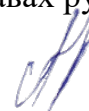


На правах рукописи



Аникин Василий Владимирович

**МЕТОДИКА И СРЕДСТВА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ
ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ПОСЛЕРЕМОНТНЫХ РЕГУЛИРУЕМЫХ
ПОГРУЖНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**

Специальности: 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты
05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат диссертации
на соискание учёной степени кандидата технических наук

Томск – 2020 г.

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Югорский государственный университет» и в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования ВО «Омский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Хамитов Рустам Нуриманович

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Ковалев Владимир Захарович

Официальные оппоненты: **Смирнов Геннадий Васильевич**, доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, директор НИИ электронного технологического оборудования и систем связи (НИИ ЭТОСС), г. Томск

Полищук Владимир Иосифович, доктор технических наук, профессор, декан энергетического факультета Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

Защита состоится: «16» декабря 2020 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета МДС. ТПУ.01 на базе ФГАОУ ВО НИ ТПУ по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, д. 7, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО НИ ТПУ по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, д. 7, ауд. 217 и на сайте <https://dis.tpu.ru>

Автореферат разослан: «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
МДС. ТПУ.01, канд. техн. наук, доцент



Кладиев С.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Асинхронные погружные электродвигатели (ПЭД) электротехнических комплексов (ЭТК) установок электроцентробежных насосов (УЭЦН) реализуют основной способ добычи нефти в России из глубинных скважин. Специфика конструкции (малый диаметральный размер, большая длина, многопакетный ротор, статор с протяжной трехфазной обмоткой) и особенности электромагнитного состояния (насыщение магнитопровода, явление вытеснения тока в стержнях короткозамкнутых обмоток ротора, действие зубцовых гармоник магнитного поля) делают асинхронный ПЭД сложным для исследования и моделирования объектом.

С точки зрения уменьшения энергопотребления для добычи нефти в осложненных условиях существующие скалярные системы управления (СУ) электроприводов УЭЦН существенно уступают векторным СУ УЭЦН. За счёт внедрения векторных СУ при ориентации системы на вектор потокосцепления ротора удаётся получить ряд существенных преимуществ: 1. Снижение энергопотребления на тонну добываемой нефти. 2. Увеличение ресурса погружного оборудования УЭЦН, особенно кабеля и ПЭД за счет формирования оптимальных фазовых траекторий всех переменных состояния в режимах непрерывной работы насоса. 3. Повышение функциональных возможностей УЭЦН по безопасному расклиниванию погружных насосов за счет внедрения специальных «щадящих» алгоритмов раскачивания, с ограничением предельных значений крутящего момента и его производных. Широкому внедрению таких систем на отечественных предприятиях, занимающихся разработкой и внедрением электроприводов для нефтегазовой промышленности, мешает теоретическая непроработанность вопросов предварительной идентификации параметров погружных асинхронных двигателей.

Информация о состоянии ПЭД особо актуальна для сервисных организаций, обслуживающих ЭТК УЭЦН нефтедобывающих предприятий, для предэксплуатационной оценки технического состояния послеремонтных асинхронных ПЭД. Развиваемый подход можно реализовать без наличия сложного испытательного оборудования для исследования ПЭД, он делает возможным определение энергетических показателей, пусковых, рабочих, механических характеристик ПЭД в составе ЭТК УЭЦН непосредственно на нефтяных месторождениях. Данная информация позволяет обеспечить оптимальные режимы эксплуатации послеремонтных асинхронных ПЭД ЭТК УЭЦН. В связи с этим тематика диссертационного исследования является актуальной, в первую очередь, для сервисных организаций, обслуживающих ЭТК УЭЦН нефтедобывающих предприятий.

Степень разработанности проблемы. В теории электрических машин известны различные методы идентификации параметров асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, которые рассмотрены в работах Беспалова В.Я., Виноградова А.Б., Вольдека А.И., Гарганеева А.Г., Казовского Е.Я., Каширских В.Г., Копылова И.П., Ковалева В.З., Ковалева Ю.З., Рогозина Г.Г., Ромашихина Ю.В., Сивокобыленко В.Ф. и др.

Значительный вклад в разработку, изучение и совершенствование бездатчиковых асинхронных электроприводов с наблюдателями состояния и идентификаторами параметров внесли: Браславский И.Я., Букреев В.Г., Виноградов А.Б., Глазырин А.С., Зюзев А.М., Каширских В.Г., Панкратов В.В., Bimal K. Bose и др.

Следует отметить, что существующая реализация методов, основанных на пуске ПЭД под нагрузкой на территории электроцехов ремонтных предприятий и на площадках нефтедобывающих скважин сложна, не технологична и не всегда возможна, т. к. требует сопряжения ПЭД со специальными нагрузочными устройствами, либо наличия специализированных приемно-испытательных стендов, имеющих только, как правило, на предприятиях-изготовителях ПЭД.

Для решения проблемы предлагается использовать известный в электромеханике метод, основанный на регистрации при неподвижном роторе переходного процесса затухания тока обмотки статора. Методика базируется на фундаментальных работах Казовского Е.Я., Вольдека А.И., Копылова И.П., Сивокобыленко В.Ф., не требует сопряжения с механической нагрузкой ПЭД, учитывает насыщение его магнитной системы и вытеснение тока в стержнях обмотки ро-

тора, имеет перспективу использования при спуске ПЭД в скважину, может быть реализован с помощью компактной переносной установки или средствами частотного преобразователя.

Однозначная связь параметров схем замещения ПЭД с кривой затухания тока статора делает возможной идентификацию параметров ПЭД без трудоемкого перехода к частотным характеристикам электродвигателя. Следует отметить, что в научной и технической литературе данная актуальная задача и разработка технических средств её реализации применительно к асинхронным ПЭД в составе ЭТК УЭЦН достаточного рассмотрения не получила.

Объектом исследования является регулируемый асинхронный ПЭД в составе ЭТК УЭЦН добычи нефти.

Предмет исследования – методики, технические средства предварительной идентификации параметров моделей послеремонтных асинхронных ПЭД, энергетические параметры и рабочие характеристики ЭТК УЭЦН, содержащих послеремонтные асинхронные ПЭД.

Цель работы. Совершенствование методики и создание аппаратно-программных средств предварительной идентификации параметров настраиваемых моделей, регулируемых асинхронных ПЭД на основе регрессионного анализа кривых затухания токов статора, определение энергетических параметров и построение статических и динамических характеристик ЭТК УЭЦН, имеющих в своем составе послеремонтные ПЭД.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

1. Провести анализ существующих методов определения параметров моделей в виде схем замещения асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, выявить достоинства и недостатки каждого метода для оценки возможности его использования в условиях сервисных предприятий на месторождениях добычи нефти.

2. Провести обоснование оптимальной схемы однофазного включения ПЭД для проведения опыта затухания тока на основе анализа различных схем однофазного включения ПЭД по схеме неполной звезды при неподвижном роторе.

3. Разработать и теоретически обосновать способ определения параметров асинхронных электродвигателей по экспериментальным данным опыта затухания тока в обмотке статора.

4. Разработать методику предварительной идентификации параметров Т-образных схем замещения ПЭД, основанную на аппроксимации переходной кривой затухания тока обмотки статора суммой трех экспонент, и на интегральном преобразовании кривой затухания тока обмотки статора.

5. Разработать и создать аппаратно-программное техническое средство для регистрации кривой затухания тока обмотки статора.

6. Провести испытание технического средства для регистрации кривой затухания тока обмотки статора в виде аппаратно-программного комплекса на образцах послеремонтных ПЭД в условиях сервисных предприятий.

7. Разработать методику и алгоритм работы аппаратно-программного комплекса для регистрации переходных характеристик на основе методики предварительной идентификации параметров модели ПЭД в виде Т-образной схемы замещения.

8. Разработать структуру, алгоритм настройки и отладки подблока предварительной идентификации параметров ПЭД для системы управления ЭТК УЭЦН добычи нефти.

9. Провести испытания и сертификацию аппаратно-программного комплекса в государственном аккредитованном центре стандартизации и метрологии.

10. Исследовать влияние вариаций внешних температурных воздействий на качество функционирования ЭТК УЭЦН с учётом выявленных разброса параметров послеремонтных ПЭД, входящих в состав ЭТК УЭЦН.

Научная новизна работы:

1. Теоретически обоснован способ идентификации параметров модели послеремонтных асинхронных погружных электродвигателей по опытным данным затухания тока в обмотке статора, отличающийся тем, что содержит ряд последовательных процедур, осуществляемых по мгновенным значениям оцифрованной переходной характеристики затухающего тока статора,

аппроксимированной выражением в виде суммы трех экспонент, соответствующих пологому, крутому и сверхпереходному участкам характеристики, процедуру определения интеграла от переходного тока статора, позволяющих определить параметры модели Т-образной схемы замещения послеремонтного ПЭД.

2. Методика предварительной идентификации параметров модели послеремонтного ПЭД в виде Т-образной схемы замещения с одноконтурной цепью ротора, отличающаяся тем, что для определения параметров элементов схемы используются мгновенные значения тока и интеграл переходной характеристики, полученные из опыта затухания тока статора ПЭД.

3. Алгоритм предварительной идентификации параметров настраиваемой модели послеремонтного ПЭД штатными средствами преобразователя частоты УЭЦН, отличающийся тем, что включены циклическая программируемая процедура устранения намагниченности магнитной системы исследуемого двигателя и процедура управления силовым мостом инвертора напряжения при регистрации тока затухания обмотки статора послеремонтного ПЭД.

4. Способ учёта влияния вариаций внешних температурных воздействий на качество функционирования ЭТК УЭЦН, реализуемый на основе аппаратно-программного комплекса для регистрации кривых затухания тока статора послеремонтных ПЭД, отличающийся тем, что добавлены модуль формирования мгновенных значений тока статора, модуль определения первой производной тока затухания, модуль изменения скольжения, модуль тестовых каталожных данных ПЭД, модуль определения энергетических параметров и построения рабочих характеристик ЭТК УЭЦН.

Практическая ценность работы:

1. Разработана и реализована инженерная методика предварительной идентификации параметров Т-образной схемы замещения ПЭД с одноконтурной цепью ротора, основанная на дифференцировании начального участка кривой затухания тока статора. Методика реализована в программной части мобильной установки регистрации переходных характеристик в электротехнических объектах РПХ-20. Новизна и техническая реализуемость предложенного способа подтверждена патентом на изобретение № 2623834 РФ «Способ определения электромагнитных параметров асинхронных электродвигателей» от 09. 02. 2016 г. и свидетельством о государственной регистрации программы на ЭВМ № 2012661265 «Программное обеспечение для расчета параметров схемы замещения асинхронного погружного электродвигателя» от 27. 11. 2012 г.

2. Разработана и реализована инженерная методика идентификации параметров Т-образной схемы замещения ПЭД с одноконтурной цепью ротора, основанная на интегральном преобразовании кривой затухания тока статора. Методика реализована на основе свидетельства о регистрации программы в ОФЕРНИО № 23747 от 27.08.2018 г.

3. Создан аппаратно-программный комплекс в виде переносной мобильной установки регистрации переходных характеристик в электротехнических объектах (РПХ-20), позволяющий получать энергетические параметры и рабочие характеристики ЭТК УЭЦН добычи нефти. Работоспособность и метрологические характеристики РПХ-20 подтверждены аттестатом № 0573 ФБУ «Омский Центр Стандартизации и Метрологии» от 09. 11. 2014 г. 4.

4. Структура, алгоритм настройки и отладки подблока идентификации параметров ПЭД для системы управления УЭЦН добычи нефти, позволяющие реализовать их в составе штатных станций управления УЭЦН добычи нефти («Триол АК-06», «Электон-05», «Борец-04», «Centrilift GCS Electrospeed» и др.).

5. Разработан программный модуль для расчета энергетических параметров и построения рабочих характеристик ЭТК УЭЦН при вариациях внешних температурных воздействий. Программный модуль апробирован при испытаниях послеремонтных асинхронных ПЭД в составе ЭТК УЭЦН и внедрен на сервисном предприятии «Ойлпамп сервис», г. Мегион, ХМАО-Югра (Акт использования результатов диссертационной работы от 11.02.2019).

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались основные положения теоретических основ электротехники, теории электрических машин, электропривода пе-

ременного тока. Для создания программного обеспечения использовались пакеты прикладных программ: «MathCad», «MatLab», «Mathematica», «ACDLab», «Multisim».

Достоверность результатов подтверждается корректным применением основных теоретических выводов, используемых для доказательства научных результатов, использованием тестовых характеристик затухания тока, согласованием теоретических результатов с экспериментальными данными, полученными на мобильной установке РПХ-20, погрешность определения параметров схемы замещения с одноконтурной цепью ротора относительно известных значений – не превысила значения 6,5%. Разработанный программно-аппаратный комплекс в виде мобильной переносной установки для регистрации переходных характеристик в электротехнических объектах РПХ-20 был испытан на сертифицированном и поверенном оборудовании ФБУ «Омский Центр Стандартизации и Метрологии».

Реализация и внедрение результатов работы. Разработанный программно-аппаратный комплекс в виде мобильной переносной установки регистрации переходных характеристик в ЭТК РПХ-20, а также программное обеспечение комплекса для получения эксплуатационных параметров и рабочих характеристик асинхронных ПЭД при различных нагрузках в составе ЭТК УЭЦН добычи нефти внедрены на сервисном предприятии «Ойлпамп сервис» (г. Мегион, ХМАО) для испытаний послеремонтных асинхронных ПЭД. Разработанные материалы по идентификации параметров схем замещения асинхронного двигателя внедрены в учебный процесс на кафедре «Электрической техники» ОмГТУ при подготовке студентов по направлениям подготовки 13.03.02, 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Личный вклад соискателя. Постановка научных задач и их решение, разработка программно-аппаратного комплекса, программ, научные положения, представляемые на защите, основные выводы и рекомендации диссертации, результаты испытаний и их анализ принадлежат автору. Личный вклад в научных работах, опубликованных в соавторстве, составляет более 75 %.

Апробация работы. Основные положения докладывались и обсуждались на конференциях: VIII Всероссийской научно-технической конференции «Россия молодая: передовые технологии – в промышленность» (г. Омск, 2019 г.),

VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Актуальные вопросы энергетики» (Омск, 2019 г.),

XIII Всероссийской конференции молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности (Газ, нефть, энергетика)» (г. Москва, РГГУ, 2019 г.),

IV Региональной научно-практической конференции «Ученые Омска – региону» (г. Омск, 2019),

Национальной с международным участием научно-практической конференции студентов, аспирантов, ученых и специалистов, посвященной 20-летию создания кафедры электроэнергетики «Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе» (г. Тюмень, 2019),

Международной научно-технической конференции «Динамика систем механизмов и машин» (г. Омск, 2014 г., 2015 г., 2016 г.).

Материалы диссертационной работы докладывались в полном объеме на научных семинарах кафедры «Электрическая техника» ОмГТУ (г. Омск, 2018 г., 2019 г.), на научных семинарах кафедры «Энергетика» Югорского государственного университета (г. Ханты-Мансийск, 2015 г., 2019 г.).

Соответствие диссертации паспортам научной специальности. Изучаемая область диссертационного исследования соответствует паспорту специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты, а именно: п.5 «Разработка подходов, методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих проектирование, надежность, контроль и диагностику функционирования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов в процессе эксплуатации, в составе рабочих комплексов», и специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы, а именно: п.1 «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, ими-

тационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем» и п. 4 «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 24 работы, из которых 8 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, 6 статей в изданиях, входящих в базы Scopus и Web of Science, 1 патент РФ на изобретение, 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Работа изложена на 182 страницах основного текста, содержит 20 таблиц, 53 рисунка, библиографический список из 162 наименований.

В первой главе рассмотрено современное состояние проблемы определения параметров модели погружных асинхронных электродвигателей. Во второй главе изложена идентификация параметров схем замещения ПЭД по переходной характеристике затухания тока обмотки статора. Третья глава посвящена разработке аппаратных средств идентификации параметров схем замещения послеремонтных погружных асинхронных электродвигателей и программного обеспечения управления аппаратной частью. Четвёртая глава посвящена разработке программного обеспечения методик идентификации параметров схем замещения послеремонтных погружных асинхронных электродвигателей и определение энергетических параметров и характеристик ЭТК УЭЦН при вариациях внешних воздействий.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность диссертации, приведены цель и задачи работы. Дается аннотация содержания работы по рассматриваемым разделам. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Сформулирована научная новизна и практическая ценность исследований.

В первой главе рассматривается структура УЭЦН, детально описывается конструкция ПЭД и обусловленные ею особенности электромагнитного состояния.

Проводится выбор наиболее удобного метода определения параметров схем замещения ПЭД в условиях сервисных и ремонтных организаций и непосредственно на кустовые площадки нефтедобычи. Необходимость в предэксплуатационной идентификации возникает при частотном и векторном регулировании скорости вращения и электромагнитного момента ПЭД для организации надежных и оптимальных режимов эксплуатации УЭЦН.

Описывается электромеханическая система с регулируемым асинхронным двигателем с подблоком идентификации параметров и блоком оценивания переменных состояния ПЭД рис. 1

Обзор методов определения параметров схем замещения погружных асинхронных электродвигателей приводит к следующим выводам. Методы идентификации, связанные с вращением погружного электродвигателя на поверхности, требует для своей реализации использования совместимого с конструкцией ПЭД оборудования, заменяющего реальную нагрузку на валу в виде ЭЦН, либо наличия дорогостоящих специализированных стендов для приемо-сдаточных испытаний, которыми оснащаются заводы изготовители ПЭД.

Показана возможность усовершенствования (развития) метода путем разработки методик параметрической идентификации непосредственно по кривой затухания $i_l(t)$ тока обмотки статора, не требующих трудоемкого и сложного дополнительного перехода к частотным характеристикам. Отмечается, что практическая реализация методик потребует анализа их точности, разработки программного обеспечения, определения рациональных областей применения, выявления требований к характеристикам средств измерений и регистрации переходных характеристик затухания постоянного тока обмотки статора, а также требований к их структуре и возможности реализации в виде мобильных установок, либо средствами ПЧ УЭЦН.

Проведен анализ схем соединения обмоток статора ПЭД при однополярном питании ПЭД постоянным током. Установлено, что результирующее потокосцепление ПЭД при однофазном питании по схеме неполной звезды получается аналогичным как питанию трехфазных обмоток

статора, соединенных звездой, синусоидальным током, действующее значение которого равно постоянному току.

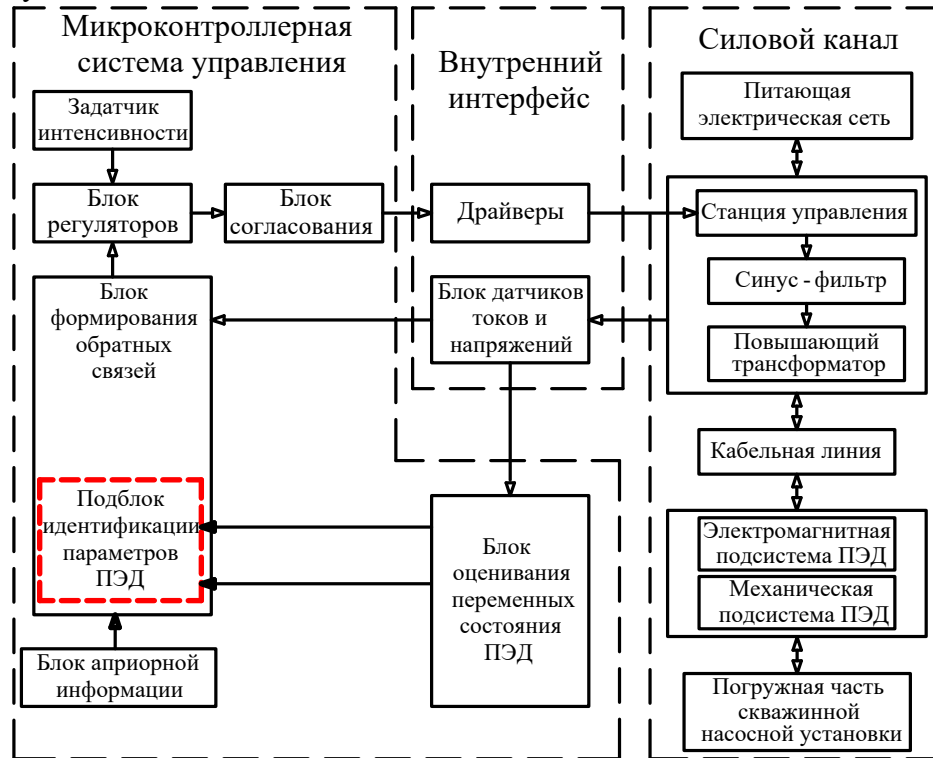


Рисунок 1. Электротехническая система с регулируемым погружным асинхронным двигателем, блоком идентификации параметров и блоком оценивания переменных состояния ПЭД

Во второй главе разрабатываются методики идентификации параметров схем замещения ПЭД по характеристике затухания постоянного тока обмотки статора. В качестве исходных использованы общепринятые допущения, математические уравнения равновесия пространственных векторов напряжений

$$\begin{aligned}\vec{U}_1 &= (r_1 + 2/3 \cdot r_{en}) \cdot \vec{I}_1 + \frac{d\vec{\Psi}_1}{dt} + j\omega_k \cdot \vec{\Psi}_1; \\ 0 &= r_2 \cdot \vec{I}_2 + \frac{d\vec{\Psi}_2}{dt} + j(\omega_k - \omega_2) \cdot \vec{\Psi}_2; \\ 0 &= r_0 \cdot \vec{I}_{r0} + \frac{d\vec{\Psi}_m}{dt},\end{aligned}\quad (1)$$

для контуров статора и ротора ПЭД (рис. 2) в ортогональной системе координат (х,у), вращающейся с произвольной угловой скоростью ω_K , уравнение (2) электромагнитного момента

$$M = \frac{3}{2} \cdot Z_p \cdot \frac{L_m}{L_R} \cdot \vec{\Psi}_2 \times \vec{I}_1, \quad (2)$$

уравнение (3) движения

$$\frac{J}{Z_p} \cdot \frac{d\omega_2}{dt} = M - M_c, \quad (3)$$

и условия (4),

$$\omega_2 = 0; M = 0; \frac{d\omega_2}{dt} = 0; \omega_K = 0 \quad (4)$$

Характерные для схемы на рис. 2 и позволяющие записать уравнения (1) в неподвижной системе координат

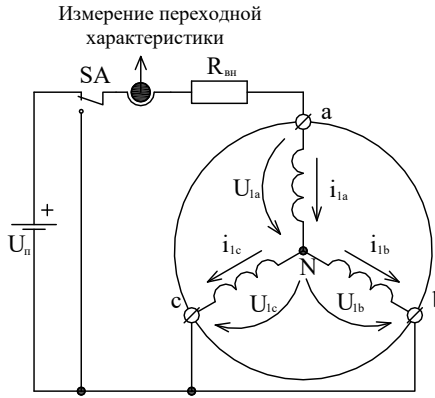


Рисунок 2. Схема регистрации переходной характеристики затухания тока статора

$$\begin{aligned}
 U_1 &= (r_1 + 2/3 \cdot r_{BH}) \cdot I_1 + \frac{d\Psi_1}{dt} + j\omega_k \cdot \Psi_1; \\
 0 &= r_2 \cdot I_2 + \frac{d\Psi_2}{dt} + j(\omega_k - \omega_2) \cdot \Psi_2; \\
 0 &= r_0 \cdot I_{r0} + \frac{d\Psi_m}{dt},
 \end{aligned} \tag{5}$$

Представить результирующие пространственные вектора $\bar{U}_1, \bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{I}_{rm}$ в виде проекций на координатные оси $\alpha, j\beta$:

$$\begin{aligned}
 u_{1a} &= (r_1 + 2/3 \cdot r_{BH}) \cdot i_{1a} + L_1 \cdot \frac{di_{1a}}{dt} + L_m \cdot \frac{di_{ma}}{dt} \\
 L_m \cdot \frac{di_{ma}}{dt} &= -r_2 \cdot i_{2a} - L_2 \cdot \frac{di_{2a}}{dt} \\
 0 &= r_{r0} \cdot i_{(ro)a} + L_m \cdot \frac{di_{ma}}{dt} \\
 i_\beta &= 0; u_\beta = 0; \frac{di_\beta}{dt} = 0.
 \end{aligned} \tag{6}$$

и выразить мгновенные значения напряжений и токов в координатной системе $\alpha, j\beta$, через напряжения и токи фаз асинхронного электродвигателя

$$\begin{aligned}
 u_{1a} &= (r_1 + 2/3 \cdot r_{BH}) \cdot i_{1a} + L_1 \cdot \frac{di_{1a}}{dt} + L_m \cdot \frac{di_{ma}}{dt} \\
 L_m \cdot \frac{di_{ma}}{dt} &= -r_2 \cdot i_{2a} - L_2 \cdot \frac{di_{2a}}{dt} \\
 0 &= r_{r0} \cdot i_{(ro)\beta} + L_m \cdot \frac{di_{m\beta}}{dt}
 \end{aligned} \tag{7}$$

Система дифференциальных уравнений (7) является математической моделью ПЭД при однофазном подключении обмоток статора по схеме неполной звезды

$$L_m = 1.5 \cdot L_{\phi m} \tag{8}$$

потокосцепления $\bar{\psi}_1, \bar{\psi}_2, \bar{\psi}_m$ определяются совокупным действием токов статора и ротора

$$\begin{aligned}
 \bar{\psi}_1 &= L_1 \cdot \bar{I}_1 + L_m \cdot \bar{I}_m \\
 \bar{\psi}_2 &= L_m \cdot \bar{I}_m + L_2 \cdot \bar{I}_2 \\
 I_m &= I_1 + I_{21} + I_{rm} \\
 \bar{\psi}_m &= \bar{I}_m \cdot L_m
 \end{aligned} \tag{9}$$

Методика идентификации параметров Т-образной схемы замещения ПЭД с одноконтурной цепью ротора.

Классическая Т-образная схема ПЭД с одноконтурной цепью ротора является достаточно корректной для практического решения задач эксплуатации ПЭД в составе УЭЦН.

На основании операторной схемы замещения фазы «а» рис. 3, вытекающей из схемы на рис. 2, и экспериментальной аппроксимированной характеристики затухания, представленной суммой трех экспонент получены изображения по Лапласу расчетной $i_{расч.1a}(p)$

$$i_{1\text{эксн.1a}}(t) = \sum_{k=1}^3 I_{mk} e^{\lambda_k t} \quad (10)$$

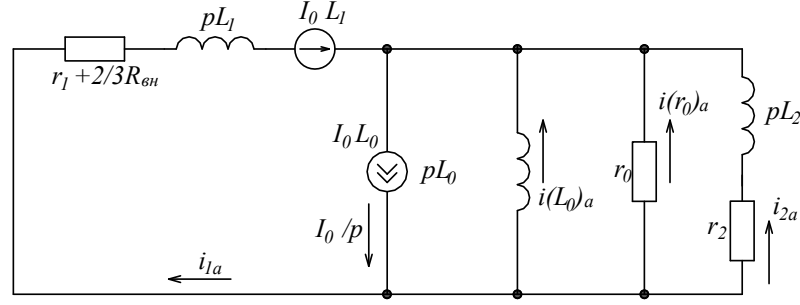


Рисунок 3. Электрическая расчетная схема фазы «а» ПЭД с одноконтурной цепью ротора

и экспериментальной $i_{\text{эксн.1a}}(p)$ характеристик затухания тока обмотки статор ПЭД. Применением к равенству $i_{\text{расч.1a}}(p) = i_{\text{эксн.1a}}(p)$ метода неопределенных коэффициентов выведена система уравнений

$$\begin{aligned} I_{m1}(\lambda_2 + \lambda_3) + I_{m2}(\lambda_1 + \lambda_3) + I_{m3}(\lambda_1 + \lambda_2) &= I_n(p_0 + p_2 + p_{01} + p_{02}); \\ I_{m1}\lambda_2\lambda_3 + I_{m2}\lambda_1\lambda_3 + I_{m3}\lambda_1\lambda_2 &= I_n(p_2p_0 + p_2p_{01}); \\ \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 &= p_0 + p_1 + p_2 + p_{01} + p_{02}; \\ \lambda_1\lambda_2 + \lambda_2\lambda_3 + \lambda_1\lambda_3 &= p_0p_1 + p_1p_2 + p_0p_2 + p_1p_{02} + p_{01}p_2; \\ \lambda_1\lambda_2\lambda_3 &= p_0p_1p_2; \\ I_{m1} + I_{m2} + I_{m3} &= I_0. \end{aligned} \quad (11)$$

где $p_0 = r_0/L_0$; $p_1 = (r_1 + 2/3 r_{BH})/L_1$; $p_2 = r_2/L_2$; $p_{01} = r_0/L_1$; $p_{02} = r_0/L_2$ и найдено аналитическое решение системы относительно параметров эквивалентной схемы ПЭД с одноконтурной цепью ротора.

$$\begin{aligned} \tau_1 &= -I_0 \cdot (I_{m1}\lambda_1 + I_{m2}\lambda_2 + I_{m3}\lambda_3)^{-1}; \\ L_1 &= \left(r_1 + \frac{2}{3} \cdot r_{BH} \right) \cdot \tau_1; \\ L_0 &= -\frac{r_1 + \frac{2}{3} \cdot r_{BH}}{I_0} \cdot \left(-\tau_1 I_0 + \frac{I_{m1}}{\lambda_1} + \frac{I_{m2}}{\lambda_2} + \frac{I_{m3}}{\lambda_3} \right); \\ \tau_0 &= -\frac{L_0}{L_1} \cdot \left[\tau_1 b_1 - \left(\frac{L_0}{L_1} + 1 \right) \tau_1^2 b_0 + \frac{1}{\tau_1} - b_2 \right]^{-1}; \\ r_0 &= \frac{L_0}{\tau_0}; \\ L_2 &= L_0 \cdot \left(\tau_0 b_2 - \frac{L_0}{L_1} - \frac{\tau_0}{\tau_1} - 1 - \tau_1 \tau_0^2 b_0 \right)^{-1}; \\ \tau_2 &= (\tau_1 \tau_0 b_0)^{-1}; \\ r_2 &= \frac{L_2}{\tau_2}. \end{aligned} \quad (12)$$

где $b_0 = -\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3$; $b_1 = -\lambda_1 \lambda_2 + \lambda_2 \lambda_3 + \lambda_1 \lambda_3$; $b_2 = -\lambda_1 - \lambda_2 - \lambda_3$.

Разработана методика прямой идентификации схем замещения ПЭД основанная на дифференцировании начального участка кривой затухания тока обмотки статора ПЭД, для определения индуктивности рассеяния L_l и других параметров схем замещения ПЭД через производную тока статора $i'(0)$. Последняя выражена в (12) в виде соотношений $(I_{m1}\lambda_1 + I_{m2}\lambda_2 + I_{m3}\lambda_3)$, но может быть также вычислена по первому отсчету оцифрованной характеристики затухания $i_{1\text{эксн}}(t)$ как отношение

$$i'_1(0) = \frac{i_{\text{эксн}}(t_1) - I_0}{t_1} \quad (13)$$

Анализ переходной характеристики затухания рис.4 позволяет выделить пологую (хвостовую) часть, крутой (миллисекундный) участок и «сверхпереходную» быстро затухающую начальную область.

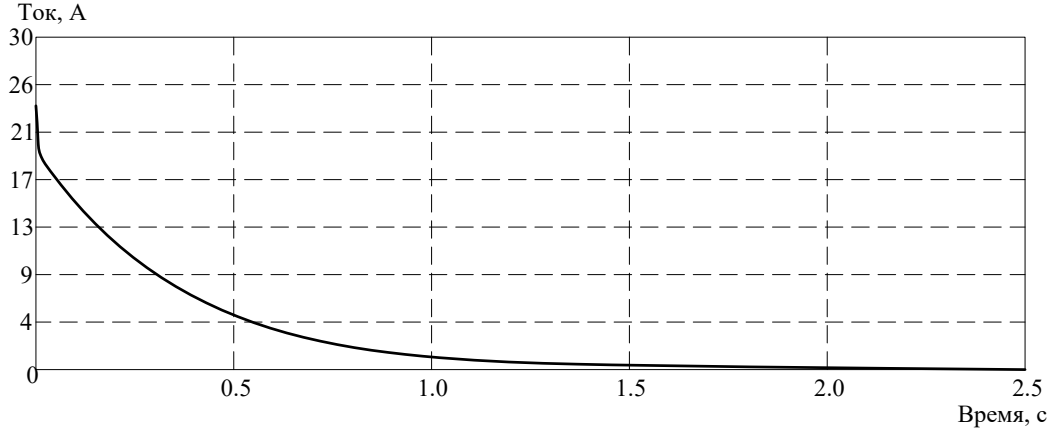


Рисунок 4. Характеристика затухания тока статора ПЭД 90-117-1300

Эти особенности переходной характеристики затухания тока обмотки статора ПЭД позволяют составить эквивалентные схемы замещения ПЭД (рис.5) с заторможенным ротором в отдельности для каждого из участков характеристики.

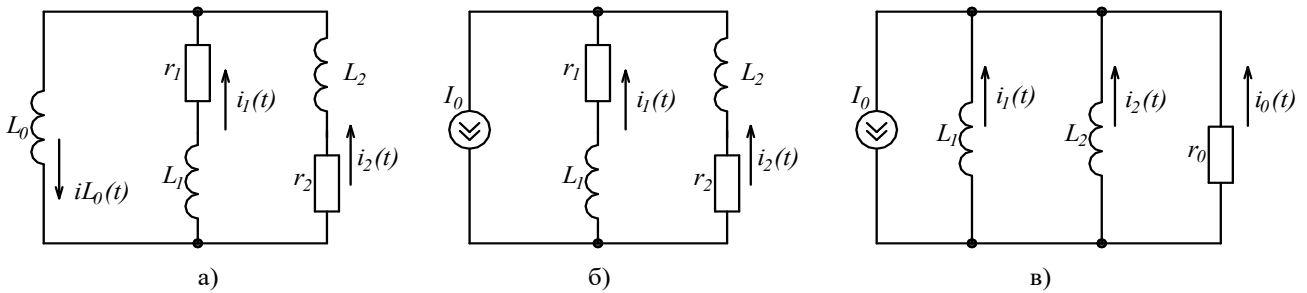


Рисунок 5. Эквивалентные схемы ПЭД: а) на пологом участке кривой затухания тока статора, б) на крутом участке кривой затухания тока статора, в) на сверхпереходном участке кривой затухания тока статора в области малых времен

Эквивалентные схемы (рис. 5, а, б) построены на базе соотношений $r_0 \gg r_1$, $r_1 \gg R_{\text{вн}}$, $r_0 \gg r_2$, $L_0 \gg L_1$ и $L_0 \gg L_2$.

Основанием для эквивалентной схемы (рис. 5, в) являются неравенства $L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} \ll L_2 \cdot \frac{di_2}{dt}$ справедливые на сверхпереходном (десятки микросекунд) участке характеристики $i_{\text{эксн}}(t)$ и соотношения $L_0 \gg L_1$ и $L_0 \gg L_2$.

Постоянная времени T_1 аппроксимирует пологий участок характеристики $i_{1\text{эксн}}(t)$, который согласно (рис. 5а), обусловлен процессами гашения энергии магнитного поля ПЭД на сопротивлениях r_1 и r_2 и выражается с хорошей степенью приближения через эквивалентные параметры электродвигателя:

$$T_1 = \frac{(r_1 + r_2) \cdot \int_0^\infty i_{\text{эксн.}}(t) dt}{I_0 \cdot r_2} \quad (14)$$

Эквивалентная схема ПЭД (рис. 5б) для крутого участка переходной характеристики затухания тока статора ПЭД позволяет выразить постоянную времени T_2 аппроксимирующей экспоненты следующим образом:

$$T_2 = \frac{L_1 + L_2}{r_1 + r_2} \quad (15)$$

Постоянная времени экспоненты T_3 (рис. 5в) связана с электромагнитными процессами проникновения магнитного поля рассеяния обмотки статора ПЭД в заторможенный ротор и представляется выражением:

$$T_3 = \frac{L_1 \cdot L_2}{r_0 \cdot (L_1 + L_2)} \quad (16)$$

Таким образом возможно выразить параметры Т-образной схемы замещения ПЭД с одно-контурной цепью ротора через постоянные времени T_1 , T_2 , T_3 и интеграл от оцифрованной переходной характеристики следующими расчетными соотношениями при известном $r_1 \gg R_{\text{вн}}$.

$$\begin{aligned} L_0 &= \frac{r_1 \cdot \int_0^\infty i_{\text{эксн.}}(t) dt}{I_0} - L_1 \\ r_2 &= \frac{r_1 \cdot \int_0^\infty i_{\text{эксн.}}(t) dt}{I_0 T_1 - \int_0^\infty i_{\text{эксн.}}(t) dt} \\ L_2 + L_1 &= T_2 \cdot (r_1 + r_2) \\ r_0 &= \frac{L_1 \cdot L_2}{T_3 \cdot (L_1 + L_2)}, \end{aligned} \quad (17)$$

где t_1 – момент времени первого цифрового отсчета тока. Методика идентификации, представленная соотношениями (17), основана на первоначальном интегральном преобразовании оцифрованной характеристики затухания тока статора ПЭД, т. е. на операции определения интеграла. Эта операция с высокой точностью реализуется современными измерительными и программными средствами. На данную методику идентификации получен патент на изобретение.

Задачей третьей главы является разработка средств испытаний ПЭД в цеховых условиях ремонтных предприятий и на кустовых площадках скважин. Для этого разработана, испытана в Омском региональном центре стандартизации и метрологии мобильная переносная установка РПХ-20 (рис.6). Установка имеет малое выходное сопротивление, удовлетворяющее условию $r_1 \gg R_{\text{вн}}$ и не влияющее на характеристику затухания тока $i_1(t)$. РПХ-20 позволяет определять параметры схем замещения включая нелинейные режимы, вызванные насыщением магнитной системы погружного асинхронного электродвигателя и эффектом вытеснения тока в глубоко-пазных машинах. Принцип действия установки основан на цифровой регистрации переходной характеристики затухания $i_{1\text{эксн}}(t)$ обмотки статора ПЭД, программном определении параметров схем замещения однозначно связанных с характеристикой $i_{1\text{эксн}}(t)$ и выдаче их в удобной для пользователя форме.

РПХ-20 содержит два контроллера ATmega16 (рис. 6). Контроллер DD2 принимает данные с платы управления и задает режимы силовому модулю на MOSFET транзисторах IRL 2505. Контроллер DD1 обеспечивает необходимые настройки для формирования тока I_0 , а так же индикацию на экране ЖКИ рис.7 тока и напряжения на обмотке статора ПЭД, измеряемых посредством датчиков тока, в выходной цепи РПХ- 20.

Напряжение с АКБ поступает в силовой модуль через блок коммутации реализующий ступенчатую регулировку напряжения при помощи магнитных пускателей, подключая последовательно 1,2 или 3 аккумулятора в цепь.

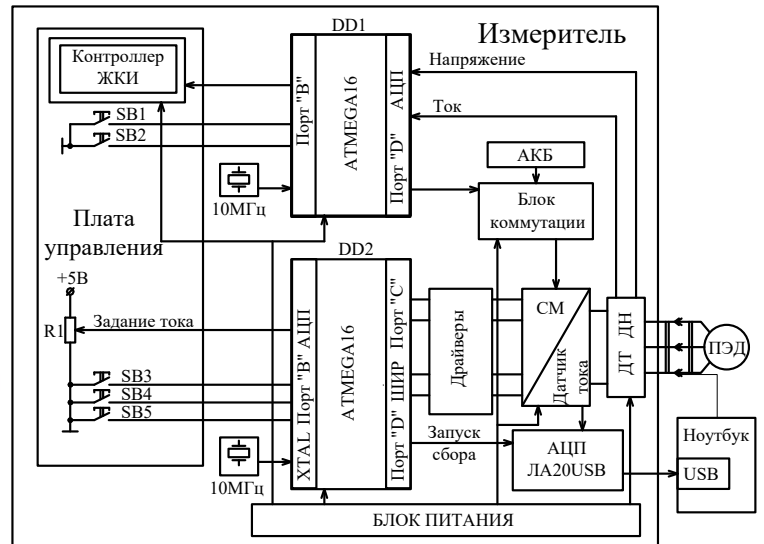


Рисунок 6. Переносная установки идентификации параметров ПЭД с пакетом статора и секцией ротора ПЭД ЭД(Т)63-117-1000

Задание величины тока I_0 производится переменным резистором R_1 . Напряжение с резистора преобразуется в цифровой код АЦП, интегрированным в микроконтроллер DD2 который пропорционально измеренному напряжению изменяет скважность ШИМ сигнала транзисторов нижних ключей для регулирования тока в обмотке испытуемого ПЭД.

При достижении током значения I_0 контроллер DD2 через СМ реализует режим однофазного короткого замыкания в обмотке статора ПЭД. Одновременно запускается сбор данных ЛА-20USB для оцифровки характеристики затухания $i_{1\text{эксп}}(t)$ и сохранения в память ПК.

Четвертая глава посвящена разработке программного обеспечения методик и способа идентификации параметров схем замещения ПЭД, а также экспериментальной оценки эффективности и достоверности.

Разработана программа SHERM_ZAM в пакете MATLAB рис. 7. Обработка экспериментальных и массивов данных для ПЭД «проводится в опциях регрессионного анализа с учетом начальных условий».

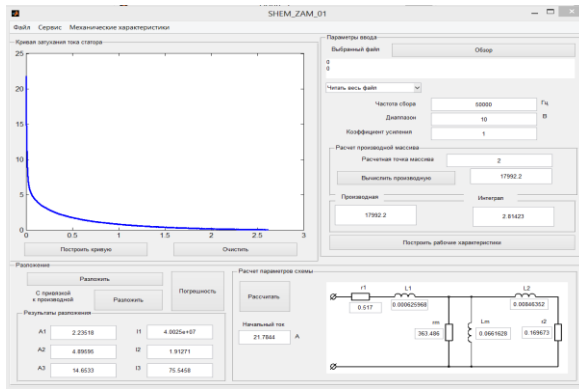


Рисунок 7. Результаты идентификации параметров схемы замещения ПЭД ЭД(Т)12-117-380 в программе SHERM_ZAM* в пакете MATLAB

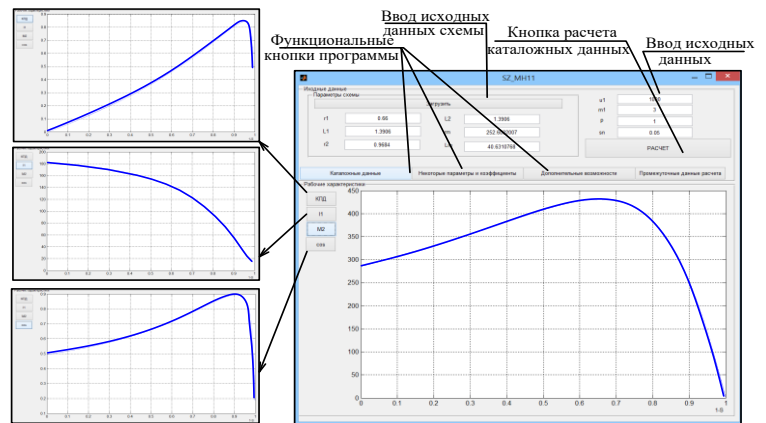


Рисунок 8. Панель управления (интерфейс) программы SZ_MH11

$$I_0 = I_{m1} + I_{m2} + I_{m3}, i_1'(0) = \frac{I_{m1}}{T_1} + \frac{I_{m2}}{T_2} + \frac{I_{m3}}{T_3}, \int_0^\infty i_1(t) dt = I_{m2}T_2 + I_{m3}T_3 \quad (18)$$

Оценка эффективности мобильной переносной установки РПХ-20 и достоверности способа идентификации, основанной на интегральном преобразовании кривой затухания тока обмотки статора ПЭД, проведен эксперимент по идентификации параметров схемы замещения ПЭД ти-

пов ЭД(Т). Результаты представлены в табл. 1, вместе с известными значениями, полученными по каталожным данным.

Таблица 1. Результаты идентификации параметров схем ПЭД по данным эксперимента

Параметры модели ПЭД	r_2 , Ом	L_1 , мГн	L_2 , мГн	r_0 , Ом	L_0 , мГн	I_0 , А	r_1 , Ом
ЭД(Т)12-117-380						10,5	0,517
каталог	1,945	2,937	2,937	323,3	115,2		
эксперимент	2,276	3,041	3,252	343,72	116,1		
погрешность $\delta, \%$	12,0	3,5	10,7	6,3	0,8		
1ЭД(Т)45-117-1000						18	0,66
каталог	2,519	5,071	5,071	695,2	176,9		
эксперимент	2,725	5,287	5,253	684,2	176,3		
погрешность $\delta, \%$	8,2	4,3	3,6	1,6	0,3		
1ЭД(Т)63-117-1000						24	0,45
каталог	2,107	4,284	4,284	550,9	132,6		
эксперимент	2,360	4,097	4,594	578,1	135,5		
погрешность $\delta, \%$	11,0	4,4	7,2	4,9	2,2		

Разработанные в диссертации методики идентификации параметров схем замещения ПЭД, позволяют определять эксплуатационные параметры и характеристики электродвигателя. Определение параметров и характеристик ПЭД через идентификационные параметры Т-образной схемы замещения в зависимости от скольжения можно свести к последовательному применению следующих расчетных соотношений.

Приведенное падение напряжения в обмотке ротора ПЭД

$$U_2 = I_1 \cdot \frac{(r_m + jx_m) \cdot \left(\frac{r_2}{s} + jx_2 \right)}{(r_m + jx_m) + \left(\frac{r_2}{s} + jx_2 \right)}. \quad (19)$$

где I_1 – ток в обмотке статора ПЭД $I_1 = U_1 / (\sqrt{3} \cdot z)$

Приведенный ток в обмотке ротора ПЭД

$$I_2 = \frac{\dot{U}_2}{\frac{r_2}{s} + jx_2}. \quad (20)$$

Выходная мощность ПЭД

$$P_2 = m_1 \cdot |I_2|^2 \cdot \frac{r_2}{s} \cdot (1 - s). \quad (21)$$

где m_1 – число фаз

Вращающий момент на валу ПЭД

$$M_2 = \frac{m_1 \cdot p}{100 \cdot \pi} \cdot |I_2|^2 \cdot \frac{r_2}{s} \cdot (1 - s). \quad (22)$$

где p – число пар полюсов

Потери мощности в обмотке ротора ПЭД

$$\Delta P_2 = m_1 \cdot |I_2|^2 \cdot r_2. \quad (23)$$

Ток в ветви намагничивания ПЭД

$$I_m = \frac{U_2}{r_m + jx_m}. \quad (24)$$

Суммарные потери мощности в ПЭД

$$\Delta P = m_1 \times |I_1|^2 \times r_1 + x_1 \times |I_m|^2 \times r_m + m_1 \times |I_2|^2 \times r_2 \quad (25)$$

Коэффициент полезного действия ПЭД

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} \quad (26)$$

Реактивная мощность ПЭД

$$Q = m_1 \times |I_1|^2 \times x_1 + m_1 \times |I_m|^2 \times x_m + m_1 \times |I_2|^2 \times x_2 \quad (27)$$

Коэффициент мощности ПЭД

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (28)$$

где $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ Полная мощность ПЭД

Подстановка в формулы 19...28 величин скольжений в $s=0-I$ позволяет получить значения эксплуатационных параметров ПЭД. Разработана программа SZ_MH11 для определения параметров ПЭД по результатам испытаний на установке РПХ-20, реализованная в системе Matlab.

Исходные данные (рис. 7, 8) для программы SZ_MH11 – параметры Т - образной схемы замещения ПЭД заносятся пользователем в соответствующие окна панели управления.

Результаты по определению каталожных параметров ПЭД типов 1ЭД(Т)45-117-1000, 1ЭД(Т)63-117-1000 на основе идентификации параметров их схем замещения приведены в табл. 2 вместе с известными каталожными параметрами этих ПЭД.

Программа SZ_MH11 показывает достаточную степень точности определения эксплуатационных параметров, и определяет целесообразность ее применения на предприятиях по ремонту погружного электрооборудования для определения измененного технического состояния ПЭД после ремонтного обслуживания и контроля его эксплуатационных параметров.

Таблица 2. Результаты определения эксплуатационных параметров ПЭД

Параметры ПЭД	Энергетические параметры погружных асинхронных электродвигателей							
	I_1 , А	P_2 , кВт	η , %	$\cos \varphi$ о.е.	n_2 , об/мин	M_n/M_n , о.е.	$M_{кр}/M_n$, о.е.	I_n/I_n , о.е.
ЭД(Т) 12-117-380, $I_0=10.5A$								
Каталожные данные	26	12	84	0,85	2850	-	-	-
Полученные данные	25,31	11,122	84,432	0,858	2850	2,250	3,100	5,783
Расхождение, %	-2,65	-7,33	0,51	0,94	0	-	-	-
ЭД(Т) 45-117-1000, $I_0=18A$								
Каталожные данные	36,5	45	85	0,86	2850	-	-	-
Полученные данные	34,14	43,926	83,538	0,858	2850	2,023	3,073	5,399
Расхождение, %	-6,46	-2,38	-1,72	-0,23	0	-	-	-
ЭД(Т) 63-117-1000, $I_0=24A$								
Каталожные данные	51,5	63	85	0,85	2844	-	-	-
Полученные данные	46,53	65,203	85,500	0,864	2844	2,082	3,045	5,577
Расхождение, %	-9,67	3,38	0,58	1,64	0	-	-	-

Для реализации в микроконтроллерной системе управления подблока идентификации (рис.1) обеспечивающий корректную работу блока формирования обратных связей, разработан алгоритм рис. 9, рис. 10, позволяющий определить параметры схемы замещения асинхронного двигателя.

Исходными данными для алгоритма является массив данных затухания постоянного тока статорной обмотки, включенной по схеме неполной звезды (рис. 2). После загрузки массива с платы сбора данных или из внешнего файла производится настройка параметров сбора: частота дискретизации, диапазон и коэффициент усиления инструментального усилителя АЦП. После обработки массива данных затухания тока производится визуализация экспериментальной кривой затухания.

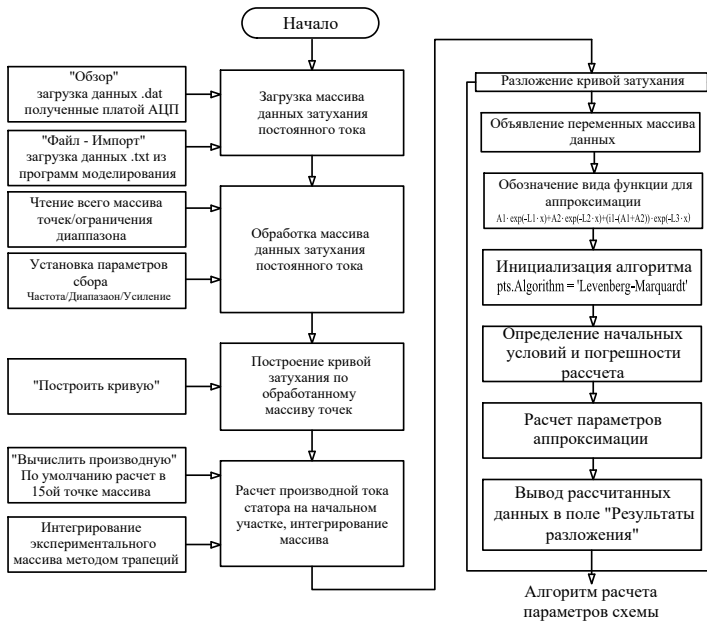


Рисунок 9. Алгоритм обработки массива экспериментального массива данных

Для расчета исходных данных, процедуры определения параметров Т-образной схемы, полученный массив интегрируется и вычисляется производная на начальном участке. В конце происходит разложение обработанной кривой затухания. После объявления переменных массива, определяется вид аппроксимирующей функции (29)

$$i(t) = A_1 \cdot e^{-\lambda_1 t} + A_2 \cdot e^{-\lambda_2 t} + A_3 \cdot e^{-\lambda_3 t} \quad (29)$$

Для определения показателей аппроксимирующей функции используется алгоритм Левенберга-Марквардта, в котором после определения начальных условий и расчета параметров аппроксимации выводятся полученные результаты для расчета параметров схемы (рис. 10).

В алгоритм расчета параметров схемы загружаются данные из обработки экспериментального массива:

- интеграл экспериментальной характеристики затухания
- производная на начальном участке
- коэффициенты аппроксимирующей функции (29).

При расчете параметров схемы замещения за известное значение принимается активное сопротивление r_1 обмотки статора, которое вводится в методику после чего вычисляются остальные параметры Т-образной схемы замещения L_1 , L_0 , r_0 , r_2 , L_2 .

Результаты исследования влияния вариаций внешних температурных воздействий на качество функционирования ЭТК УЭЦН с применением оценок параметров настраиваемых моделей послеремонтных ПЭД

ПЭД выполняет главную роль в преобразовании электрической энергии в составе ЭТК УЭЦН (рис. 11). В качестве электротехнического комплекса (ЭТК УЭЦН) принимаются совокупность следующих взаимодействующих и взаимовлияющих элементов: КТУ, КЛ, ПЭД, СУ УЭЦН, ТМС. Основное влияние на качество функционирования ЭТК УЭЦН, как комплекса энергопреобразования, оказывают энергетические характеристики ПЭД, которые существенно варьируются из-за особенностей существующих ремонтных технологий и нелинейной зависимости от температуры окружающей среды и характера нагрузки. Потери в ЭТК УЭЦН в основном определяются потерями мощности, энергии и напряжения в кабельных линиях, трансформаторах, ПЭД, и могут достигать до 60% от общего электропотребления. Большая часть потерь приходится на ПЭД.

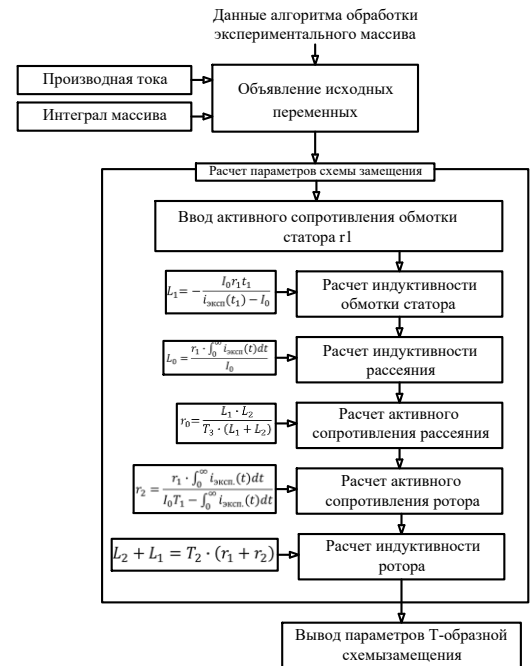


Рисунок 10. Алгоритм обработки массива экспериментального массива данных

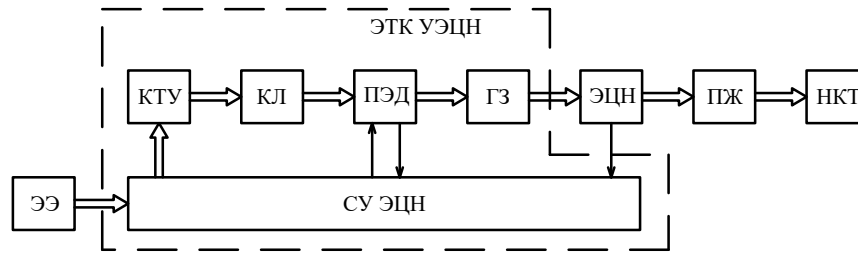


Рисунок 11. Структурная схема электротехнического комплекса с УЭЦН: силовая часть станции управления (СУ УЭЦН), комплектное трансформаторное устройство (КТУ), погружная кабельная линия (КЛ), погружной асинхронный электрический двигатель (ПЭД), гидрозащита (ГЗ – протектор), электроцентробежный насос (ЭЦН), пластовая жидкость (ПЖ), колонна насосно-компрессорных труб (НКТ)

На рисунках 12, 13 приведены схемы замещения КЛ и КТУ при исследовании влияния на качество функционирования ЭТК УЭЦН идентифицированных отклонений параметров после-ремонтных ПЭД при вариациях внешних температурных воздействий.

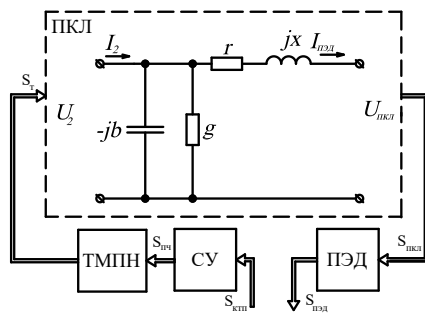


Рисунок 12. Схема замещения погружной кабельной линии в составе ЭТК УЭЦН для промышленной частоты 50 Гц

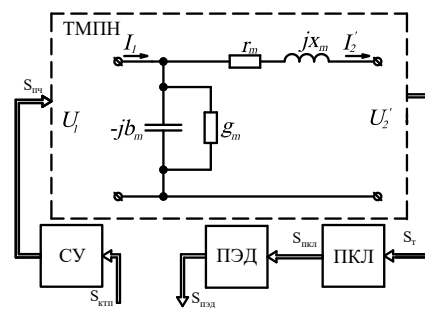


Рисунок 13. Схема замещения нефтепромыслового трансформатора в составе ЭТК УЭЦН

Среднеквадратичные отклонения выходных параметров ЭТК УЭЦН, полученных по паспортным данным ПЭД от оценок, полученных по параметрам модели идентифицированной с учетом температурных флуктуаций, приведены в таблице 3.

Таблица 3. Отклонения параметров ЭТК УЭЦН при вариациях внешних температурных воздействий

Погружной электродвигатель ЭДТ45		I, A	$\Delta U_{\text{кабеля}}, B$	$U_{\text{ПЭД}}, B$	$P_2, кВт$	$\eta, \%$	$n_2, об/мин$	$s, о. е.,$
$t=25^{\circ}C$	паспорт	26	58,15	941,8	30,86	83,71	2881,8	0,0394
	эксперимент	26	59,36	940,6	29,43	82,55	2909,7	0,0301
Отклонение при $25^{\circ}C, \%$			2,08	0,13	4,63	1,39	0,97	23,60
$t=100^{\circ}C$	паспорт	26	75,26	924,7	28,87	82,03	2839,5	0,0535
	эксперимент	26	76,94	923,1	28,38	80,12	2845,5	0,0515
Отклонение при $100^{\circ}C, \%$			2,23	0,17	1,70	2,33	0,21	3,74
$t=150^{\circ}C$	паспорт	26	86,66	913,3	28,3	80,71	2810,9	0,0630333
	эксперимент	26	88,67	911,3	27,76	78,89	2817	0,061
Отклонение при $150^{\circ}C, \%$			2,32	0,22	1,91	2,25	0,22	3,23

Среднеквадратичные отклонения выходных параметров ЭТК УЭЦН, полученных по паспортным данным от оценок, полученных по параметрам модели идентифицированной с учетом температурных флуктуаций, составляют по скольжению 17,0 %, по мощности на валу 3,7%, в диапазоне температур от $25^{\circ}C$ до $150^{\circ}C$, при поддержании неизменным действующего значения тока в силовой цепи ЭТК УЭЦН. Отклонения существенно варьируются в зависимости от задачи, решаемой ЭТК УЭЦН: поддержание заданного момента, изменение частоты вращения при выходе на заданный режим, расклинивание и др.

Таким образом, в этих условиях рациональный подбор элементов ЭТК УЭЦН, учитывающих реальные энергетические характеристики ПЭД в их взаимосвязях, имеет важнейшее значение для обеспечения качества функционирования всего ЭТК УЭЦН добычи нефти.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Осуществлен критический анализ методов определения параметров элементов схем замещения регулируемых погружных асинхронных электродвигателей, позволивший выделить метод на основе регрессионного анализа кривых затухания тока статора как наиболее подходящий по точности, трудоемкости, требуемому аппаратному обеспечению и технической реализации для идентификации параметров моделей послеремонтных ПЭД в условиях предприятий по ремонту погружного электрооборудования и кустовых площадок нефтедобывающих скважин.

2. Выбрана и обоснована в качестве оптимальной схемы однофазного включения послеремонтного ПЭД для проведения опыта затухания статорного тока на базе анализа однофазного включения ПЭД по схеме неполной звезды при неподвижном роторе.

3. Разработаны методики предварительной идентификации параметров Т-образных схем замещения послеремонтных ПЭД, основанные на определении производной тока статора в начальный момент времени формирования характеристики затухания тока статора, что позволило идентифицировать параметры схемы замещения с одноконтурной цепью ротора.

4. Разработан и запатентован способ предварительной идентификации параметров схемы замещения послеремонтного ПЭД с одноконтурной цепью ротора, основанный на интегральном преобразовании $\int_0^{\infty} i(t)dt$ кривой затухания $i_1(t)$ тока обмотки статора и на эквивалентных схемах

ПЭД для хвостового (медленного), крутого (миллисекундного) и сверхпереходного (микросекундного) участков кривой затухания.

5. Разработан и изготовлен аппаратно-программный комплекс в виде мобильной переносной установки для регистрации характеристики затухания тока обмотки статора послеремонтного ПЭД. Проведено испытание аппаратно-программного комплекса (РПХ-20) в ФБУ «Государственный региональный центр стандартизации, метрологии в Омской области» и получен аттестат № 0573 от 09 октября 2014 г.

6. Выполнено промышленное испытание аппаратно-программного комплекса на образцах послеремонтных ПЭД на сервисном предприятии «Ойлпамп сервис», г. Мегион, ХМАО-Югра, акт внедрения получен 11.02.2019.

7. Разработана методика и алгоритм работы аппаратно-программного комплекса (РПХ-20) для регистрации переходных характеристик на основе методики идентификации параметров модели послеремонтного ПЭД на основе Т-образной схемы замещения, позволяющие получить энергетические параметры и рабочие характеристики ЭТК УЭЦН.

8. Разработана структура, алгоритм настройки и отладки подблока идентификации параметров ПЭД для системы управления ЭТК УЭЦН добычи нефти.

9. Получены значения энергетических параметров и рабочие характеристики различных образцов послеремонтных ПЭД в составе ЭТК УЭЦН при различных нагрузках. Исследовано влияние вариаций внешних температурных воздействий с учётом разброса параметров послеремонтных ПЭД на качество функционирования ЭТК УЭЦН. Отклонения от паспортных данных составили по скольжению –17,0 %, по мощности на валу – 3,7% в диапазоне температур от 25°C до 150°C, при поддержании неизменным действующего значения тока в силовой цепи ЭТК УЭЦН.

10. Перспективы дальнейших исследований по теме диссертации:

- исследование и реализация алгоритмов для идентификации параметров подключенного ПЭД штатными средствами станции управления установленной в условиях кустовой площадки;
- выявление перспективных источников тока для проведения опыта затухания тока статора при неподвижном роторе с целью уменьшения массы и габаритов регистратора переходных процессов;
- обоснование повышения эксплуатационной надежности УЭЦН добычи нефти.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ

1. Аникин В. В. Способ определения электромагнитных параметров погружных асинхронных электродвигателей / Аникин В. В., Хамитов Р. Н. // Омский научный вестник. 2019. № 3 (165). С. 33-37.
2. Ковалев В. З. Определение эксплуатационных параметров погружных асинхронных электродвигателей по идентификационным параметрам Т-образной схемы замещения / В. З. Ковалев, Р. Н. Хамитов, Е. М. Кузнецов, В. В. Аникин, В. О. Бессонов // Омский научный вестник. 2018. № 6. – С. 36-40.
3. Аникин В. В. Послеремонтное определение эквивалентных параметров асинхронного электродвигателя без применения нагрузочного устройства – электродвигатель с короткозамкнутым ротором / Е. М. Кузнецов, В. В. Аникин // Омский научный вестник. 2017. – №6. – С. 76-79.
4. Аникин В. В. Экспериментальное исследование переходных процессов в системе станция управления – электродвигатель с короткозамкнутым ротором / Е. М. Кузнецов, А. В. Дегтярев, В. В. Аникин, С. Г. Старостин // Омский научный вестник. 2012. – №3. – С. 213-216.
5. Аникин В. В. Системное моделирование станций управления в составе установок электроцентробежных насосов / Е. М. Кузнецов, В. В. Аникин, С. Г. Старостин // Промышленная энергетика. 2012. – №1. – С. 12-16.
6. Аникин В. В. Исследование потерь электроэнергии, вызванных наличием высших гармоник в напряжениях и токах силового канала преобразования энергии установок электроцентробежных насосов / Е. М. Кузнецов, А. В. Дегтярев, В. В. Аникин, С. Г. Старостин // Промышленная энергетика. 2012. – №1. – С. 54-58.
7. Аникин В. В. Установка для определения параметров схем замещения асинхронных электродвигателей / А. Ю. Ковалев, Е. М. Кузнецов, В. В. Аникин // Приборы и техника эксперимента. 2010. – №3. – С. 162.
8. Хамитов Р. Н. Исследование функционирования электротехнических комплексов установок электроцентробежных насосов при вариациях внешних температурных воздействий / Р. Н. Хамитов, В. В. Аникин, В. З. Ковалев, А. О. Парамзин // Омский научный вестник. 2020. № 4 (172). С. 19-25.

Публикации в изданиях, входящих в базы Scopus и Web of Science

9. Chernysheva, T.A. Variable speed electric drive of centrifugal pump in oil lifting plants / Tatyana A. Chernysheva, Vasilii V. Anikin, Igor A. Chernyshev, Aleksandr Yu. Chernyshev // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2019. V. 330. 12. 168-178.
10. Glazyrin, A.S. Nonlinear algebraic estimation of the inductance of a vibrating electromagnetic activator based on the current attenuation curve / Alexander S. Glazyrin, Vasily V. Anikin, Dmitriy S. Bunkov, Dmitriy I. Antyaskin, Yulia N. Startseva, Vladimir Z. Kovalev, Rustam N. Khamitov, Sergey N. Kladiev, Alexander A. Filipas // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2020. V. 331. 1. 148-157.
11. Anikin V. V. The Parameter identification of submersible motors of electrical centrifugal pump units for oil production / Kovalev A.Yu., Kuznetsov Ye. M., Anikin V. V. – International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON – Proceeding, Pages, 2015. – 4 p.
12. Anikin V. V. Determining computational aspects of submersible electric centrifugal pump installations electric motors parameters / Ye. M. Kuznetsov, V. V. Anikin – 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). Nov. 2016. – p. 15-17.
13. Anikin V. V. Determination of the electromagnetic parameters of submersible electric motors of electric centrifugal pumps installation / Ye. M. Kuznetsov, V. V. Anikin – 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), p. 2016 – 2017.
14. Anikin V. V. Diagnostic unit for electrical submersible motors and their rotor packs / A. Yu. Kovalev, E. M. Kuznetsov, V. V. Anikin – 2014 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). 2014. – p.11-13.

Объекты интеллектуальной собственности

15. Пат. 2 623 834 РФ, МПК G01R 27/26. Способ определения электромагнитных параметров асинхронных электродвигателей / Е. М. Кузнецов, А. Ю. Ковалев, В. В. Аникин. – № 2016104186; заявл. 09.02.16; опубл. 29.06.17, Бюл. № 19.

16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012661262. Программное обеспечение для расчета параметров схемы замещения асинхронного погружного электродвигателя / В.В. Аникин, Е. М. Кузнецов, А. Ю. Ковалев. – Заявка № 2012619023. Дата поступления 23.10.2012 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 11.12.2012 г.

17. Свидетельство о регистрации электронного ресурса № 23747. Идентификация параметров схемы замещения погружного асинхронного электродвигателя / В.В. Аникин, Е. М. Кузнецов, В. З. Ковалев. Зарегистрировано в Реестре ИУО РАО ОФЭРНиО 27.08. 2018 г.

Научные публикации в прочих изданиях

18. Аникин, В. В. Установка для идентификации параметров схем замещения погружных асинхронных электродвигателей/ В. В. Аникин // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность: Материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции (02-03 апреля 2019 года), 2019, кн. 1. Омск: ОмГТУ, 2019. – С.28-33.

19. Аникин, В.В. Методика определения параметров асинхронного двигателя с помощью аппроксимации кривой затухания фазного тока статора/ В.В. Аникин // Актуальные вопросы энергетики: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (Омск, 21 мая 2019 г.) / Минобрнауки России, ОмГТУ; [редкол.: П. А. Батраков (отв. ред.) и др.]. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2019. – С. 117-122.

20. Аникин, В.В. Совершенствование методики и средств идентификации параметров схем замещения погружных асинхронных электродвигателей в составе электротехнических комплексов добычи нефти / В.В. Аникин // Новые технологии в газовой промышленности (Газ, нефть, энергетика): Сборник тезисов XIII Всероссийской конференции молодых ученых, специалистов и студентов (22-25 октября 2019 г.), 2019. Москва: РГГУ, 2019. – С. 624-625.

21. Аникин, В.В. Расчет и построение рабочих характеристик погружного асинхронного электродвигателя по параметрам Т-образной схемы замещения/ В.В. Аникин // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе: материалы Национальной с международным участием научно-практической конференции студентов, аспирантов, ученых и специалистов, посвященной 20-летию создания кафедры электроэнергетики: в 2 т. Том 2 / отв. ред. А. Н. Халин. – Тюмень: ТИУ, 2019. – С. 212-216.

22. Аникин, В.В. Оценка погрешности измерения параметров схем замещения асинхронного двигателя по переходной характеристике затухания фазного тока / В.В. Аникин // Ученые Омска – региону: материалы IV Регион. науч.-техн. конф. (Омск, 4–5 июня 2019 г.) / Минобрнауки России, ОмГТУ, М-во образования Ом. обл.; под общ. ред. Л. О. Штриплинга. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2019. – С.24-27.

23. Аникин В. В. Электротехнологические установки для нефтедобычи: монография / А. Ю. Ковалев, Е. М. Кузнецов, В. В. Аникин. Минобрнауки России, ОмГТУ; НОУ ВПО «АИПЭ». – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2015. – 160 с.

24. Аникин, В. В. Исследование функционирования электротехнических комплексов установок электроцентробежных насосов при вариациях внешних температурных воздействий/ В.В. Аникин // Наука и инновации – современные концепции: Сборник научных статей по итогам работы Международного научного форума (г. Москва, 31 июля 2020 г.). / отв. ред. Д.Р. Хисматуллин. – Москва: Изд-во Инфинити, 2020. – С. 140-148.