

*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

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тюмень, 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тюменский индустриальный университет»

Научный руководитель: **Сушков Валерий Валентинович**  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Ковалев Владимир Захарович**  
доктор технических наук, профессор, профессор  
Института нефти и газа Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Югорский государственный университет» (г. Ханты-Мансийск)

**Рысев Павел Валерьевич**  
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры  
«Электроснабжение промышленных предприятий»  
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный технический университет» (г. Омск)

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина» (г. Москва)

Защита диссертации состоится «26» мая 2021 г. в 15:30 на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.162.02, созданного на базе Омского государственного технического университета и Омского государственного университета путей сообщения, по адресу: 644050, г. Омск, пр. Мира, 11, Главный корпус, П-202.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Омского государственного технического университета и на сайте [www.omgtu.ru](http://www.omgtu.ru).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 644050, г. Омск, пр. Мира, 11, объединенный диссертационный совет Д 999.162.02. Тел.: (3812) 65-24-79, e-mail: [dissov\\_omgtu@omgtu.ru](mailto:dissov_omgtu@omgtu.ru).

Автореферат разослан «\_\_» апреля 2021 года.

Ученый секретарь объединенного диссертационного совета Д 999.162.02  
канд. техн. наук, доцент



О.А. Лысенко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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 электромеханической 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., Мартьянова 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.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, определены объект и методы исследования, представлены основные научные положения, выносимые на защиту, отмечены их научная новизна и практическая ценность, приведены структура работы и объем публикаций по теме.

**Первая глава** посвящена проблеме устойчивости по напряжению ЭТС объектов нефтяных месторождений с ВАД. Анализ данной проблемы включал изучение особенностей электроснабжения нефтяных месторождений, изучение статистики нарушений электроснабжения на нефтяных месторождениях, изучение влияния взаимозависимости источников питания на надежность электроснабжения, обзор литературных источников и технических средств для повышения устойчивости ЭТС.

Для анализа была использована статистика нарушений электроснабжения одного из крупнейших нефтяных месторождений Западной Сибири за 2012-2014 годы. В результате были выявлены общие закономерности, такие как наличие постоянной составляющей (тренда) и циклических колебаний с периодом 12 месяцев, а также возрастание общего числа нарушений электроснабжения в среднем на 50% в год, при этом недоотпуск нефти из-за простоя технологического оборудования увеличивается в среднем на 123% ежегодно, следовательно, необходимо повышать надежность системы электроснабжения.

Проведенный обзор публикаций показал, что взаимозависимость источников питания является важной характеристикой системы электроснабжения нефтяного месторождения. Учет данного параметра позволяет обеспечить бесперебойное электроснабжение потребителей, что ведет к увеличению эффективности предприятия и к повышению надежности технологического процесса в целом. Выявлено, что проблема устойчивости ЭТС при несимметричных провалах напряжения раскрыта недостаточно полно, рассмотрены только некоторые случаи несимметрии и типы электродвигателей. Остается открытым вопрос выбора мероприятий по повышению устойчивости при несимметричных провалах напряжения.

Сравнение технических средств для повышения устойчивости ЭТС показало, что для снижения времени возмущающего воздействия наиболее перспективными представляются устройства быстрого действия автоматического ввода резерва (БАВР), а для повышения запаса энергии ЭТС динамические компенсаторы искажений напряжения (ДКИН). 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.

**Во второй главе** описаны математические модели элементов ЭТС нефтяного месторождения и моделируемые возмущающие воздействия; сформулирована методика оценки устойчивости ЭТС при несимметричных провалах напряжения; выполнена оценка устойчивости ЭТС кустовой насосной станции (КНС) при одноступенчатых и двухступенчатых провалах напряжения.

В работе под термином ЭТС понимается совокупность асинхронных электродвигателей и распределительной сети электрической энергии технологического объекта. Входом ЭТС будем считать вводы обмотки высшего напряжения понижающего трансформатора подстанции. Исходя из этого, математическая модель ЭТС должна включать описания следующих элементов: энергосистемы, трансформатора, кабельной и воздушной линии электропередачи, асинхронных

электродвигателей. Для учета несимметричных провалов напряжения был использован метод симметричных составляющих.

Для оценки устойчивости ЭТС, как правило, применяют одноступенчатые провалы напряжения, которые формируются следующим образом: эквивалентная ЭДС энергосистемы 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.

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 ЭТС. При этом провал напряжения на шинах потребителя будет состоять из нескольких отрезков с разными значениями остаточного напряжения. В работе такие возмущения формировались следующим образом: в начале возмущения эквивалентная ЭДС энергосистемы 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 1, далее подобные провалы напряжения будем называть двухступенчатыми.

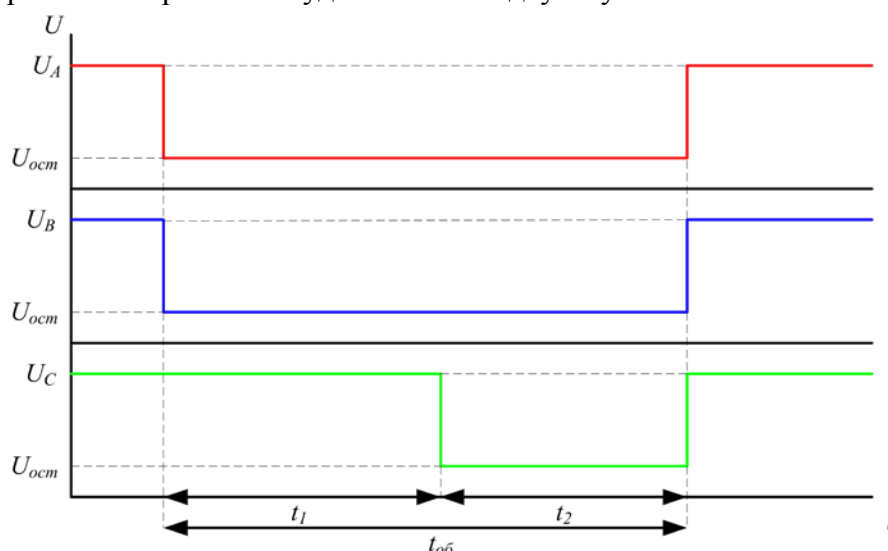


Рисунок 1 – Моделируемое фазное напряжение при двухступенчатом провале

Для оценки влияния несимметричных провалов напряжения на устойчивость ЭТС объектов нефтяных месторождений с ВАД необходимо определить:

1. Границу статической устойчивости.
2. Границу динамической устойчивости (ГДУ).
3. Коэффициент устойчивости по напряжению:

$$k = \frac{S_{уст}}{S_{общ}}, \quad (1)$$

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.



Оценка устойчивости была проведена для типовой КНС, включающей семь асинхронных двигателей типа АРМ мощностью 315 кВт напряжением 6 кВ, один из которых резервный. В расчетах была принята одинаковая нагрузка для всех электродвигателей. Питание узла нагрузки осуществляется от трансформаторов ТМН-2500/35, двигатели подключены с помощью кабеля АПВнг(А)-LS 3х25-6 длиной 250 метров.

На входе ЭТС КНС моделировались несимметричные одноступенчатые провалы напряжения. Результаты расчетов, см. рисунок 2, показали, что в ЭТС КНС при несимметричных возмущающих воздействиях увеличение напряжения обратной последовательности на 10 % приводит к увеличению напряжения статической устойчивости прямой последовательности в среднем на 3,5 %, кроме того, уменьшается допустимая длительность провала напряжения по условию сохранения устойчивости в среднем на 8,6 % и, соответственно, уменьшается коэффициент устойчивости по напряжению в среднем на 4,3 %.

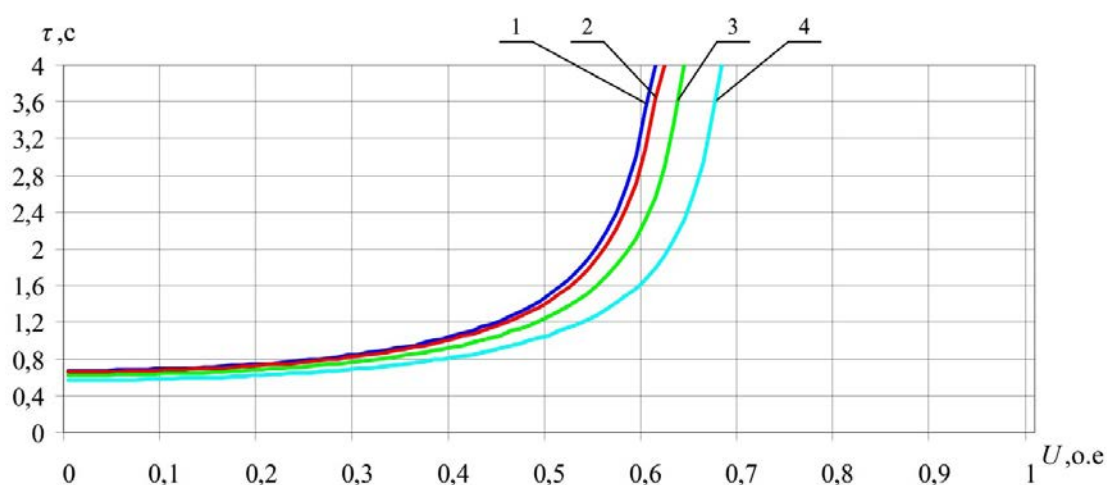


Рисунок 2 - ГДУ рассматриваемой ЭТС КНС: 1 - при симметричном провале напряжения, 2 - при напряжении обратной последовательности 0,1 о.е., 3 - при напряжении обратной последовательности 0,2 о.е., 4 - при напряжении обратной последовательности 0,3 о.е.

В следующем опыте было выполнено моделирование двухступенчатых провалов для рассматриваемой ЭТС КНС с различными значениями остаточного напряжения. На рисунке 3 представлены зависимости допустимой длительности второй ступени провала напряжения по условию сохранения устойчивости ЭТС от длительности его первой ступени. На рисунке 4 представлены зависимости допустимой длительности двухступенчатого провала напряжения от длительности его первой ступени.

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  $U_{ост}=0$  – к уменьшению второй ступени на 9,7% и к увеличению общей длительности на 0,3%.

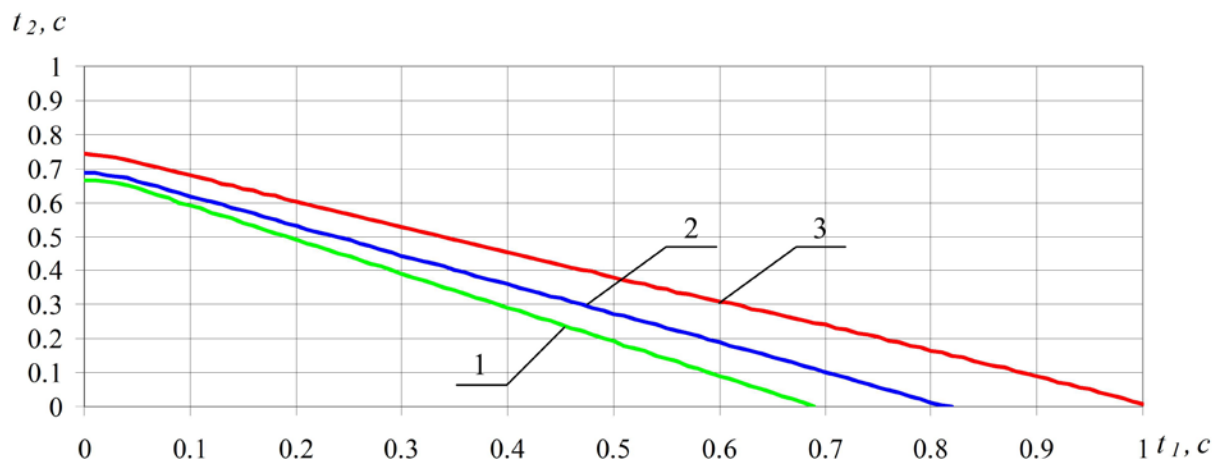


Рисунок 3 - Графики зависимостей допустимой длительности второй ступени провала напряжения  $t_2$  от длительности первой ступени провала  $t_1$ : 1 – при  $U_{ост}=0$ ; 2 – при  $U_{ост}=0,1$  о.е.; 3 – при  $U_{ост}=0,2$  о.е.

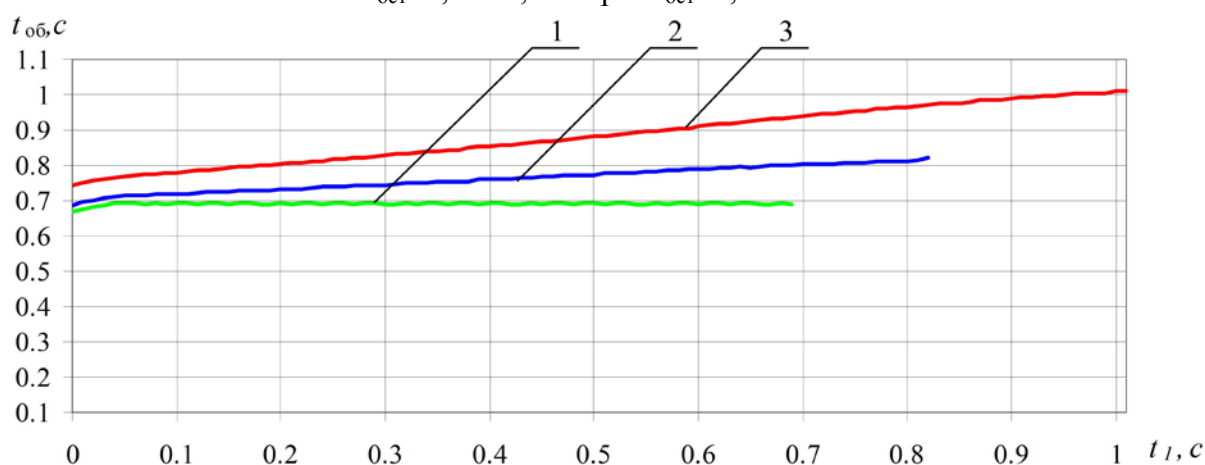


Рисунок 4 - Графики зависимостей допустимой длительности двухступенчатого провала напряжения  $t_{об}$  от длительности первой ступени провала  $t_1$ : 1 – при  $U_{ост}=0$ ; 2 – при  $U_{ост}=0,1$  о.е.; 3 – при  $U_{ост}=0,2$  о.е.

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:

$$t_2 = \frac{t_3 \cdot (t_1' - t_1)}{t_1'} \quad (2)$$

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) 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 5. Анализ полученных значений показал, что погрешность предложенного выражения (2) 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 может быть использовано для определения допустимой длительности второй ступени провала напряжения от длительности его первой ступени по условию сохранения устойчивости по значениям запасов устойчивости ЭТС с ВАД при двухфазном и трехфазном провалах напряжения.

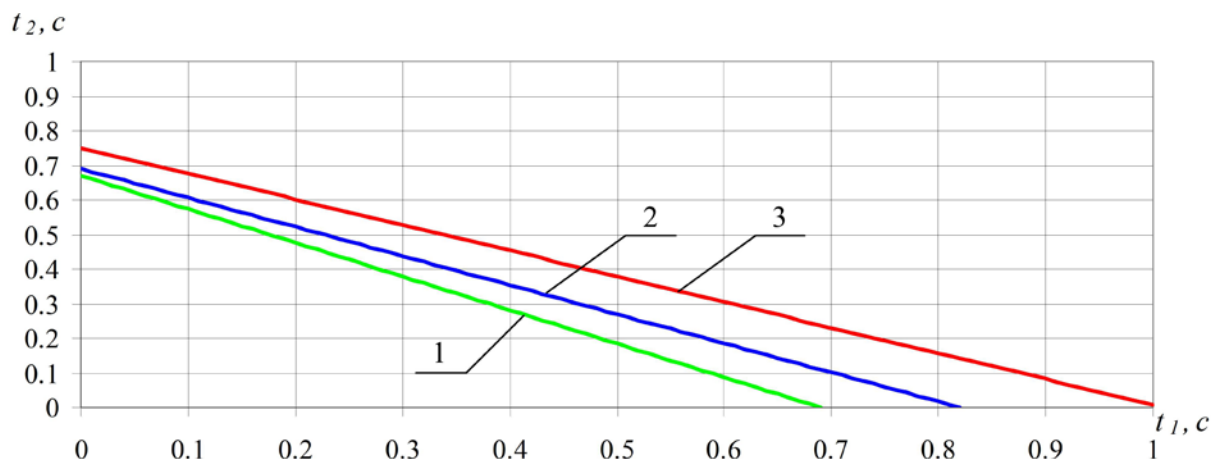


Рисунок 5 - Графики зависимостей допустимой длительности второй ступени провала напряжения  $t_2$  от длительности первой ступени провала  $t_1$ , полученные по предложенному выражению: 1 – при  $U_{ост}=0$ ; 2 – при  $U_{ост}=0,1$  о.е.; 3 – при  $U_{ост}=0,2$  о.е.

**В третьей главе** разработана методика обоснованного выбора технических средств для повышения устойчивости ЭТС объектов нефтяных месторождений с учетом коэффициента зависимости источников питания; предложен коэффициент запаса устойчивости по напряжению, учитывающий степень взаимозависимости источников питания.

Основная идея методики выбора технических средств для повышения устойчивости ЭТС с ВАД заключается в объединении технических, технологических и экономических факторов, что позволит максимально полно учитывать влияние устройств на устойчивость.

Методика выбора состоит из следующих этапов:

1. Рассчитывается ГДУ ЭТС с учетом несимметричных провалов напряжения.
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.
3. Определяется вероятное количество провалов напряжения  $N_0$ , приводящих к нарушению устойчивости ЭТС согласно статистическим данным.
4. Определяется вероятное годовое количество отключений потребителей  $N_n$ , вызванных провалами и прерываниями напряжения с заданным распределением их количества в координатах глубины и длительности.
5. Рассчитывается коэффициент зависимости ИП по известным методикам.
6. Учитывается влияние степени взаимозависимости ИП на вероятное годовое количество отключений потребителей из-за потери устойчивости ЭТС.

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:

$$N = \begin{cases} N_0 K_3, & \text{если } N_n = 0 \text{ или } K_3 > 0,5 \\ \frac{N_n}{1 - K_3}, & \text{если } K_3 \leq 0,5 \end{cases}, \quad (3)$$

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;  $K_3$  – 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.

Экономический эффект в данном случае будет равен величине снижения ущерба при проведении мероприятий по повышению устойчивости ЭТС. Расчет экономических ущербов основан на технологическом подходе оценки последствий, связанных с остановом нефтепромыслового оборудования. 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  $\mathcal{E}_{i3}$ :

$$\mathcal{E}_i = \mathcal{E}_{i1} + \mathcal{E}_{i2} + \mathcal{E}_{i3}. \quad (4)$$

Первая составляющая экономического эффекта равна:

$$\mathcal{E}_{i1} = Y_{i6} - Y_{i1}, \quad (5)$$

где  $Y_{i6}$  – ущерб от остановки производства при базовом варианте электроснабжения;  $Y_{i1}$  – ущерб от остановки производства при предлагаемом варианте электроснабжения с устройствами по повышению устойчивости.

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

$$Y_i = Q(C - C_n), \quad (6)$$

где  $Q$  – потери продукции за год, м<sup>3</sup>;  $C$  – оптовая цена нефти, руб/м<sup>3</sup>;  $C_n$  – себестоимость нефти, руб/м<sup>3</sup>

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:

$$\mathcal{E}_{i2} = Z_{i6} - Z_{i1}, \quad (7)$$

где  $Z_{i6}$  – затраты на электроэнергию в форсированных режимах работы оборудования при базовом варианте электроснабжения;  $Z_{i1}$  – затраты на электроэнергию в форсированных режимах работы оборудования при предлагаемом варианте электроснабжения с повышением устойчивости ЭТС.

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. 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:

$$Z = Z_i - Z_6, \quad (8)$$

где  $Z_6$  – капитальные вложения при базовом варианте электроснабжения;  $Z_i$  – 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:

$$K_3 = \frac{Э_t}{Z}, \quad (9)$$

где  $Z$  – капитальные вложения в мероприятия по повышению устойчивости;  $Э_t$  – экономический эффект от повышения устойчивости, достигаемый в течение 1 года.

Установлено, что 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.

Разработка коэффициента запаса устойчивости по напряжению была основана на методе площадей. ГДУ разбивает плоскость глубины и длительности провала напряжения на зоны устойчивой и неустойчивой работы, см. рисунок 6.

Во-первых, были рассмотрены ограничения по оси времени. Для потребителей первой категории по надежности электроснабжения было принято предельное время равным времени срабатывания АВР.

Во-вторых, ось абсцисс была разбита на три отрезка: первый - от 1 до  $E_{cy}$ , второй - от  $E_{cy}$  до  $E_{остх}$  и третий - от  $E_{остх}$  до 0, соответственно, получим разбиение области устойчивой работы на три части, см. рисунок 8: первая  $S_{cy}$  - площадь статической устойчивости, вторая  $S_x$  - искомая площадь, третья  $S_{ГДУ}$  - площадь под ГДУ.

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

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

$$P_{cy} = \frac{S_{cy}}{S_{общ}}. \quad (10)$$

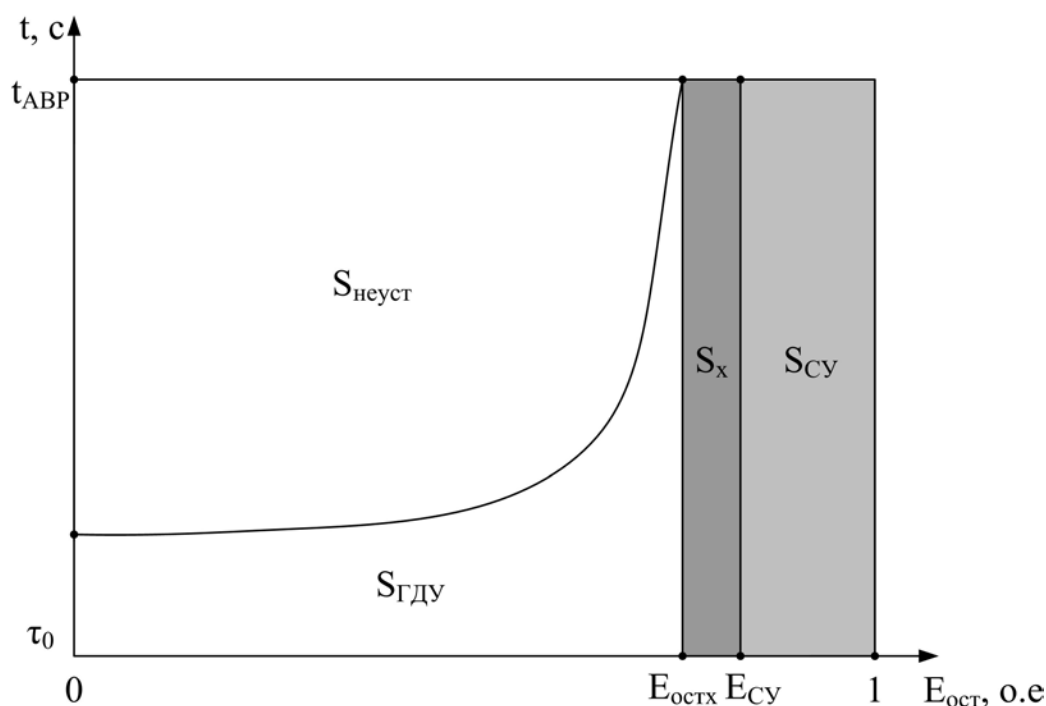


Рисунок 6 - Области устойчивой и неустойчивой работы ЭТС

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

$$P_{АВР} = 1 - K_3, \quad (11)$$

где  $K_3$  - коэффициент зависимости источников питания.

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

$$P_x = \frac{S_x}{S_{общ}} \cdot (1 - K_3). \quad (12)$$

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

$$P_{ГДУ} = \frac{S_{ГДУ}}{S_{общ}}. \quad (13)$$

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

$$P_{уст} = P_{су} + P_{ГДУ} + P_x. \quad (14)$$

Тогда коэффициент запаса устойчивости по напряжению, учитывающий показатели устойчивости ЭТС и степень взаимозависимости источников питания, равен:

$$K_{зу} = P_{уст} = \frac{S_{cy} + S_{уст} + S_x \cdot (1 - K_3)}{S_{общ}}. \quad (15)$$

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

**В четвертой главе** предложено устройство для защиты асинхронных электродвигателей от потери устойчивости на основе искусственной нейронной сети, проверена его работоспособность с помощью имитационной модели; выполнена оценка эффективности применения ДКИН и БАВР для повышения устойчивости ЭТС КНС и куста скважин с помощью разработанной методики.

Применяемые в нефтепромысловых электрических сетях защиты минимального напряжения не могут обеспечить требуемого запаса устойчивости по напряжению. Для устранения недостатков типовых защит, таких как наличие зоны ложных срабатываний и жестко заданная характеристика срабатывания, необходимо разработать устройство, которое позволит изменять свою характеристику срабатывания автоматически в режиме реального времени с учетом текущих параметров работы электродвигателей. Этим требованиям отвечают методы искусственного интеллекта, наиболее перспективным из которых является искусственная нейронная сеть.

Для реализации этого было предложено устройство, которое содержит датчики фазных напряжений 1-3, датчик частоты вращения вала электродвигателя 4 и датчик фазного тока 5. К датчикам напряжения последовательно подключен блок преобразования координат 6, выходы которого подключены к входам блока продолжительности провала 8. К датчику тока последовательно подключен блок расчета коэффициента загрузки 7. Выходы датчика частоты вращения вала электродвигателя 4, блока расчета коэффициента загрузки 7 и блока преобразования координат 6 подключены к входам искусственной нейронной сети 9. Выходы искусственной нейронной сети 9 и блока продолжительности провала 8 подключены к блоку сравнения 10, сигнал с которого идет на выключатель, см. рисунок 7.

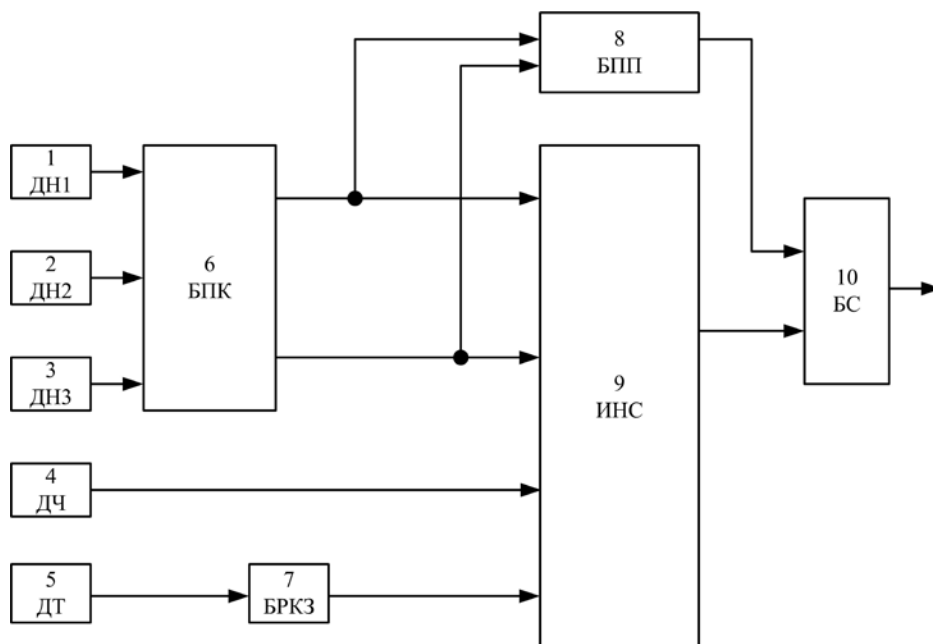


Рисунок 7 - Структурная схема разработанного устройства

Устройство работает следующим образом: с выходов датчиков фазных напряжений 1-3 сигнал поступает на блок преобразования координат 6 из естественной трехфазной системы в двухфазную; сигнал с выхода датчика тока 5 поступает на блок расчета коэффициента загрузки 7; сигналы с датчика частоты вращения вала электродвигателя 4, блока расчета коэффициента загрузки 7 и блока преобразования координат 6 подаются на искусственную нейронную сеть 9, которая определяет допустимую длительность провала питающего напряжения, используя выявленные при обучении зависимости между входными и выходными данными; сигнал с выхода блока преобразования координат 6 подается на вход блока продолжительности провала 8, который начинает отсчет времени при снижении питающего напряжения. Сигналы с выхода искусственной нейронной сети 9 и блока продолжительности провала 8 подаются на блок сравнения 10. Если текущая длительность провала питающего напряжения превышает допустимое значение, полученное с помощью искусственной нейронной сети 9, то подается сигнал на отключение электродвигателя; если значение питающего напряжения восстановится до номинального уровня за время меньше допустимой длительности провала, то защита возвращается в исходное состояние.

Затем была произведена апробация разработанной методики выбора технических средств для повышения устойчивости по совокупности технических, технологических и экономических факторов. Для сравнения были выбраны ДКИН и БАВР.

В качестве электрической сети внешнего электроснабжения использовалась схема питания потребителей первой категории по надежности электроснабжения, включающая подстанции напряжением 110/35/6 кВ и 35/6 кВ, коэффициент зависимости источников для которой равен 0,29. Ожидаемое количество провалов и прерываний напряжения на шинах ЭТС было принято равным 4, распределение провалов было принято согласно ГОСТ 32144. Схема внешнего электроснабжения и распределение провалов напряжения по длительности и глубине было принято неизменным для всех расчетов. Рассматривалась ЭТС КНС из главы 2 и ЭТС куста скважин, включающего погружные асинхронные электродвигатели мощностью 90 кВт номинальным напряжением 1800 В – ПЭД-90 117М, подключенные с помощью кабеля КПБП сечением 25 мм<sup>2</sup> длиной 1200 м и трансформатора ТМПН мощностью 160 кВА.

ДКИН обеспечивает компенсацию провалов напряжения глубиной до 60% длительностью до 30 секунд, при этом данные устройства отличаются по степени компенсации провалов напряжения от 20% до 60% от номинального значения. Для определения наиболее эффективного ДКИН по степени компенсации были проведены расчеты для ЭТС КНС. Они показали, что при установке ДКИН 20% коэффициент экономической эффективности капитальных вложений равен 0,91, при ДКИН 30% - 0,64, при ДКИН 40% - 0,49. Данная зависимость связана со значительным ростом капитальных вложений при увеличении глубины компенсации ДКИН, вызывающей незначительное снижение ущерба. Аналогичная картина наблюдается при оценке эффективности использования ДКИН для повышения устойчивости ЭТС куста скважин. Таким образом, наиболее эффективной степенью компенсации ДКИН является 20%.

Далее были рассмотрены варианты установки БАВР и ДКИН 20% в ЭТС КНС и кустов скважин при различных производительностях технологических объектов, результаты приведены в таблице 1.



Таблица 1 - 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 м3/ч	БАВР ДКИН 20%	0,8 0,72	0,29 0,29	0,58 0,59
	Q=720 м3/ч	БАВР ДКИН 20%	0,8 0,72	0,29 0,29	1,74 0,91
	Q=1890 м3/ч	БАВР ДКИН 20%	0,8 0,72	0,29 0,29	2,23 0,95
Кусты скважин	Q=0,5 т/ч	БАВР ДКИН 20%	0,56 0,53	0,29 0,29	0,01 0,03
	Q=2,5 т/ч	БАВР ДКИН 20%	0,56 0,53	0,29 0,29	0,07 0,1
	Q=5 т/ч	БАВР ДКИН 20%	0,56 0,53	0,29 0,29	0,15 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 (граничное значение определенное ранее). 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.

## 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 оценке 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 основных работ, опубликованных по теме диссертации Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России**

1. 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 // Омский научный вестник. - 2018. - № 4 (160). - С. 94-98.

2. Лосев Ф.А. Оценка устойчивости объектов нефтяных месторождений при различных несимметричных провалах напряжения / Ф.А. Лосев, В.В. Сушков // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2020. – № 2. – С. 5–12.

### **Статьи в изданиях, входящих в базы данных Web of Science и Scopus**

3. 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 // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. - Volume 329, Issue 10. – 2018. - Pages 40-48.

4. 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. // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. - Volume 330, Issue 8. - 2019. - Pages 55-64.

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

### **Патенты и свидетельства**

6. 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., Мартьянов А.С., Сушков В.В., Тимошкин В.В. ; патентообладатель ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет».

7. 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.

8. 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.

### **Статьи в других печатных изданиях**

9. Лосев Ф.А. Исследование частоты возникновения нарушений электроснабжения на объектах нефтедобычи / Ф.А. Лосев // Новые технологии – нефтегазовому региону: материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Т.2. - Тюмень: ТИУ, - 2016. - С. 325-328.

10. Лосев Ф.А. The problem of the interruption in oil and gas complexes power supply system / Ф.А. Лосев // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно - энергетическом комплексе: материалы Международной научно - практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов. Т.2. - Тюмень: ТИУ, 2016. - С. 347-348.

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

12. Лосев Ф.А. Оценка влияния сечения питающего кабеля на устойчивость погружного электродвигателя. / Ф.А. Лосев, А.С. Мартьянов. // Новые технологии - нефтегазовому региону: материалы Международной научно-практической

конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Т.5. - Тюмень: ТИУ, 2017. - С. 229-232.

13. Лосев Ф.А. Определения количества отключений по статистике динамических снижений напряжения и кривым динамической устойчивости. / Ф.А. Лосев, А.С. Мартьянов. // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно - энергетическом комплексе: материалы Международной научно - практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов. Т.2. - Тюмень: ТИУ, 2018. - С. 282-285.

14. 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 студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов. Т.2. - Тюмень: ТИУ, 2018. - С. 309-312.

15. Лосев Ф.А. Разработка методики и алгоритма оценки эффективности мероприятий по повышению устойчивости электротехнических систем нефтяных месторождений / Ф.А. Лосев // 73-я Международная молодежная научная конференция «Нефть и газ - 2019». Тезисы докладов. Т.3. - Москва: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, 2019. - С. 458-459.

Подписано в печать 15.03.2021. Формат 60x90 1/16. Усл. печ. л. 1,25.  
Тираж 100 экз. Заказ № 2097.

Библиотечно-издательский комплекс  
федерального государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования  
"Тюменский индустриальный университет".  
625000, Тюмень, ул. Володарского, 38.

Типография библиотечно-издательского комплекса.  
625039, Тюмень, ул. Киевская, 52.