ИП принят 0,2 и рассчитаны коэффициент устойчивости и предложенный коэффициент запаса устойчивости. Известный коэффициент устойчивости для ЭТС КНС равен 0,675, для куста скважин – 0,438.

Разработанный коэффициент запаса устойчивости по напряжению для КНС равен 0,663, для куста скважин – 0,43.

Далее был рассчитан разработанный коэффициент запаса устойчивости при различных значениях коэффициента зависимости ИП, при этом уставка АВР не изменялась и была равна 2 секунды. В результате моделирования были получены зависимости коэффициента запаса устойчивости от коэффициента зависимости ИП, см. рисунок 3.4.

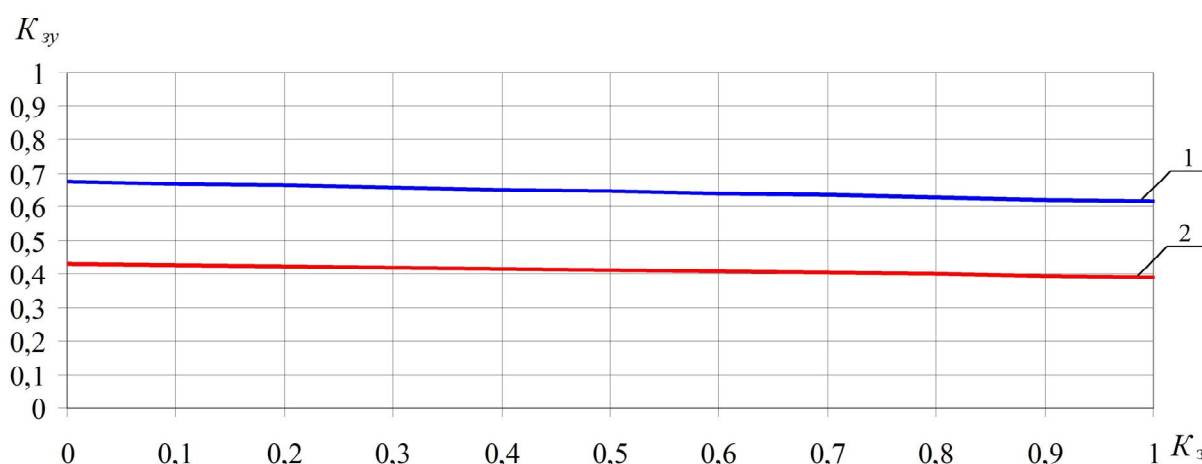


Рисунок 3.4 - Графики зависимости коэффициента запаса устойчивости по напряжению от коэффициента зависимости ИП для ЭТС: 1 - КНС, 2 – куста скважин

Затем было выполнено моделирование изменения уставки АВР в диапазоне от 2 секунд до 0,2 секунды при неизменном коэффициенте зависимости ИП равном 0,2. В результате были получены зависимости коэффициента запаса устойчивости от уставки АВР, см. рисунок 3.5.

Согласно расчетам разработанный коэффициент меньше известного в среднем на 1,8%, значит, предложенный коэффициент запаса устойчивости позволяет повысить точность определения вероятности устойчивой работы ЭТС в среднем на 1,8%.

Моделирование показало, что увеличение коэффициента зависимости ИП на 10% приводит к снижению коэффициента запаса устойчивости ЭТС КНС в среднем на 0,6%, коэффициента запаса устойчивости ЭТС куста скважин в

среднем на 0.4%. Эти зависимости напрямую связаны с шириной области S_x между перпендикуляром, опущенным из точки пересечения ГДУ и уставки АВР, и напряжением статической устойчивости: для ЭТС КНС эта ширина равна 0.06 о.е., для ЭТС куста скважин – 0.04 о.е.

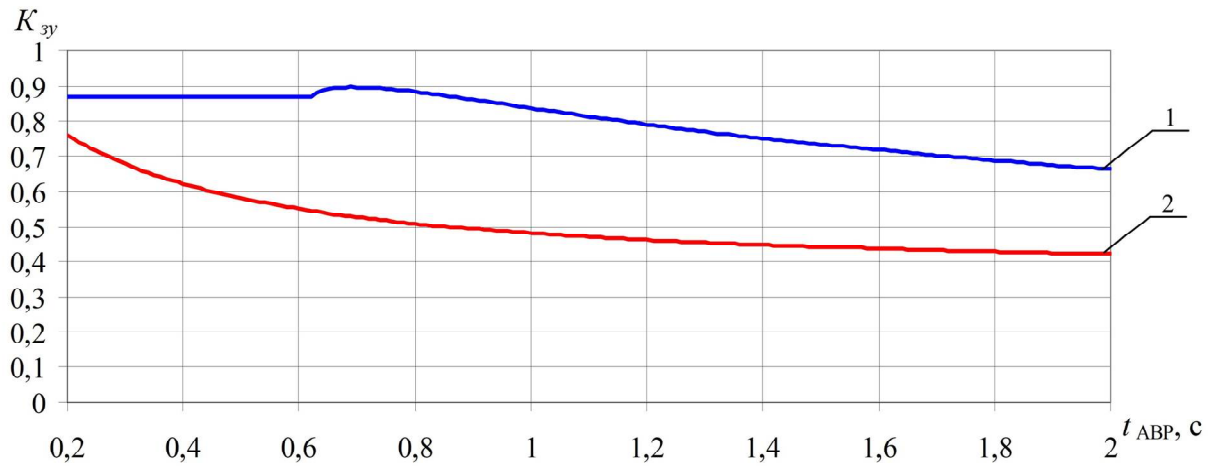


Рисунок 3.5 - Графики зависимости коэффициента запаса устойчивости от уставки АВР для ЭТС: 1 - КНС, 2 – куста скважин

Установлено, что зависимость для ЭТС КНС, см. рисунок 3.5, имеет два участка со своими особенностями: первый участок - при уставке АВР от запаса динамической устойчивости при прерывании напряжения до 2 секунд имеет максимум, второй участок - при уставках по времени АВР меньших запаса динамической устойчивости характеризуется постоянным значением коэффициента запаса устойчивости. Для ЭТС КНС на первом участке имеется максимум коэффициента запаса устойчивости равный 0.898 при уставке АВР 0.69 секунды. Коэффициент запаса устойчивости на втором участке зависит только от вероятности срабатывания АВР, которая в большей степени зависит от коэффициента зависимости ИП.

Таким образом, для количественной оценки устойчивости ЭТС объектов нефтяных месторождений с ВАД предложен коэффициент, который позволяет учитывать напряжение статической устойчивости, запас динамической устойчивости при прерывании напряжения и коэффициент зависимости источников питания.

3.3 Выводы по главе 3

1. Разработана методика обоснованного выбора технических средств для повышения устойчивости ЭТС объектов нефтяных месторождений с ВАД, отличающаяся тем, что учитывает как границу динамической устойчивости, коэффициент экономической эффективности капитальных вложений, так и коэффициент зависимости источников питания.

2. Предложен коэффициент запаса устойчивости по напряжению для ЭТС объектов нефтяных месторождений с ВАД, отличающийся тем, что учитывает напряжение статической устойчивости, запас динамической устойчивости при прерывании напряжения и коэффициент зависимости источников питания.

4 РАЗРАБОТКА И ВЫБОР ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОБЪЕКТОВ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

4.1 Разработка технического средства для повышения устойчивости на основе искусственной нейронной сети

Для поддержания максимальной добычи нефтяные скважины переводят на механизированный способ эксплуатации, что предполагает применение установок электроцентробежных насосов (УЭЦН). Погружной асинхронный электродвигатель, входящий в состав УЭЦН, имеет ряд конструктивных особенностей, что обуславливает его низкую устойчивость к КНЭ из-за малого значения электромеханической постоянной времени и, следовательно, быстрого протекания переходных процессов [1-3]. При этом нагрузка и частота вращения вала электродвигателя могут изменяться в процессе эксплуатации по требованиям технологического процесса добычи нефти, также вышеуказанные параметры оказывают существенное влияние на время выбега ПЭД [1, 56]. Увеличение нагрузки ПЭД приводит к большему расходу накопленной кинетической энергии, следовательно, и к меньшей допустимой длительности провала напряжения. Установлено [1, 56], что даже провал напряжения длительностью 0,15 секунды способен привести к нарушению устойчивой работы УЭЦН.

Сейчас для снижения влияния КНЭ применяют защиту минимального напряжения (ЗМН) [76]. Она контролирует величину питающего напряжения и отключает защищаемый электродвигатель при снижении напряжения до критического значения, при этом ЗМН должна селективно и с высокой надежностью срабатывать при возникновении провалов питающего напряжения [76]. Наиболее распространены следующие виды характеристик срабатывания (ХС) ЗМН: одноступенчатая [76], трехступенчатая [39], зависимая [44].

Одноступенчатая ЗМН, как правило, имеет выдержку времени, не превышающую 10 с, и уставку по напряжению не выше 70 % от номинального

значения [76]. Она предназначена для отключения электродвигателя при длительном исчезновении напряжения по условиям технологического процесса. Из-за малого значения электрохимической постоянной времени ПЭД такую защиту необходимо отстраивать по результатам расчета динамической устойчивости.

Для более полного использования запаса динамической устойчивости электродвигателей по напряжению в работе [39] была предложена трехступенчатая защита. Уставка третьей ступени принимается равной 95...98 % от напряжения статической устойчивости, а выдержка времени первой ступени отстраивается от времени динамической устойчивости при прерывании напряжения. Остальные уставки выбираются по выражениям:

$$u_{3MH_i} = u_{cy} - \sqrt[n]{u_{cy}^{n-i-1} \cdot (u_{cy} - u_{3MH_{(i+1)}})^i}, \quad (4.1)$$

$$t_{3MH_i} = \tau_0 \frac{1 - u_{3MH_i}}{1 - \frac{u_{3MH_i}}{u_{cy}}}, \quad (4.2)$$

где u_{3MH_i} – уставка срабатывания i -й ступени защиты; t_{3MH_i} – выдержка времени i -й ступени защиты; u_{cy} – напряжение статической устойчивости электродвигателя; τ_0 – время динамической устойчивости электродвигателя при прерывании напряжения до нуля; n – число ступеней защиты.

Современные терминалы микропроцессорных релейных защит электродвигателей позволяют использовать ЗМН с зависимой характеристикой срабатывания [44]. Такая характеристика повышает степень использования запаса устойчивости электродвигателей, но не позволяет использовать его полностью. Эта ХС представляет собой зависимость выдержки времени t от значения остаточного напряжения U_o на шинах двигателя:

$$t(U_o) = \frac{T}{1 - \frac{U_o}{U_s}}, \quad (4.3)$$

где U_s – уставка срабатывания защиты по напряжению; T – коэффициент кратности времени.

Для оценки влияния вида характеристики срабатывания ЗМН была использована ЭТС куста скважин, см. рисунок 4.1. Электроснабжение куста скважин реализовано по схеме двойного преобразования: на подстанции производится преобразование напряжения с 10 кВ до 0,4 кВ, затем с помощью кабеля напряжение 0,4 кВ подводится на скважины, где осуществляется преобразование на рабочее напряжение погружных электродвигателей. Для расчетов использовались три одинаковые скважины, оснащенные погружным асинхронным электродвигателем мощностью 90 кВт с номинальным напряжением 1800 В – ПЭД-90 117М, подключенного с помощью кабеля КПБП сечением 25 мм² длиной 1200 м и трансформатора ТМПН мощностью 160 кВА. Питание куста скважин осуществляется от трансформатора серии ТМ мощностью 400 кВА. ГДУ ЭТС и рассмотренные характеристики срабатывания ЗМН представлены на рисунке 4.2.

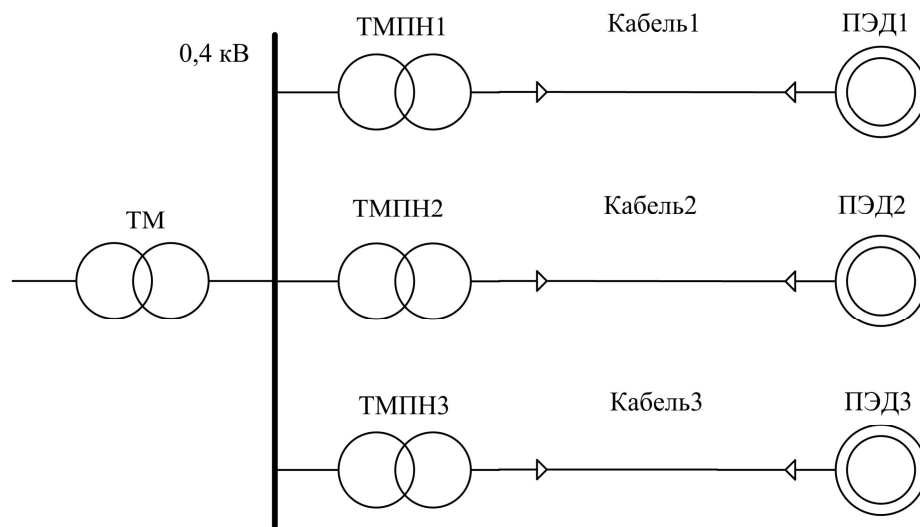


Рисунок 4.1 – Упрощенная однолинейная схема электроснабжения куста скважин

Анализ ХС показал следующие недостатки типовых защит:

1. Наличие жестко заданной ХС, которая не зависит от режима работы электродвигателей, что не позволяет учитывать загрузку и частоту вращения вала электродвигателя.
2. Наличие зоны нечувствительности между ХС и ГДУ, что приводит к необоснованным отключениям потребителей, и, следовательно, к экономическим потерям (упущенной прибыли) промышленного предприятия.

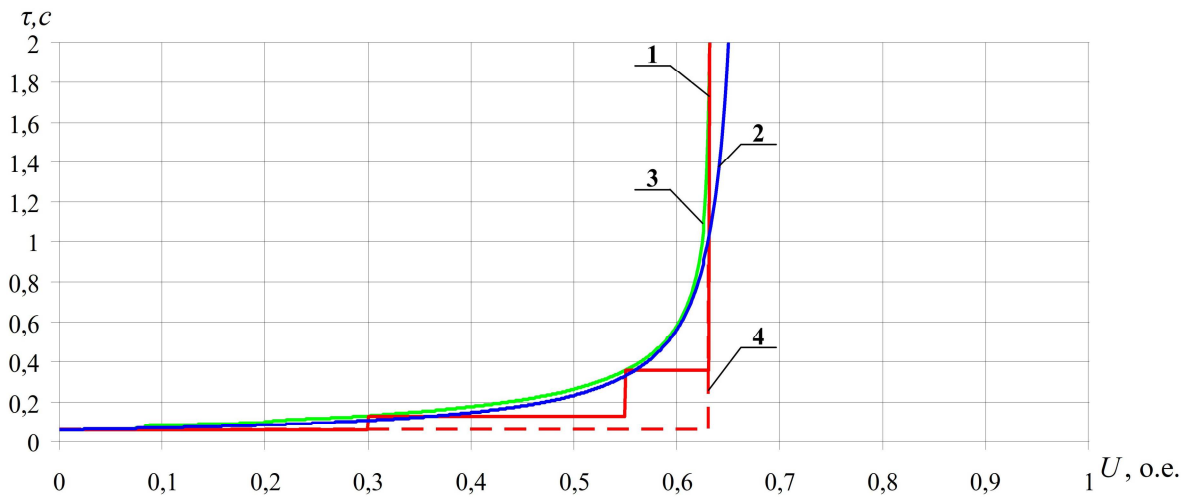


Рисунок 4.2 – Зависимости допустимой длительности провала напряжения от остаточного напряжения на шинах для ЭТС куста скважин: 1 – граница срабатывания трехступенчатой ЗМН, 2 – граница срабатывания ЗМН с зависимой выдержкой времени, 3 – ГДУ, 4 – граница срабатывания одноступенчатой ЗМН

Затем оценили влияние вида характеристики срабатывания ЗМН на коэффициент запаса устойчивости по напряжению для рассматриваемой ЭТС куста скважин. При использовании ЗМН с ХС, максимально приближенной к ГДУ (кривая 3, рисунок 4.2), коэффициент запаса устойчивости по напряжению максимальный k_m . Если ХС одноступенчатая (кривая 4, рисунок 4.2), то коэффициент запаса составляет $0,88k_m$, трехступенчатая (кривая 1, рисунок 4.2) – $0,94k_m$, зависимая (кривая 2, рисунок 4.2) – $0,97k_m$. Таким образом, приближение ХС к ГДУ позволит повысить запас устойчивости по напряжению на 3...12 %.

Также коэффициенты запаса устойчивости по напряжению ЭТС в различных режимах работы значительно отличаются друг от друга, в связи с изменением ГДУ, см. рисунок 2.10. Уменьшение загрузки приводит к увеличению области устойчивой работы электродвигателя, что ведет к увеличению области необоснованных срабатываний ЗМН.

Таким образом, применяемые в нефтепромысловых электрических сетях ЗМН не могут обеспечить наиболее полное использование запаса устойчивости по напряжению. Для устранения недостатков типовых ЗМН необходимо разработать

защиту, которая позволяет изменять ХС в режиме реального времени с учетом текущих параметров работы ПЭД. Этим требованиям отвечают методы искусственного интеллекта, наиболее перспективным из которых является искусственная нейронная сеть (ИНС) [30]. Ее основные достоинства: возможность учитывать большое количество входных параметров; скорость вычислений за счет параллельной обработки информации; отказоустойчивость – при выходе из строя нескольких нейронов, качество работы ИНС снижается незначительно [98, 114, 116]. Недостаток – необходимость предварительного обучения.

Основная концепция устройства заключается в том, что на входы ИНС будут подаваться мгновенные значения напряжения в двухфазной системе координат, коэффициент загрузки и текущая частота вращения вала электродвигателей. На выходе ИНС получим допустимую длительность провала напряжения по условию сохранения динамической устойчивости для рассматриваемого режима работы ЭТС, которую используем в качестве уставки устройства.

Для реализации идеи было предложено устройство [74], которое содержит датчики фазных напряжений 1-3 (ДН1-ДН3), датчик частоты вращения вала электродвигателя 4 (ДЧ) и датчик фазного тока 5 (ДТ). К датчикам напряжения последовательно подключен блок преобразования координат 6 (БПК), выходы которого подключены к входам блока продолжительности провала 8 (БПП). К датчику тока последовательно подключен блок расчета коэффициента загрузки 7 (БРКЗ). Выходы датчика частоты вращения вала электродвигателя 4 (ДЧ), блока расчета коэффициента загрузки 7 (БРКЗ) и блока преобразования координат 6 (БПК) подключены к входам искусственной нейронной сети 9 (ИНС). Выходы искусственной нейронной сети 9 (ИНС) и блока продолжительности провала 8 (БПП) подключены к блоку сравнения 10 (БС), сигнал с которого идет на выключатель, см. рисунок 4.3.

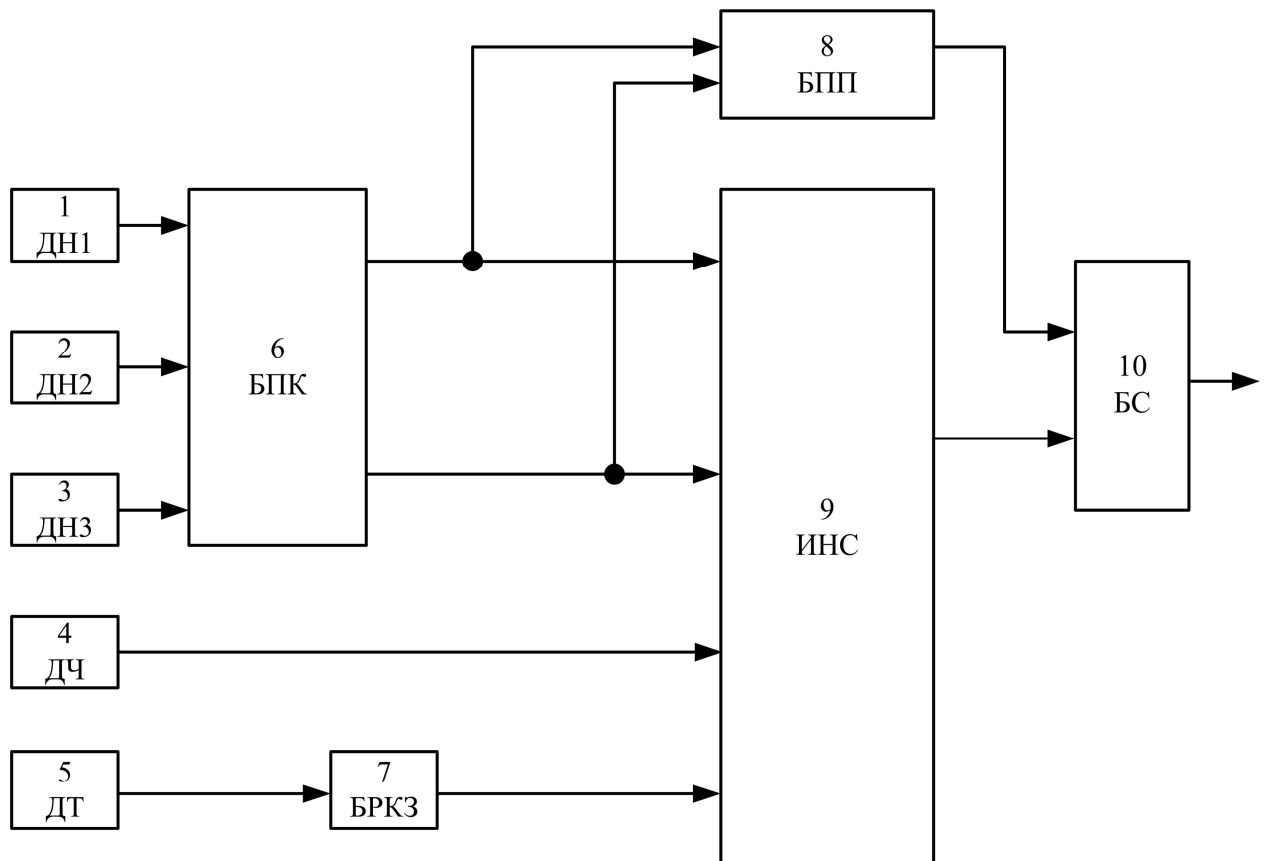


Рисунок 4.3 – Структурная схема разработанного устройства

Предложенное устройство работает следующим образом. Датчики фазных напряжений 1-3 (ДН1-ДН3), датчик частоты вращения вала электродвигателя 4 (ДЧ) и датчик фазного тока 5 (ДТ) подключают к ЭТС. С выходов датчиков фазных напряжений 1-3 (ДН1-ДН3) сигнал поступает на блок преобразования координат 6 (БПК), который выполняет перевод фазных напряжений из естественной трехфазной системы координат в двухфазную согласно известным выражениям, приведенным в [13]. Сигнал с выхода датчика тока 5 (ДТ) поступает на блок расчета коэффициента загрузки 7 (БРКЗ), который определяет загрузку ЭТС в режиме предшествующем аварийному. Сигналы с датчика частоты вращения вала электродвигателя 4 (ДЧ), блока расчета коэффициента загрузки 7 (БРКЗ) и блока преобразования координат 6 (БПК) подаются на искусственную нейронную сеть 9 (ИНС), которая определяет допустимую длительность провала питающего напряжения, используя выявленные при обучении зависимости между входными и выходными данными.

Сигнал с выхода блока преобразования координат 6 (БПК) подается на вход блока продолжительности провала 8 (БПП), который начинает отсчет времени при снижении питающего напряжения. Сигналы с выхода искусственной нейронной сети 9 (ИНС) и блока продолжительности провала 8 (БПП) подаются на блок сравнения 10 (БС). Если текущая длительность провала питающего напряжения превышает допустимое значение, полученное с помощью искусственной нейронной сети 9 (ИНС), то подается сигнал на отключение электродвигателей; если значение питающего напряжения восстановится до номинального уровня за время меньшее допустимой длительности провала, то устройство возвращается в исходное состояние.

В Matlab Simulink была создана имитационная модель рассматриваемого куста скважин с предложенным устройством на основе ИНС, см. рисунок 4.4. В модели отсутствует один вход устройства по сравнению со структурной схемой, так как куст скважин оборудованным нерегулируемыми ПЭД и частота вращения вала будет постоянной. Модель устройства включает в себя искусственную нейронную сеть, таймер и элемент сравнения. На входы ИНС подаются значения напряжения и тока, по которым она определяет допустимую длительность провала питающего напряжения по условию сохранения динамической устойчивости ЭТС. На вход таймера подается напряжение, если его значение меньше напряжения статической устойчивости ЭТС, то начинается отсчет. Сигналы с таймера и ИНС подаются на элемент сравнения, если текущая длительность провала питающего напряжения превышает допустимое значение, полученное с помощью ИНС, то подается сигнал на отключение, если значение питающего напряжения восстановится до номинального уровня за время, меньшее допустимой длительности провала, то устройство возвращается в исходное состояние.

При использовании ИНС для решения задач аппроксимации возникает ряд трудностей: выбор оптимальной обучаемой выборки; выбор и настройка метода обучения; подбор структуры ИНС. В источниках литературы [102, 103, 124, 125, 128] есть общие расчетные формулы, которые позволяют получить начальные

данные для выбора структуры ИНС и ее обучения, а также правильно сформировать обучающую выборку, но в большинстве случаев они требуют определенной коррекции.

Количество нейронов в скрытом слое было рассчитано, а затем скорректировано экспертным путем: вначале было сформировано несколько ИНС с разным количеством нейронов в скрытом слое и далее с помощью тестовой выборки была выбрана ИНС с меньшей погрешностью.

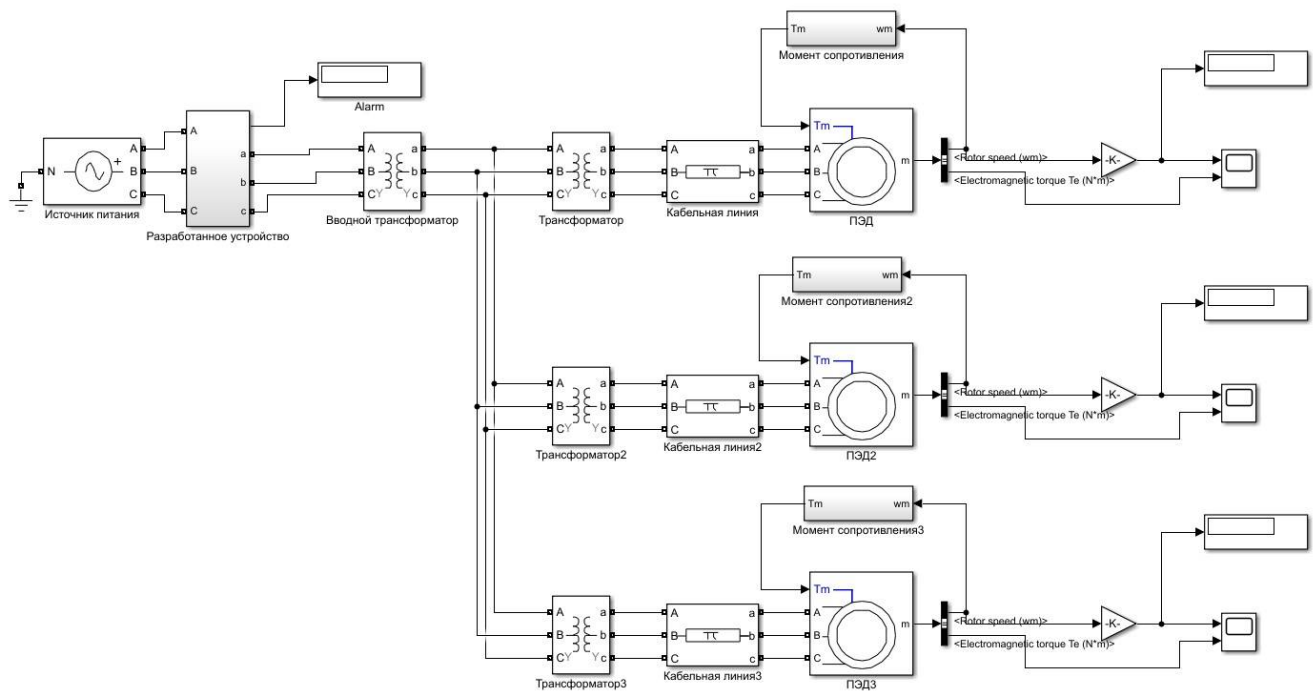


Рисунок 4.4 - Имитационная модель ЭТС рассматриваемого куста скважин с разработанным устройством

Для построения ГДУ при различных значениях загрузки электродвигателей была выбрана ИНС с тремя нейронами во входном слое, 40 – в скрытом слое, 1 – в выходном слое. С помощью средств Neural Network Toolbox в Matlab Simulink была получена модель этой ИНС, представленная на рисунке 4.5.

Нейроны входного слоя передают входные сигналы на скрытый слой, не преобразуя их. В качестве функции активации скрытого слоя в данном случае можно было выбрать: сигмоидальную униполярную или сигмоидальную биполярную (гиперболический тангенс). В итоге был выбран гиперболический тангенс, так как он обладает рядом преимуществ: более быстрая вычислимость;

выходной диапазон лежит в пределах -1 от $+1$; позволяет ускорить обучение ИНС.

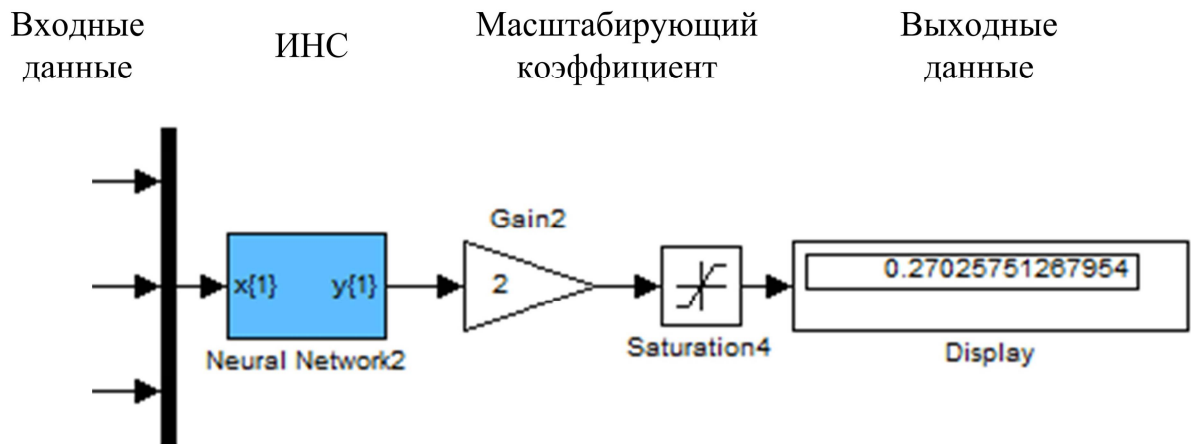


Рисунок 4.5 - Модель ИНС в Matlab Simulink

Для обучения нейронной сети использовался один из встроенных методов в Neural Network Toolbox Matlab, основанный на алгоритме Левенберга–Марквардта (Levenberg–Marquardt Algorithm) [101, 105-107, 110]. Выбранный метод имеет оптимальную скорость сходимости и позволяет с необходимой точностью решать поставленные задачи. К его недостаткам можно отнести необходимость вычисления на каждом шаге итерации обратной матрицы, что значительно усложняет вычисления при больших размерах модели. Встроенный пакет Parallel Computing Toolbox в Matlab позволяет ускорить обучение сложных нейронных сетей, имеющих большое количество данных в тренировочном шаблоне, за счет использования параллельных вычислений.

Процесс обучения ИНС проводили следующим образом: все коэффициенты связей между нейронами инициализировали случайными числами, затем сети предъявляли обучающую выборку и, с помощью алгоритма обучения, коэффициенты синаптических связей подстраивали при выполнении циклической процедуры так, чтобы расхождение между обучающей выборкой и реакцией сети на соответствующие входные данные было минимальным.

В качестве тренировочных данных для ИНС использовались ГДУ ЭТС куста скважин, полученные для различных значений загрузки электродвигателей, которая менялась у всех ПЭД одинаково. Входные данные для обучения ИНС

представлены на рисунке 4.6. Каждая кривая построена с шагом по напряжению 0,01 о.е, следовательно, объем обучающей выборки составил 219 наборов данных.

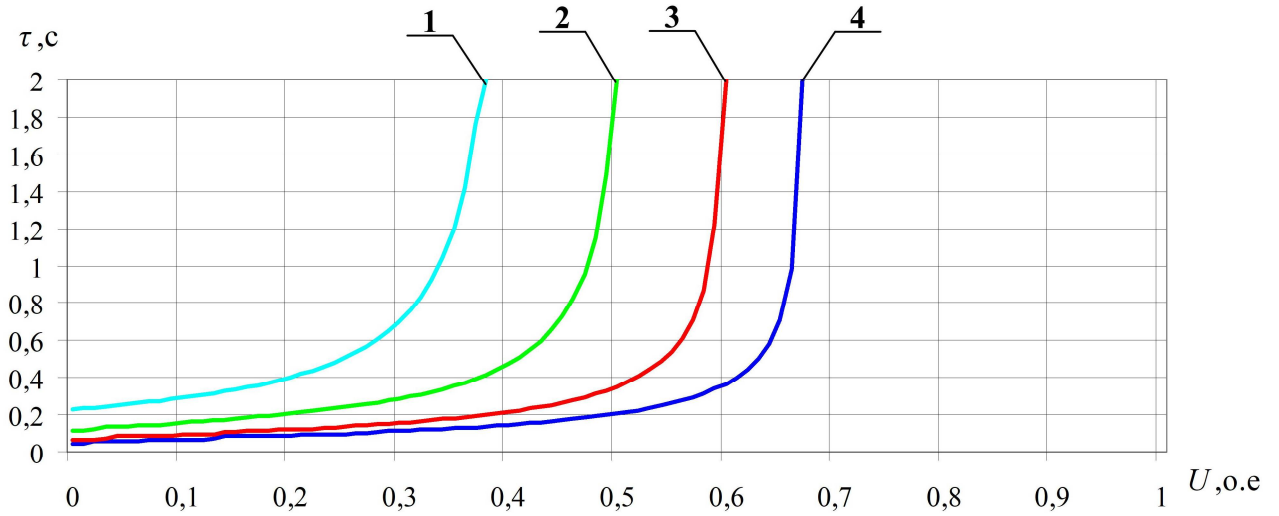


Рисунок 4.6 - ГДУ ЭТС куста скважин при: 1 - загрузке 30%,
2 – загрузке 50%, 3 - загрузке 80%, 4 - загрузке 100%

После обучения ИНС позволяет определять допустимую длительность провала питающего напряжения по условию сохранения динамической устойчивости ЭТС, используя выявленные при обучении зависимости между входными и выходными данными, согласно выражению [114]:

$$y_i(t) = f_3 \left(a_{30i} + \sum_{i=1}^N a_{3i} f_2 \left(a_{20m} + \sum_{k=1}^M a_{2m} f_1 \left(\sum_{k=1}^K a_{1k} x_k(t) + a_{10k} \right) \right) \right), \quad (4.4)$$

где $x_k(t)$ – вектор входных параметров; K – число нейронов первого слоя; M – число нейронов второго слоя; N – число нейронов третьего слоя; a_{10k} , a_{20m} , a_{30i} – начальные возбуждения нейронов первого, второго и третьего слоя соответственно; a_{1k} , a_{2m} , a_{3i} – весовые коэффициенты нейронов для первого, второго и третьего слоя; f_1, f_2, f_3 – функции активации первого, второго и третьего слоя; $y_i(t)$ – значение выходного параметра.

После обучения была проведена проверка работоспособности предложенного устройства. На входе ЭТС куста скважин моделировались одноступенчатые симметричные провалы напряжения, при этом ПЭД работали при загрузке 90%, полученные результаты приведены на рисунке 4.7.

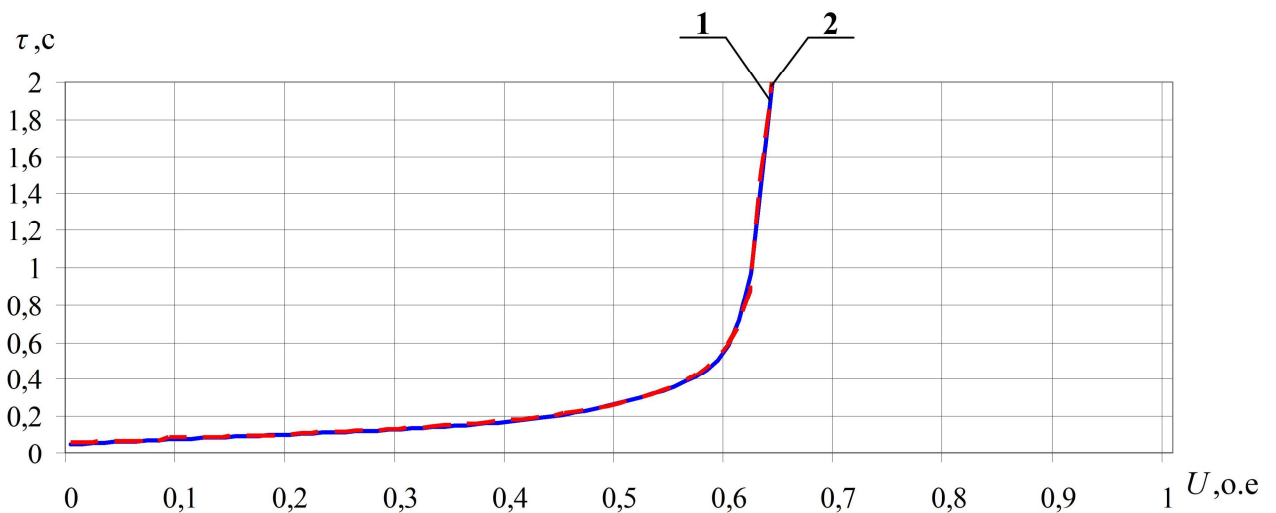


Рисунок 4.7 - Зависимости допустимой длительности провала напряжения (τ) от остаточного напряжения на шинах (U) для ЭТС куста скважин: 1 – граница срабатывания предлагаемого устройства, 2 – ГДУ.

Из полученных результатов следует, что средняя относительная ошибка составляет 2,7 %. Для исключения зоны нечувствительности устройства допустимую длительность провала напряжения по условию сохранения динамической устойчивости ЭТС необходимо уменьшить на время срабатывания коммутирующего устройства, например высоковольтного выключателя.

После обучения и проверки формируется программный код, моделирующий структуру ИНС, вводятся значения весов, полученные при обучении. Далее этот код можно использовать, например, в промышленных контроллерах, для реализации предложенного устройства.

Таким образом, устройство защиты от потери устойчивости на основе ИНС позволяет приблизить характеристику срабатывания к ГДУ при различных режимах работы электродвигателей, неограниченного набором обучающих данных, и максимально использовать запас устойчивости ЭТС. Разработанное устройство повысит коэффициент запаса устойчивости по напряжению электротехнической системы на 3 – 12 % по сравнению с обычными защитами минимального напряжения.

4.2 Выбор технических средств для повышения устойчивости электротехнических систем объектов нефтяного месторождения

Согласно проведенному анализу в параграфе 1.5 наиболее эффективными техническими средствами для повышения устойчивости ЭТС объектов нефтяного месторождения являются БАВР и ДКИН. Оценим целесообразность их применения с помощью разработанной методики выбора технических средств для повышения устойчивости по совокупности технических, технологических и экономических факторов.

ДКИН обеспечивает компенсацию провалов напряжения глубиной до 70% длительностью до 30 секунд, при этом данные устройства отличаются по степени компенсации провалов напряжения от 20% до 60% от номинального значения [111, 118, 126, 127]. Для определения наиболее эффективного ДКИН по степени компенсации было проведено моделирование для ЭТС КНС, рассмотренной в параграфе 2.2, и получены ГДУ, см. рисунок 4.8.

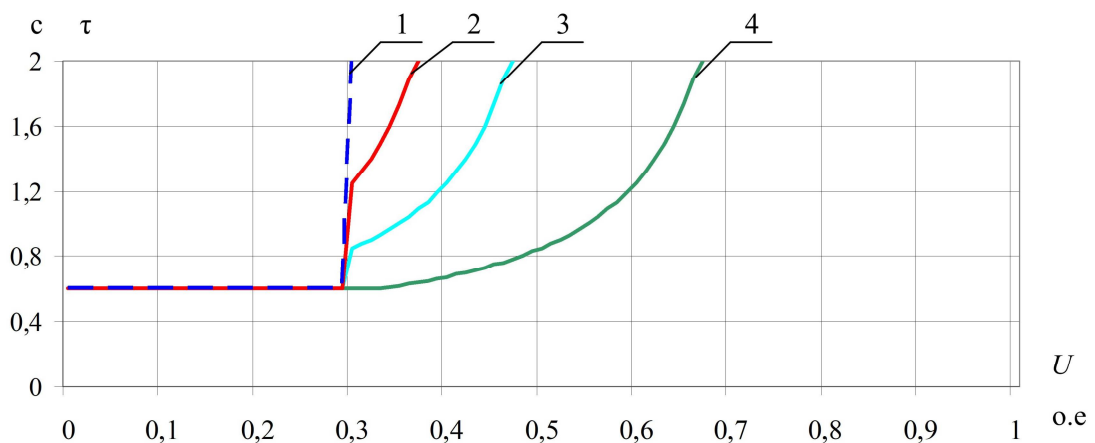


Рисунок 4.8 - ГДУ рассматриваемой ЭТС КНС при использовании: 1) ДКИН 40%, 2) ДКИН 30%, 3) ДКИН 20%, 4) без ДКИН

В качестве электрической сети внешнего электроснабжения использовалась схема питания потребителей первой категории по надежности, включающая подстанции напряжением 110/35/6 кВ и 35/6 кВ, коэффициент зависимости ИП для которой равен 0,29. Вероятное количество провалов и прерываний

напряжения на вводах ЭТС было принято равным 4, распределение провалов было принято согласно ГОСТ 32144 [19]. Схема внешнего электроснабжения и распределение провалов напряжения по длительности и глубине было принято неизменным для всех расчетов. На основании принятых данных был проведен анализ применения ДКИН для повышения устойчивости ЭТС КНС, см. таблицу 4.1.

Таблица 4.1 - Анализ применения ДКИН для повышения устойчивости рассматриваемой ЭТС КНС

Тип устройства	Коэффициент запаса устойчивости по напряжению	Коэффициент зависимости источников питания	Коэффициент экономической эффективности капитальных вложений
Без ДКИН	0,59	0,29	-
ДКИН 20%	0,72	0,29	0,91
ДКИН 30%	0,77	0,29	0,64
ДКИН 40%	0,79	0,29	0,49

Для рассмотренной ЭТС КНС коэффициент запаса устойчивости по напряжения равен 0,59, при применении ДКИН 20% - коэффициент запаса повысился до 0,72, при ДКИН 30% - до 0,77 и при ДКИН 40% - до 0,79. Дальнейшее увеличение глубины компенсации не даст увеличения запаса устойчивости по напряжению, так как рассматриваемые ДКИН не работают при остаточных напряжениях менее 30% [111, 118, 126, 127]. Для каждого типа ДКИН был рассчитан коэффициент экономической эффективности капитальных вложений, а также были построены графики ущерба, обусловленного упущенной прибылью предприятия, и капитальных затрат относительно базового значения принятого равным 70 млн. руб, см. рисунок 4.9.

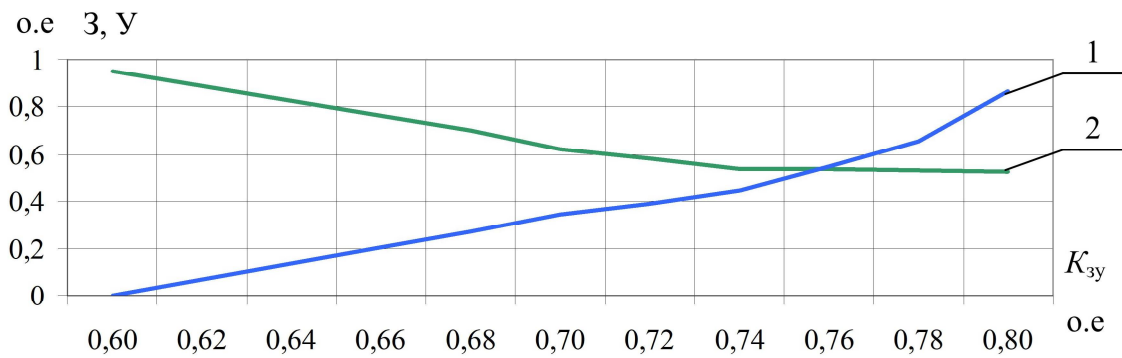


Рисунок 4.9 - 1) Зависимость капитальных затрат от коэффициента запаса устойчивости по напряжению при использовании ДКИН; 2) зависимость ущерба при потере устойчивости ЭТС КНС от коэффициента запаса устойчивости по напряжению при использовании ДКИН

Согласно результатам расчета для ДКИН 20% коэффициент экономической эффективности капитальных вложений равен 0,91, для ДКИН 30% - 0,64, для ДКИН 40% - 0,49. Данная зависимость связана со значительным ростом капитальных вложений при увеличении глубины компенсации ДКИН, вызывающей незначительное снижение ущерба, см. рисунок 4.9. Таким образом, наиболее эффективной степенью компенсации ДКИН является 20% для рассматриваемой КНС.

В качестве второго объекта для апробации методики выбора технических средств использовалась ЭТС куста скважин, рассмотренного в параграфе 4.1, при этом исходные данные были приняты такими же, как для ЭТС КНС, исходя из принадлежности объектов одному нефтяному месторождению. Для рассматриваемой ЭТС куста скважин была смоделирована работа ДКИН различной степени компенсации напряжения, см. рисунок 4.10. Аналогично ЭТС КНС было установлено, что наиболее эффективной является степень компенсации 20%, дальнейшие исследования проводилось только для этой модификации ДКИН.

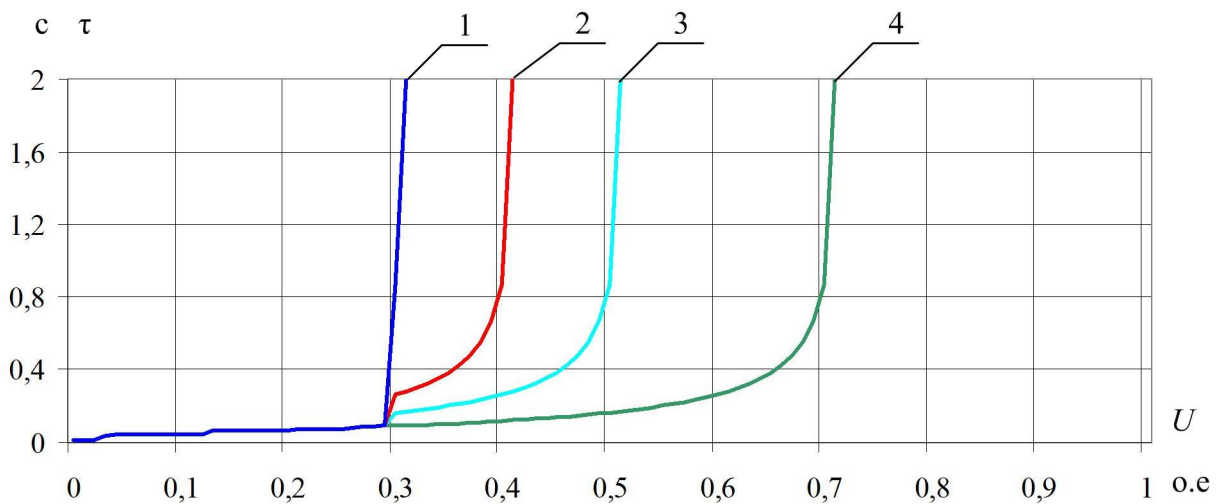


Рисунок 4.10 - ГДУ рассматриваемой ЭТС куста скважин при использовании: 1) ДКИН 40%, 2) ДКИН 30%, 3) ДКИН 20%, 4) без ДКИН

Установка БАВР в ЭТС позволяет устранять все виды провалов и прерываний напряжения за счет быстрого переключения на резервный источник питания, при этом техническую эффективность позволяет оценить разработанный коэффициент запаса устойчивости, см. рисунок 4.11.

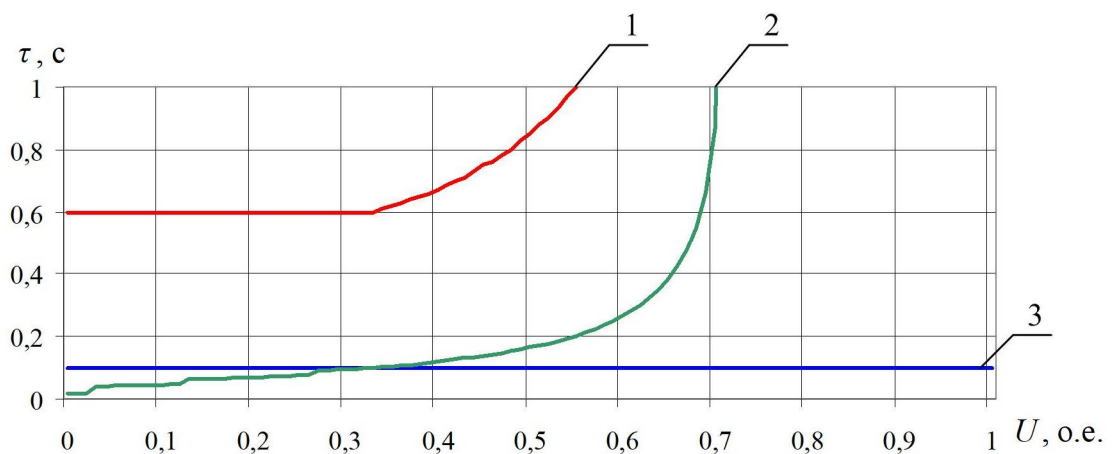


Рисунок 4.11 - 1 – ГДУ рассматриваемой ЭТС КНС, 2 – ГДУ рассматриваемой ЭТС куста скважин; 3 – уставки срабатывания БАВР

Далее были рассмотрены варианты установки БАВР и ДКИН 20% в ЭТС КНС различной производительности и на ЭТС добывающих скважин с УЭЦН различной производительности, см. таблицу 4.2.

Таблица 4.2 - Анализ эффективности применения технических средств для повышения устойчивости ЭТС КНС и кустов скважин различной производительности

Объект	Производительность	Техническое средство	Коэффициент запаса устойчивости по напряжению	Коэффициент зависимости источников питания	Коэффициент экономической эффективности капитальных вложений
КНС	Q=200 м ³ /ч	БАВР	0,8	0,29	0,58
		ДКИН 20%	0,72	0,29	0,59
	Q=720 м ³ /ч	БАВР	0,8	0,29	1,74
		ДКИН 20%	0,72	0,29	0,91
	Q=1890 м ³ /ч	БАВР	0,8	0,29	2,23
		ДКИН 20%	0,72	0,29	0,95
Кусты скважин	Q=0,5 т/ч	БАВР	0,56	0,29	0,01
		ДКИН 20%	0,53	0,29	0,03
	Q=2,5 т/ч	БАВР	0,56	0,29	0,07
		ДКИН 20%	0,53	0,29	0,1
	Q=5 т/ч	БАВР	0,56	0,29	0,15
		ДКИН 20%	0,53	0,29	0,19

Согласно результатам расчета повышение устойчивости ЭТС кустов скважин производительностью от 0,5 т/ч до 5 т/ч с помощью БАВР и ДКИН не является экономически целесообразным, т.к. коэффициент экономической эффективности капитальных вложений во всех случаях меньше 0,364. Повышение устойчивости ЭТС КНС с помощью БАВР показывает, что при производительности КНС 200 м³/ч коэффициент экономической эффективности капитальных вложений равен 0,58, при производительности 1890 м³/ч - 2,23, следовательно, чем больше производительность КНС, тем быстрее окупится применение дорогостоящего БАВР. Коэффициент экономической эффективности капитальных вложений в ДКИН для повышения устойчивости ЭТС КНС равен 0,59 при производительности 200 м³/ч и 0,95 - при производительности 1890 м³/ч.

4.3 Выводы по главе 4

1. Предложено устройство для защиты асинхронных электродвигателей от потери устойчивости на основе ИНС, проверена его работоспособность с помощью имитационной модели.

2. На основе разработанной методики получены границы динамической устойчивости ЭТС КНС и куста скважин при использовании ДКИН и БАВР.

3. Выполнены оценки эффективности применения ДКИН и БАВР для повышения устойчивости ЭТС КНС и куста скважин. Получены технико-экономические показатели эффективности применения рассмотренных устройств на объектах нефтяных месторождений с различной производительностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований по проблеме повышения устойчивости электротехнических систем объектов нефтяных месторождений с высоковольтными асинхронными электродвигателями получены следующие результаты:

1. Зависимость допустимой общей длительности двухступенчатого провала напряжения от длительности его первой ступени по условию сохранения устойчивости, позволяющая оценивать запас динамической устойчивости электротехнической системы с высоковольтными асинхронными электродвигателями при переходе несимметричных провалов напряжения в симметричные.

2. Аналитическое выражение для определения допустимой длительности второй ступени провала напряжения от длительности его первой ступени по условию сохранения устойчивости, учитывающее запасы устойчивости электротехнической системы с высоковольтными асинхронными электродвигателями при двухфазном и трехфазном провалах напряжения. Предложенное выражение позволяет определить допустимую длительность двухфазного провала напряжения без непосредственного расчета переходных процессов в электротехнической системе, что ускоряет процесс вычисления.

3. Коэффициент запаса устойчивости по напряжению для электротехнических систем с высоковольтными асинхронными электродвигателями, учитывающий напряжение статической устойчивости, запас динамической устойчивости при прерывании напряжения и коэффициент зависимости источников питания. Предложенный коэффициент позволяет повысить точность определения вероятности устойчивой работы электротехнической системы в среднем на 1.8%, а также количественно оценить устойчивость электротехнической системы при использовании устройств быстрого действия автоматического ввода резерва.

4. Методика обоснованного выбора технических средств для повышения устойчивости электротехнических систем объектов нефтяных месторождений с высоковольтными асинхронными электродвигателями, учитывающая как границу динамической устойчивости, коэффициент экономической эффективности капитальных вложений, так и коэффициент зависимости источников питания. Разработанная методика может быть использована при оценки эффективности средств для повышения устойчивости электротехнических систем как на этапе проектирования, так и на этапе эксплуатации.

5. Устройство защиты асинхронных электродвигателей от потери устойчивости на базе искусственной нейронной сети и программы для ЭВМ «Оценка устойчивости АД при сложных провалах напряжения» и «Voltage stability of electromotive load», которые позволяют оценивать устойчивость электротехнической системы с высоковольтными асинхронными электродвигателями при одноступенчатых и двухступенчатых провалах питающего напряжения. Разработанное устройство повысит коэффициент запаса устойчивости по напряжению электротехнической системы на 3 – 12 %, а также позволит адаптировать свои настройки к режиму работы электродвигателей автоматически.

6. Разработанные методика обоснованного выбора технических средств для повышения устойчивости электротехнических систем объектов нефтяных месторождений с высоковольтными асинхронными электродвигателями и коэффициент запаса устойчивости по напряжению внедрены в производственную деятельность ПАО «Гипротюменнефтегаз» и в учебный процесс Тюменского индустриального университета.

Перспективы дальнейшей разработки темы диссертации заключаются в оценке устойчивости электротехнических систем с высоковольтными асинхронными электродвигателями при изменении частоты питающего напряжения, а также в исследовании устойчивости электротехнических систем с высоковольтными асинхронными и синхронными электродвигателями при двухступенчатых провалах напряжения.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АВР	Автоматический ввод резерва
БАВР	Быстродействующий автоматический ввод резерва
ВАД	Высоковольтный асинхронный электродвигатель
ГДУ	Граница динамической устойчивости
ДКИН	Динамический компенсатор искажений напряжения
ДНЭ	Длительные нарушения электроснабжения
ЗМН	Защита минимального напряжения
ИБП	Источник бесперебойного питания
ИНС	Искусственная нейронная сеть
ИП	Источник питания
КЗ	Короткое замыкание
КНС	Кустовая насосная станция
КНЭ	Кратковременные нарушения электроснабжения
ЛЭП	Линия электропередачи
ПЧ	Преобразователь частоты
ПЭД	Погружной асинхронный электродвигатель
УЭЦН	Установка электроцентробежного насоса
ХС	Характеристика срабатывания
ЭТС	Электротехническая система

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Абрамович Б. Н. Динамическая устойчивость работы установок электроцентробежных насосов / Б. Н. Абрамович, Д. А. Устинов, В. Е. Поляков. – Текст : непосредственный // Нефтяное хозяйство. - 2010. - № 9. - С. 104-106.
2. Абрамович Б. Н. Динамическая устойчивость электромеханических комплексов с синхронными и асинхронными двигателями на предприятиях с непрерывным технологическим циклом / Б.Н. Абрамович, Д.А. Устинов, В.Е. Поляков. – Текст непосредственный // Промышленная энергетика. - 2011. - № 4. - С. 21-23.
3. Абрамович Б. Н. Динамическая устойчивость электромеханических комплексов с синхронными и асинхронными двигателями на предприятиях нефтедобычи / Б.Н. Абрамович, Д.А. Устинов, Ю.А. Сычев, И.Г. Плотников. – Текст непосредственный // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. - 2011. - № 3. - С. 17-25.
4. Абрамович Б. Н. Система бесперебойного электроснабжения предприятий горной промышленности / Б.Н. Абрамович. – Текст непосредственный // Записки Горного института. - 2018. - Т. 229. - С. 31-40.
5. Абрамович Б. Н. Системы электроснабжения электромеханических комплексов в горной и нефтегазовой промышленности : учебное пособие / Б. Н. Абрамович, Ю. А. Сычев. - Санкт-Петербург : Лема, 2017. - 115 с. – Текст непосредственный.
6. Анцифоров В. А. Методы оценки независимости источников питания и мероприятия по повышению надежности и устойчивости электротехнических систем непрерывных производств : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : диссертация на соискание степени кандидата технических наук / Анцифоров Виталий Алексеевич; Российский государственный университет им. И.М. Губкина. – Москва, 2015. – 186 с. – Текст непосредственный.

7. Астраханский ГПЗ: анализ надежности электроснабжения / Б.Г. Меньшов, А.Ф. Шкута, В.А. Федоров [и др.]. – Текст непосредственный // Газовая промышленность. – 1990. – № 4. – С. 22–25.

8. Бак С. И. Электрификация блочно-комплектных установок нефтяной промышленности / С. И. Бак, С. П. Читипаховян. - Москва : Недра, 1989. – 183 с. - Текст : непосредственный.

9. Белоусенко И. В. Некоторые проблемы и возможности обеспечения устойчивости электротехнических систем современных нефтегазовых производств / И.В. Белоусенко, А.В. Егоров, А.А. Трифонов. – Текст непосредственный // Промышленная энергетика. – 2015. – № 10. – С. 17–24.

10. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. В 2 т. Том 1. Электрические цепи : учебник для вузов / Л. А. Бессонов. – 12-е изд., испр. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2020. – 831 с. – Текст : непосредственный.

11. Важнов А. И. Переходные процессы в машинах переменного тока / А. И. Важнов. – Ленинград : Энергия, 1980. – 256 с. – Текст непосредственный.

12. Важнов А. И. Электрические машины / А. И. Важнов. – Ленинград : Энергия, 1968. – 768 с. – Текст непосредственный.

13. Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: учебник для электроэнергетических специальностей вузов / В. А. Веников. – Москва : Высшая школа, 1985. - 536 с. - Текст : непосредственный.

14. Веников В. А. Электрические системы. Режимы работы электрических систем и сетей / В. А. Веников, Л. А. Жуков, Г. Е. Поспелов ; ред. В. А. Веников. – Москва : Высшая школа, 1975. – 344 с. – Текст непосредственный.

15. Вольдек А. И. Электрические машины. Машины переменного тока : учебник для вузов / А.И. Вольдек, В.В. Попов. – Санкт-Петербург : Питер, 2010. – 350 с. – Текст непосредственный.

16. Гамазин С. И. Переходные процессы в системах промышленного электроснабжения, обусловленные электродвигательной нагрузкой / С. И.

Гамазин, В. А. Ставцев, С. А. Цырук. – Москва : Издательство МЭИ, 1997. – 424 с. – Текст непосредственный.

17.Гамазин С. И. Установившийся режим и переходные процессы турбодвигателей с расщепленной обмоткой / С.И. Гамазин, С.А. Цырук, Д.Б. Понаровский. – Текст непосредственный // Промышленная энергетика. - 1994. - № 5. - С. 37-40.

18.Горев А. А. Переходные процессы синхронной машины / А. А. Горев ; под ред. А. И. Вольдек. – Москва : Государственное энергетическое издательство, 1950. – 552 с. – Текст непосредственный.

19.ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 июля 2013 г. № 400-ст : введен впервые : дата введения 2014-07-01 / разработан ООО «ЛИНВИТ». – Москва : Стандартинформ, 2014. – 19 с. – Текст : непосредственный.

20.ГОСТ Р 57114-2016 Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Электроэнергетические системы. Оперативно-диспетчерское управление в электроэнергетике и оперативно-технологическое управление. Термины и определения: национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 4 октября 2016 г. № 1302-ст : введен впервые : дата введения 2017-03-01 / разработан ОАО «СО ЕЭС». – Москва : Стандартинформ, 2019. – 16 с. – Текст : непосредственный.

21.ГОСТ Р 58367-2019 Обустройство месторождений нефти на суше. Технологическое проектирование : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12

марта 2019 г. № 82-ст : введен впервые : дата введения 2019-04-15 / разработан АО «Гипровостокнефть». – Москва : Стандартинформ, 2019. – 120 с. – Текст : непосредственный.

22.Гумиров Д. Т. Повышение надежности работы электроцентробежных насосов и станков-качалок при авариях в питающих сетях предприятий нефтедобычи / Д.Т. Гумиров, В.А. Жуков, В.М. Пупин. – Текст непосредственный // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. - 2009. - № 9. - С. 56-66.

23.Гуревич В. И. Устройства электропитания релейной защиты: проблемы и решения / В.И. Гуревич. – Москва : Инфра-Инженерия, 2013. – 288 с. – Текст непосредственный.

24.Гуревич Ю. Е. Особенности электроснабжения, ориентированного на бесперебойную работу промышленного потребителя / Ю. Е. Гуревич, К. В. Кабиков. – Москва : ЭЛЕКС-КМ, 2005. - 408 с. – Текст : непосредственный.

25.Дайитбегов Д. М. Компьютерные технологии анализа данных в эконометрике : монография / Д. М. Дайитбегов. - Москва : Вузовский учебник, 2013. - 587 с. – Текст непосредственный.

26.Денисенко Е. А. Источники бесперебойного и автономного электроснабжения / Е.А. Денисенко, М.М. Тарасов, А.А. Кривошей, А.В. Бондарчук. – Текст непосредственный // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. - 2016. - № 115. - С. 1337-1349.

27.Егоров А. В. Опыт повышения надежности электроснабжения высокотехнологичного производства / А. В. Егоров, И. А. Мелик-Шахназарова, А. В. Суржигов. – Текст непосредственный // Труды РГУ Нефти и газа имени И.М. Губкина. – 2012. – Т. 268. – № 3. – С. 130–140.

28.Егоров А. В. Устойчивость асинхронных многомашинных комплексов при внешних многопараметрических возмущениях / А. В. Егоров, Ю. В. Новоселова. – Текст : непосредственный // Промышленная энергетика. - 2000. - № 11. - С. 24-27.

29.Егоров А. В. Устойчивость промышленных электротехнических систем при возмущениях в системах электроснабжения : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : диссертация на соискание степени доктора технических наук / Егоров Андрей Валентинович; Российский государственный университет им. И.М. Губкина. – Москва, 2004. – 300 с. – Текст непосредственный.

30.Ершов М. С. Адаптация защит узлов электрических нагрузок к потере питания при несимметричных возмущениях / М. С. Ершов, И. О. Рупчев. - Текст : непосредственный // Промышленная энергетика. - 2004. - № 1. - С. 47-50.

31.Ершов М. С. Влияние несимметрии питающего напряжения на устойчивость синхронных двигателей / М.С. Ершов, А.В. Егоров, А.Н. Комков. - Текст : непосредственный // Труды РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина. - 2012. - № 1(266). - С. 117-128.

32.Ершов М. С. Влияние частоты на устойчивость промышленных электротехнических систем / М. С. Ершов, А. В. Егоров, А. Н. Комков. – Текст непосредственный // Промышленная энергетика. – 2013. – № 9. – С. 21–25.

33.Ершов М. С. Вопросы повышения устойчивости электрической нагрузки промышленных систем электроснабжения / М.С. Ершов, А.В. Егоров. – Текст непосредственный // Промышленная энергетика. - 1994. - № 3. - С. 20-22.

34.Ершов М. С. Методы оценки надежности и независимости источников питания в системах промышленного электроснабжения / М.С. Ершов, А.В. Егоров, В.А. Анцифоров. - Текст : непосредственный // Промышленная энергетика. – 2014. - №1. – С. 2-6.

35.Ершов М. С. Некоторые итоги исследования устойчивости промышленных электротехнических систем / М. С. Ершов, А. В. Егоров, А. А. Трифионов. - Текст : непосредственный // Труды Российского государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина. - 2009. - № 3. - С. 57-68.

36.Ершов М. С. О некоторых закономерностях областей устойчивости асинхронных электротехнических систем / М.С. Ершов, А.В. Егоров, Н.В. Валов,

Э.Б. Мукани. - Текст : непосредственный // Промышленная энергетика. - 2010. - № 7. - С. 22-26.

37.Ершов М. С. Оценка взаимной зависимости источников питания систем промышленного электроснабжения с учетом несимметричных возмущений во внешних электрических сетях / М.С. Ершов, В.А. Анцифоров, А.Н. Комков. – Текст непосредственный // Промышленная энергетика. – 2014. - №11. – С. 2-7.

38.Ершов М. С. Развитие теории, разработка методов и средств повышения надежности и устойчивости электротехнических систем многомашинных комплексов с непрерывными технологическими процессами : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы, включая их управление и регулирование» : диссертация на соискание степени доктора технических наук / Ершов Михаил Сергеевич ; Московский государственный горный университет. – Москва, 1995. – 515 с. – Текст непосредственный.

39.Ершов М. С. Устойчивость промышленных электротехнических систем / М. С. Ершов, А. В. Егоров, А. А. Трифонов. – Москва : ООО «Издательский дом «Недра», 2010. - 319 с. - Текст : непосредственный.

40.Ершов М. С. Учет несимметрии питающего напряжения в системах защиты от потери устойчивости промышленных электротехнических систем / М.С. Ершов, А.В. Егоров, Н.В. Валов, А.Н. Комков. - Текст : непосредственный // Промышленная энергетика. - 2011. - № 9. - С. 22-24.

41.Ершов М. С. Характеристики провалов напряжения при авариях в сетях систем электроснабжения нефтегазовых комплексов / М.С. Ершов, В.Н. Валов. – Текст непосредственный // Труды Российского государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина. - 2010. - № 2 (259). - С. 114-120.

42.Жданов П. С. Вопросы устойчивости электрических систем / П.С. Жданов; под ред. Л.А. Жукова. – Москва : Энергия, 1979. - 456 с. - Текст : непосредственный.

43.Карапетян И. Г. Справочник по проектированию электрических сетей / И. Г. Карапетян, Л.Д. Файбисович, И. М. Шапиро. – Москва : ЭНАС, 2012. – 376 с. – Текст : непосредственный.

44.Каталог Seram серий 20, 40 с расширенными функциями, 60 и 80. Цифровые реле защиты. – Текст: электронный // Schneider electric : официальный сайт. – 2020. – URL : <https://www.se.com/ru/ru/product-range-download/933-серия-seram-20/> (дата обращения : 07.02.2020).

45.Комплексная система управления качеством продукции. Оценка эффективности мероприятий по повышению надежности электрических сетей нефтяных промыслов : СТП 0148463.004-87 : утвержден начальником Главтюменнефтегаза 20.10.87 : введен в действие с 01.02.88. – Тюмень : Ротапринт Гипротюменнефтегаза, 1988. - 52 с. – Текст : непосредственный.

46.Копылов И. П. Математическое моделирование асинхронных машин / И. П. Копылов, Ф. А. Мамедов, В. Я. Беспалов. – Москва : Энергия, 1969. – 96 с. – Текст непосредственный.

47.Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин : учебник для вузов / И. П. Копылов. – Москва : Высшая школа, 2001. – 327 с. – Текст непосредственный.

48.Костенко М. П. Электрические машины. Учебник для студентов высших технических учебных заведений. В 2-х частях. Часть 2. Машины переменного тока / М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. – Ленинград : Энергия, 1973. – 648 с. – Текст непосредственный.

49.Костенко М. П. Электродинамическая модель для исследования устойчивости / М.П. Костенко. – Текст непосредственный // Электричество. - 1950. - № 9. - С. 5-16.

50.Куренный Э. Г. Оценка и нормирование несимметрии напряжений в системах электроснабжения общего назначения / Э.Г. Куренный, Е.Н. Дмитриева, А.П. Лютый, О.А. Сидоренко. – Текст непосредственный // Электричество. – 2008. - № 4. – С.18-26.

51.Лосев Ф. А. The problem of the interruption in oil and gas complexes power supply system / Ф.А. Лосев. – Текст непосредственный // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе: материалы

Международной научно - практической конференции. Т.2. – Тюмень, 2016. - С. 347-348.

52.Лосев Ф. А. Исследование частоты возникновения нарушений электроснабжения на объектах нефтедобычи / Ф.А. Лосев. – Текст непосредственный // Новые технологии – нефтегазовому региону: материалы Международной научно-практической конференции. Т.2. – Тюмень, 2016. - С. 325-328.

53.Лосев Ф. А. Методика оценки экономической целесообразности мероприятий по повышению устойчивости узлов электродвигательной нагрузки / Ф.А. Лосев // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно – энергетическом комплексе: материалы Национальной с международным участием научно - практической конференции. Т.2. - Тюмень, 2018. - С. 309-312.

54.Лосев Ф. А. Определения количества отключений по статистике динамических снижений напряжения и кривым динамической устойчивости / Ф.А. Лосев, А.С. Мартьянов. – Текст непосредственный // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе: материалы Международной научно - практической конференции. Т.2. - Тюмень, 2018. - С. 282-285.

55.Лосев Ф. А. Оценка влияния сечения питающего кабеля на устойчивость погружного электродвигателя / Ф.А. Лосев, А.С. Мартьянов. – Текст : непосредственный // Новые технологии - нефтегазовому региону: материалы Международной научно-практической конференции. Т. 5. – Тюмень, 2017. - С. 229-232.

56.Лосев Ф. А. Оценка динамической устойчивости погружных установок электроцентробежных насосов / Ф.А. Лосев, А.С. Мартьянов, В.В. Сушков. - Текст : непосредственный // Актуальные вопросы энергетики: материалы Международной научно-практической конференции - Омск, 2017 . - С. 303-306.

57.Лосев Ф. А. Оценка устойчивости объектов нефтяных месторождений при различных несимметричных провалах напряжения / Ф.А. Лосев, В.В. Сушков.

– Текст непосредственный // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2020. – № 2. – С. 5–12.

58.Лосев Ф. А. Разработка методики и алгоритма оценки эффективности мероприятий по повышению устойчивости электротехнических систем нефтяных месторождений / Ф.А. Лосев. – Текст непосредственный // 73-я Международная молодежная научная конференция «Нефть и газ - 2019»: тезисы докладов. Т.3. - Москва, 2019. - С. 458-459.

59.Лосев Ф. А. Разработка методики и алгоритмов оценки влияния несимметричных провалов напряжения на устойчивость узла асинхронной электродвигательной нагрузки нефтяных месторождений / Ф. А. Лосев, В. В. Сушков. - Текст : непосредственный // Омский научный вестник. - 2018. - № 4 (160). - С. 94-98.

60.Ляпунов А. М. Собрание сочинений : в 3 томах / А. М. Ляпунов. – Москва; Ленинград : Изд-во АН СССР, 1954. – 3 т. – Текст непосредственный.

61.Малафеев А.В. Исследование статической устойчивости синхронных двигателей в условиях системы электроснабжения ОАО "ММК" при параллельной работе с энергосистемой / А.В. Малафеев, О.В. Буланова, А.М. Ахметханов. – Текст непосредственный // Электротехнические системы и комплексы. - 2010. - № 18. - С. 32-35.

62.Мартьянов А. С. Кратковременные нарушения электроснабжения в электрических сетях нефтяных месторождений / А.С. Мартьянов, В.В. Сушков, И.С. Небилович. - Текст : непосредственный // Культура, наука, образование: проблемы и перспективы: материалы V Международной научно-практической конференции. -Нижевартовск, 2016. - С. 123-126.

63.Мартьянов А. С. Обоснование технических решений для повышения динамической устойчивости установок добычи нефти с электрическими центробежными насосами / А. С. Мартьянов, В. В. Сушков. - Текст : непосредственный // Омский научный вестник. - 2017. - № 6 (156). - С. 105-111.

64.Мартьянов А. С. Разработка и обоснование технических решений повышения устойчивости по напряжению электротехнических комплексов

установок добычи нефти с центробежными насосами : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : диссертация на соискание степени кандидата технических наук / Мартянов Антон Сергеевич; Омский государственный технический университет. – Омск, 2018. – 115 с. – Текст непосредственный.

65.Меньшов Б. Г. Вопросы управления электротехническими системами нефтегазовых комплексов в аварийных режимах / Б. Г. Меньшов, М. С. Ершов. – Текст непосредственный // Промышленная энергетика. – 1995. – № 5. – С. 15-17.

66.Меньшов Б. Г. Надежность электроснабжения газотурбинных компрессорных станций / Б. Г. Меньшов, М. С. Ершов. – Москва : Недра, 1995. – 163 с. – Текст непосредственный.

67.Меньшов Б. Г. Электротехнические установки и комплексы в нефтегазовой промышленности: учебник для вузов / Б.Г. Меньшов, М.С. Ершов, А.Д. Яризов. – Москва : ОАО «Издательство «Недра», 2000. - 487 с. - Текст : непосредственный.

68.Мищенко И. Т. Скважинная добыча нефти: учебное пособие для вузов / И.Т. Мищенко. – Москва : ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. — 816 с. - Текст : непосредственный.

69.Нейросетевая идентификация и диагностика электрических машин в условиях сильных импульсных помех / В. В. Тимошкин, Р. Ю. Ткачук, А. С. Глазырин [и др.]. - Текст : непосредственный // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2011. – №. 2.– С. 282–285.

70.Неклепаев Б. Н. Вероятностные характеристики коротких замыканий в энергосистемах / Б.Н. Неклепаев, А.А. Востросаблин. - Текст : непосредственный // Электричество. - 1999. - № 8. - С. 15-23.

71.Нешитой А. С. Инвестиции: учебник / А.С. Нешитой. – Москва : Издательско-торговая корпорация «Дашков и К», 2007. – 372 с. - Текст : непосредственный.

72.Нормы технологического проектирования объектов сбора, транспорта, подготовки нефти, газа и воды нефтяных месторождений (с Изменением N 1) :

ВНТП 3-85 : утверждены Министерством нефтяной промышленности 10.01.86 : введены в действие 01.03.86. - URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200018989> (дата обращения: 05.06.2019). - Текст : электронный.

73. Ограничение провалов напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий / Г.П. Корнилов, А.Ю. Коваленко, А.А. Николаев [и др.]. – Текст непосредственный // Электротехнические системы и комплексы. - 2014. - № 2 (23). - С. 44-48.

74. Патент 183312 Российская федерация, МПК H02H 3/24 (2006.01). Устройство защиты асинхронного электродвигателя от потери устойчивости : № 2017146900 : заявл. 28.12.2017 : опубл. 18.09.2018 / Лосев Ф.А., Мартыанов А.С., Сушков В.В., Тимошкин В.В. ; патентообладатель ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет». – Текст непосредственный.

75. Постников И. М. Обобщенная теория и переходные процессы электрических машин / И. М. Постников. – Киев : Техника, 1969. – 332 с. – Текст непосредственный.

76. Правила устройства электроустановок. Все действующие разделы шестого и седьмого изданий с изменениями и дополнениями : утверждены Министерством энергетики Российской Федерации от 08.07.02 : введены в действие 01.01.03. – Москва : Норматика, 2018. - 462 с. – Текст : непосредственный.

77. Представление машин переменного тока в расчетах динамической устойчивости систем электроснабжения промышленных предприятий с собственными электростанциями / Б.И. Заславец, В.А. Игуменцев, А.В. Малафеев [и др.]. – Текст непосредственный // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. - 2008. - № 11 (111). - С. 3-8.

78. Пупин В. М. Новые способы защиты электрооборудования в питающих сетях предприятий при провалах напряжения / В.М. Пупин, Д.С. Куфтин, Д.О. Сафонов. - Текст : непосредственный // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. - 2012. - № 4. - С. 22-28.

79.Пупин В. М. Устройства защиты электрооборудования от провалов напряжения длительностью от 10 миллисекунд / В.М. Пупин. - Текст : непосредственный // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. - 2013. - № 10. - С. 23-34.

80.Репина Ю. В. Устойчивость промышленных электротехнических систем с асинхронными и синхронными электроприводами : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : диссертация на соискание степени кандидата технических наук / Репина Юлия Валерьевна; Российский государственный университет им. И.М. Губкина. – Москва, 2005. – 135 с. – Текст непосредственный.

81.Романова В. В. Оценка достоверности результатов компьютерного моделирования влияния несимметрии напряжений на режимы работы асинхронного двигателя / В.В. Романова, С.В. Хромов. – Текст непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - 2016. - № 4 (52). - С. 155-162.

82.Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019667309 Российская Федерация. Оценка устойчивости АД при сложных провалах напряжения : № 2019663515 : заявл. 29.10.2019 : опубл. 23.12.2019 / Лосев Ф. А., Сушков В. В.; правообладатель Лосев Ф.А. – Текст непосредственный.

83.Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019667724 Российская Федерация. Voltage stability of electromotive load : № 2019663487 : заявл. 29.10.2019 : опубл. 26.12.2019 / Лосев Ф. А., Сушков В. В.; правообладатель Лосев Ф.А. – Текст непосредственный.

84.Семенов В. М. Экономика предприятия: учебник для вузов / В. М. Семенов. – Санкт-Петербург : Питер, 2008. – 416 с. - Текст : непосредственный.

85.Способы повышения устойчивости частотно-регулируемых электроприводов при нарушениях электроснабжения / А. С. Карандаев, Р.Р. Храмшин, Т.Р. Храмшин [и др.]. – Текст непосредственный // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. - 2013. - Т. 1, № 1. - С. 62-69.

86.Способы повышения устойчивости электроприводов непрерывных производств при провалах напряжения / Т.Р. Храмшин, Г.П. Корнилов, Д.С. Крубцов [и др.]. – Текст непосредственный // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. - 2014. - Т. 14, № 2. - С. 80-87.

87.Суворов И. Ф. Исследование влияния несимметрии фазных напряжений на режимы работы асинхронных двигателей в среде имитационного моделирования Matlab/Simulink / И.Ф. Суворов, В.В. Романова, С.В. Хромов. – Текст непосредственный // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. - 2016. - Т. 16, № 3. - С. 72-83.

88.Суворов И. Ф. Новый подход к нормированию коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности k_{2u} для узлов нагрузок систем электроснабжения с асинхронными двигателями / И.Ф. Суворов, В.В. Романова, С.В. Хромов. – Текст непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - 2017. - № 1 (53). - С. 209-214.

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

90.Сушков В. В. Оптимальное управление многомашинным комплексом системы поддержания пластового давления на нефтяных месторождениях / В.В. Сушков, М.К. Велиев, В.В. Тимошкин, Т.Д. Гладких. - Текст : непосредственный // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 2. – С. 82–84.

91.Тимофеев В. С. Эконометрика : учебник для бакалавров и студентов вузов, обучающихся по экономическим направлениям и специальностям / В. С. Тимофеев, А. В. Фаддеев, В. Ю. Щеколдин. – Москва : Юрайт, 2013. - 328 с. – Текст непосредственный.

92.Требования к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок «Методические указания по устойчивости энергосистем» :

официальное издание : утверждено Минэнерго России от 03.08.18: введено в действие с 01.03.19. – URL : <http://docs.cntd.ru/document/542630877> (дата обращения: 05.06.2019). - Текст : электронный.

93.Федотов А. И. Влияние провалов напряжения при внешних коротких замыканиях на режимы работы синхронных двигателей / А.И. Федотов, Р.М. Мударисов. – Текст непосредственный // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. - 2012. - № 3. - С. 71-76.

94.Федотов А. И. Устойчивость синхронного двигателя в условиях однофазного короткого замыкания во внешней сети / А. И. Федотов, Р.М. Мударисов. – Текст непосредственный // Энергетика Татарстана. - 2012. - № 3 (27). - С. 60-63.

95.Чернобровов Н. В. Релейная защита энергетических систем / Н.В. Чернобровов, В.А. Семенов. – Москва : Энергоатомиздат,1998. – 800 с. – Текст непосредственный.

96.Шабад М. А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей : монография / М.А. Шабад. – Санкт-Петербург : ПЭИПК, 2003. – 350 с. – Текст непосредственный.

97.Шаповало А. А. Критерии выбора схем электроснабжения основных производственных объектов ПАО «Газпром» / А.А. Шаповало, Т.Ф. Коноплев, И.Б. Масалева. – Текст непосредственный // Газовая промышленность. – 2018. - №4. – С. 98-105.

98.Шевцов А. А. Моделирование электрической нагрузки с помощью искусственной нейронной сети в Mathlab Simulink / А.А. Шевцов, Е.С. Глибин, В.Н. Алексеева. – Текст непосредственный // Вестник магистратуры. - 2015. - № 4-1 (43). - С. 23-27.

99.Электрические системы. Математические задачи электроэнергетики / В. А. Веников, Э. Н. Зуев, И. В. Литкенс [и др.] ; ред. В. А. Веников. – Москва: Высшая школа, 1981. – 288 с. – Текст непосредственный.

100. Электрические системы. Том 2. Электрические сети / В. А. Веников, А. А. Глазунов, Л. А. Жуков, Л. А. Солдаткина ; ред. В. А. Веников. – Москва : Высшая школа, 1971. – 440 с. – Текст непосредственный.

101. A Novel Neural-Network-Based Adaptive Control Scheme for Output-Constrained Stochastic Switched Nonlinear Systems/ B. Niu; D. Wang; H. Li [et al.]. – Direct text // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. - 2017. - V. 99. - P. 1-15.

102. Adnan W. N. Modeling baseline electrical energy use of chiller system by artificial neural network / W. N. Adnan, N.Y. Dahlan, I. Musirin. – Direct text // IEEE International Conference on Power and Energy. – Melaka, Malaysia, 2016. – P. 500–505.

103. Application of Paraconsistent Artificial Neural Network in Statistical Process Control acting on voltage level monitoring in Electrical Power Systems / C. M. da Cruz; A. Rocco; M. C. Mario [et al.]. – Direct text / 18th International Conference on Intelligent System Application to Power Systems. - Porto, Portugal, 2015. - P. 1-6.

104. Carnovale D. J. Design, Development and Testing of a Voltage Ride-Thru Solution for Variable Speed Drives in Oil Field Applications / D. J. Carnovale, J. Biternas, T. J. Dionise, D. D. Shipp. – Direct text // IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference. - Calgary, Canada, 2007. – P. 1-7.

105. Chen Z. Neural network electrical machine faults diagnosis based on multi-population GA / Z. Chen; Y. Zhao; Y. Zheng; R. Lou. – Direct text // IEEE International Joint Conference on Neural Networks. - Hong Kong, China, 2008. - P. 3795-3799.

106. Cirstea M. N. Neural and Fuzzy Logic Control of Drives and Power Systems / M. N. Cirstea, A. Dinu. - Oxford: Newnes, 2002. - 400 p. – Direct text.

107. Classification of Electrical Disturbances in Real Time Using Neural Networks/ I. Monedero, C. León, J. Ropero [et al.]. – Direct text // IEEE Transactions on Power Delivery. - 2007. - V. 22. - No. 3. - P. 1288-1296.

108. Deane J. Modeling the dynamics of nonlinear inductor circuits / J. Deane. – Direct text // IEEE Transactions on Magnetics. – 1994. – Volume 30. – Issue 5. – P. 2795 - 2801.
109. Deepa F. Mitigation of voltage sag and swell using dynamic voltage restorer / F. Deepa, T. Tomson. – Direct text // Annual International Conference on Emerging Research Areas: Magnetics, Machines and Drives. - Kottayam, India, 2014. - P. 1 - 6.
110. Demuth H. MATLAB/Neural Network Toolbox User's Guide. Version 4 / H. Demuth, M. Beale. – Massachusetts: MathWorks, 1999. – 846 p. – Direct text.
111. Dynamic Voltage Restore DVR SET. Operating manual. – Text: electronic // ZIGOR Corporation. – 2018. - URL: <http://www.zigor.com/products/power-quality-back-up/zigor-power-avc/> (date of the application 03.09.2018).
112. Farhadi-Kangarlou M. A comprehensive review of dynamic voltage restorers / M. Farhadi-Kangarlou E. Babaei F. Blaabjerg. – Direct text // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2017. – Vol. 92. – P. 136-155.
113. Ghosh A. Design of a Capacitor-Supported Dynamic Voltage Restorer (DVR) for Unbalanced and Distorted Loads / A. Ghosh, A. K. Jindal, A. Joshi. - Direct text // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2004. – Vol. 19. – № 1. – P. 405–413.
114. Goodfellow I. Deep Learning / I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville. – Cambridge : MIT Press, 2016. - 779 p. – Direct text.
115. Gupta C. P. Probabilistic Assessment of Financial Losses due to Interruptions and Voltage Sags . Part I / C. P. Gupta, J. V. Milanovic. - Direct text // The Methodology. – 2006. – Vol. 21. – Issue 2. – P. 918–924.
116. Hagan M. Neural Network Design / M. Hagan, H. Demuth. - URL: <http://hagan.okstate.edu/NNDesign.pdf> (date of the application 01.10.2017). – Text : electronic.
117. Heine P. A method for estimating the frequency and cost of voltage sags / P. Heine, P. Pohjanheimomethod. – Direct text // IEEE Transactions on Power Systems. – 2002. – V. 17. – Issue 2. – P.290–296.

118. Ital A. V. Compensation of voltage sags and swells by using Dynamic Voltage Restorer (DVR) / A. V. Ital, S. A. Borakhade. – Direct text // International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques. - Tamilnadu, India, 2016. - P. 1515 - 1519.

119. Jiadai L. Detailed Magnetic Equivalent Circuit Based Real-Time Nonlinear Power Transformer Model on FPGA for Electromagnetic Transient Studies / L. Jiadai, D. Venkata. – Direct text // IEEE Transactions on Industrial Electronics. - 2016. - Volume 63. - Issue 2. - P. 1191 - 1202.

120. Losev F. A. Increasing stability of electric centrifugal pumps in submersible electromotor to voltage sags with adaptive undervoltage protection / F. A. Losev, V.V. Sushkov, V.V. Timoshkin, A.S. Martyanov. – Direct text // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. – 2018. - Volume 329. - Issue 10. – P. 40-48.

121. Losev F. A. The polycriteria approach to the analysis of actions for increasing electromotive loading stability of the oil-extracting enterprises / F.A. Losev, V.V. Sushkov. – Direct text // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. – Vol. 330, Is. 8. - 2019. – P. 55-64.

122. Losev F. A. The Stability Assessment of Responsible Oilfield Power Consumers / F.A. Losev, I. A. Prokopchuk, V.V. Sushkov. – Direct text // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). - Omsk, Russia, 2019. - P. 1-4.

123. Martianov A. S. Ride-through solutions: Classification and comparison / A.S. Martianov, V.V. Sushkov. – Direct text // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). – Omsk, Russia, 2016. – P. 1–4.

124. Nazirah W. Modeling baseline electrical energy use of chiller system by artificial neural network / W. Nazirah; W. Md Adnan; N. Y. Dahlan; I. Musirin. – Direct text // IEEE International Conference on Power and Energy. - Melaka, Malaysia, 2016. - P. 500-505.

125. Nowopolski K. Recursive neural network as speed controller for two-sided electrical drive with complex mechanical structure / K. Nowopolski; B. Wicher; D.

Łuczak; P. Siwek. – Direct text // 22nd International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics. - Międzyzdroje, Poland, 2017. - P.576-581.

126. Rauf A. M. An Enhanced Voltage Sag Compensation Scheme for Dynamic Voltage Restorer / A. M. Rauf, V. Khadkikar. – Direct text // IEEE Transactions on Industrial Electronics. - 2015. - Vol. 62. - Issue 5. - P. 2683 - 2692.

127. Singh S. K. Enhancement in power quality using dynamic voltage restorer (DVR) in distribution network / S. K. Singh, S. K. Srivastava. – Direct text // International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems. - Tamilnadu, India, 2017. - P. 1 - 5.

128. Sovann N. A method to determine the input variable for the neural network model of the electrical system / N. Sovann; P. Nallagownden; Z. Baharudin. – Direct text // 5th International Conference on Intelligent and Advanced Systems. - Kuala Lumpur, Malaysia, 2014. - P. 1-6.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. ПАТЕНТ НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 183312

**Устройство защиты асинхронного электродвигателя от
потери устойчивости**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Тюменский индустриальный университет" (ТИУ) (RU)*

Авторы: *Лосев Федор Алексеевич (RU), Сушков Валерий
Валентинович (RU), Тимошкин Вадим Владимирович (RU),
Мартьянов Антон Сергеевич (RU)*

Заявка № 2017146900

Приоритет полезной модели 28 декабря 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 18 сентября 2018 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 28 декабря 2027 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. СВИДЕТЕЛЬСТВА РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019667309

«Оценка устойчивости АД при сложных провалах
напряжения»Правообладатель: *Лосев Федор Алексеевич (RU)*Авторы: *Лосев Федор Алексеевич (RU),
Сушков Валерий Валентинович (RU)*

Заявка № 2019663515

Дата поступления 29 октября 2019 г.

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ 23 декабря 2019 г.Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019667724

«Voltage stability of electromotive load»

Правообладатель: *Лосев Федор Алексеевич (RU)*Авторы: *Лосев Федор Алексеевич (RU),
Сушков Валерий Валентинович (RU)*

Заявка № 2019663487

Дата поступления 29 октября 2019 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 26 декабря 2019 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

ПРИЛОЖЕНИЕ В. АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по образовательной
деятельности ТИУ

Л.К. Габышева

« 18 11 » 2020 г.

АКТ

использования в учебном процессе результатов диссертационной работы Лосева Федора Алексеевича

Результаты диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук Лосева Федора Алексеевича внедрены в практику деятельности Тюменского индустриального университета.

В частности:

1. Материалы по теме диссертации систематически используются на кафедре «Электроэнергетика» Института промышленных технологий и инжиниринга Тюменского индустриального университета при чтении лекций, при выполнении расчетных работ по дисциплине «Устойчивость электроэнергетических систем» для студентов направления подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» направленностей «Автоматика энергосистем» и «Интеллектуальная электроэнергетика».

2. Материалы по теме диссертации систематически используются на кафедре «Электроэнергетика» Института промышленных технологий и инжиниринга Тюменского индустриального университета при чтении лекций, при выполнении расчетных работ по дисциплине «Переходные процессы в электроэнергетических системах» для студентов направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» направленность «Электроснабжение».

И.о. зав. кафедрой «Электроэнергетика»
Тюменского индустриального университета
канд. техн. наук, доцент

Хмара Г.А. Хмара

**ГИПРОТЮМЕННЕФТЕГАЗ**

ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ТЮМЕНСКИЙ ПРОЕКТНЫЙ И НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
НЕФТЯНОЙ И ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ИМ. В.И. МУРАВЛЕНКО»

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук «Повышение устойчивости электротехнических систем объектов нефтяных месторождений с высоковольтными асинхронными электродвигателями»

Лосева Федора Алексеевича

Настоящий акт подтверждает, что ПАО «Гипротюменнефтегаз» внедрило следующие результаты диссертационной работы Лосева Ф.А. в производственную деятельность:

1. Коэффициент запаса устойчивости по напряжению используется для количественной оценки устойчивости проектируемых электротехнических систем нефтяных месторождений.

2. Методика обоснованного выбора технических средств для повышения устойчивости электротехнических систем объектов нефтяных месторождений используется для сравнения эффективности различных мероприятий по повышению устойчивости при проектировании электротехнических систем нефтяных месторождений.

Директор по проектированию

В.Е. Бояркин



625000 г. Тюмень, ул. Республики, 62
тел.: +7(345-2) 25-75-30, 25-75-31
факс: +7(345-2) 46-56-80, 46-36-80

E-mail: gtng@gtng.ru www.gtng.ru
ИНН 7202017289 КПП 720301001
ОГРН 1027200880343 ОКПО 00147329

