

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Югорский государственный университет»
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет»

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
д.т.н., доцент
Хамитов Рустам Нуриманович
(специальность 05.09.01)
Научный консультант:
д.т.н., профессор
Ковалев Владимир Захарович
(специальность 05.09.03)

Ханты-Мансийск, 2020 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ моделей ПОГРУЖНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ	15
1.1 Погружные электродвигатели в составе электротехнических комплексов для нефтедобычи	15
1.2 Особенности конструкции, условия эксплуатации, режимы работы погружных асинхронных электродвигателей в составе электротехнических комплексов для нефтедобычи	22
1.3 Проблемы определения параметров схем замещения погружных асинхронных электродвигателей	33
1.4 Предварительная идентификация параметров модели частотно- регулируемого погружного асинхронного электродвигателя в составе УЭЦН ...	41
1.5 Критический обзор методов определения параметров схем замещения асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором	45
1.6 Цели и задачи диссертационного исследования	55
Выводы по главе 1	56
2 ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ПЭД ПО ПЕРЕХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ ЗАТУХАНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ОБМОТКИ СТАТОРА	58
2.1 Определение рациональных схем однофазного включения асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором на постоянное напряжение для реализации переходного процесса затухания тока статора	58
2.2 Анализ однофазного включения ПЭД по схеме неполной звезды	60
2.3 Методика идентификации параметров схемы замещения ПЭД с одноконтурной цепью ротора	65

2.4. Оценка погрешности определения производной тока статора на начальном участке переходного процессе его затухания	69
2.5 Методика идентификации параметров схемы замещения ПЭД с интегральным преобразованием характеристики затухания тока статора	79
Выводы по главе 2	83
3 РАЗРАБОТКА АППАРАТНЫХ СРЕДСТВ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ПОГРУЖНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ УПРАВЛЕНИЯ АППАРАТНОЙ ЧАСТЬЮ	84
3.1 Описание установок идентификации параметров модели ПЭД	84
3.2 Измерительная подсистема и конструктивное исполнение установки	93
3.3 Силовой модуль	98
3.4 Программный модуль мобильной переносной установки РПХ-20	106
3.5 Протокол испытаний мобильной переносной установки РПХ-20	109
Выводы по главе 3	113
4 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МЕТОДИК ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ПОГРУЖНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК ПЭД.....	115
4.1 Определение параметров экспонент, аппроксимирующих характеристику затухания тока статора ПЭД	115
4.2 Оценка эффективности и достоверности обрабатываемой программы и методики идентификации, основанной на дифференцировании начального участка характеристики затухания тока обмотки статора ПЭД.....	122
4.3 Оценка эффективности и достоверности программного обеспечения методики идентификации, основанной на интегральном преобразовании характеристики затухания тока обмотки статора ПЭД.....	126

4.4 Разработка подблока идентификации параметров модели ПЭД.....	130
4.5 Определение энергетических параметров и характеристик ПЭД по идентификационным параметрам схем замещения.....	133
4.6 Моделирование функционирования ЭТК УЭЦН, содержащих послеремонтные ПЭД при вариациях внешних температурных воздействий ...	138
4.7 Исследование влияния вариаций внешних температурных воздействий на качество функционирования ЭТК УЭЦН с применением оценок параметров настраиваемых моделей послеремонтных ПЭД.....	145
Выводы по главе 4.....	151
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	153
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	155
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	156
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	175

ВВЕДЕНИЕ

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., Vimal 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 ротора, 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 постоянного 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 постоянного 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 разбросом 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. 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).

Положения, выносимые на защиту:

1. Способ идентификации параметров асинхронных погружных электродвигателей по опытным данным опыта затухания постоянного тока в обмотке статора, основанный на том, что содержит ряд последовательных процедур, а именно процедуру измерения производной тока статора, осуществляемой по оцифрованной переходной характеристике затухающего тока статора в виде массива его мгновенных значений, процедуру аппроксимации огибающей этой характеристики выражением в виде суммы трех экспонент, у которых определяются начальные токи и постоянные времени экспонент, соответственно, пологого, крутого и сверхпереходного участков характеристики тока статора, процедуру определения интеграла от переходного тока статора, позволяющих по результатам измерений и вычислений данных в ходе выполнения указанных процедур определить параметры Т-образной схемы замещения асинхронного электродвигателя: активное сопротивление фазы обмотки статора, индуктивность намагничивания, активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к статору, индуктивность обмотки ротора, приведённая к статору, сопротивление активных потерь в магнитопроводе.

2. Инженерная методика идентификации параметров модели асинхронного ПЭД в виде Т-образной схемы замещения с одноконтурной цепью ротора, основанная на определении параметров элементов схемы замещения с использованием мгновенных значений тока статора, благодаря чему можно обойтись без частотных характеристик асинхронного ПЭД.

3. Алгоритм предварительной идентификации параметров настраиваемой модели послеремонтного ПЭД штатными средствами преобразователя частоты УЭЦН, содержащий циклическую программируемую процедуру устранения намагниченности магнитной системы исследуемого двигателя и процедуру управления силовым мостом инвертора напряжения при регистрации тока затухания обмотки статора послеремонтного ПЭД.

4. Структура, алгоритм настройки и отладки подблока идентификации параметров настраиваемой модели послеремонтных ПЭД в составе системы управления УЭЦН.

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

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались основные положения теоретических основ электротехники, теории электрических машин, электропривода переменного 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 постоянного 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 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-Югра) 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 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» (г. 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, имитационное 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. Четвертая 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.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛЕЙ ПОГРУЖНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

1.1 Погружные электродвигатели в составе электротехнических комплексов для нефтедобычи

В соответствии с терминологией международных стандартов под электротехническим комплексом (ЭТК) понимается объект, состоящий из преобразовательного устройства, электромеханического преобразователя, механизма передачи и преобразования движения, предназначенный для реализации рабочих процессов машины в заданном технологическом цикле и рабочего механизма [1]. ЭТК для нефтедобычи представляют собой базовую структуру в составе установок электроцентробежных насосов (УЭЦН), реализующих один из основных способов механизированной добычи нефти на вновь вводимых и на действующих нефтяных скважинах [2, 3]. На этапе развития техники, достигнутого на начало XXI века, благодаря революционным достижениям в области силовой и информационной электроники, ЭТК стали во многом определять технические возможности и уровень УЭЦН, такие как производительность, безопасность, ресурс работы, энергоэффективность, возможности глубокой автоматизации и дистанционного диспетчерского управления. ЭТК в УЭЦН принимают, трансформируют, преобразовывают электрическую энергию, управляют ее потоком, превращают в механическую энергию, передают механическую энергию электроцентробежным насосам для извлечения нефти из скважины на поверхность. В ЭТК УЭЦН (рис. 1.1) входят станция управления (СУ), повышающий трансформатор, кабельная линия с удлинителем (КЛ), погружной асинхронный электродвигатель (ПЭД) с короткозамкнутым ротором и гидрозащитой (ГЗ-протектор), предохраняющей ПЭД от проникновения в него окружающей пластовой жидкости, система погружной телеметрии (ТМС).

В соответствии с принципами системного анализа [4, 5, 6] ЭТК, содержащий названные выше элементы, является в то же время подсистемой электротехнологической системы – УЭЦН добычи нефти из скважин.

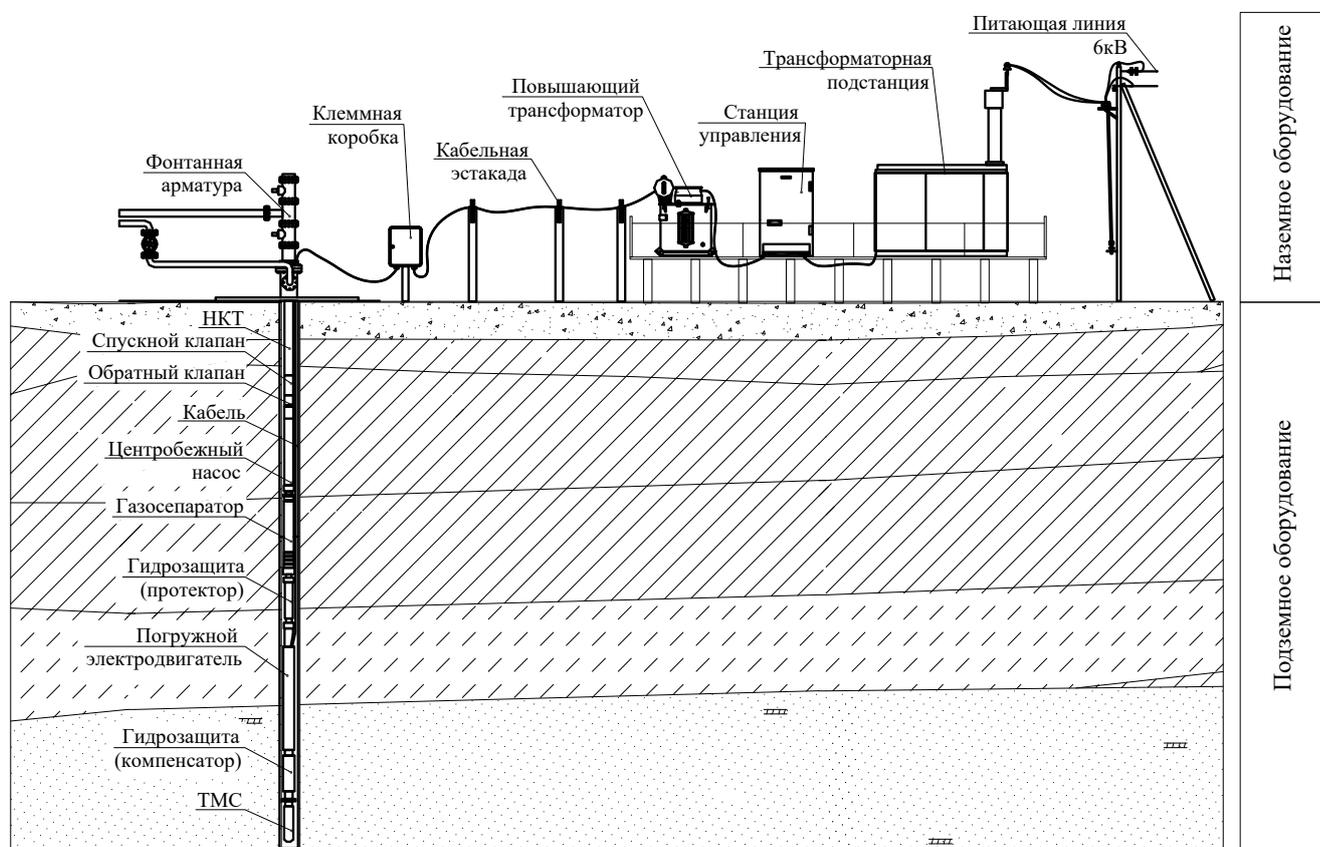


Рисунок 1.1. Состав и компоновка УЭЦН

В УЭЦН помимо ЭТК входит также гидромеханическая подсистема (рис. 1.1): многоступенчатый (от 80 до 500 и более ступеней) электропогружной центробежный насос (ЭЦН) с газосепаратором на приеме, насосно-компрессорные трубы (НКТ), обратный и сливной клапаны, клеммная коробка, устьевое оборудование и другие элементы. Корпуса ПЭД, протектора и ЭЦН соединены между собой посредством фланцев и образуют погружной агрегат. Валы имеют шлицевые соединения.

В собранном виде ПЭД расположен внизу погружного агрегата (рис. 1.1), над ним – протектор, а над протектором ЭЦН. Агрегат опускают в скважину на колонне (НКТ), соединяющихся с устьевым оборудованием, и подвешивают на подвесной шайбе без дополнительного крепления к скважине. ПЭД в составе ЭТК является электротехнологическим устройством для преобразования электрической энергии

в «технологическую» энергию вращения вала. ЭЦН преобразует энергию вращения вала ПЭД в технологическую работу по откачиванию пластовой жидкости (смесь нефти, воды и попутного газа).

Электропитание ПЭД осуществляется по специальному маслонефтегазостойкому круглому или плоскому трехжильному кабелю с гибкой ленточной броней, который укрепляется к НКТ металлическими поясами. На конечном участке у первых НКТ КЛ выполняется плоским кабелем-удлинителем. Это позволяет несколько увеличить диаметр ЭЦН и ПЭД, находящихся в колонне обсадных труб нефтяной скважины [7]. Система ТМС предназначена для регистрации, преобразования и передачи по КЛ на контроллер СУ текущих значений основных параметров эксплуатации УЭЦН: сопротивления изоляции в системе выходная обмотка повышающего трансформатора – КЛ – ПЭД; температуры пластовой жидкости на приеме ЭЦН; давления на приеме ЭЦН; вибрации ПЭД в трех плоскостях; температуры двигателя и других параметров [8]. ТМС состоит из погружного блока, устанавливаемого в основании ПЭД, и наземного блока, устанавливаемого в СУ УЭЦН. Полученные данные используются в алгоритмах защиты и управления УЭЦН.

К наземному электрооборудованию ЭТК УЭЦН относятся трансформатор и СУ. Промысловый трансформатор двухобмоточный предназначен для повышения напряжения от 0,4 кВ, поступающего с выхода СУ (рис. 1.1), до напряжения 1,0–3 кВ, необходимого для работы ПЭД. Вторичная обмотка трансформатора содержит от 5 до 36 отпаяк для ступенчатого регулирования выходного напряжения при помощи ручного привода в режиме ПБВ (переключение без возбуждения). Регулирование такого рода обеспечивает компенсацию потерь напряжения, возникающих в длинной (обычно многокилометровой) кабельной линии. СУ УЭЦН обеспечивает электропитание погружной насосной установки, управление работой УЭЦН, защиту от аномальных режимов, а также передачу информации через радиомодуль в систему телеметрии и хранение истории работы УЭЦН.

Колонна НКТ обеспечивает транспорт пластовой жидкости на поверхность.

В колонне НКТ выше ЭЦН установлен обратный клапан. Он предназначен для удерживания столба пластовой жидкости при остановках ЭЦН для исключения турбинного вращения ЭЦН и ротора ПЭД, а также для облегчения последующего пуска. Турбинное вращение возникает при отсутствии обратного клапана под воздействием столба жидкости, остающейся в НКТ. Выше обратного клапана расположен сливной клапан, обеспечивающий слив пластовой жидкости в затрубное пространство при подъеме агрегата. При его отсутствии жидкость, разливаясь на поверхности, создает опасность для экологии окружающей среды и для рабочих.

Таким образом, ЭТК УЭЦН является сложным техническим объектом, в составе которого ПЭД осуществляет преобразование электроэнергии (рис. 1.2).

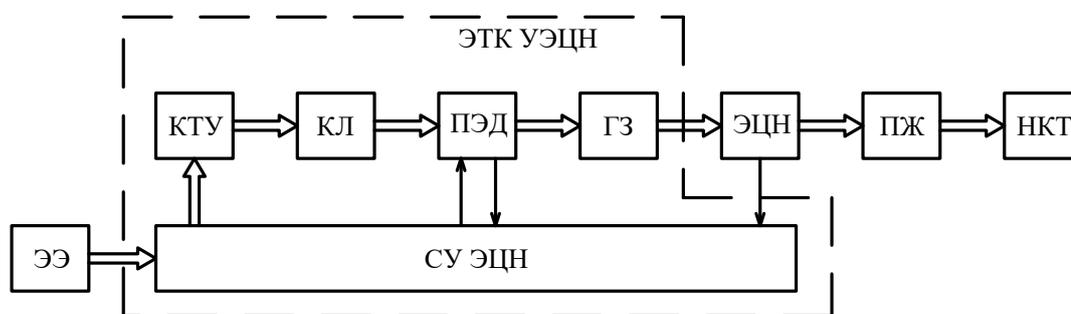


Рисунок 1.2. Структурная схема силового канала УЭЦН

Источником электрической энергии (ЭЭ) является промысловая комплектная трансформаторная подстанция с понижающим силовым трансформатором и выходным напряжением, равным 0,4кВ. Силовая часть СУ УЭЦН, комплектное трансформаторное устройство КТУ в виде двухобмоточного скважинного трансформатора и погружная КЛ осуществляют подвод электрической энергии к ПЭД. Ее основной полезный поток преобразуется далее ПЭД в механическую энергию [9], которая поступает на ЭЦН через узел передачи крутящего момента – ГЗ и преобразуется в технологическую энергию для подъема ПЖ из скважины на поверхность в колонне НКТ. Посредством ПЭД, являющимся неотъемлемой частью ЭТК УЭЦН, осуществляется также управление технологическими режимами добычи нефти.

Благодаря отсутствию длинной механической связи (штанги) между приводным электродвигателем и центробежным насосом УЭЦН с ПЭД имеют

значительно большую мощность, чем штанговые насосные установки. Это дает возможность поддерживать большие отборы пластовой жидкости (до 200...400 м³/сут) и достигать глубин спуска агрегата до 3600 м. На поверхности скважины отсутствуют громоздкие станки-качалки и массивные фундаменты, необходимые для их установки. Устье скважины, оборудованной УЭЦН, легко поддается герметизации, что позволяет осуществлять сбор и отвод попутного газа. Для УЭЦН с ПЭД характерны также простота обслуживания, экономичность, достаточно высокий для установок подобного рода КПД (0,35...0,4), возможность автоматизации и телеуправления, относительно большой межремонтный период, превышающий в большинстве случаев 200 суток. В настоящее время УЭЦН добывают свыше 65 % нефти в России и более 90 % нефти в Западной Сибири и на Крайнем Севере. По существующим прогнозам в среднесрочной перспективе за УЭЦН в механизированной добыче нефти сохранится преимущественная роль.

В последнее время уделяется существенное внимание исследованиям ЭТК УЭЦН, включая ПЭД. Появились фундаментальные докторские диссертации [10, 11, 12], в которых разрабатываются проблемы энергосбережения и энергоэффективности УЭЦН, развивается теория электроприводов агрегатов нефтегазодобывающих комплексов. Ряд актуальных задач решается в кандидатских диссертациях [9, 13, 14]. Подробный анализ диссертаций [9, 10, 11, 12] выполнен в работе [20] и сводится, главным образом, к следующим положениям, излагаемым согласно материалам данной работы.

В диссертации [10] ЭТК УЭЦН моделируется схемой замещения, содержащей Т-образную эквивалентную схему ПЭД, Г-образную эквивалентную схему длинной КЛ, Т-образную эквивалентную схему повышающего промышленного трансформатора, Г-образную эквивалентную схему синусного фильтра гармоник СУ. В результате анализа электромагнитных процессов, протекающих в схеме замещения, исследованы: суммарные потери в ПЭД, частотный спектр и коэффициенты нелинейности напряжения и тока на выходе СУ, диапазон рабочих частот СУ, температура нагрева.

В работе [11] рассматривается расчетная схема ЭТК УЭЦН, содержащего питающую линию, компенсирующие установки и ПЭД, для чего используются системные подходы и методы. В частности декомпозиция и выделение отдельных систем и комплексов: электротехнические комплексы нефтедобывающей скважины, электротехнические комплексы предприятия, электротехнические комплексы крупного узла электрической нагрузки.

В работе [12] рассматриваются синтез и теория электроприводов агрегатов нефтегазовой отрасли как электротехнических комплексов, образованных соответствующей совокупностью взаимосвязанных и взаимодействующих между собой элементов, составляющих типовую схему электропривода. Разработаны математические модели электропривода по системе транзисторный преобразователь напряжения – асинхронный двигатель. Созданы прикладные программы, моделирующие работу электропривода технологических агрегатов как единых технологических комплексов.

В диссертации [9] осуществляется сравнительный анализ и оценка эффективности способов регулирования ПЭД. Отмечается, что имеет большое значение учет насыщения по путям рассеяния и основного потока. Из возможных направлений моделирования выбирается направление, использующее общую информацию о состоянии магнитной цепи в виде заданных кривых намагничивания или изменения параметров модели. В качестве исходной принимается математическая модель асинхронной машины в синхронно вращающихся координатах и общепринятой системе относительных единиц. Учет насыщения по пути основного потока ПЭД производится по зависимости индуктивного сопротивления контура намагничивания x_0 от напряжения двигателя в режиме холостого хода U_0 (из характеристик холостого хода). Учет насыщения по путям рассеивания ПЭД осуществляется на основании зависимости индуктивного сопротивления короткого замыкания x_k от тока короткого замыкания I_k из характеристик короткого замыкания. На основе исследования отечественных и зарубежных аналогов таких фирм как Новомет-Пермь, Алнас, Борец, REDA, Centrilift, Ployger, Mitsubishi Danky предложены универсальные характеристики

$x_0=x_0(U_0)$ и $x_k=x_k(I_k)$ и поправочные коэффициенты, которые приводят в соответствие значения сопротивлений x_0 и x_k конкретного ПЭД к результату универсальной характеристики.

В работе [13] решается задача оптимального управления режимами электропотребления системы «УЭЦН-скважина» в условиях отклонений напряжения, характерных для электрических сетей нефтегазодобывающих предприятий. На основе расчетной схемы участка электроснабжения двух кустов скважин Мамонтовского месторождения с ПЭД производится оценка влияний отклонений напряжения на входе схемы электроснабжения на электрические и технологические показатели куста скважин с УЭЦН. Предложены и реализованы новые схемы энергообеспечения месторождений в ООО «Энергонефть».

Объектом исследования в [14] является оптимизация режимов работы ЭТК УЭЦН механизированной добычи нефти. Синтезирована модель УЭЦН как элемента системы «УЭЦН-скважина», объединяющая модели гидро- и электромеханической подсистем и учитывающая взаимное влияние технологических и технических параметров подсистем, а также управляющие воздействия и возмущающие факторы. Разработан алгоритм оптимального управления режимом ПЭД с позиций рентабельности нефтедобычи путем регулирования частоты вращения погружного агрегата.

В диссертациях, перечисленных выше, а также в других работах [15, 16] ПЭД является неразрывной частью исследуемых ЭТК, выполняет основную технологическую роль по преобразованию электрической энергии в механическую и передаче ее электроцентробежному насосу для регулирования его напора и входит в состав математических моделей ЭТК.

1.2 Особенности конструкции, условия эксплуатации, режимы работы погружных асинхронных электродвигателей в составе электротехнических комплексов для нефтедобычи

Для комплектации УЭЦН, преобразования электрической энергии, поступающей на ПЭД по КЛ, в механическую и привода в действие ЭЦН используются электродвигатели: погружные, асинхронные, трехфазные, короткозамкнутые, двухполюсные, маслозаполненные, вертикального исполнения, одиночные и секционные отечественных предприятий («Римера», «Борец», «Новомет-Пермь») и зарубежных фирм («Reda», «Centrilift», «Shlumberger») [17].

Электродвигатели выполняются в стальном корпусе из особо высокой точности трубы для корпусов ПЭД и ЭЦН [18, 19]. Наружный диаметр трубы зависит от внутреннего диаметра обсадной колонны и определяет габарит ПЭД. Обычно применяются трубы диаметром, мм, 96, 103, 117, 123, 130, 145, 185. Соответственно этому диаметру ПЭД имеют 96, 103, 117, 123, 130, 145, 185 габариты. Наиболее распространенными в эксплуатации являются 103 и 117 габариты. В последнее время осваиваются более мощные двигатели 145 и 185 габаритов. Электродвигатели предназначены для продолжительного режима работы S1 от сети переменного тока частотой 50 Гц. При частоте тока 50 Гц синхронная частота вращения вала ПЭД равна 3000 об/мин. При использовании регулятора частоты допускается работа ПЭД при частоте тока от 40 до 60 Гц.

Основные параметры погружного электродвигателя: мощность, ток и напряжение, зависят от его типоразмера. Для снижения сечения питающего кабеля и уменьшения потерь в УЭЦН понижают рабочий ток ПЭД, что приводит к необходимости повышения рабочего напряжения, подводимого к электродвигателю. В настоящее время выпускают двигатели с рабочим напряжением до 3600В, рабочим током до 180А, номинальной мощностью до 500кВт. Малые диаметры и большие мощности вызывают необходимость увеличивать длину электродвигателей. В результате соотношения между главными размерами ПЭД в десятки и сотни раз отличаются от аналогичных соотношений

серийно выпускаемых асинхронных двигателей общепромышленного исполнения. Это обстоятельство влияет на конструкцию и на все свойства ПЭД. Например, длина ПЭД 117 габарита может достигать 22 метров (рис. 1.3, табл. 1.1) [20, 21]. Двигатели мощностью более 180 кВт – диаметром 123 мм, более 90 кВт – диаметром 117 мм, более 63 кВт – диаметром 103 мм выполняются секционными и состоят из двух или трех секций, которые соединяются при монтаже двигателя на скважине.

Электрическое соединение секций между собой последовательное и осуществляется с помощью 3-х наконечников. Герметизация соединения обеспечивается уплотнением при стыковке секций. Конструктивное исполнение односекционного электродвигателя серии ПЭД представлено на рис 1.4. [22]. Конструктивно ПЭД состоит из следующих основных элементов: статора, ротора, вала, головки, корпуса статора.

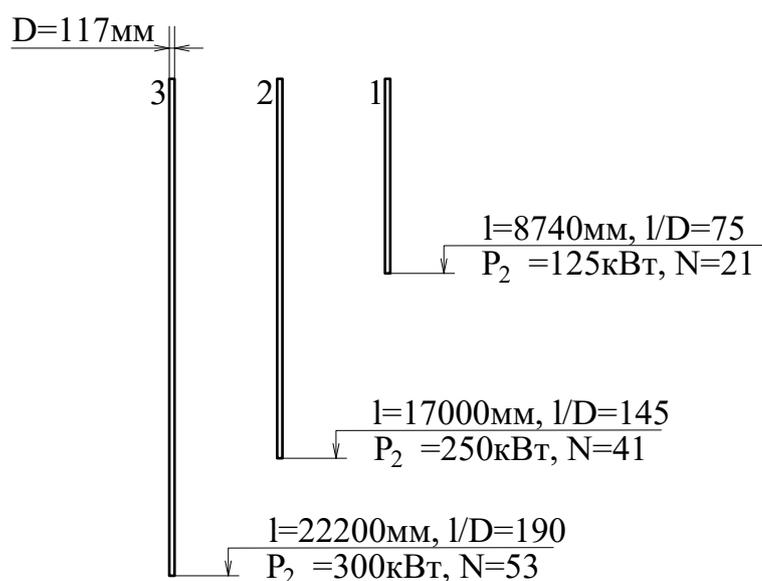
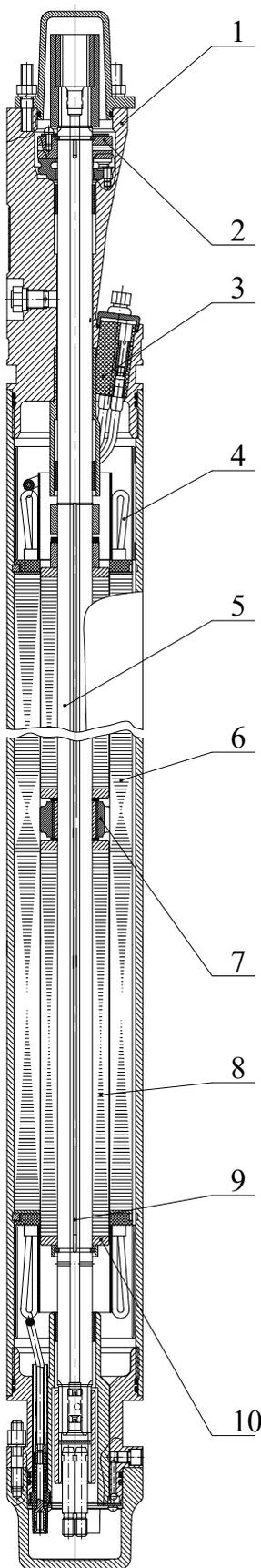


Рисунок 1.3. Фактическое соотношение между главными размерами погружных асинхронных электрических двигателей 117 габарита: 1, 2, 3 – одно-, двух- и трехсекционные двигатели

Магнитопровод статора 6 (рис. 1.4) ПЭД состоит из активных пакетов (рис. 1.5, а) [23], набранных из отдельных листов отожженной электротехнической



стали Э12 или Э13 и из немагнитных пакетов, отштампованных из латуни или из немагнитной нержавеющей стали. Немагнитные пакеты служат опорами для промежуточных подшипников ротора 7 (рис. 1.4, рис. 1.5, б). Длина активного пакета определяется расстоянием между подшипниками на валу ротора (исходя из расчета вала на прогиб) и колеблется в пределах 300...450 мм. Длина немагнитных пакетов соответствует ширине промежуточных подшипников ротора и колеблется в пределах 32...45 мм. Активные и немагнитные пакеты статора, чередуясь между собой, плотно запрессованы в корпус статора и закреплены с обеих сторон по торцам запорными кольцами. Число активных пакетов зависит от мощности двигателя, который может быть изготовлен с двумя, пятнадцатью и больше пакетами. Число немагнитных пакетов зависит от числа промежуточных подшипников ротора.

Рисунок 1.4. Погружной односекционный асинхронный электрический двигатель: 1 – головка; 2 – подшипник осевой; 3 – разъем для кабельной линии; 4 – обмотка статора (однослойная протяжная); 5 – вал двигателя; 6 – магнитопровод статора; 7 – подшипник скольжения; 8 – магнитопровод ротора (пакет ротора); 9 – отверстие для циркуляции масла; 10 – обмотка ротора (беличья клетка)

Таблица 1.1. Технические данные ПЭД

Марка двигателя	P_2 , кВт	η , %	D , мм	l , мм
ЭДН 16-96	16	79	96	2790
ПЭДН 22-96	22	79	96	3870
ПЭДН 32-96	32	79	96	5300
ПЭДН 16-103	16	82	103	2655
ПЭДН 22-103	22	81	103	3345
ПЭДН 28-103	28	81	103	3692
ПЭДН 32-103	32	82	103	4040
ПЭДН 40-103	40	82	103	4740
ПЭДН 45-103	45	82	103	5430
ПЭДН 63-103	63	80	103	6810
ПЭДН 70-103	70	80	103	7500
ПЭДН 80-103	80	80	103	8190
ПЭДН 12-117	12	83	117	1420
ПЭДН 16-117	16	84	117	1800
ПЭДН 22-117	22	85	117	2180

После запрессовки листов статора в корпус контролируется прямолинейность статора. При неудовлетворительной прямолинейности внутренней расточки статор подлежит правке на специальной установке. Допустимое отклонение от прямолинейности внутренней поверхности (кривизна) по всей длине не более 0,15 мм на метр. В связи с тем, что наружный диаметр сердечника статора ограничен принятыми габаритами двигателя, число пазов статора небольшое: $Z_1 = 18$ или 24. В последних конструкциях ПЭД пазы обмотки статора с целью упрощения технологий сборки выполняются закрытыми (рис. 1.6) [22]. Это обстоятельство усиливает влияние насыщения на параметры и характеристики ПЭД и делает его учет необходимым элементом расчетных методик.

Обмотка статора ПЭД. В пазах статора уложена впротяжку трехфазная обмотка (рис. 1.5, а) из специального обмоточного провода с пленочной полиимидо-фторопластовой изоляцией, например провода ППИ-У, ПЭУ-200, ПФО, выпускаемого в России и СНГ. Поскольку двигатель работает при температуре пластовой жидкости равной 90–150°C, то его электрическая изоляция нагревостойкая. Применяется пленка марки ПМФ-С-351 и НМФ-С-352 и пленки

Каптон типа РN, выпускаемые рядом зарубежных фирм. Сопротивление изоляции обмоток ПЭД относительно корпуса должно быть не менее 100 Мом при температуре 20 °С и не менее 0,5 Мом при температуре 105 °С [24]. Полиимидно-фторопластовые пленки имеют высокую диэлектрическую прочность, выдерживают рабочую температуру до 200 °С. Они обладают высоким сопротивлением проколам, истиранию и другим механическим нагрузкам, которые возникают как в процессе протяжки обмотки статора, так и при эксплуатации ПЭД.

Перед протяжкой обмотки статора в пазы укладывают гильзу из изоляционного материала. Фазы обмотки соединены в звезду, а выводные концы обмотки статора соединяются с выводными концами колодки кабельного ввода и изолируются. Обмотка ПЭД двухполюсная $p = 1$, с невысоким коэффициентом заполнения паза 0,6–0,8.

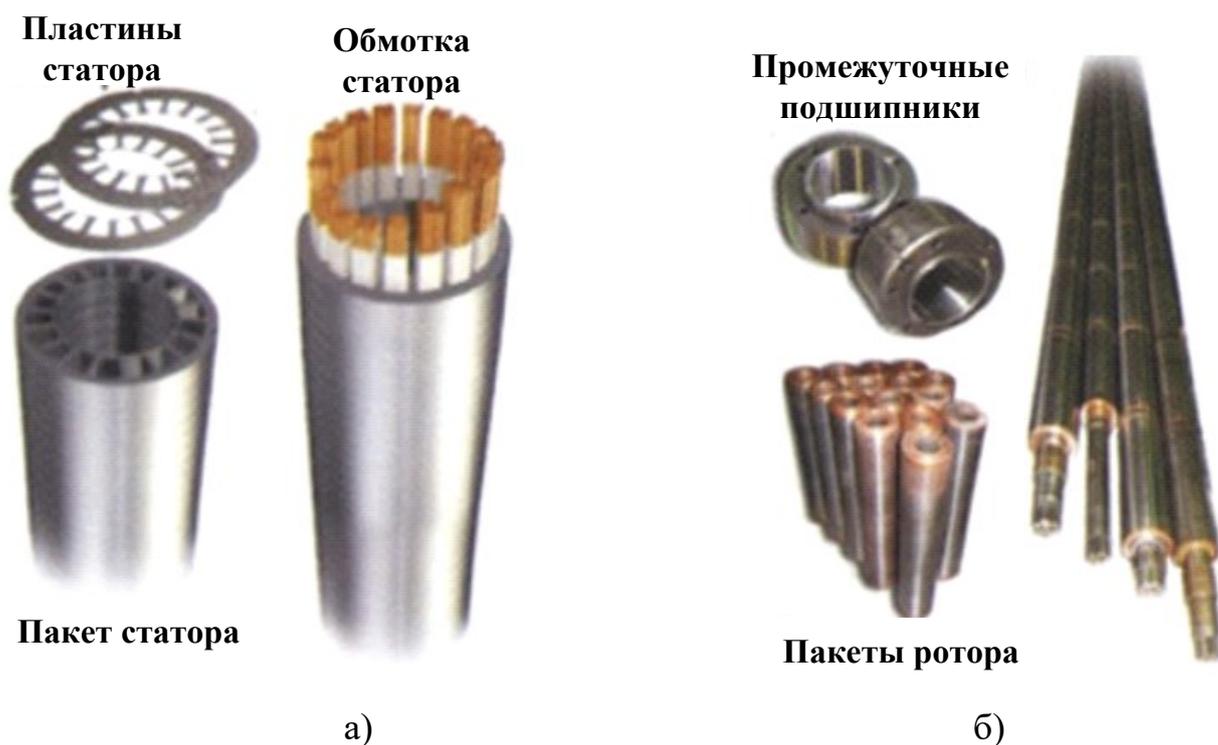


Рисунок 1.5. Элементы статора и ротора ПЭД

Однослойная обмотка и малое число пазов статора являются причиной появления так называемых зубцовых гармоник основного порядка $\nu = Z_1 \pm 1$. Зубцовые гармоники и насыщение магнитопровода существенно влияют на вид механической и электромеханической характеристики ПЭД, особенно в области

пусковых режимов. В итоге ПЭД по энергетическим характеристикам (табл. 1.2 [22]) уступает двигателям общепромышленного исполнения и имеет повышенное номинальное скольжение [2]. Предельная длительно допускаемая температура обмотки статора ПЭД – 170°C, модификации базовой, термостойкой и повышенной термостойкости соответственно. Расчетная рабочая температура – 115 °С.

Ротор ПЭД. Внутри статора размещается ротор 8 (рис. 1.4). Последний представляет собой набор отдельных пакетов (рис. 1.5, б), имеющих каждый самостоятельную короткозамкнутую медную обмотку (беличье колесо). Пакеты ротора шихтуются из отштампованных листов с пазами из электротехнической стали марок Э12, 2212 или 2215.

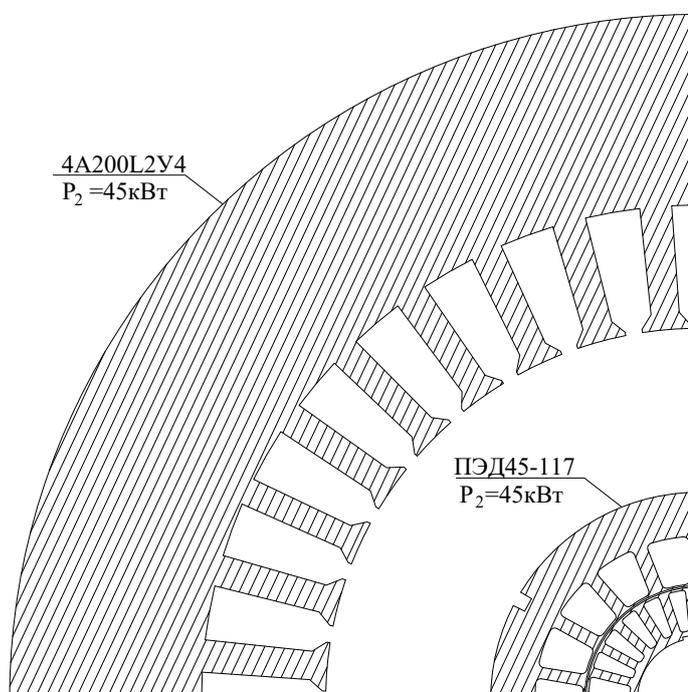


Рисунок 1.6. Листы магнитопроводов погружного и общепромышленного асинхронных электродвигателей

Длина каждого пакета зависит от расстояния между промежуточными радиальными опорами ротора, которое в свою очередь определяется расчетом на прогиб вала. Количество пакетов ротора соответствует количеству активных пакетов статора и зависит от мощности электродвигателя. Приблизительно на один пакет ротора приходится 2–6 кВт полезной мощности. Пакеты ротора насаживаются на вал на шпонку группами по 3–4 пакета и разделяются между собой промежуточными радиальными подшипниками скольжения (рис. 1.5, б),

которые опираются на немагнитные пакеты статора. Таким путем исключается возможное касание ротора о статор (заклинивание ПЭД), которое при длинном роторе и малых воздушных зазорах ($\leq 0,4$ мм) было бы неминуемым.

Группа пакетов фиксируется на валу стопорными кольцами так, чтобы был гарантирован зазор 2–3 мм, компенсирующий тепловые расширения во время работы. Пазы ротора овальные закрытые. В пазы ротора укладываются неизолированные медные стержни. К стержням привариваются медные короткозамыкающие кольца.

Таблица 1.2. Параметры погружных асинхронных электродвигателей

Тип электродвигателя	Ном. мощность, кВт	Номинальное напряжение, В	Номинальный ток, А	Коэффициент полезного действия, %		Коэффициент мощности, о.с.		Скольжение, %	
				ПЭД	АД	ПЭД	АД	ПЭД	АД
ПЭДН16-96-500	16	500	29.2	79.0	89.5	0.80	0.90	6.0	3.5
ПЭДН22-96-700	22	700	28.7	79.0	90.5	0.80	0.89	6.0	2.8
ПЭДН32-96-1000	32	1000	29.2	79.0	91.5	0.80	0.89	6.0	2.0
ПЭДН45-96-1400	45	1400	28.0	80.7	93.4	0.421	0.90	5.5	2.0
ПЭДН50-96-1450	50	1450	29.0	79.8	95.4	0.860	0.90	6.5	2.0
ПЭДН56-96-1750	56	1750	28.5	80.7	93.4	0.803	0.91	5.3	1.7
ПЭДНС45-96-1450	45	1450	25.9	80.7	93.4	0.860	0.90	5.7	2.0
ИЭДНС50-96-1650	50	1650	26.5	81.0	93.4	0.815	0.90	5.1	2.0
ПЭДНС56-96-1950	56	1950	23.8	81.6	93.4	0.857	0.91	5.8	1.7
ПЭДН16-103-600	16	600	24.7	81.6	89.5	0.761	0.90	4.3	3.0
ПЭДН22-103-700	22	700	25.8	81.0	90.5	0.879	0.89	5.8	2.8
ПЭДН28-103-850	28	850	27.5	81.4	91.5	0.857	0.89	5.5	2.0

Сварка осуществляется на основе порошковой металлургии и использования СВЧ-технологий. Благодаря этому достигается высокое качество сварки медных стержней и медных колец, чем обеспечивается низкое переходное сопротивление обмотки ротора. Последняя 10 (рис. 1.4) выполняется без скоса пазов – прямая, что

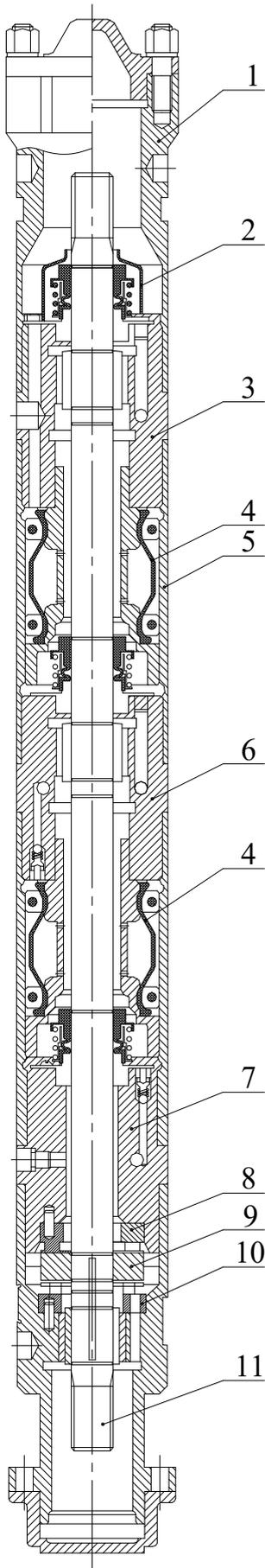
естественно усиливает зубцовые гармоники в магнитном поле воздушного зазора, приводит к появлению соответствующих составляющих в потоке взаимоиндукции между статором и ротором, приводит к усилению паразитных асинхронных моментов и повышению рассеяния. Вал ротора пустотелый с радиальными отверстиями для обеспечения циркуляции масла, выполнен из высокопрочной стали АЦ28ХГНЗФТ, высокой точности. Прутки для изготовления валов имеют диаметры 24,99; 29,99; 34,99 мм; длину – до 8 м. Основным производителем прутков и валов для роторов ПЭД, а также валов ЭЦН, газосепараторов, гидрозащиты является ЗАО «Ижевский опытно-механический завод». Диаметр осевого канала 9 (рис. 1.4) вала ротора ПЭД – 7,1–8,2 мм.

Головка и основание ПЭД. Корпус ПЭД заканчивается в верхней части головкой 1 (рис. 1.4), которая вворачивается в верхнюю часть статора ПЭД [22, 25]. Головка обеспечивает присоединение протектора (гидрозащиты) и содержит узел радиально-опорного подшипника 2, который воспринимает осевые нагрузки от веса ротора и узел токоввода 3, служащий для питания обмотки статора. Узел радиально-опорного подшипника состоит из пяты, которая крепится на вал ротора и подпятника, который устанавливается в головке. В пяте имеются два отверстия, играющие роль турбинки для создания циркуляции масла во внутренней полости двигателя. Подпятник имеет шесть сегментов, между которыми в зону трения подается масло. Узел токоввода содержит электроизоляционную колодку, внутри которой размещены контактные гильзы, связанные с выводами обмотки статора. Электрические контакты находятся внутри полости двигателя, заполненного маслом. В основании, расположенном в нижней части электродвигателя, размещаются масляный фильтр, обратный клапан для закачки в двигатель масла, магниты для улавливания продуктов износа и нижний подшипник, при помощи которого центрируется нижняя часть вала ротора. При использовании гидрозащиты типа Г в основании ПЭД дополнительно размещается перепускной клапан, который обеспечивает сообщение полости электродвигателя с компенсатором.

Гидрозащита ПЭД. Погружные электродвигатели защищены от проникновения внутрь пластовой жидкости, создающей в скважине большое гидростатическое давление. Попадая в ПЭД, агрессивная пластовая жидкость разъедает изоляцию обмоточных проводов и приводит к короткому замыканию обмотки. Кроме того, ухудшается смазка подшипников вала ПЭД. Защита достигается заполнением двигателей диэлектрическим трансформаторным маслом типа МДПЭ, МА-ПЭД8, МА-ПЭД12 с пробивным напряжением 30 кВ, которое благодаря протектору (гидрозащите) находится под избыточным давлением 0,2 МПа относительно внешнего давления пластовой жидкости. Циркуляция масла осуществляется при помощи турбинки, расположенной в верхней части двигателя.

Циркуляция масла внутри двигателя происходит из полости масляного фильтра в основании ПЭД по внутреннему отверстию в валу, затем масло поступает для смазки радиальных подшипников, откуда попадает в зазор между статором и ротором и возвращается к масляному фильтру. Заполнение двигателя маслом выполняет несколько функций: во-первых, в этом случае затрудняется поступление внутрь двигателя агрессивной среды – пластовой жидкости – и ее контакта с магнитопроводом и обмоткой статора и ротора. Во-вторых, масло выполняет свою прямую роль в смазывании трущихся поверхностей подшипников скольжения двигателя.

Рисунок 1.7. Протектор: 1 – головка, 2 – кожух, 3 – ниппель верхний, 4 – диафрагма, 5 – корпус, 6 – ниппель средний, 7 – ниппель нижний, 8 – подпятник верхний, 9 – пята, 10 – подпятник нижний, 11 – вал



В-третьих, масло обеспечивает охлаждение двигателя и способствует равномерному распределению температуры двигателя по его длине. Масло передает тепло статору и через корпус статора – омывающей двигатель пластовой жидкости. Поэтому для охлаждения двигателя необходимо непрерывное протекание пластовой жидкости в межтрубном пространстве между корпусом электродвигателя и обсадной колонной. И чем больше будет скорость прохождения пластовой жидкости, тем лучше будет осуществляться охлаждение ПЭД. Более эффективное охлаждение позволяет применить обмоточный провод меньшего диаметра, что улучшает коэффициент заполнения паза медью и использование железа статора.

Существует несколько вариантов гидрозащиты: П, ПД, Г, выпускаемых в обычном и коррозионностойком исполнении.

В настоящее время на промыслах распространена гидрозащита типа Г, состоящая из двух сборочных единиц: протектора и компенсатора (рис. 1.7 и 1.8 [22]). Протектор, устанавливается между ПЭД и приемным модулем ЭЦН (рис. 1.1), служит для передачи крутящего момента от электродвигателя насосу и для компенсации тепловых изменений объема масла при эксплуатации ПЭД.

Протектор имеет две упругие диафрагмы (верхнюю и нижнюю), за счет деформации которых компенсируется изменение объема масла в электродвигателе (рис. 1.7). Компенсатор расположен в

нижней части ПЭД (рис. 1.8) и предназначен для выравнивания давления в двигателе и компенсации утечек масла через торцевые уплотнения при работе электродвигателя и его остановках.

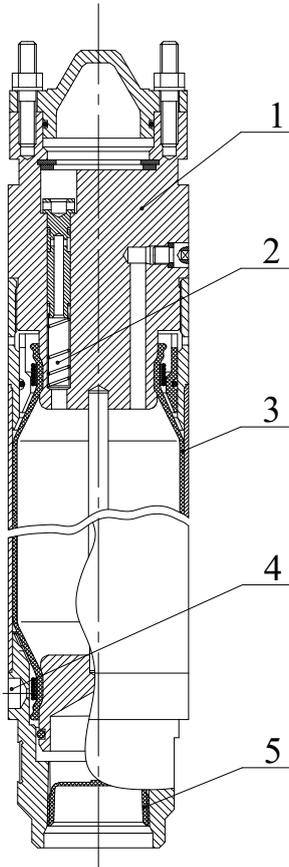


Рисунок 1.8. Компенсатор: 1 – диафрагма в сборе, 2 – поршень, 3 – диафрагма, 4 – отверстие, 5 – пробка защитная

Изменение объема масла компенсируется за счет деформации эластичной диафрагмы компенсатора. В зависимости от температуры двигателя, масло перетекает из полости гидрозащиты в основную полость двигателя, не создавая дополнительного давления и условий для его вытекания в затрубное пространство или попадания агрессивной среды в двигатель.

В целом ПЭД является многодвигательной установкой с несколькими асинхронными двигателями, работающими на общий вал [3, 14] и имеет следующие особенности. В рабочих режимах ПЭД участки магнитопровода статора и ротора находятся в насыщенном состоянии, интенсивность которого изменяется в зависимости от режима работы. В неизолированных медных стержнях короткозамкнутых обмоток ротора ПЭД, повторяющих форму узкого овального закрытого паза магнитопровода ротора (рис. 1.6), проявляется эффект вытеснения тока. Ограниченный по величине наружный диаметр статора и небольшое число пазов $Z_1 = 18$ или 24 усиливает действие зубцовых гармоник магнитного поля ПЭД. Кроме того, наличие составного ротора с числом пакетов от 3-х до 25 повышает влияние технологического разброса параметров пакетов на характеристики ПЭД.

1.3 Проблемы определения параметров схем замещения погружных асинхронных электродвигателей

В последнее время наблюдается интенсивное внедрение в СУ УЭЦН преобразователей частоты (ПЧ) с широтно-импульсной модуляцией для перехода от нерегулируемого электропривода к частотно-регулируемому электроприводу УЭЦН в силу ряда общеизвестных положительных эксплуатационных свойств этого электропривода [26, 27, 28]. Применение преобразователей частоты в составе СУ УЭЦН позволяет:

1) снизить нагрузки на промышленную электрическую сеть и обеспечить экономию электроэнергии в УЭЦН до 40 % от общего электропотребления погружными установками такого рода [29];

2) реализовать плавный пуск и останов УЭЦН, энергосберегающее регулирование производительности при изменении дебита скважины;

3) обеспечить управление широким классом ПЭД как отечественного, так и зарубежного производства мощностью до 500–600 кВт;

4) устранить негативное влияние большого пускового тока на электродвигатель и ударных механических нагрузок, сопутствующих прямому пуску;

– увеличить объем добычи нефти без замены оборудования путем повышения частоты питающего напряжения выше 50 Гц;

– улучшить режим работы нефтеносного пласта;

– обеспечить передачу информации в системы телеметрии.

Надежное и энергоэффективное частотное управление УЭЦН, их качественное моделирование напрямую связано с адекватным выбором эквивалентной схемы замещения ПЭД и с разработкой эффективных методов определения ее параметров по экспериментальным данным. Информация о параметрах необходима для оценки скорости вращения, электромагнитного момента и потокосцеплений ПЭД при моделировании ЭТК УЭЦН [30, 31]. Она требуется также для определения пусковых, рабочих и механических характеристик ПЭД [32], энергетических

показателей ПЭД, для получения достоверных данных об энергетических процессах в УЭЦН, а также для взаимного энергоэффективного согласования ПЧ, ПЭД и ЭЦН. При частотном бездатчиковом регулировании скорости и электромагнитного момента ПЭД возникает необходимость в информации об эквивалентных параметрах асинхронного погружного электродвигателя для организации оптимальных и надежных режимов эксплуатации УЭЦН. Примерами таких режимов являются режим оптимизации напряжения с максимальной экономией электроэнергии, режим поддержания динамического уровня пластовой жидкости [33, 34] и другие режимы.

Идентификация параметров схем замещения ПЭД необходима для оценки измененного технического состояния ПЭД, прошедших ремонтное обслуживание. Причинами таких изменений являются неоднородность магнитных свойств рулонной электротехнической стали, из которой штампуются листы для пакетов статора [35, 36], неравномерность рабочего воздушного зазора в АД из-за несоосности расположения ротора относительно статора и отклонений от прямолинейности внутренней поверхности статора по его длине, действие технологических факторов, например нестабильность характеристик оборудования и инструмента при выполнении операций штамповки, резки, механообработки, термообработки [89, 90], а также влияние вибраций и температуры пластовой жидкости, составляющей $90...150^{\circ}\text{C}$ на глубинах спуска ПЭД $1,0...3,6\text{ км}$ [7].

Следует отметить, что активные и индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора ПЭД недоступны (за исключением активного сопротивления статора) для непосредственного измерения, не определяются при приемосдаточных испытаниях в условиях завода-изготовителя, а каталожные значения параметров могут существенно отличаться от реальных величин. Поэтому возникает необходимость идентификации параметров элементов схем замещения ПЭД на основе экспериментальных исследований.

Для решения этой проблемы в [20] предлагается использовать экспериментально полученную механическую характеристику ПЭД. Возможность снятия такой характеристики появилась в связи с разработкой и изготовлением

ЗАО «НОВОМЕТ-Пермь» специализированных стендов приемо-сдаточных и периодических испытаний ПЭД с нагрузкой до 160 кВт [37], которые предназначены для оснащения предприятий, выпускающих ПЭД, и крупных сервисных центров, обслуживающих УЭЦН с ПЭД.

Стенд «НОВОМЕТ-Пермь» обеспечивает проведение приемо-сдаточных и периодических испытаний, промывку и обкатку погружных короткозамкнутых трехфазных маслозаполненных электродвигателей 4, 5, 5А, 6, 8 габаритов, с питанием от сети переменного тока частотой 50 Гц, напряжением питания от 300 до 3000 В (4200 В), с нагрузкой до 160 кВт, применяемых в качестве привода центробежных и винтовых насосов для откачки пластовой жидкости из нефтяных скважин. В рамках приемо-сдаточных испытаний стенд ЗАО «НОВОМЕТ-Пермь» позволяет получать механические характеристики ПЭД в диапазоне скольжений от идеального холостого хода до короткого замыкания. Оптимизационная процедура идентификации параметров схемы замещения ПЭД, используемая в работах [20], представляет собой частный случай нелинейной регрессии и включает следующие элементы: экспериментально полученную механическую характеристику и теоретически полученную механическую характеристику ПЭД.

Невязка между измеренной и рассчитанной механическими характеристиками в диапазоне скольжений s от 0 до 1 является функцией идентифицируемых параметров ПЭД и итерационно корректируется в сторону уменьшения с помощью функции *FindFit* пакета *Mathematica 5.0* *FindFit [data, expr, pars, vars]*. Здесь *data* – совокупность экспериментальных значений момента на валу ПЭД и соответствующих им скольжений, *expr* – рассчитанная через обобщенные выражения механическая характеристика, *pars* – компоненты векторов активных (R) и индуктивных (X) элементов схемы замещения ПЭД, *vars* – независимая переменная – скольжение. Функция *FindFit* реализует поиск и определяет параметры схемы замещения ПЭД, обеспечивающие наилучшее среднеквадратичное приближение предлагаемой механической характеристики к экспериментальным значениям во всем диапазоне скольжений.

К достоинствам данного метода можно отнести возможность одновременного определения всех идентифицируемых параметров, к недостаткам – большой объем промежуточных вычислений, производимых во время итераций. Другим недостатком является трудоемкость снятия механических характеристик по точкам в диапазоне скольжений от 0 до 1. При этом из-за возможных тепловых нагрузок в процессе измерений может изменяться температура обмоток ПЭД, что приводит к снижению точности измерений. Кроме того, возможность снятия механических характеристик ПЭД может быть реализована только на предприятиях-изготовителях ПЭД и на сервисных центрах, оборудованных дорогостоящими специализированными стендами ЗАО «НОВОМЕТ-Пермь». Между тем параметры схем замещения ПЭД индивидуальны для каждого конкретного электродвигателя и могут существенно изменяться в зависимости от степени насыщения магнитопровода и теплового режима электродвигателя.

Другое направление решения проблемы идентификации параметров асинхронных электродвигателей (АД) реализовано в преобразователях частоты с векторным управлением. ПЧ такого рода обычно имеют встроенную функцию автоматической идентификации параметров АД [38, 39]. Эта функция в моделях ПЧ называется также как «автоадаптация двигателя» [39]; «автоподстройка» [40]; «автонастройка» [41]. Функция реализуется в виде опции и позволяет по исходным каталожным данным асинхронного электродвигателя и набору тестовых режимов, реализуемых в ПЧ без привлечения дополнительных средств (кроме программных), определять параметры электродвигателя для оптимального и энергоэффективного согласования его с ПЧ. Распознанные параметры электродвигателя сохраняются в программном обеспечении микропроцессорной системы управления ПЧ. Коррекция изменяющихся в процессе работы параметров электродвигателя как правило не производится либо для этого используются косвенные данные о температурном и нагрузочном режимах работы АД. Периодическая идентификация параметров АД в процессе его работы осуществляется только в ПЧ фирмы Mitsubishi [42].

Следует отметить, что параметры идентификационной модели АД, алгоритмы идентификации, используемые математические методы фирмами-изготовителями ПЧ не раскрываются, в информационных материалах и в технической документации не приводятся и для пользователей ПЧ недоступны. Как исключение можно отметить инструкцию по эксплуатации привода VLT фирмы Danfoss, в которой упоминаются параметры Т-образной схемы замещения электродвигателя, по-видимому, определяемые в ходе первоначальной автоадаптации АД. Среди отечественных публикаций наиболее полная информация о методах автоматической идентификации параметров АД, реализованных в отечественных ПЧ серии ЭПВ, приводится в работах А. Б. Виноградова [26, 43, 44].

Для определения активного сопротивления R_s обмотки статора АД реализуется средствами ПЧ серии ЭПВ в обмотке статора тестовый режим «неподвижного» вектора напряжения с формированием на обмотке постоянного эквивалентного напряжения U_s . Активное сопротивление определяется как отношение

$$R_s = \frac{U_s}{I_{scp}}, \quad (1.1)$$

где $I_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{si}$ – число замеров эквивалентного постоянного тока статора.

Индуктивность намагничивания АД определяется с помощью тестового режима холостого хода при разгоне электродвигателя до частоты вращения $f_u \approx 0,9 f_{ном}$ близкой к номинальной частоте вращения АД:

$$L_m = \frac{1}{\omega_s} \cdot \frac{E_{cp}}{I_{scp}} \quad (1.2)$$

где $E_{cp} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n E_i$ $I_{mcp} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n I_{mi}$ (E_i , I_{mi} – ЭДС и ток намагничивания на i -том интервале измерения). В процессе разгона ПЧ формирует трехфазное напряжение для обмоток статора электродвигателя согласно характеристике управления $U_s/f_s = const$. Оценка эквивалентной индуктивности рассеяния на зажимах статорной цепи σL_s в электроприводе производится по двум выборкам тока статора

АД на интервале модуляции в тестовом режиме неподвижного вектора напряжения (рис. 1.9, а). При линейной аппроксимации кривой тока статора

$$\sigma L_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{R_s I_{scp} \Delta T_B}{(I_{s1}) - (I_{s2})i'} \quad (1.3)$$

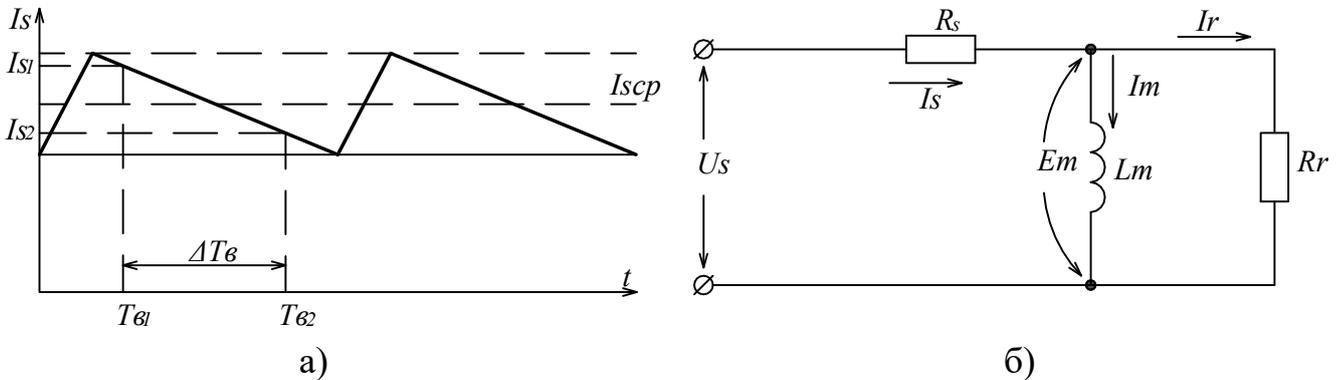


Рисунок 1.9. а – к определению σL_s ; б – упрощенная схема замещения АД в тестовом режиме однофазного питания напряжением пониженной частоты

где I_{scp} – среднее значение тока статора; ΔT_B – интервал между выборками тока; n – число опытов; $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$ – коэффициент рассеяния; L_s – полная эквивалентная индуктивность фазы статора; L_r – полная эквивалентная индуктивность фазы ротора. Заметим, что вопрос о фактическом разделении эквивалентной индуктивности рассеяния σL_s на ее составляющие – индуктивность рассеяния статора $L_{\sigma s}$ и ротора $L_{\sigma r}$ при реализации тестового режима неподвижного вектора напряжения – остается открытым.

Для определения активного сопротивления роторной цепи предлагается три метода. По первому методу сопротивление R_r определяется с использованием результатов измерения индуктивности намагничивания L_m и справочных данных для номинального режима АД:

$$R_r = E_{ном} S_{ном} / I_{rном} \quad (1.4)$$

где $L_{rном} = \sqrt{I_{sном}^2 - I_{mном}^2}$ ($I_{mном} = \frac{E_{ном}}{\omega_{sном} L_m}$; $I_{rном}, I_{mном}$ – расчетные значения токов ротора и намагничивания для номинального режима работы электродвигателя; $E_{ном}$ –

расчетное значение ЭДС ротора для номинального режима работы электродвигателя; ω_s – номинальная частота вращения поля; $S_{ном}$ – номинальное скольжение. Оценка R_r согласно второму методу выполняется по следующим уравнениям:

$$R_r = \frac{E_m}{\sqrt{I_s^2 - I_m^2}};$$

$$I_m = \frac{E_m}{\omega_{кз} L_m} \quad (1.5)$$

$$E_m = \sqrt{U_s^2 - 2U_s I_s R_s \cos \varphi_{кз} + (R_s I_s)^2},$$

где $E_m I_m$ – расчетные значения ЭДС и тока цепи намагничивания; $U_s I_s$ – действующие значения основных гармоник переменных составляющих напряжения и тока фазы статора; $\varphi_{кз}$ – угол сдвига между основными гармониками напряжения и тока фазы. Уравнения (1.5) получены для схемы замещения фазы АД (рис. 1.9, б), справедливой при реализации тестового режима однофазного питания электродвигателя переменным напряжением пониженной частоты $\omega_{кз} \approx R_s / L_m$, когда индуктивностями рассеяния статора и ротора можно пренебречь и считать скольжение $S=1$ (т. к. при таком питании ротор электродвигателя неподвижен). Третий предлагаемый метод оценки сопротивления ротора R_r заключается в реализации средствами ПЧ тестового режима включения «неподвижного» вектора напряжения (рис. 1.10) при нулевых начальных условиях АД и фиксации в кривой переходного процесса нарастания тока статора его установившегося значения I_y и значения тока в точке излома I_{II} .

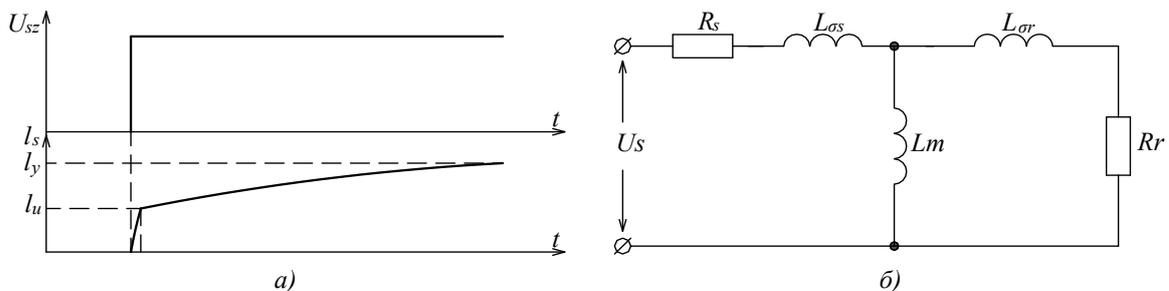


Рисунок 1.10. К оценке R_r методом включения на неподвижный вектор напряжения: а – временные диаграммы; б – схема замещения фазы двигателя

Для оценки сопротивления ротора по третьему методу приводится соотношение

$$R_r = \frac{R_s \cdot (I_y - I_H)}{I_H}, \quad (1.6)$$

основанное на выражениях $U_s \approx (R_s + R_r) \cdot I_H$ и $U_s = R_s \cdot I_y$, относящихся, соответственно, к точке излома и к установившемуся значению тока статора в режиме включения «неподвижного вектора напряжения». Отмечается также, что при введении допущений, позволяющих выделить медленную (статорную) и быструю (роторную) стадии переходного процесса (рис. 1.10), имеется принципиальная возможность оценивания эквивалентной индуктивности рассеяния σL_s и индуктивности намагничивания L_m АД.

Завершая этим обсуждение функции идентификации [26, 43, 44] параметров наземных АД, встроенной в отечественные ПЧ серии ЭПВ, необходимо отметить сложность ее реализации и невысокую точность. Сложность реализации функции обусловлена необходимостью получения на фазах наземных АД с помощью средств ПЧ целого набора тестовых режимов, таких как режим «неподвижного» вектора напряжения, режим холостого хода, режим однофазного питания электродвигателя напряжением пониженной частоты и др. Невысокая точность идентификации параметров АД связана с использованием в расчетных соотношениях каталожных данных, которые могут существенно отличаться от реальных параметров конкретных электродвигателей [45].

Для ПЭД, находящихся в скважине и работающих в составе УЭЦН, получение тестовых режимов, рассмотренных выше, принципиально невозможно [38] из-за наличия в системе СУ УЭЦН с ПЧ - ПЭД повышающего промышленного трансформатора и длинной кабельной линии. Индуктивность и сопротивление жил такого кабеля, как правило, сравнимы с аналогичными параметрами обмотки статора ПЭД и вносят существенную погрешность в экспериментальные данные. Получению тестового режима холостого хода, кроме того, препятствует нагрузка на валу ПЭД в виде ЭЦН.

Для ПЭД, прошедших ремонтное обслуживание либо находящихся на поверхности кустовой площадки, реализация тестовых режимов средствами СУ УЭЦН с ПЧ также практически невозможна, во-первых, ввиду подключения к выходу ПЧ повышающего промышленного трансформатора и, во-вторых, из-за необходимости использования совместимого с конструкцией ПЭД оборудования, заменяющего реальную нагрузку на валу в виде ЭЦН.

Изложенные выше положения указывают на важность и актуальность проблемы разработки эффективных методов определения параметров схем замещения на основе экспериментальных испытаний ПЭД и реализации этих методов в виде переносных установок, пригодных для использования в условиях ремонтных предприятий либо при необходимости на кустовых площадках нефтепромыслов. Важное значение имеет также возможность реализации методов в перспективе на оборудовании преобразователей частоты СУ УЭЦН для энергоэффективного и надежного управления ЭТК УЭЦН.

1.4 Предварительная идентификация параметров модели частотно-регулируемого погружного асинхронного электродвигателя в составе УЭЦН

Электромеханические системы, использующие косвенные методы измерения переменных состояния регулируемых асинхронных двигателей в своем составе имеют три основных блока: силовой канал, внутренний интерфейс, микроконтроллерная система управления (рис. 1.11).

Отличительной особенностью данного варианта компоновки электромеханической системы становится наличие блока оценивания переменных состояния АД, являющегося программно-реализуемым элементом микроконтроллерной системы управления. Как правило, в состав блока оценивания переменных состояния АД входят наблюдатели потокосцепления, угловой скорости ротора и момента на валу АД [2].

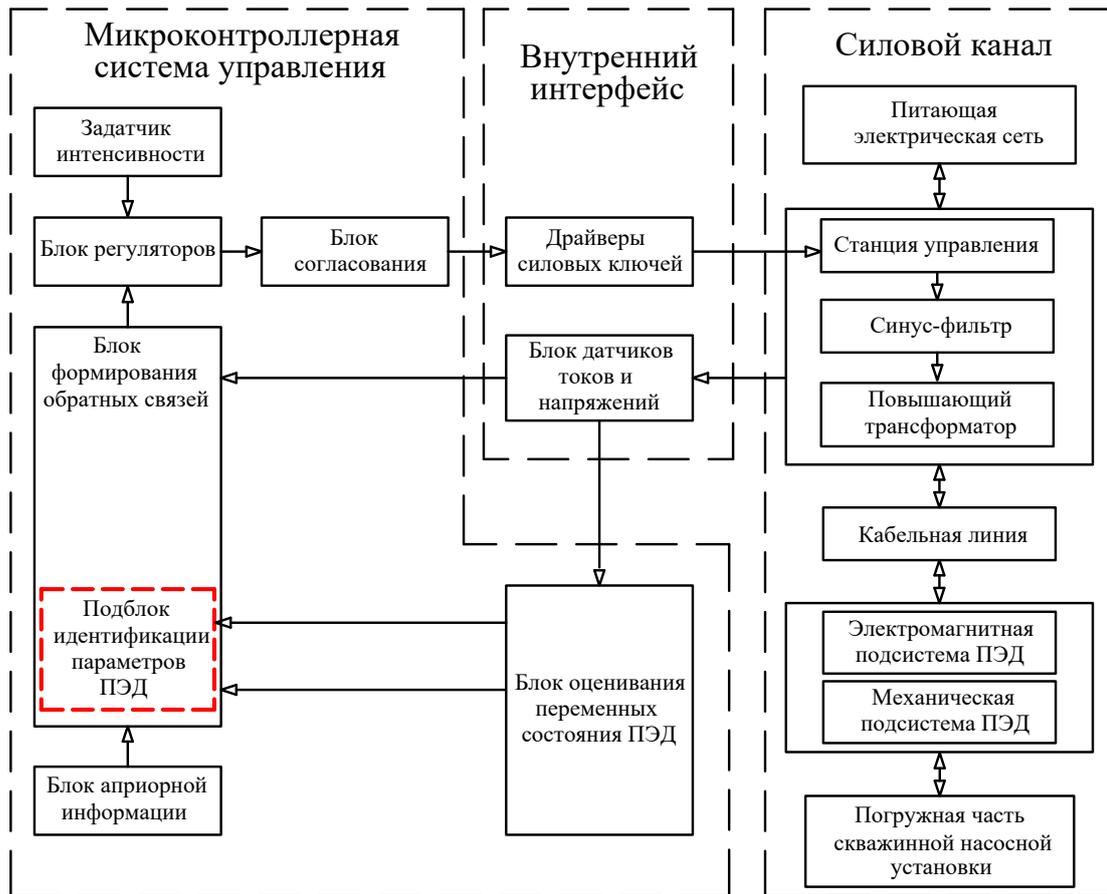


Рисунок 1.11. Электротехническая система с регулируемым погружным асинхронным двигателем, блоком идентификации параметров и блоком оценивания переменных состояния ПЭД

Силовой канал электротехнической системы УЭЦН с регулируемым погружным асинхронным двигателем и косвенным методом измерения переменных состояния (рис. 1.11) включает в себя [46]:

1. Коммутационные элементы для подключения к питающей электрической сети.
2. Наземное оборудование УЭЦН, в состав которого входят такие силовые элементы, как: станция управления, предназначенная непосредственно для управления приводом погружного электроцентробежного насоса, для обеспечения защит технологического оборудования и электродвигателя при аварийных режимах, для отображения и передачи текущей информации состояния электроцентробежного насоса при помощи средств телекоммуникации, для

осуществления контроля и измерения параметров автоматического регулирования; синус-фильтр, который выполняет максимальное приближение формы выходного напряжения ПЧ к синусоиде, тем самым минимизируя значение суммарного коэффициента гармонических составляющих междуфазного напряжения и аналогичного коэффициента для тока; и повышающий трансформатор.

3. Кабельную линию установок, предназначенную для снабжения электроэнергией электродвигателя погружного агрегата.

4. Регулируемый погружной асинхронный электродвигатель, представленный двумя подсистемами:

4.1. Электромагнитная подсистема включает в себя переменные состояния статора и ротора, как правило, проекции вектора тока статора и проекции вектора потокосцепления ротора.

4.2. Механическая подсистема электродвигателя является составной частью одномассовой или многомассовой механической подсистемы электропривода [12], при этом измерению подлежат, как правило, угловая скорость ротора и крутящий момент на валу двигателя.

5. Погружную часть скважинной насосной установки, предназначенную непосредственно для добычи нефти [3].

Внутренний интерфейс электромеханической системы (рис. 1.11) представлен следующими блоками:

1. Драйверы силовых ключей представляют собой специальные микросхемы, предназначенные для коммутации силовых электронных ключей, как правило, мощных тиристоров, MOSFET или IGBT транзисторов.

2. Блок датчиков токов и напряжения проектируется встроенным в корпус электромеханической системы и предназначен для измерения мгновенных значений статорных токов и напряжений.

Микроконтроллерная система управления (рис. 1.11) включает следующие основные блоки:

1. Задатчик интенсивности предназначен для управления интенсивностью переходных процессов электромеханической системы.

2. Блок регуляторов обеспечивает показатели качества и устойчивость электромеханической системы.

3. Блок согласования позволяет согласовывать выходные сигналы регулятора и входные сигналы драйверов силовых ключей, при этом, как правило, в случае полеориентированного управления применяется ШИМ-модуляция.

4. Блок оценивания переменных состояния ПЭД, в состав которого входят наблюдатели потокосцепления, угловой скорости ротора и момента на валу АД.

5. Блок формирования обратных связей обрабатывает мгновенные значения сигналов, поступающих с датчиков, и с учетом полученной информации формирует сигналы каналов обратных связей. Адекватная работа этого блока гарантируется подблоком идентификации параметров ПЭД, который позволяет оценивать параметры Т-образной схемы замещения регулируемого ПЭД и параметры механической системы электропривода в процессе работы.

Блок априорной информации содержит дополнительные сведения об элементах электромеханической системы, например, каталожные данные асинхронного электродвигателя.

Компоновка системы с полным набором датчиков обратных связей и компоновка системы с устройствами оценивания параметров и наблюдателями имеют свои преимущества и недостатки и характеризуются общими замечаниями. Эти преимущества и недостатки зависят от типа систем с регулируемым асинхронными двигателями [46]. В условиях проектирования станций управления УЭУН ввиду наличия объективных трудностей компоновка системы управления электропривода с полным набором обратных связей невозможна. К таким объективным трудностям следует отнести в первую очередь малую пропускную способность каналов связи между станцией управления и блоком погружной телеметрии, а также ограничение конструктивных особенностей погружного асинхронного электродвигателя.

В представленной диссертационной работе изложены результаты исследований, позволяющие провести проектирование, настройку и отладку

подблока идентификации параметров ПЭД в составе электротехнической системы управления УЭЦН.

1.5 Критический обзор методов определения параметров схем замещения асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором

Проблеме определения параметров схем замещения наземных АД посвящена обширная научная и техническая литература. В ней освещаются различные методы, имеющие свои достоинства, недостатки и области применения. К их числу относятся такие методы, как определение параметров АД по опыту холостого хода (хх) и короткого замыкания (кз); определение параметров электродвигателя по каталожным данным; определение параметров АД по экспериментальным данным рабочего режима при различной нагрузке; определение электромагнитных параметров асинхронного электродвигателя путем питания его от полигармонического источника; итерационные методы, использующие фильтры Калмана и другие поисковые алгоритмы; методы идентификации электромагнитных параметров АД, основанные на использовании нейронных искусственных сетей и нечеткой логики; методы определения электромагнитных параметров АД по переходным и частотным характеристикам.

Рассмотрим особенности использования и приемлемость этих методов с позиции точности, требуемого аппаратного обеспечения и возможности технической реализации для определения (идентификации) параметров ПЭД по результатам испытаний в условиях предприятий по ремонту погружного оборудования, на территории кустовых скважин нефтепромыслов, при работе ПЭД на глубине спуска в скважину, а также при моделировании ПЭД в составе ЭТК УЭЦН.

Идентификация по опыту хх и кз [50, 51, 52, 53]. Методика проведения испытаний трехфазных АД по данному методу устанавливается государственным и международным стандартами. Параметры определяются по данным опыта хх, проводимого при скольжении $s=0$, и опыта кз, выполняемого при номинальном

токе АД. Применению методики на ремонтных предприятиях и кустовых площадках нефтепромыслов препятствует необходимость в дополнительном регулирующем оборудовании в виде синхронного электродвигателя и ПЧ и специальной подготовки ПЭД к эксперименту. Реализация методики для ПЭД в скважине принципиально невозможна.

Идентификация по каталожным данным [45, 54, 55, 56, 57]. Обычно каталожные данные наземных АД содержат сведения о номинальном моменте, кратности пускового момента, кратности максимального момента, номинальном токе, кратности номинального тока, коэффициенте мощности и коэффициенте полезного действия для номинальной (100 %) и одной из частичных нагрузок (25 и 50 %). Эти данные позволяют определить параметры схемы замещения асинхронного электродвигателя.

Отечественные и зарубежные производители погружных электродвигателей (предприятия Алнас, Борец, Новомет, Римера, фирмы REDA, Centrilift, Temtex и др.) не предоставляют сведения о параметрах схем замещения выпускаемых ПЭД. В конструкторской документации и в технических условиях на отечественные ПЭД [57] даются результаты опытов холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ), проводимых на предприятиях-изготовителях ПЭД в процессе приемо-сдаточных испытаний, а также приводятся значения сопротивления обмотки статора r_1 , измеренного при постоянном токе и температуре 20⁰С – обязательного пункта программы приемо-сдаточных испытаний.

В опыте хх определяются ток I_0 и потери холостого хода P_0 , коэффициент мощности $\cos\varphi_0$, потери в стали $P_{ст}$, суммарные потери в обмотке статора P_m и механические потери $P_{мех}$ [20]. Эти данные позволяют определить, в частности, индуктивность намагничивания L_m и сопротивление R_m в контуре намагничивания, моделирующее потери в стали. Опыт кз проводится при напряжениях от 30 до 60 процентов номинального значения. Конкретные значения напряжений для каждого типа ПЭД приводятся в соответствующей конструкторской документации, например в [57]. Производители ПЭД в опыте кз определяют ток I_k , мощность P_k и

напряжение U_k короткого замыкания. По этим опытным данным могут быть рассчитаны приведенное сопротивление обмотки ротора r_2' и индуктивность L_k , равная сумме индуктивностей рассеяния статора L_1 и приведенной индуктивности рассеяния ротора L_2' . Вопрос о фактическом разделении индуктивностей рассеяния на L_1 и L_2' в опытах хх и кз не решается.

Основным недостатком метода является низкая точность. Это связано с тем, что каталожные данные рассчитываются в процессе проектирования ПЭД и могут существенно отличаться от реальных величин [45, 54], которые индивидуальны для каждого конкретного электродвигателя благодаря производственному разбросу, а также зависимости параметров ПЭД от его режима работы и теплового состояния. Известно, что активное сопротивление обмотки статора r_1 зависит главным образом от температуры. На величину приведенного активного сопротивления ротора r_2 влияет температура, а также эффект вытеснения тока [20, 47]. Кроме того, при определении параметров не учитываются физические процессы, происходящие в электродвигателе, т. к. принимаются допущения об отсутствии в ПЭД явления насыщения магнитных цепей и вытеснения тока в стержнях короткозамкнутых обмоток ротора. Между тем эти явления оказывают существенное влияние на параметры ПЭД [9, 20].

Идентификация по экспериментальным данным рабочего режима при различной нагрузке [60]. Экспериментальные данные (фазный ток, напряжение, скольжение, активная мощность) получаются в режиме прямого пуска и работы электропривода при различной нагрузке. Метод позволяет определить параметры ротора и ветви намагничивания. Параметры обмотки статора при этом считаются известными, либо вычисляются по приближенным выражениям. Недостатком метода является невысокая точность, т. к. отклонение параметров, считаемых известными, от их истинных значений может приводить к появлению значительных погрешностей в расчетах. Другой недостаток – необходимость дополнительного оборудования для регистрации скольжения ПЭД. При работе ПЭД в скважине регистрация этого параметра невозможна, поскольку

существующие системы ТМС (см. стр. 3) не обеспечивают измерение фактической скорости вращения ротора ПЭД и вала ЭЦН.

Идентификация с питанием от полигармонического источника. В работе [61] рассматриваются методы определения электромагнитных параметров АД с питанием от полигармонического источника. На одну из обмоток статора подается полигармоническое испытательное напряжение, и фиксируются кривые мгновенных значений напряжения и тока статора, которые разлагаются в гармонический ряд для определения составляющих мгновенной мощности по различным гармоникам. По этим данным определяются параметры схемы замещения. Недостатком методов является необходимость в полигармоническом источнике питания, отсутствующим на кустовых площадках нефтепромыслов и территории предприятий по ремонту погружного оборудования.

Идентификация на основе фильтра Калмана и генетических алгоритмов. Первая группа методов основана на поисковых способах оценивания параметров схем замещения АД с использованием различных реализаций фильтра Калмана [61, 63, 64], представляющего собой модель АД, построенную на основе системы дифференциальных уравнений, наблюдателя высокого порядка и других методов. Идентификация позволяет определять текущие значения параметров асинхронного электродвигателя (активные сопротивления и индуктивности статора и ротора, индуктивность цепи намагничивания, электромагнитный момент, частоту вращения ротора, потокосцепление статора и ротора) в режиме реального времени, т. е. непосредственно во время работы электропривода переменного тока с АД. Неадаптивные методы на основе фильтра Калмана используют параметрическое описание модели АД по предварительной идентификации его электрических и магнитных параметров. Адаптивные (замкнутые) методы используют математическое описание АД по предварительной идентификации с введением различных коррекций в целевую функцию по результатам сравнения измеряемых электрических параметров с их оценками на основе поисковых алгоритмов с применением фильтра Калмана (рис. 1.12).

В работе [65] приводится метод идентификации параметров электродвигателя, предназначенный для использования в частотно-регулируемых электроприводах с векторным управлением. По этому методу измеряется ток статора электродвигателя (рис. 1.13) и формируется его вектор i_1 .

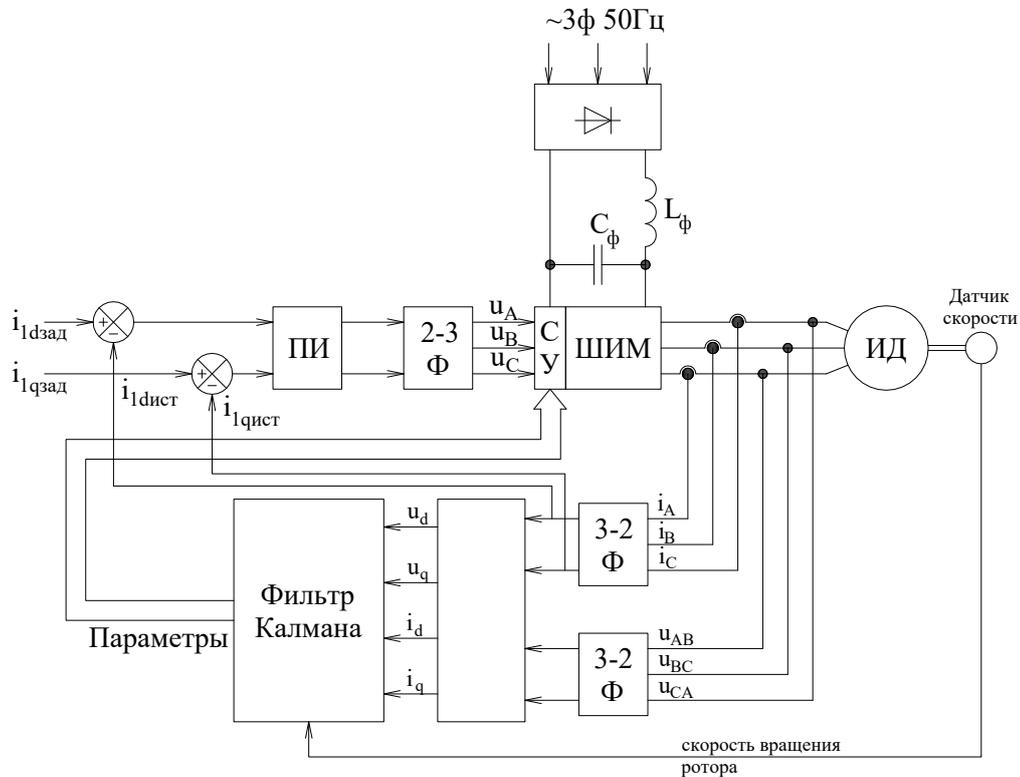


Рисунок 1.12. Определение параметров асинхронного электродвигателя в режиме реального времени с помощью адаптивного метода на основе фильтра Калмана

Параллельно рассчитывается ток статора математической модели асинхронной машины и также формируется вектор \vec{i}_1 данного тока. В качестве входных сигналов для математической модели используется угловая скорость вращения ротора ω и входное напряжение u_1 электродвигателя. Отклонения между измеренными и соответствующими им рассчитанными траекториями вектора тока статора являются функцией параметров схемы замещения электродвигателя. Отклонения итерационно корректируются с помощью идентификационного поискового алгоритма до достижения заданного минимального значения, при этом в качестве поискового алгоритма используется метод градиентного спуска.

Необходимость предварительной идентификации параметров АД исключает возможность применения данных методов для идентификации параметров ПЭД. Другой характерной особенностью методов на основе фильтра Калмана является высокая чувствительность к уровню шумов и их статистическим характеристикам.

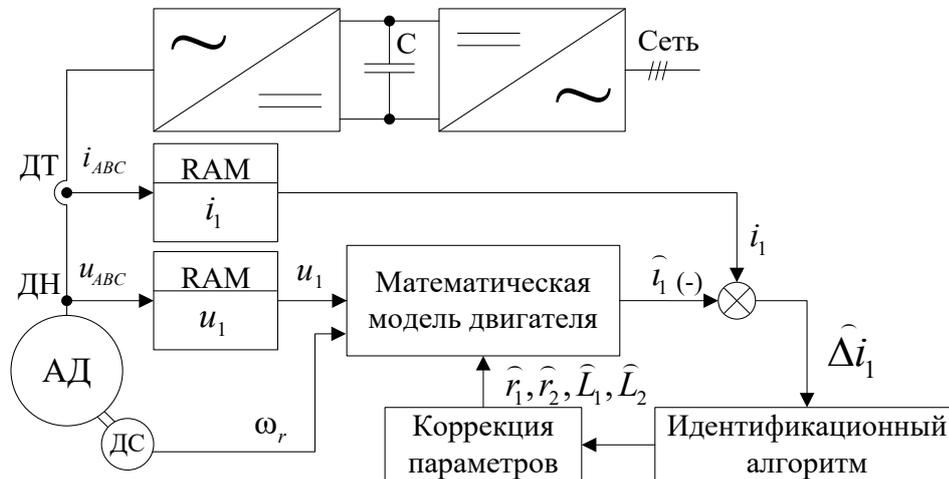


Рисунок 1.13. Идентификация параметров асинхронного электродвигателя при векторном управлении

Это ухудшает устойчивость вычислительных процессов оценивания параметров асинхронных электродвигателей и может стать причиной значительных ошибок и неточностей в определении параметров или неустойчивостей в поисковых алгоритмах оценивания.

Вторая группа методов основана на применении генетических алгоритмов [65, 66, 67]. Метод, представленный в [65], дает оценки параметров АД с погрешностью порядка 19 % и рекомендуется авторами для предварительной идентификации параметров АД. Недостатками методов данной группы является невозможность получения оценок параметров асинхронного электродвигателя в реальном времени в связи с необходимостью предварительной записи информации, необходимой для диагностики. Методы находятся в стадии развития, характеризуются сложностью реализации и большими затратами вычислительной мощности.

Идентификация на основе нейронных искусственных сетей и нечеткой логики [68, 69]. В последнее время появились работы, посвященные методам идентификации параметров схем замещения АД на базе искусственных нейронных

сетей и нечеткой логики. Сложность реализации предлагаемых методов пока позволяет отнести их лишь к потенциально перспективным. Другим недостатком методов с использованием нечеткой логики является необходимость привлечения опытного эксперта по настройке элементов нечеткой логики.

Изложенное выше позволяет сделать следующее заключение. Выбор метода идентификации ПЭД зависит от ряда факторов и прежде всего от того, на каком этапе жизненного цикла ПЭД определяется его техническое состояние, а именно на этапе производства, эксплуатации или ремонта. Реализация рассмотренных методов для идентификации параметров схемы замещения по результатам приемосдаточных послеремонтных испытаний ПЭД на предприятиях по ремонту погружного оборудования и на площадках нефтедобывающих скважин сложна, не технологична и не обеспечивает необходимой точности, т. к. требует сопряжения ПЭД со специальными и сложными нагрузочными устройствами, применения дополнительного оборудования, осуществления набора тестовых режимов, либо наличия специализированных стендов, которыми оснащаются предприятия, выпускающие ПЭД. Использованию рассмотренных методов в нефтедобывающих скважинах при работе погружных электродвигателей на глубинах спуска от 1-го до 3-х км в комплекте с электроцентробежным насосом дополнительно препятствует наличие многокилометровой электропитающей кабельной линии и промышленного повышающего трансформатора.

В этих условиях наиболее приемлемыми следует признать экспериментальные безнагрузочные методы определения эквивалентных параметров ПЭД, реализуемые при неподвижном роторе [70, 71]. Они основаны на питании трехфазной обмотки статора ПЭД по однофазной несимметричной схеме специальными тестовыми сигналами, такими как гармонические воздействия, ступенчатые воздействия, импульсные сигналы, случайные воздействия с заданными параметрами.

Отсутствие сопряжения ПЭД с дополнительным оборудованием, синхронным двигателем или механической нагрузкой делают легко осуществимыми испытания ПЭД в условиях ремонтных предприятий, на

поверхности кустовых площадок и при необходимости на глубине спуска в скважину. Среди перечисленных воздействий наиболее подходит для решения поставленных задач одиночный ступенчатый перепад напряжения. Он легко реализуется с помощью ПЧ СУ УЭЦН и в сравнении с другими сигналами имеет наименьший уровень высших гармонических составляющих, что снижает методическую погрешность измерений. Данный метод идентификации параметров электродвигателей известен в электромеханике как метод, основанный на регистрации переходной характеристики затухания постоянного тока обмотки статора. Он базируется на фундаментальных работах [49, 72, 73, 74, 75], позволяет определять эквивалентные параметры ПЭД в широком диапазоне режимов работы, включая нелинейные режимы, вызванные насыщением магнитной системы ПЭД, эффектом вытеснения в стержнях обмоток ротора тока, и является актуальным.

Идентификация по переходным и частотным характеристикам [20, 51, 76, 77, 78, 79]. По этому методу воздействуют на обмотку статора электродвигателя постоянным напряжением, измеряют в ней установившийся ток I_0 , отключают обмотку от источника напряжения и одновременно замыкают ее накоротко, регистрируют кривую затухания тока в обмотке статора $i_{1эксн}(t)$ до окончания переходного процесса, переходят с помощью преобразования Лапласа и интеграла Фурье к частотным характеристикам и по ним определяют параметры схемы замещения электродвигателя [70]. Для этого в [51, 76, 70, 77, 78 и др.] аппроксимируют регистрируемый сигнал $i_{1эксн}(t)$ суммой экспоненциальных функций

$$i_{1эксн}(t) = \sum_{k=1}^n I_{mk} e^{\lambda_k t}, \quad (1.10)$$

для которых выполняется равенство

$$\sum_{k=1}^n I_{mk} = I_0, \quad (1.11)$$

вытекающее из начального условия

$$i_{эксн.}(0) = I_0. \quad (1.12)$$

В (1.10) количество функций n определяет степень адекватности схемы замещения электродвигателя. Начальные токи экспонент – I_{mk} и коэффициенты затухания – λ_k находят путем обработки оцифрованной переходной характеристики $i_{1эксп.}(t)$. Используя взаимосвязь преобразования Лапласа и Фурье определяют экспериментальные частотные характеристики электродвигателя – зависимости полного входного сопротивления и тока статора от скольжения. Возможно также определение экспериментальных частотных характеристик из опыта пуска АД [51, 76].

По структуре схемы замещения электродвигателя получают выражение ее расчетных частотных характеристик и методами нелинейного программирования выполняют синтез параметров схемы так, чтобы экспериментальные и расчетные характеристики совпадали с заданной точностью. Идентификация по частотным характеристикам позволяет определять параметры схем замещения, вычислять механические, электромеханические, пусковые характеристики и проводить анализ электромагнитных процессов во всем диапазоне скольжения ПЭД. Вместе с тем переход от кривой затухания $i_{1эксп.}(t)$ к частотным характеристикам существенно усложняет процесс определение параметров ПЭД и увеличивает трудоемкость расчетов.

Однозначная связь параметров схемы замещения электродвигателя с кривой затухания $i_{1эксп.}(t)$, делает возможным и, на наш взгляд, целесообразным другой более простой подход к идентификации, использующий непосредственно оцифрованную кривую затухания $i_{1эксп.}(t)$ без привлечения частотных характеристик [79, 20]. Согласно этому подходу для изображений по Лапласу экспериментальной переходной характеристики тока статора

$$i_{эксп.}(p) = I_{эксп.}(p, I_{m1} \dots I_{mk}, \lambda_1 \dots \lambda_k) \quad (1.13)$$

и переходной характеристики, полученной расчетным путем по структуре схемы замещения асинхронной машины

$$i_{расч.}(p) = I_{расч.}(p, r_0, r_1, r_{21} \dots r_{2(N-2)}, x_0, x_1, x_{21} \dots x_{2(N-2)}), \quad (1.14)$$

$$i_{эксп.}(p) = i_{расч.}(p). \quad (1.15)$$

В уравнениях (1.13), (1.14) приняты обозначения: p – оператор Лапласа, N – порядок схемы замещения. Под порядком схемы замещения N понимается число индуктивных элементов N_i схемы замещения, уменьшенное на число независимых узлов N_0 , во всех ветвях которых имеются индуктивные элементы $N = N_i - N_0$ [2]. Далее, применяя метод неопределенных коэффициентов относительно степеней оператора p , получают систему уравнений для параметров схемы замещения асинхронной машины. Решение системы позволяет найти параметры схемы замещения ПЭД.

Следует отметить, что, в отличие от публикаций по частотным характеристикам, вопросы идентификации параметров непосредственно по переходным характеристикам освещены и исследованы в литературе недостаточно полно [79, 80, 20]. Не уделено существенного внимания разработке конкретных методик идентификации, не проведен анализ их точности, не определены рациональные области их применения, не выявлены требования к характеристикам средств измерений и регистрации переходных характеристик затухания постоянного тока обмотки статора, а также требования к структуре таких средств и возможности их реализации в виде мобильных установок, не рассмотрены вопросы реализации методик средствами СУ УЭЦН. Перечисленные аспекты нуждаются в дополнительном рассмотрении и исследовании, которое выполняется в следующих главах диссертации.

1.6 Цели и задачи диссертационного исследования

В ходе проведенного обзора выдвигаем следующую цель исследования:

Совершенствование методик и создание технических средств идентификации параметров моделей асинхронных ПЭД в виде схем замещения, осуществляемых непосредственно по току затухания обмотки статора, определение эксплуатационных параметров и построение рабочих характеристик послеремонтных ПЭД в составе ЭТК УЭЦН добычи нефти. 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 постоянного 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 идентификации параметров T-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 программно-аппаратное техническое средство для регистрации кривой затухания постоянного тока обмотки статора.

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

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

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

9. Провести испытания и сертификацию программно-аппаратного комплекса в государственном аккредитованном центре стандартизации и метрологии.

10. Исследовать возможности программно-аппаратного комплекса для получения значений эксплуатационных параметров и построения рабочих характеристик ЭТК УЭЦН добычи нефти при различных нагрузках, исследовать влияние на качество функционирования ЭТК УЭЦН идентифицированных отклонений параметров послеремонтных ПЭД при вариациях внешних температурных воздействий в условиях сервисных предприятий и на месторождениях добычи нефти.

Выводы по главе 1

1. ПЭД является неразрывной частью ЭТК УЭЦН, выполняет основную технологическую роль по преобразованию электрической энергии в механическую и передаче ее ЭЦН, входит в состав математических моделей ЭТК. Посредством ПЭД осуществляется управление технологическими режимами добычи нефти.

2. Специфика конструкции, условий эксплуатации и режимов работы ПЭД в УЭЦН приводит к необходимости учета явлений насыщения магнитного поля и вытеснения токов в стержнях обмоток ротора при идентификации параметров схем замещения ПЭД, по которым рассчитываются пусковые, рабочие и механические характеристики, энергетические показатели, определяется измененное техническое состояние ПЭД после ремонта, организуются оптимальные и надежные режимы эксплуатации УЭЦН.

3. Методы идентификации параметров модели ПЭД, использующие экспериментальную механическую характеристику и встроенные в ПЧ СУ УЭЦН

функции «автоадаптации» двигателя, малопригодны для реализации в УЭЦН, а также на предприятиях по ремонту погружного оборудования и кустовых площадках нефтепромыслов.

4. 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.

5. Метод регистрации переходного процесса затухания постоянного тока статора неподвижного ПЭД не требует сопряжения ПЭД с дополнительным оборудованием, учитывает насыщение магнитного поля ПЭД и эффект вытеснения тока в обмотках ротора, легко реализуется в условиях ремонтных предприятий, на кустовых площадках нефтепромыслов и при необходимости на глубине спуска ПЭД в скважину.

6. В настоящее время вопросы идентификации параметров схем замещения ПЭД непосредственно по характеристике затухания постоянного тока статора недостаточно освещены и исследованы. Поставлены задачи по разработке методик идентификации, анализу их точности, определению рациональных областей применения, выявлению требований к характеристикам средств измерений и их разработке в виде мобильных установок, реализации методик в перспективе средствами ПЧ СУ УЭЦН.

7. Выбраны наиболее рациональные схемы однофазного включения ПЭД на постоянное напряжение.

2 ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ПЭД ПО ПЕРЕХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ ЗАТУХАНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ОБМОТКИ СТАТОРА

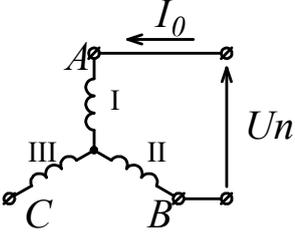
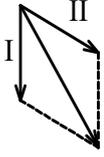
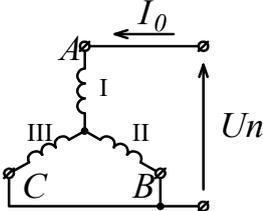
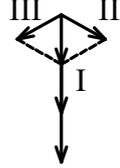
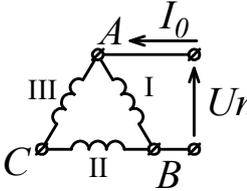
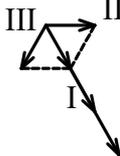
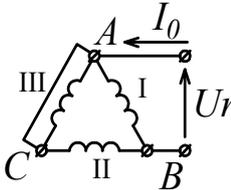
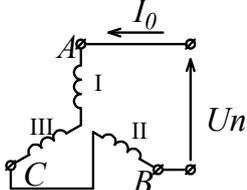
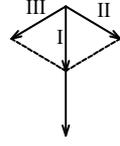
2.1 Определение рациональных схем однофазного включения асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором на постоянное напряжение для реализации переходного процесса затухания тока статора

Важное значение для определения электромагнитных параметров ПЭД имеет схема соединения обмоток статора ПЭД при однофазном питании от источника постоянного напряжения. Возможны разнообразные схемы подключения обмоток статора к источнику постоянного напряжения, часть из которых представлена в табл. 2.1. В настоящее время в международной и отечественной практике для определения электромагнитных параметров машин переменного тока по опыту затухания постоянного тока, реализуемого путем замыкания накоротко питаемой постоянным током обмотки статора, рекомендуется использовать схему неполной звезды с параллельным соединением двух фаз и схему обмотки статора при встречном соединении двух фаз [78, 51]. При этом вторая схема не требует дополнительных соединений и реализуется с меньшими трудозатратами. Первая схема реализуется простым объединением начал обмоток фаз В и С асинхронного электродвигателя и традиционно применяется для экспериментального определения частотных характеристик АД по опыту затухания постоянного тока статора.

Рассмотрение схем соединения обмоток статора, диаграмм магнитодвижущих сил (МДС) и пространственных векторов тока, приведенных в табл. 2.1, показывает, что результирующее потокосцепление при однофазном питании по схеме неполной звезды получается таким же, как и при трехфазном питании обмоток статора синусоидальным током, действующее значение которого равно постоянному току I_0 . Результирующее потокосцепление в опыте питания постоянным током по схеме встречного соединения двух фазных обмоток в $\sqrt{3}/1,5$

раза больше, чем по предыдущей схеме питания. Поэтому при равных значениях результирующих потокосцеплений величина тока I_0 во второй схеме при испытаниях ПЭД должна быть уменьшена в 1.154 раза по сравнению с током I_0 при соединении обмотки статора по схеме неполной звезды. Следует отметить также, что магнитные потоки рассеяния, получаемые в рассматриваемых схемах однофазного питания и при трехфазном питании обмоток статора, не полностью совпадают между собой, несмотря на равные значения результирующих потокосцеплений. Эти различия в магнитных потоках рассеяния отражаются на величинах индуктивности рассеяния L_1 обмоток статора, определенных тем или иным способом. Однако, как показано в работе [51], изменения L_1 относительно невелики и не служат серьезным препятствием для применения рекомендуемых схем соединения обмоток статора для параметрической идентификации схем замещения ПЭД по переходной характеристике затухания тока статора.

Таблица 2.1. Характеристика схем соединения обмоток статора

Схема соединения обмоток	Диаграмма МДС	Пространственный вектор тока
		$\sqrt{3} \cdot I_0 \cdot e^{j30^\circ}$
		$1,5 \cdot I_0 \cdot e^{j0^\circ}$
		$I_0 \cdot e^{j0^\circ}$
		$0,5 \cdot \sqrt{3} \cdot I_0 \cdot e^{j30^\circ}$
		$2 \cdot I_0 \cdot e^{j0^\circ}$

2.2 Анализ однофазного включения ПЭД по схеме неполной звезды

При анализе используются пространственная векторная модель ПЭД и общепринятые [49, 73, 74, 75] допущения:

- воздушный зазор в расточке статора равномерен, поверхности статора и ротора в зоне воздушного зазора гладкие (т. е. без зубцов и пазов), отсутствуют эксцентриситеты расточки статора и поверхности ротора;

- реальная распределенная обмотка ПЭД заменяется сосредоточенной;

- поверхности статора и ротора в зоне воздушного зазора гладкие, намагничивающие силы обмоток и поля распределены вдоль окружности воздушного зазора синусоидально;

- сопротивление внешней цепи $R_{вн}$, отнесенное к одной фазе обмотки статора ПЭД, равно $(2/3) \cdot R_{вн}$ для схемы на рис. 2.1;

- считаем симметричными обмотки ротора и статора;

- пренебрегаем высшими пространственными гармониками магнитного поля;

- принимаем число витков обмоток статора и ротора одинаково.

Математические уравнения равновесия векторов напряжений для контуров статора и ротора ПЭД (рис. 2.1) в ортогональной системе координат (x, y), вращающейся с произвольной угловой скоростью ω_k , записываются следующим образом [26, 74, 83, 82]:

$$\vec{U}_1 = (r_1 + 2/3 \cdot r_{вн}) \cdot \vec{I}_1 + \frac{d\vec{\Psi}_1}{dt} + j\omega_k \cdot \vec{\Psi}_1; \quad (2.1)$$

$$0 = r_{21} \cdot \vec{I}_{21} + \frac{d\vec{\Psi}_{21}}{dt} + j(\omega_k - \omega_2) \cdot \vec{\Psi}_{21}; \quad (2.2)$$

$$0 = r_{22} \cdot \vec{I}_{22} + \frac{d\vec{\Psi}_{22}}{dt} + j(\omega_k - \omega_2) \cdot \vec{\Psi}_{22}; \quad (2.3)$$

$$0 = r_0 \cdot \vec{I}_{r0} + \frac{d\vec{\Psi}_m}{dt}, \quad (2.4)$$

где $\vec{U}_1, \vec{I}_1, \vec{\Psi}_1, \vec{I}_{21}, \vec{\Psi}_{21}, \vec{I}_{22}, \vec{\Psi}_{22}$ – результирующие пространственные вектора напряжений, токов, потокосцеплений статора и двух ветвей ротора; $\vec{\Psi}_m$ – потокосцепление взаимоиндукции между статором и ротором; ω_2 – угловая скорость вращения ротора ПЭД; r_1, r_{21}, r_{21} – активные сопротивления обмоток статора и ветвей схемы замещения ротора;

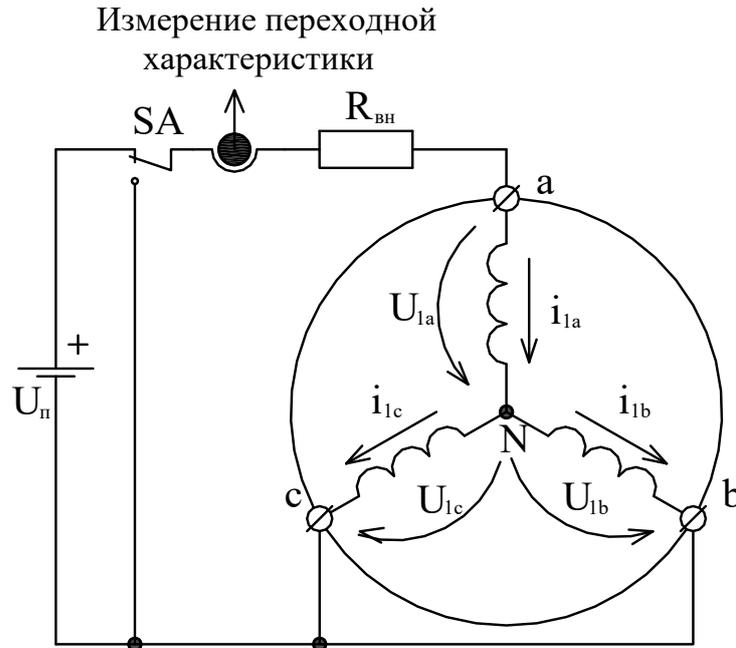


Рисунок 2.1. Схема соединения обмоток ПЭД при снятии переходной характеристики затухания тока обмотки статора: $R_{вн}$ – сопротивление внешней, относительно выводов ПЭД, цепи

r_0 – сопротивление, моделирующее активные потери в стали магнитопровода статора ПЭД; \vec{I}_{r_0} – активная составляющая тока холостого хода ПЭД. Следует заметить, что потери в стали ПЭД могут составлять до 50 % от потерь холостого хода [57], что имеет значение при рассмотрении энергетических характеристик ПЭД. В то же время влияние этого вида потерь на величину и расположение пространственных векторов напряжения, тока и потокосцепления незначительно [26] и его можно не учитывать ввиду малости этого влияния.

Уравнение электромагнитного момента

$$M = \frac{3}{2} \cdot Z_p \cdot \frac{L_m}{L_R} \cdot \vec{\Psi}_2 \times \vec{I}_1, \quad (2.5)$$

где Z_p – число пар полюсов; погружные асинхронные электродвигатели изготавливаются однополюсными [24], поэтому в уравнении (2.5) $Z_p = 1$.

Уравнение вращательного движения:

$$\frac{J}{Z_p} \cdot \frac{d\omega_2}{dt} = M - M_C, \quad (2.6)$$

где J (кг/м²) – момент инерции ротора ПЭД и приведенный к валу момент инерции рабочего механизма – электроцентробежного насоса; M_C (Нм) – момент сопротивления рабочего механизма, приведенный к валу ПЭД.

До и после переключения контакта SA скорость ротора ПЭД при снятии переходной характеристики тока статора равна нулю $\omega_2=0$, поэтому электромагнитный момент $M = 0$ и $\frac{d\omega_2}{dt} = 0$. В связи с этим принимаем $\omega_K = 0$ и записываем уравнения (2.1) – (2.4) в неподвижной системе координат

$$\begin{aligned}\overline{U}_1 &= (r_1 + 2/3 \cdot r_{en}) \cdot \overline{I}_1 + \frac{d\overline{\Psi}_1}{dt}; \\ 0 &= r_{21} \cdot \overline{I}_{21} + \frac{d\overline{\Psi}_{21}}{dt}; \\ 0 &= r_{22} \cdot \overline{I}_{22} + \frac{d\overline{\Psi}_{22}}{dt}; \\ 0 &= r_0 \cdot \overline{I}_0 + \frac{d\overline{\Psi}_0}{dt}.\end{aligned}\tag{2.7}$$

Потокосцепления, входящие в (2.7), определяются совокупным действием токов статора и ротора

$$\vec{\psi}_1 = L_1 \cdot \vec{I}_1 + L_m \cdot \vec{I}_m \tag{2.8}$$

$$\vec{\psi}_2 = L_m \cdot \vec{I}_m + L_{21} \cdot \vec{I}_{21} \tag{2.9}$$

$$\vec{I}_m = \vec{I}_1 + \vec{I}_{21} + \vec{I}_{r_m} \tag{2.10}$$

$$\vec{\psi}_m = \vec{I}_m \cdot L_m. \tag{2.11}$$

Здесь \vec{I}_m – пространственный вектор намагничивающего тока; L_1 , L_{21} , – индуктивности статора и ротора от потоков рассеяния; L_m – взаимная трехфазная эквивалентная индуктивность обмоток статора и ротора, или индуктивность намагничивания, превышающая в 3/2 раза взаимную индуктивность одной фазы статора и ротора [82]:

$$L_m = 1,5 \cdot L_{\phi m}. \tag{2.12}$$

Выбираем далее систему координатных осей α , $j\beta$, жестко связанных со статором. Вещественная ось α совпадает с электрической осью фазы А, мнимая ось

$j\beta$ опережает ось α на 90 эл. град. В данной системе координат результирующие пространственные вектора $\vec{U}_1, \vec{I}_1, \vec{I}_{21}, \vec{I}_{22}, \vec{I}_{rm}$ представляются в виде проекций на координатные оси:

$$\vec{U}_1 = u_{1\alpha} + ju_{1\beta}; \vec{I}_1 = i_{1\alpha} + ji_{1\beta}; \vec{I}_2 = i_{2\alpha} + ji_{2\beta}; \vec{I}_{21} = i_{21\alpha} + ji_{21\beta}; \vec{I}_{22} = i_{22\alpha} + ji_{22\beta}; \vec{I}_{rm} = i_{rm\alpha} + ji_{rm\beta}.$$

При этом система уравнений (2.7...2.10) разделяется на две подсистемы, содержащие отдельно действительные и мнимые части:

$$\begin{aligned} u_{1\alpha} &= (r_1 + 2/3 \cdot r_{BH}) \cdot i_{1\alpha} + L_1 \cdot \frac{di_{1\alpha}}{dt} + L_m \cdot \frac{di_{m\alpha}}{dt} \\ L_m \cdot \frac{di_{m\alpha}}{dt} &= -r_{21} \cdot i_{21\alpha} - L_{21} \cdot \frac{di_{21\alpha}}{dt} \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} 0 &= r_{r0} \cdot i_{(r0)\alpha} + L_m \cdot \frac{di_{m\alpha}}{dt} \\ u_{1\beta} &= (r_1 + 2/3 \cdot r_{BH}) \cdot i_{1\beta} + L_1 \cdot \frac{di_{1\beta}}{dt} + L_m \cdot \frac{di_{m\beta}}{dt} \\ L_m \cdot \frac{di_{m\beta}}{dt} &= -r_{21} \cdot i_{21\beta} - L_{21} \cdot \frac{di_{21\beta}}{dt} \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$0 = r_{r0} \cdot i_{(r0)\beta} + L_m \cdot \frac{di_{m\beta}}{dt}.$$

Мгновенные значения напряжений и токов в координатной системе $\alpha, j\beta$ можно выразить через напряжения и токи фаз асинхронного электродвигателя уравнениями [85, 86]

$$i_\alpha = \frac{2}{3} \operatorname{Re}(i_a + a \cdot i_b + a^2 \cdot i_c) = i_a; \quad (2.15)$$

$$i_\beta = \frac{2}{3} \operatorname{Im}(i_a + a \cdot i_b + a^2 \cdot i_c) = \frac{i_b - i_c}{\sqrt{3}}; \quad (2.16)$$

$$u_\alpha = \frac{2}{3} \operatorname{Re}(u_a + a \cdot u_b + a^2 \cdot u_c) = u_a; \quad (2.17)$$

$$u_\beta = \frac{2}{3} \operatorname{Im}(u_a + a \cdot u_b + a^2 \cdot u_c) = \frac{u_b - u_c}{\sqrt{3}}, \quad (2.18)$$

в которых

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

оператор поворота. В схеме неполной звезды на рис. 2.3(а) обмотки фаз В и С статора соединены параллельно, поэтому $u_{1b} = u_{1c}$ и составляющая напряжения $u_{\beta} = 0$. До коммутации и после коммутации переключателя SA токи $i_{1b} = i_{1c}$ и в соответствии с уравнением (2.16) составляющая тока $i_{\beta} = 0$. Принимая во внимание это, исключаем из рассмотрения систему уравнений (2.14). В уравнениях (2.13) выполняем подстановку $i_{\alpha} = i_{1\alpha}$, $u_{\alpha} = u_{1\alpha}$, $i_{(rm)\alpha} = i_{(rm)1\alpha}$, получаем следующую систему дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} u_{1a} &= (r_1 + 2/3 \cdot r_{BH}) \cdot i_{1a} + L_1 \cdot \frac{di_{1a}}{dt} + L_m \cdot \frac{di_{ma}}{dt}; \\ L_m \cdot \frac{di_{ma}}{dt} &= -r_{21} \cdot i_{21a} - L_{21} \cdot \frac{di_{21a}}{dt} \\ 0 &= r_{r0} \cdot i_{(r0)a} + L_m \cdot \frac{di_{ma}}{dt}, \end{aligned} \quad (2.19)$$

моделирующих фазу «а» схемы на рис. 2.3

2.3 Методика идентификации параметров схемы замещения ПЭД с одноконтурной цепью ротора

Как показано в [20], классическая Т-образная эквивалентная схема ПЭД с одноконтурной цепью ротора обеспечивает для рабочего диапазона скольжений (от холостого хода $s_l = 0$ до критического $s_l = s_{kp}$) такую же точность определения всех необходимых параметров и характеристик ПЭД, как и схема на рис. 2.2 при условии обязательного учета эффекта насыщения. Она обоснованно применяется в ряде работ при исследованиях ЭТК УЭЦН [10, 11, 12] и является достаточно корректной для практического решения задач эксплуатации ПЭД в составе УЭЦН.

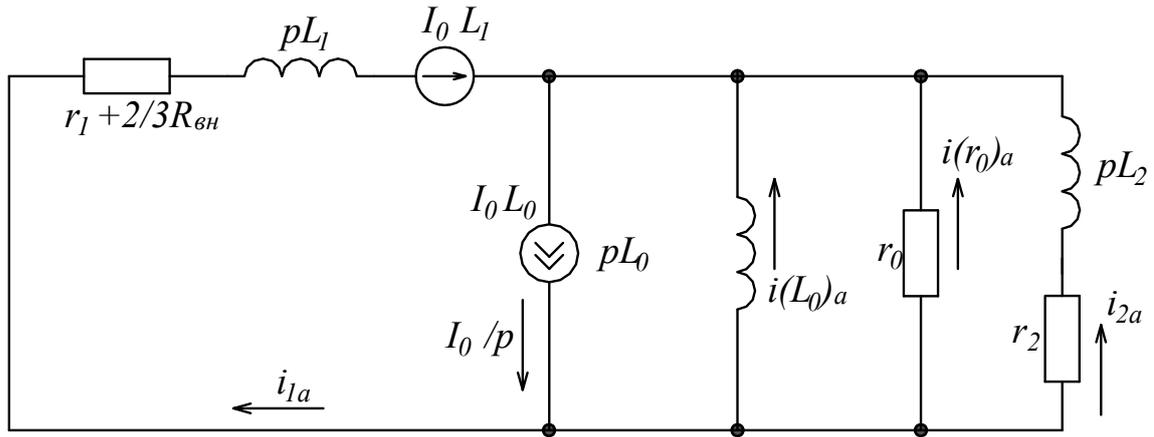


Рисунок 2.2. Электрическая расчетная схема фазы «а» ПЭД с одноконтурной цепью ротора и эквивалентным источником тока

На основании электрической расчетной схемы рис. 2.2, вытекающей из схемы рис. 2.1, можно получить в операторном виде систему уравнений электромагнитного состояния ПЭД

$$\begin{aligned} I_0 \cdot (L_1 + L_0) &= i_{ma}(p) \cdot pL_0 + i_{1a}(p) \cdot \left(r_1 + \frac{2}{3} \cdot r_{BH} + pL_1 \right) \\ I_0 \cdot L_0 &= i_{0ma}(p) \cdot pL_0 + i_{2a}(p) \cdot (r_2 + pL_2); \\ i_{(r_0)a}(p) \cdot r_0 &= i_{2a}(p) \cdot (r_2 + pL_2), \end{aligned} \quad (2.20)$$

и, решив ее относительно $i_{1a}(p)$, найти изображение по Лапласу расчетной переходной характеристики затухания тока статора ПЭД

$$i_{расч}(p) = i_{1a}(p) = I_0 \cdot \frac{p^2 + b_0 p + b_1}{p^3 + p^2 b_2 + p b_3 + b_4}, \quad (2.21)$$

где $b_0 = p_0 + p_2 + p_{01} + p_{02}$; $b_1 = p_2 p_0 + p_2 p_{01}$; $b_2 = p_0 + p_1 + p_2 + p_{01} + p_{02}$

$b_3 = p_0 p_1 + p_1 p_2 + p_0 p_2 + p_1 p_{02} + p_{01} p_2$; $b_4 = p_0 p_1 p_2$;

в свою очередь $p_0 = r_0 / L_0$; $p_1 = (r_1 + 2/3 r_{BH}) / L_1$; $p_2 = r_2 / L_2$; $p_{01} = r_0 / L_1$; $p_{02} = r_0 / L_2$.

Изображение экспериментальной переходной характеристики затухания тока в обмотке статора ПЭД, аппроксимированной суммой трех экспоненциальных составляющих, записывается следующим образом

$$i_{экспер.}(p) = \frac{I_{m1}}{p + \lambda_1} + \frac{I_{m2}}{p + \lambda_2} + \frac{I_{m3}}{p + \lambda_3} \quad (2.22)$$

и после преобразований принимает вид

$$i_{\text{экснер.}}(p) = \frac{a_0 p^2 + a_1 p + a_2}{p^3 + p^2 a_3 + p a_4 + a_5}, \quad (2.23)$$

Где $a_0 = I_{m1} + I_{m2} + I_{m3}$; $a_1 = I_{m1}(\lambda_2 + \lambda_3) + I_{m2}(\lambda_1 + \lambda_3) + I_{m3}(\lambda_1 + \lambda_2)$;

$a_2 = I_{m1}\lambda_2\lambda_3 + I_{m2}\lambda_1\lambda_3 + I_{m3}\lambda_1\lambda_2$; $a_3 = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3$; $a_4 = \lambda_1\lambda_2 + \lambda_2\lambda_3 + \lambda_1\lambda_3$; $a_5 = \lambda_1\lambda_2\lambda_3$.

В результате применения к (2.40) и (2.42) метода неопределенных коэффициентов относительно степеней оператора p получаем систему уравнений

$$\begin{aligned} I_{m1}(\lambda_2 + \lambda_3) + I_{m2}(\lambda_1 + \lambda_3) + I_{m3}(\lambda_1 + \lambda_2) &= I_n(p_0 + p_2 + p_{01} + p_{02}); \\ I_{m1}\lambda_2\lambda_3 + I_{m2}\lambda_1\lambda_3 + I_{m3}\lambda_1\lambda_2 &= I_n(p_2p_0 + p_2p_{01}); \\ \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 &= p_0 + p_1 + p_2 + p_{01} + p_{02}; \\ \lambda_1\lambda_2 + \lambda_2\lambda_3 + \lambda_1\lambda_3 &= p_0p_1 + p_1p_2 + p_0p_2 + p_1p_{02} + p_{01}p_2; \\ \lambda_1\lambda_2\lambda_3 &= p_0p_1p_2; \\ I_{m1} + I_{m2} + I_{m3} &= I_0. \end{aligned} \quad (2.24)$$

Эта система при известных значениях r_1 и r_{BH} имеет аналитическое решение относительно параметров эквивалентной схемы ПЭД:

$$\tau_1 = -I_0 \cdot (I_{m1}\lambda_1 + I_{m2}\lambda_2 + I_{m3}\lambda_3)^{-1}; \quad (2.25)$$

$$L_1 = \left(r_1 + \frac{2}{3} \cdot r_{BH} \right) \cdot \tau_1; \quad (2.26)$$

$$L_0 = -\frac{r_1 + \frac{2}{3} \cdot r_{BH}}{I_0} \cdot \left(-\tau_1 I_0 + \frac{I_{m1}}{\lambda_1} + \frac{I_{m2}}{\lambda_2} + \frac{I_{m3}}{\lambda_3} \right); \quad (2.27)$$

$$\tau_0 = -\frac{L_0}{L_1} \cdot \left[\tau_1 b_1 - \left(\frac{L_0}{L_1} + 1 \right) \tau_1^2 b_0 + \frac{1}{\tau_1} - b_2 \right]^{-1}; \quad (2.28)$$

$$r_0 = \frac{L_0}{\tau_0} \quad (2.29)$$

$$L_2 = L_0 \cdot \left(\tau_0 b_2 - \frac{L_0}{L_1} - \frac{\tau_0}{\tau_1} - 1 - \tau_1 \tau_0^2 b_0 \right)^{-1}; \quad (2.30)$$

$$\tau_2 = (\tau_1 \tau_0 b_0)^{-1}; \quad (2.31)$$

$$L_2 = L_0 \cdot \left(\tau_0 b_2 - \frac{L_0}{L_1} - \frac{\tau_0}{\tau_1} - 1 - \tau_1 \tau_0^2 b_0 \right)^{-1}; \quad (2.32)$$

$$\tau_2 = (\tau_1 \tau_0 b_0)^{-1}; \quad (2.33)$$

$$r_2 = \frac{L_2}{\tau_2}. \quad (2.34)$$

Соотношения (2.44 ... 2.51) включают в себя следующие $b_0 = -\lambda_1\lambda_2\lambda_3$;
 $b_1 = \lambda_1\lambda_2 + \lambda_2\lambda_3 + \lambda_1\lambda_3$; $b_2 = -\lambda_1 - \lambda_2 - \lambda_3$.

Реализация методик идентификации параметров схем замещения ПЭД, разработанных в данном и предыдущем разделах, начинается с определения индуктивности рассеяния обмотки статора согласно выражениям (2.27) и (2.46), которые могут быть представлены общим соотношением

$$L_1 = -\frac{I_0 \cdot \left(r_1 + \frac{2}{3} \cdot R_{BH} \right)}{i_1'(0)}. \quad (2.35)$$

Последнее дается в [100] и получено при $R_{BH} = 0$ по правилам и законам теоретической электротехники без использования упрощающих предположений и допущений, приводящих к потерям его точности. Производную тока статора $i_1'(0)$ в начальный момент времени $t=0$ можно выразить через параметры экспоненциальных составляющих

$$i(0)' = (I_{m1}\lambda_1 + I_{m2}\lambda_2 + I_{m3}\lambda_3)^{-1} \quad (2.36)$$

либо просто вычислить по первому отсчету оцифрованной характеристики затухания $i_{эксн}(t_1)$ как отношение

$$i_1'(0) = \frac{i_{эксн}(t_1) - I_0}{t_1}. \quad (2.37)$$

Для эффективной практической реализации разработанных методов аналитического определения параметров эквивалентных схем замещения ПЭД необходимо осуществить адекватное представление экспериментальных переходных характеристик тока статора $i_1(t)$ суммой экспоненциальных составляющих согласно уравнению (1.10), в котором $k = 3$ для схемы с одноконтурной цепью ротора.

2.4. Оценка погрешности определения производной тока статора на начальном участке переходного процессе его затухания

Для практической реализации методики идентификации параметров ПЭД, основанной на определении производной тока статора $i_1'(0)$, важное значение приобретает оценка погрешности такого определения на начальной стадии характеристики затухания $i_{I_{эксн}}(t)$, т. е. в области малых времен, имитирующих условие $t \rightarrow 0$. В литературе оценка погрешностей определения производной $i_1'(t \rightarrow 0)$ и их влияние на точность идентификации параметров ПЭД достаточного освещения не получили и являются актуальными. Для изучения данной проблемы исследовались Т-образные схемы замещения погружных электродвигателей типов ЭД(Т)12-117-380, 1ЭД(Т)45-117-1000, 1ЭД(Т)63-117-1000, ЭД(Т)90-117-1300.

Для определения значений резистивных и индуктивных элементов схемы замещения ПЭД в [97] приводятся расчетные соотношения

$$Z_{кз} = \frac{U_{кз}}{1,73I_{кз}}, \cos\varphi_{кз} = \frac{P_{кз} \cdot 10^3}{1,73 \cdot U_{кз} \cdot I_{кз}}, R_{кз} = Z_{кз} \cdot \cos\varphi_{кз}, \quad (2.38)$$

$$r_2' = R_{кз} - r_1, X_{кз} = \sqrt{Z_{кз}^2 - R_{кз}^2},$$

и даются сведения (табл. 2.2) о предельно допустимых значениях параметров ПЭД в опытах холостого хода и короткого замыкания.

Таблица 2.2. Данные по опытам холостого хода и короткого замыкания на теплостойкие ПЭД 117 габарита

Двигатели		ЭД(Т)12-	1ЭД(Т)45	1ЭД(Т)63	ЭД(Т)90-
		117-380	-117-1000	-117-1000	117-1300
Параметры					
Сопротивление обмотки статора при $T=20^{\circ}\text{C}$		0,517 $\pm 0,026$	0,66 $\pm 0,033$	0,45 $\pm 0,023$	0,63 $\pm 0,031$
Опыт хх при $T_{\text{хх}}=(115+15)^{\circ}\text{C}$	Напряжение $U_{\text{хх}}$, В	380	1000	1000	1300
	Ток, не более $I_{\text{хх}}$, А	10,5	18	24	29
	Потери, не более $P_{\text{хх}}$, кВт	1,2	4,0	5,0	9,7
Опыт кз	Напряжение $U_{\text{кз}}$, В	200	450	450	500
	Ток, не менее $I_{\text{кз}}$, А	65	100	135	125
	Потери, не более $P_{\text{кз}}$, кВт	18	55	75	80

Однако вероятность одновременного появления предельных значений у всех параметров ПЭД в опытах холостого хода и короткого замыкания в действительности ничтожно мала. Поэтому использование в (2.38) данных из табл. 2.2 приведет к чрезмерному ужесточению значений резистивных и индуктивных элементов в схеме замещения моделируемого ПЭД и к неоправданному ухудшению его параметров и рабочих характеристик относительно параметров и характеристик реального погружного электродвигателя. Применение методик определения параметров Т-образных схем замещения, опирающихся на использование номинальных каталожных (паспортных) параметров ПЭД, таких как номинальная выходная мощность P_2 , номинальное напряжение U_1 , сопротивление обмотки статора r_1 , номинальное скольжение s , номинальные коэффициент полезного действия η и коэффициент мощности $\cos\phi$, позволит получить гораздо лучшие результаты в смысле приближения их к реальным параметрам и характеристикам ПЭД.

В табл. 2.3 приведены эквивалентные параметры Т-образной схемы замещения погружных электродвигателей типов ПЭД типов ЭД(Т)12-117-380,

1ЭД(Т)45-117-1000, 1ЭД(Т)63-117-1000, ЭД(Т)90-117-1300, рассчитанные по соотношениям, представленным в [55, 120]. Номинальное значение перегрузочной способности ПЭД λ принималось при расчетах равным 3,0 на основании сведений, приведенных в работах [9, 20]. Индуктивные сопротивления рассеяния фаз статора и ротора считались согласно рекомендациям [9] равными, при этом соответствующие индуктивности рассеяния определялись как

$$L_1 = L_2 = \frac{0,5X_{кз}}{314}. \quad (2.38)$$

Таблица 2.3. Эквивалентные параметры асинхронных электродвигателей

Двигатель \ Параметры	I_0 , А	r_1 , Ом	r_2 , Ом	L_1 , мГн	L_2 , мГн	r_0 , Ом	L_0 , мГн
ЭД(Т)12-117-380	10,5	0,517	0,510	2,050	2,050	155,293	63,809
1ЭД(Т)45-117-1000	18	0,660	0,968	4,428	4,428	252,609	129,398
1ЭД(Т)63-117-1000	24	0,45	0,719	3,197	3,197	181,7147	87,7537
ЭД(Т)90-117-1300	29	0,63	0,888	3,5673	3,5673	191,375	90,8872

Фактические параметры экспонент

$$i_1(t) = \sum_{k=1}^3 I_{mk} e^{\lambda_k t}, \quad (2.39)$$

аппроксимирующих тестовые переходные характеристики погружных электродвигателей ЭД(Т)12-117-380, 1ЭД(Т)45-117-1000, 1ЭД(Т)63-117-1000, ЭД(Т)90-117-1300, определены по данным табл. 2.3 путем решения системы уравнений (2.43), выполненного в программе Mathematica, и представлены в табл. 2.4 [101], где приняты следующие обозначения $T_1 = \lambda_1^{-1}$, $T_2 = \lambda_2^{-1}$, $T_3 = \lambda_3^{-1}$.

Таблица 2.4. Параметры аппроксимации переходных характеристик $i_{l_{эксн}}(t)$ затухания тока статора ПЭД

Двигатель	Параметры аппроксимации					
	I_{m1}, A	I_{m2}, A	I_{m3}, A	T_1, c	$T_2, мс$	$T_3, мкс$
ЭД(Т)12-117-380, $I_0=10,5A$	8,335	2,1609	0,0040	0,2872	2,377	4,4760
ЭД(Т)45-117-1000, $I_0=18$	14,35	3,6452	0,0047	0,345	3,176	3,591
ЭД(Т)63-117-1000, $I_0=24A$	19,90	4,093	0,005	0,366	3,33	3,82
ЭД(Т)90-117-1300, $I_0=29A$	23,779	5,212	0,009	0,2880	2,367	3,16

Результаты вычисления производной $i_1'(0)$ по данным табл. 2.3 и выражению

$\sum_{i=1}^3 I_{mi} \cdot \lambda_i$ представлены в табл. 2.5.

Таблица 2.5. Составляющие производной тока статора при $t \rightarrow 0$

Производная Двигатель	$I_{m1}/T_1 (A \cdot c^{-1})$	$I_{m2}/T_2 (A \cdot c^{-1})$	$I_{m3}/T_3 (A \cdot c^{-1})$	$i_1'(0) (A \cdot c^{-1})$
ЭД(Т)12-117-380	29,43	909,08	893,6	-1832,1
ЭД(Т)45-117-1000	41,59	1148,37	1249,6	-2409,5
ЭД(Т)63-117-1000	54,37	1229,1	1308,9	-2592,8
ЭД(Т)90-117-1300	82,56	2163,1	2848,1	-5099,7

Как видно из рассмотрения данных, приведенных в табл. 2.4, начальное значение тока I_{m3} у экспоненциальной составляющей, аппроксимирующей начальный быстрозатухающий участок характеристики $i_{l_{эксн}}(t)$, незначительно в сравнении с I_{m2} и I_{m1} , т. к. имеет место соотношение $I_{m3} \ll I_{m2}$ и $I_{m3} \ll I_{m1}$. Однако, несмотря на казалось бы пренебрежимо малую величину I_{m3} , эта составляющая характеристики $i_{l_{эксн}}(t)$ существенно влияет на значение производной затухающего тока статора $i_1'(0)$, рассчитанной через параметры аппроксимирующих функций

$$i_1'(0) = -\left(\frac{I_{m1}}{T_1} + \frac{I_{m2}}{T_2} + \frac{I_{m3}}{T_3}\right) \quad (2.40)$$

Это видно из данных, приведенных в табл. 2.4, и объясняется малой величиной постоянной времени T_3 , намного уступающей значениям T_2 и T_3 .

Таким образом, производная $i_1'(t)$ быстро уменьшается на начальном участке оцифрованной переходной характеристики $i_1(t)$, что дает нарастающую погрешность $\delta_M(i_1(0))$ метода измерения при $t > 0$ – относительную разность между величиной $i_1'(0)$ и мгновенным (в точке опроса) значением производной $i_1'(t)$ в данный близкий к $t = 0$ момент времени определения производной по экспериментальным данным. Методическая погрешность направлена в сторону уменьшения значения $i_1'(0)$.

Методическая погрешность определения производной $i_1(0)$. Эта составляющая погрешности выражается в функции времени соотношением [106]

$$\delta_M(i_1'(0))\% = \left(1 - \frac{i_1'(t)}{i_1'(0)}\right)\% = \left(1 - \frac{I_{m1} \cdot T_1^{-1} \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} + I_{m2} \cdot T_2^{-1} \cdot e^{-\frac{t}{T_2}} + I_{m3} \cdot T_3^{-1} \cdot e^{-\frac{t}{T_3}}}{I_{m1} \cdot T_1^{-1} + I_{m2} \cdot T_2^{-1} + I_{m3} \cdot T_3^{-1}}\right)\% \quad (2.41)$$

Результаты расчета погрешности по выражению (2.41) приведены в процентах на рис. 2.3, из которого видно, что $\delta_M(i_1'(0))\%$ на начальном участке переходной характеристики $i_1(t)$ быстро увеличивается. Длительность этого участка примерно равна $4T_3$, что для ЭД(Т)12-117-380 составляет 17,9 мкс, для ЭД(Т)45-117-1000 – 15,2 мкс, для ЭД(Т)63-117-1000 – 15 мкс и для ЭД(Т)90-117-1300 – 12,6 мкс. По истечении данного времени методическая погрешность $\delta_M(i_1'(0))\%$, как показывают расчеты, достигает для данных типов ПЭД абсолютных значений 51,6 %, 49,8 %, 46 %, 55,1 % соответственно.

В дальнейшем скорость нарастания методической погрешности снижается и определяется в основном постоянной времени T_2 , которая намного превышает T_3 . Методическая погрешность определения по формуле (2.45) индуктивности рассеяния обмотки статора L_l выражается через $\delta_M(i_1'(0))\%$ соотношением [111]

$$\delta_M(L_l)\% = \frac{\delta_M(i_1'(0))}{1 - \delta_M(i_1'(0))} \quad (2.42)$$

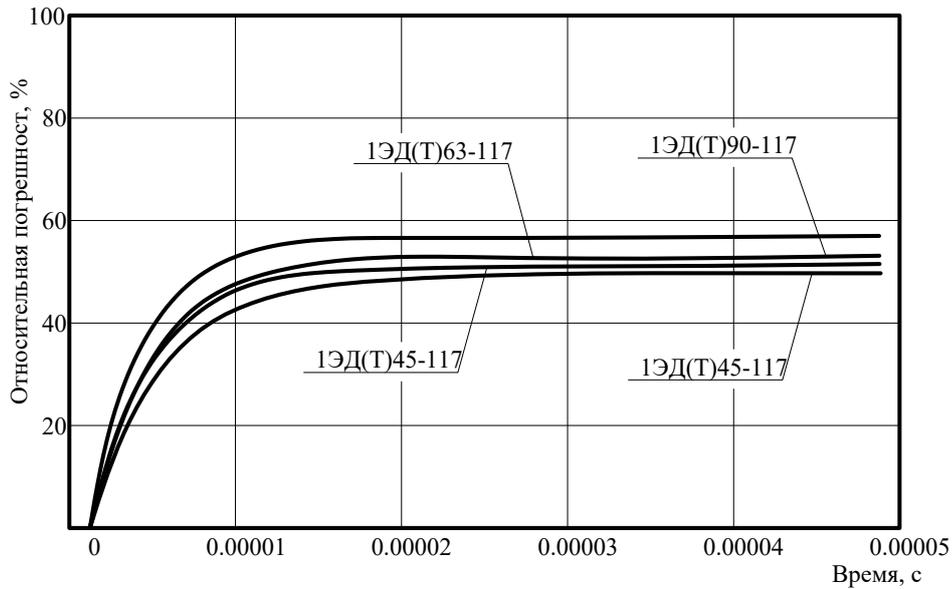


Рисунок 2.3. Методическая погрешность определения производной тока статора

ПЭД на сверхпереходном участке характеристики затухания $i_{1\text{эксп}}(t)$

и, как видно из (2.42), превышает величину $\delta_M(i_1'(0))\%$. При этом значение индуктивности рассеяния получается завышенным.

Большая величина возможной методической погрешности $\delta_M(L_1)\%$ приводит к ошибкам определения индуктивности рассеяния L_1 обмотки статора электродвигателя по результатам экспериментально измерения производной $i_1'(0)$, что может затруднить практическую реализацию методов идентификации параметров ПЭД, основанных на определении производной тока статора на начальном участке кривой затухания $i_1(t)$.

Исследование начальной стадии характеристики затухания $i_1(t)$ у ПЭД типа 1ЭД (Т) 63-117-1000 выполнено также путем схемотехнического моделирования его Т-образной схемы замещения в программном пакете Multisim 12. Фрагменты начального участка характеристики $i_1(t)$ показаны рис. 2.4а и рис. 2.4б. Методическая погрешность $\delta_M(i_1'(0))\%$, обусловленная определением производной $i_1'(0)$ по истечении времени 15 мкс от начала переходного процесса, составляет при схемотехническом моделировании 43,6 %, что согласуется с результатом, полученным с помощью программного пакета Mathematica.

Инструментальные погрешности определения производной $i_1(t)$. Эти погрешности $\delta_{II}(i_1'(0))\%$ зависят от элементной базы, метрологических характеристик установки, осуществляющей цифровую регистрацию переходной характеристики тока $i_1(t)$ обмотки статора ПЭД, и от программного определения параметров схем замещения.

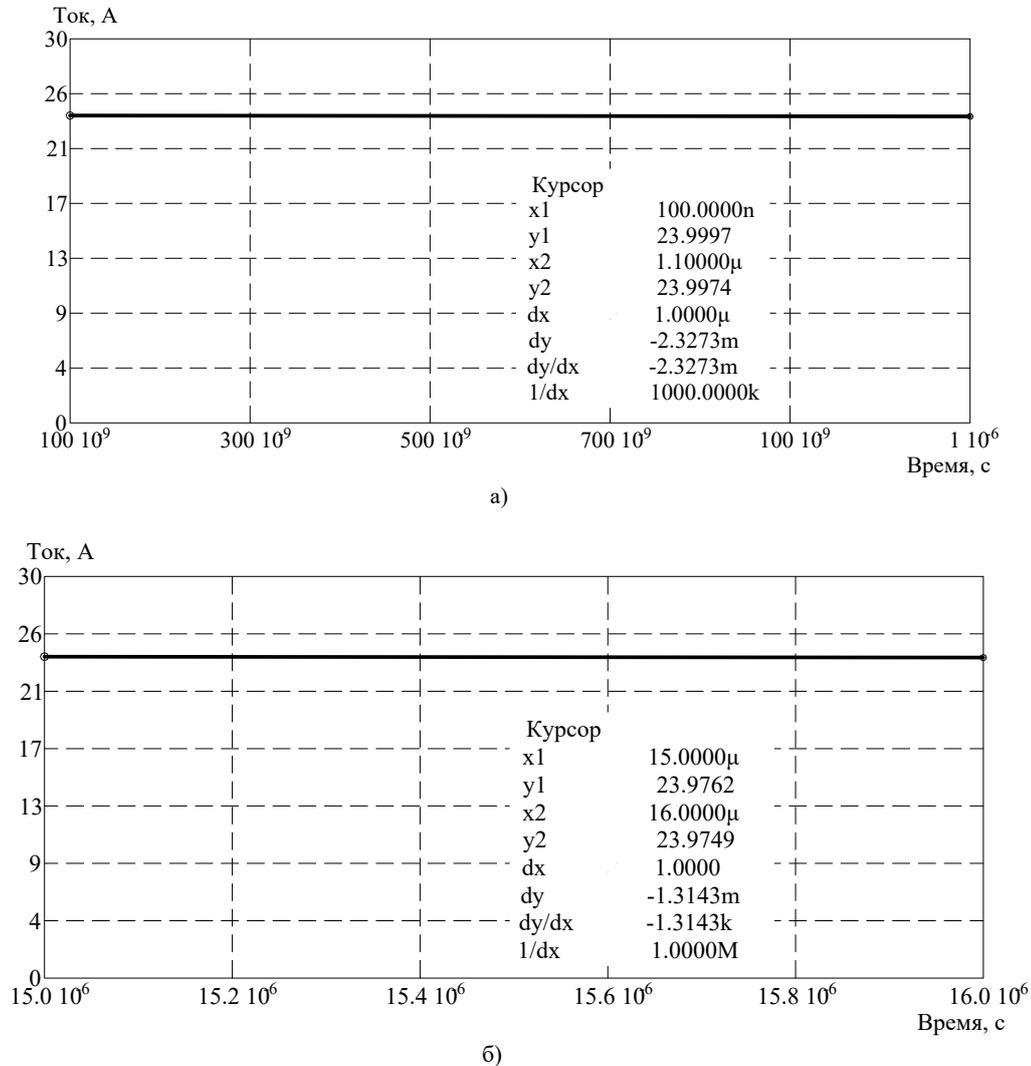


Рисунок 2.4. Интервалы переходной характеристики: а) от 0,1мкс. до 1,1 мкс,

$$i_1'(t) = -2327,3 \text{ A} \cdot \text{c}^{-1}; \text{ б) от 15 мкс. до 16 мкс, } i_1'(t) = -1314,3 \text{ A} \cdot \text{c}^{-1}$$

На величины $\delta_{II}(i_1'(0))\%$ в меньшей степени влияют статические и динамические параметры коммутатора SA на рис. 2.3,а (транзисторные MOSFET и IGBT ключи), стабильность и мощность источника постоянного напряжения U_{II} и в большей степени воздействуют метрологические характеристики датчиков тока и

платы сбора и обработки данных, а также эффективность программного обеспечения [107].

Оценим погрешность $\delta_{и}(i'_1(0)\%$ идентификации параметров ПЭД 1ЭД (Т) 63-117-1000 при использовании в качестве элементной базы установки цифровой регистрации характеристики затухания тока статора $i_1(t)$:

– широко распространенной платы сбора и обработки информации LA-20 USB, содержащей одноядерный микроконтроллер, инструментальный усилитель, АЦП и имеющей диапазоны входных напряжений $\pm 10B, \pm 5B, \pm 2,5B$ и др., разрешение 12 бит, максимальную частоту преобразования 50 кГц [108];

– датчика тока LA 50 – NP на эффекте Холла, имеющего номинальный входной ток, эффективное значение 50 А, напряжение питания $\pm 15B$, величину измерительного резистора max 330 Ом, номинальный аналоговый выходной ток 25 мА, коэффициент преобразования 1:2000, частотный диапазон 0...150 кГц, гальваническую развязку между входной силовой и выходной измерительной цепями [109].

Шумовая составляющая напряжения на выходе АЦП при числе эффективных разрядов в АЦП LA-20 USB $N=11$ [108]

$$\Delta U_{\sigma} = \frac{10 \cdot 10^3}{2^N} = 4,88mB \quad (2.43)$$

Приращение выходного напряжения датчика тока LA-50-PN, регистрируемое в АЦП с десятипроцентной погрешностью $\Delta U_{\sigma} = 48,8mB$. Интервал времени Δt_1 от начала переходного процесса затухания, по истечении которого выходное напряжение датчика тока изменяется на величину $-48,8mB$

$$\Delta t_1 = \frac{\Delta U_{\sigma}}{i'_1(0) \cdot k_{\text{дт}} \cdot r_{\text{изм.}}} = \frac{-48,8 \cdot 10^{-3}}{-2327,3 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 330} = 127\text{мкс}, \quad (2.44)$$

где $k_{\text{дт}}$ – коэффициент преобразования датчика типа LA-50-PN, $r_{\text{изм.}}$ – сопротивление измерительного резистора, Ом. Значение производной тока статора, определенное через его приращение на интервале от 127 мкс до 128 мкс по переходной характеристике рис. 2.10, $i'_1(\Delta t_1) = -1230,2 \text{ А} \cdot \text{с}^{-1}$. Погрешность

определения производной $i'_1(0)$ от действия шумовой составляющей напряжения на выходе АЦП платы LA-20USB

$$\delta_{и}(i'_1(0)) = \frac{i'_1(\Delta t_1) - i'_1(0)}{i'_1(0)}; \quad \delta_{и}(i'_1(0))\% = -47,1\%. \quad (2.45)$$

Погрешность определения индуктивности рассеяния обмотки статора L_1 выражается через $\delta_{и}(i'_1(0))\%$ соотношением (2.72).

Режим предварительного усиления измерительного сигнала в плате сбора и обработки данных LA-20USB. Наиболее применяемый коэффициент усиления инструментального усилителя платы LA-20USB составляет $k_{ус} = 10$. Для данного коэффициента усиления определим интервал времени $\Delta t_{1\text{ус}}$, по истечении которого выходной сигнал датчика тока изменяется на величину $\Delta U_{om} = 48,8\text{ мВ}$.

$$\Delta t_{1\text{ус}} = \frac{\Delta U_{\text{дт}}}{i'_1(0) \cdot k_{\text{дт}} \cdot k_{\text{ус}} \cdot r_{\text{изм.}}} = 12,7 \text{ мкс} \quad (2.46)$$

Производная тока статора на интервале времени от 12,7 мкс до 13,7 мкс, найденная с помощью программной среды Multisim 12.0, составляет $i'_1(\Delta t_{1\text{ус}}) = -1314 \text{ А} \cdot \text{с}^{-1}$. Погрешность $\delta_{и\text{ус.}}(i'_1(0))$ определения производной в режиме предварительного усиления измерительного сигнала равна $\delta_{и\text{ус.}}(i'_1(0))\% = -43,5\%$. Таким образом, усиление на порядок измерительного сигнала в LA-20USB способствует уменьшению величины инструментальной погрешности измерения всего на 3,6 %, что объясняется расположением интервала времени $\Delta t_{1\text{ус}}$ вблизи от участка $4T_3$, составляющего для ПЭД типа ЭД(Т)63-117-1000 15 мкс (рис. 2.3), а интервала времени Δt_1 на участке медленного изменения зависимости инструментальной погрешности определения производной $i'_1(0)$ от времени. Данное обстоятельство позволяет прийти к заключению о том, что предварительное усиление сигнала $i_{1\text{экс}}(t)$ не является эффективной мерой уменьшения этого вида погрешности и повышения точности определения производной $i'_1(0)$.

Последующее рассмотрение временной зависимости методической погрешности $\delta_{м}(i'_1(0))\%$, приведенной на рис. 2.7, показывает, что длительность

участка быстрого нарастания погрешности равна 16 мкс, а средняя скорость изменения методической погрешности на этом участке составляет примерно 2,5 % на 1 мкс, после чего скорость нарастания погрешности значительно снижается до величины порядка 0,32 % на 1 мкс. Таким образом, для определения индуктивности рассеяния статора ПЭД L_1 с методической погрешностью порядка 10 % следует произвести измерение производной $i_1'(0)$ с момента начала переходного процесса за интервал времени, не превышающий 4 мкс, при этом для снижения инструментальной погрешности потребуется АЦП с разрешающей способностью не менее 14 бит.

Этим требованиям удовлетворяют технические характеристики платы сбора данных ЛА-2USB-14 [110], имеющей АЦП 14 разрядов, диапазон входных напряжений $\pm 10\text{В}$, $\pm 2\text{В}$ и др., максимальную частоту выборок 400 кГц. Однако при данной частоте выборки тока статора и длительности переходного процесса его затухания, занимающего несколько секунд (что типично для ПЭД с выходной мощностью в десятки сотни киловатт), объем массива данных получается достаточно большим за время спада $i_{1\text{эксп}}(t)$ до нуля. Так, для ПЭД ЭД(Т)63-117-1000 объем массива составит миллион 14-ти разрядных слов, что потребует дополнительных затрат времени на его обработку с использованием алгоритма Левенберга-Марквардта и применения дополнительных мер по увеличению емкости оперативной памяти данной платы. В этой связи представляет интерес другой подход к определению значения $i_{1\text{эксп}}'(0)$, заключающийся в применении более простого устройства из технического решения [100], специально разработанного для выделения и измерения этой производной у затухающего тока статора.

2.5 Методика идентификации параметров схемы замещения ПЭД с интегральным преобразованием характеристики затухания тока статора

Рассмотрение результатов моделирования и расчетов, представленных в табл. 2.3 и рис. 2.5, показывает, что постоянные времени T_1, T_2, T_3 аппроксимирующих экспонент значительно отличаются друг от друга по величине. Данное обстоятельство дает возможность выделить на характеристике затухания тока обмотки статора ПЭД (рис. 2.10) пологую (хвостовую) часть, крутой участок и «сверхпереходную» быстрозатухающую начальную область [102, 103, 104, 105].

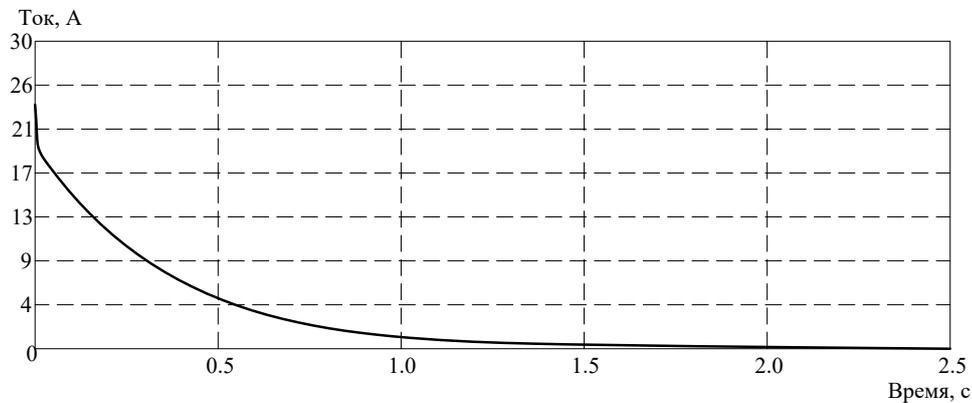


Рисунок 2.5. Характеристика затухания тока статора ПЭД 90-117-1300

Эти особенности переходной характеристики затухания тока обмотки статора ПЭД позволяют составить эквивалентные схемы замещения ПЭД (рис. 2.6) с заторможенным ротором в отдельности для пологого, крутого и «сверхпереходного» участков характеристики затухания [102, 103, 105].

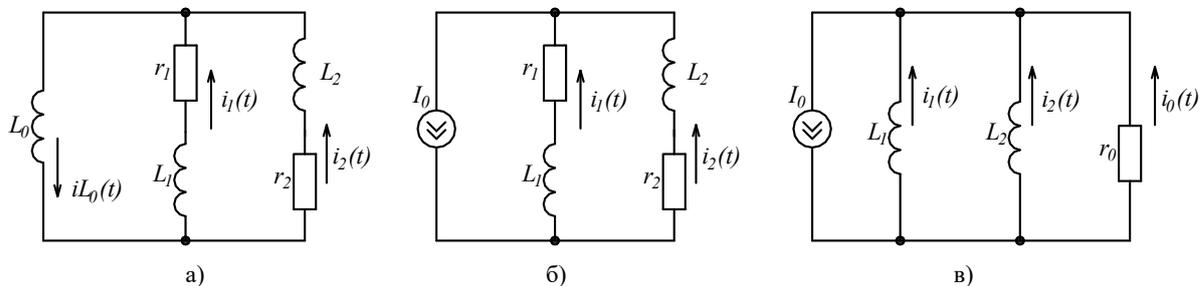


Рисунок 2.6. Эквивалентные схемы ПЭД: а) на пологом участке кривой затухания тока статора, б) на крутом участке кривой затухания тока статора, в) на сверхпереходном участке кривой затухания тока статора в области малых времен

Эквивалентные схемы (рис. 2.6, а, б), соответственно, для пологого и крутого участков кривой затухания тока статора АД 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 $L_0 \gg L_2$, позволяющих без какой-либо значительной ошибки пренебречь:

– влиянием сопротивления r_0 , сопротивлением внешней цепи $R_{\text{вн.}}$, на постоянную времени T_1 (рис. 2.6, а) экспоненты, аппроксимирующей пологий участок характеристики $i_{\text{эксп}}(t)$, который обусловлен процессами гашения энергии магнитного поля АД на сопротивлениях r_1 и r_2 ;

– влиянием индуктивности L_0 и сопротивлений $R_{\text{вн.}}$, r_0 на постоянную времени экспоненты T_2 , (рис. 2.6, б) аппроксимирующей крутой (миллисекундный) участок огибающей переходной характеристики $i_{\text{эксп}}(t)$, который связан с электромагнитными процессами проникновения магнитного поля рассеяния обмотки статора АД в заторможенный ротор.

Основанием для эквивалентной схемы (рис. 2.6, в) являются неравенства $L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} \gg r_1 \cdot i_1(t)$, $L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} \gg r_2 \cdot i_2(t)$, справедливые на сверхпереходном (десятки микросекунд) участке характеристики $i_{\text{эксп}}(t)$ и соотношения $L_0 \gg L_1$ и $L_0 \gg L_2$, которые дают возможность с очень хорошим приближением не учитывать влияние индуктивности L_0 и сопротивлений r_1 и r_2 на величину постоянной времени T_3 сверхпереходной аппроксимирующей экспоненты кривой затухания тока $i_{\text{эксп}}(t)$. Вследствие этого практически точное выражение для постоянной времени T_3 аппроксимирующей экспоненты принимает следующий вид [103, 104, 105]:

$$T_3 = \frac{L_1 + L_2}{r_0 \cdot (L_1 + L_2)}. \quad (2.47)$$

Различие в определении T_3 по формуле (2.70) при подстановке в нее значений эквивалентных фактических параметров электродвигателей из табл. 2.2 в сравнении с фактическими значениями T_3 , приведенными в табл. 2.4, не превышало 2 % для ПЭД и 2,4 % для наземных асинхронных машин.

На основании эквивалентной схемы (рис. 2.6, а) с учетом соотношения $L_0 + L_1 \approx L_0 + L_2$ постоянная времени для медленно спадающего тока на конечном участке

переходной характеристики $i_{эксн}(t)$ выражается с хорошей степенью приближения через эквивалентные параметры электродвигателей следующим образом:

$$T_1 = \frac{(r_1 + r_2) \cdot (L_0 + L_1)}{r_1 + r_2} \quad (2.48)$$

Несоответствие в определении T_1 по формуле (2.75) в сравнении с фактическими значениями T_1 , приведенными в табл. 2.3, не превышало для данного типа электродвигателей 2 %. С учетом формулы

$$L_0 + L_1 = \frac{r_1 \cdot \int_0^{\infty} i_{эксн.}(t) dt}{I_0}, \quad (2.49)$$

которая следует из (2.47) и может быть выведена для Т-образной схемы без использования упрощающих предположений и допущений, получается другое выражение для постоянной времени T_1 в иной, более удобной для применения форме [105]

$$T_1 = \frac{(r_1 + r_2) \cdot \int_0^{\infty} i_{эксн.}(t) dt}{I_0 \cdot r_2} \quad (2.50)$$

Эквивалентная схема ПЭД на рис. 2.6(б), соответствующая крутому участку переходной характеристики затухания тока статора ПЭД, позволяет выразить постоянную времени T_2 аппроксимирующей экспоненты следующим образом:

$$T_2 = \frac{L_1 + L_2}{r_1 + r_2}, \quad (2.51)$$

при этом различие между точными значениями T_2 , приведенными в табл. 2.3 и рассчитанными по формуле, составляет не более 0,7 %.

Определение параметров схемы замещения ПЭД. Из уравнения (2.49) определяется индуктивность ветви намагничивания эквивалентной схемы ПЭД

$$L_0 = \frac{r_1 \cdot \int_0^{\infty} i_{эксн.}(t) dt}{I_0} - L_1, \quad (2.52)$$

которую с очень хорошим приближением можно принять равной

$$L_0 = \frac{r_1 \cdot \int_0^{\infty} i_{эксн.}(t) dt}{I_0} \quad (2.52)$$

Из уравнения (2.50) находится приведенное к статору активное сопротивление обмотки ротора ПЭД

$$r_2 = \frac{r_1 \cdot \int_0^{\infty} i'_{\text{эксн.}}(t) dt}{I_0 T_1 - \int_0^{\infty} i'_{\text{эксн.}}(t) dt} \quad (2.53)$$

Сумма индуктивностей рассеяния обмотки статора и приведенной к обмотке статора индуктивности рассеяния обмотки ротора ПЭД определяется по эквивалентной схеме (рис. 2.6 б) и уравнению (2.51) как

$$L_2 + L_1 = T_2 \cdot (r_1 + r_2). \quad (2.54)$$

При необходимости определения L_1 и разделения этой суммы на две составляющие можно использовать оцифрованную характеристику затухания тока обмотки статора ПЭД $i'_{\text{эксн.}}(t)$ и соотношение (2.37), в котором t_1 – момент времени первого измерения тока.

Сопротивление активных потерь в параллельной ветви намагничивания схемы замещения ПЭД выражается (рис. 2.6 в) через постоянную времени сверхпереходного участка кривой затухания $i'_{\text{эксн.}}(t)$ тока статора [105]

$$r_0 = \frac{L_1 \cdot L_2}{T_3 \cdot (L_1 + L_2)}, \quad (2.55)$$

где разделение $L_1 + L_2$ на L_1 и L_2 , необходимое в частности для определения сопротивления r_0 параллельной ветви намагничивания схемы замещения ПЭД, может быть выполнено следующим образом:

– путем вычисления L_1 по (2.35) с использованием результатов первого измерения тока $i'_{\text{эксн.}}(t_1)$ в момент времени t_1

$$L_1 = \frac{I_0 r_1 t_1}{I_0 - i'_{\text{эксн.}}(t_1)}; \quad (2.56)$$

– выбором с учетом рекомендации [9] $L_1 = L_2$, что можно считать допустимым, поскольку влияние r_0 на величину и расположение пространственных векторов напряжения, тока и потокосцепления асинхронных электродвигателей незначительно [26];

– снятием и регистрацией двух характеристик затухания тока статора, одну из которых получают при соединении обмоток статора ПЭД по схеме неполной звезды (рис. 2.3 (а)), а другую – по схеме встречного соединения двух фаз (рис. 2.3 (б) при разомкнутой третьей фазе.

Выводы по главе 2

1. 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.

2. Разработаны методики идентификации параметров схем замещения ПЭД с одноконтурной цепью ротора, основанные на определении значения производной тока статора в начальный момент времени протекания переходного процесса его затухания, вызванного отключением обмоток статора от источника постоянного напряжения и замыканием их накоротко при неподвижном роторе.

3. Разработана методика идентификации параметров схем замещения ПЭД с одноконтурным ротором, основанная на определении значения интеграла от характеристики затухания тока обмотки статора ПЭД, близкая по точности к методике, основанной на определении значения производной $i_1'(0)$.

4. Произведена оценка методической и инструментальной погрешности измерения производной тока статора $i_1'(0)$ на начальном участке переходной характеристики его затухания. Для измерения $i_1'(0)$ рекомендован интервал от начала характеристики длительностью 4 мкс, за пределами которого погрешность определения индуктивности рассеяния L_1 по результатам измерения превышает приемлемые значения.

3 РАЗРАБОТКА АППАРАТНЫХ СРЕДСТВ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ПОГРУЖНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ УПРАВЛЕНИЯ АППАРАТНОЙ ЧАСТЬЮ

Для получения переходных характеристик исследуемых двигателей и последующей обработки их математическим аппаратом необходим измеритель с малым выходным сопротивлением, стабильным источником напряжения, силовым коммутатором и системой управления для организации процесса формирования характеристики затухания тока. В измеритель также должна входить система сбора данных, поступающих от датчиков тока обмотки статора ПЭД. При формировании переходных характеристик необходимо иметь возможность плавной регулировки начального тока I_0 , подаваемого в цепь обмотки статора ПЭД, для формирования переходных характеристик в широком диапазоне режимов работы, включая нелинейные режимы, вызванные насыщением магнитной системы ПЭД и эффектом вытеснения тока в глубокопазных электродвигателях.

Основными целями главы являются:

- разработка измерителя такого рода, способного регистрировать с необходимой точностью переходные характеристики, сохранять и передавать в ноутбук полученную информацию;
- разработка программных средств, предназначенных для последующей обработки информации в ноутбуке и идентификации параметров схем замещения ПЭД.

3.1 Описание установок идентификации параметров модели ПЭД

Для идентификации эквивалентных параметров ПЭД разработаны и эксплуатируются мобильная (передвижная) [112] и кейсовая (переносная) [113, 114, 115] установки, представленные на рис. 3.1, а, б.



а)



б)

Рисунок 3.1. Установки идентификации параметров ПЭД: а – передвижная версия установки; б – переносная версия установки с пакетом статора и секцией ротора ЭД(Т)63-117-1000

Установки позволяют определять параметры схемы замещения ПЭД в широком диапазоне режимов работы (до 30...50 А), включая нелинейные режимы, вызванные насыщением магнитной системы ПЭД и эффектом вытеснения тока в

глубокопазных электродвигателях. Принцип действия установок основан на цифровой регистрации переходной характеристики затухания $i_{l_{эксн}}(t)$ обмотки статора ПЭД, программном определении параметров схем замещения, однозначно связанных с характеристикой $i_{l_{эксн}}(t)$, и выдаче их в удобной для пользователя форме.

При испытании ПЭД переходная характеристика $i_{l_{эксн}}(t)$ аппроксимируется суммой экспоненциальных составляющих, количество которых определяет степень адекватности схемы замещения ПЭД и задается в программной части установки. Параметры экспоненциальных составляющих находятся программным путем. По полученным данным вычисляются параметры схемы замещения ПЭД при заданной ее структуре. Массогабаритные показатели кейсовой установки улучшены в сравнении с мобильной установкой главным образом за счет применения малогабаритных свинцовых необслуживаемых аккумуляторных батарей Delta HR 12-7.2 12 В / 7,2 А·ч, а также жидкокристаллического индикатора и микропроцессорных контроллеров взамен стрелочного индикатора и схем управления с жесткой логикой.

Основой измерителя (рис. 3.1, б) с функциональной схемой (рис. 3.2) является контроллер ATmega16 DD2 (рис. 3.3), принимающий данные с платы управления для задания режимов силовому модулю на MOSFET транзисторах IRL 2505. Второй контроллер DD1 аналогичной модели обеспечивает необходимые режимы для формирования тока, а также индикацию текущего тока и напряжения на жидкокристаллическом индикаторе в измеряемой цепи посредством датчиков тока, встроенных в выходную цепь измерителя. Источник напряжения на аккумуляторной батарее Delta HR 12-7.2 12 В / 7,2 А·ч способен выдавать ток до 20А при полном отсутствии пульсаций для получения качественной переходной характеристики и стабильности процесса измерения.

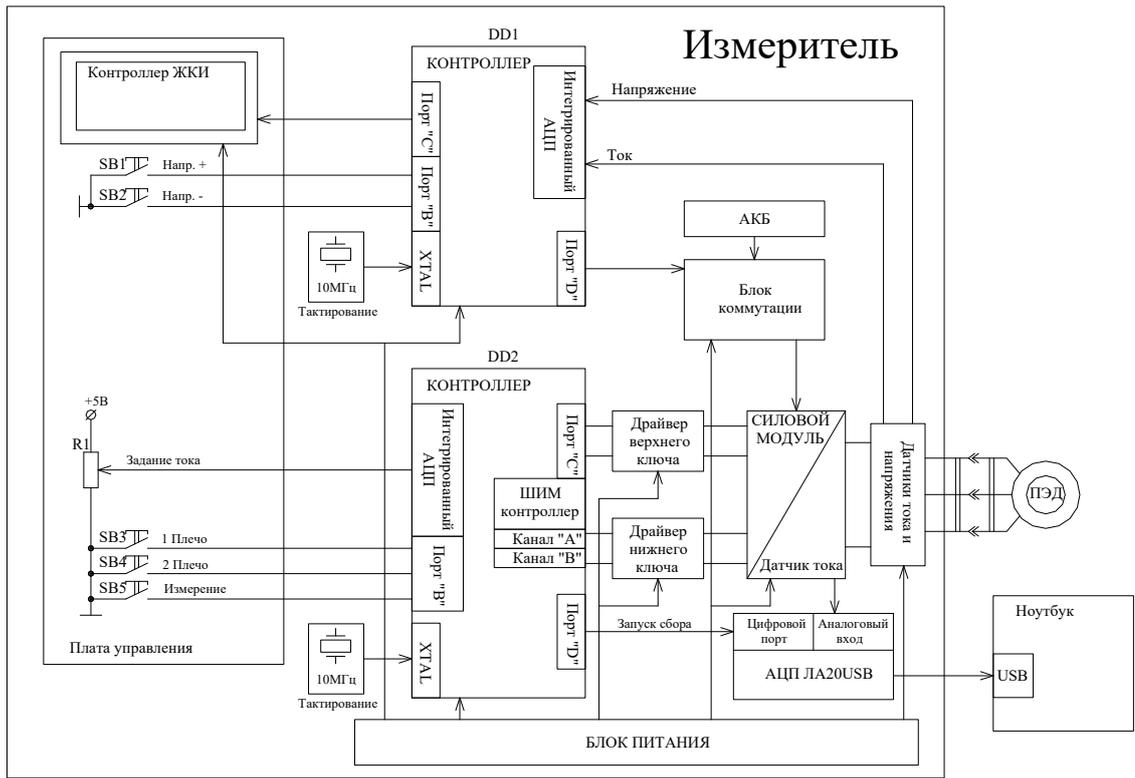


Рисунок 3.2. Функциональная схема измерителя

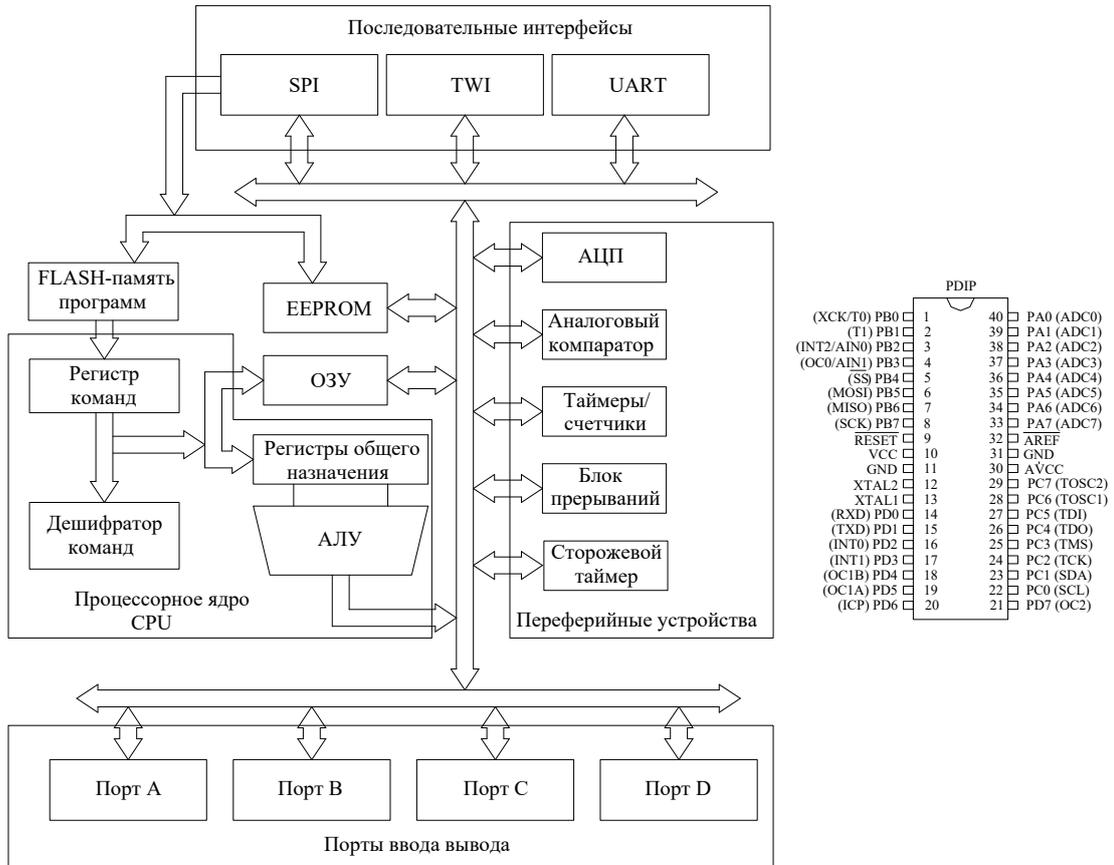


Рисунок 3.3. Архитектура и цоколевка контроллера ATmega16

Контроллер серии ATmega16 (таблица 3.1) – 8-разрядный высокопроизводительный AVR микроконтроллер с малым потреблением и прогрессивной RISC архитектурой 130 высокопроизводительных команд, большинство команд выполняется за один тактовый цикл.

Таблица 3.1. Характеристики микроконтроллера ATmega16

Наименование	Значение параметра
Регистры общего назначения	32 8-разрядных рабочих регистра
Производительность	16 MIPS (при тактовой частоте 16 МГц)
Память программ	Энергонезависимая память программ и данных
	16 Кбайт внутрисистемной программируемой Flash-памяти
	Обеспечивает 1000 циклов стирания/записи
Память EEPROM, байт	256
Память ОЗУ (SRAM), байт	512
Количество прерываний Внутр./внеш.	20/3
Таймеры 8/16 бит	2/1
Число каналов ШИМ	4
Число каналов АЦП	8
Аналоговый компаратор	+
Сторожевой таймер	+
Количество команд	130
Тип корпуса	DIP40, TQFP44 (Рисунок 3.6)

Микроконтроллер имеет программируемую блокировку, обеспечивающую защиту программных средств пользователя. Контроллеры DD1, DD2 реализуют настройку измерителя на необходимый режим получения переходной характеристики и организацию процесса измерения в автоматическом режиме с выдачей сигнала запуска сбора аналого-цифровому преобразователю.

Управление ключами силовой части реализует контроллер DD2 с помощью драйверов верхнего и нижнего ключа, выполненных на микросхеме IR2113 рис. 3.4, а также производит формирование ШИМ сигнала с регулируемой скважностью для нижних ключей транзисторов силового модуля.

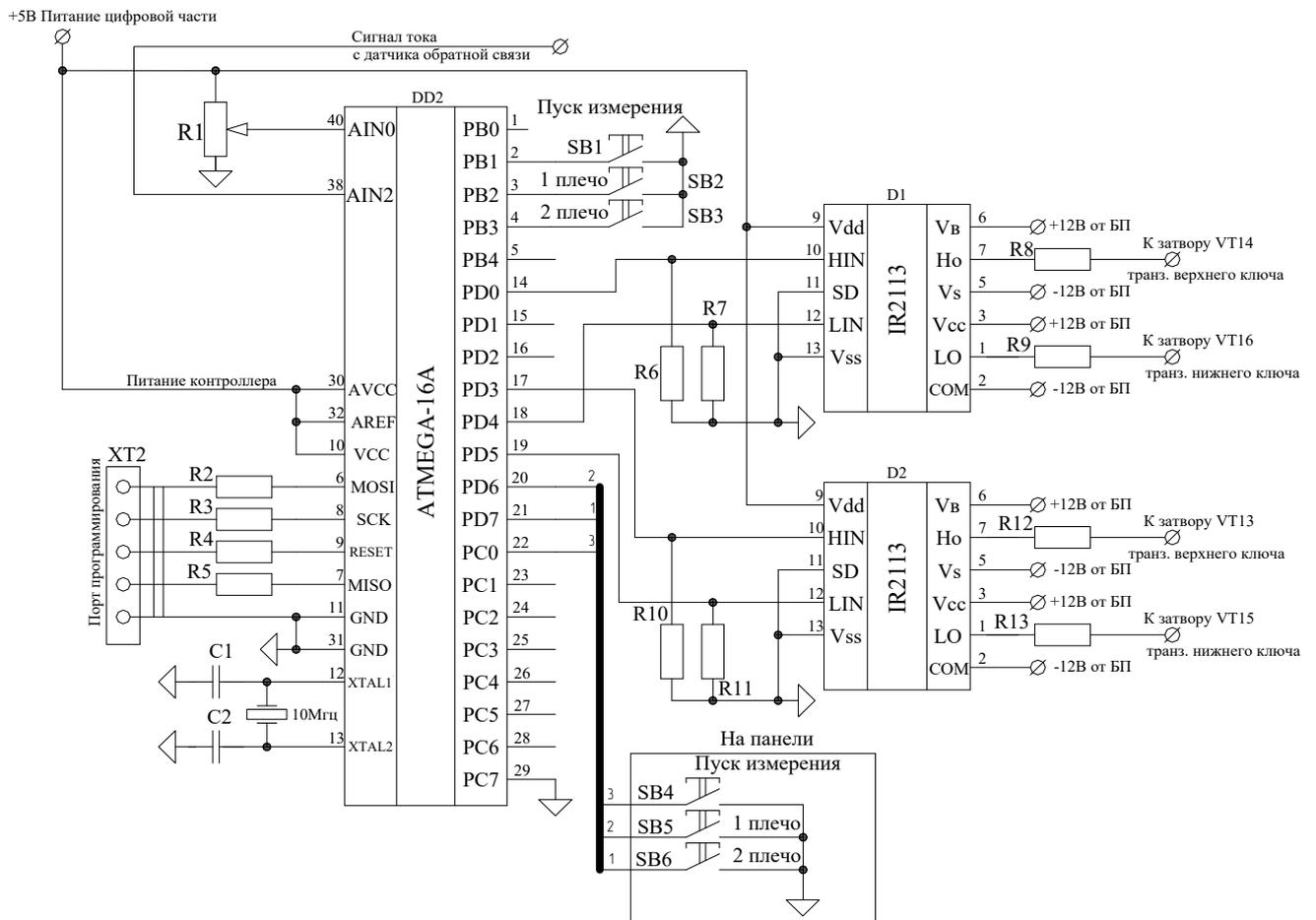


Рисунок 3.4. Принципиальная схема управления силовым модулем

Задание тока реализуется с помощью переменного реостата R1, напряжение с которого измеряется интегрированным АЦП микроконтроллера DD2, канал AIN0. Контроллер пропорционально измеренному напряжению изменяет скважность ШИМ сигнала одного из транзисторов нижних ключей для регулирования тока в обмотке измеряемого двигателя, подключаемого в диагональ моста транзисторов силового модуля (рис. 3.5).

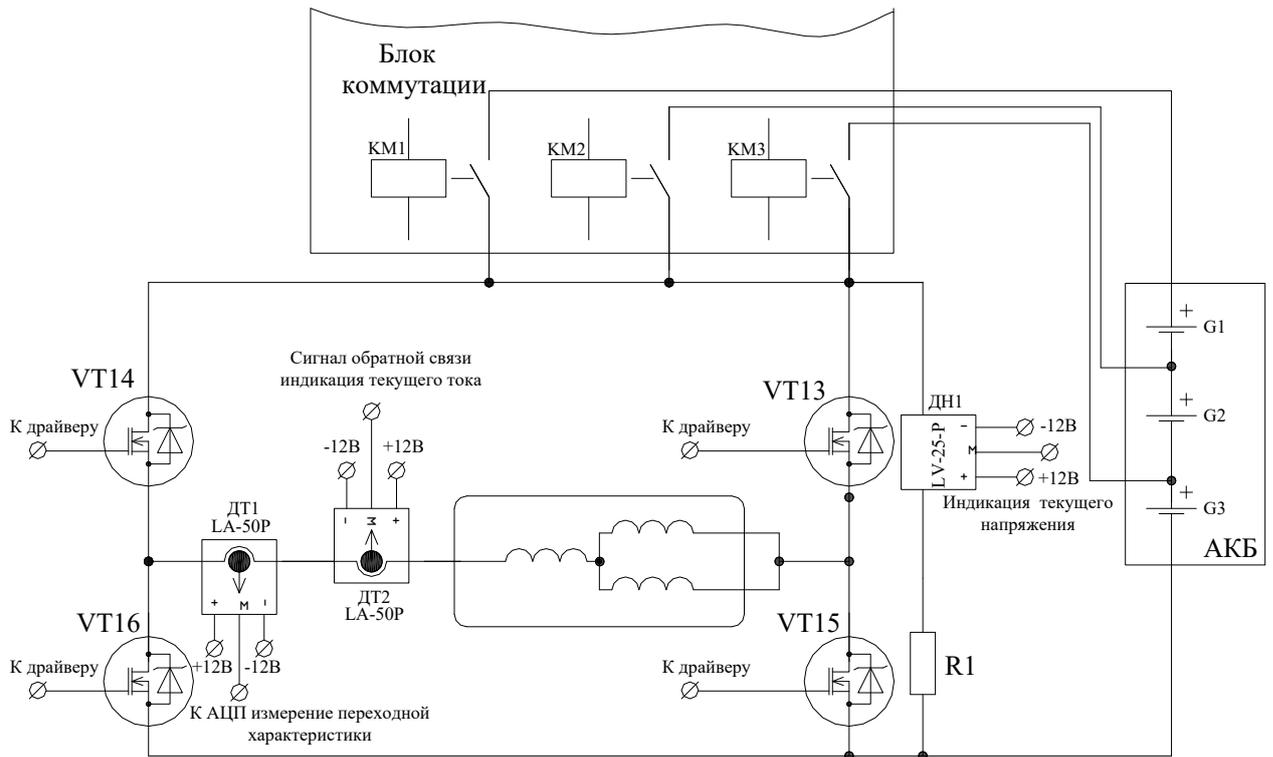


Рисунок 3.5. Принципиальная схема силового модуля с датчиками

Для измерения тока используются датчики ДТ1, ДТ2 типа LA 50-P (таблица 3.2) – компенсационные датчики на эффекте Холла, предназначенные для электронного преобразования токов (постоянного, переменного, импульсного и т. д.) в пропорциональный выходной ток с гальванической развязкой между первичной (силовой) и вторичной (измерительной) цепями.

Таблица 3.2. Параметры датчика тока LA 50-P

Наименование параметра	Обозначение	Значение
Электрические параметры		
Номинальный входной ток, А	I_{PN}	50А
Диапазон преобразования	I_P	0...±110А
Величина нагрузочного резистора при питании ±12В и $T_A=70^\circ\text{C}$	R_M	0...221Ом
Номинальный аналоговый выходной ток, мА	I_{SN}	25мА
Коэффициент преобразования	K_N	1:2000
Точностно-динамические характеристики		
Точность преобразования, % $T_A=25^\circ\text{C}$	I_{NP}	±0,25 %
Нелинейность, %	ε_L	<0,15 %
Время отклика при 10 % от I_{PN} , нс	$t_{ГВ}$	<200нс
Время задержки при 90 % от I_{PN} , нс	t_3	<500нс
Скорость нарастания входного тока, А/мкс	di/dt	>200А/мкс
Частотный диапазон, кГц	f	0...200кГц

Для индикации напряжения используется датчик ДН1 типа LV-25-P (таблица 3.3)

Таблица 3.3. Параметры датчика напряжения LV-25-P

Наименование параметра	Обозначение	Значение
Электрические параметры		
Номинальное входное напряжение, В	U_{PN}	10...500В
Номинальный входной ток, А	I_{PN}	10мА
Диапазон преобразования	I_P	0...±14А
Величина нагрузочного резистора при питании ±12В и $T_A=70^\circ\text{C}$	R_M	30...190Ом
Номинальный аналоговый выходной ток, мА	I_{SN}	25мА
Коэффициент преобразования	K_N	2500:1000
Напряжение питания, В	V_C	±12...15В
Точностно-динамические характеристики		
Точность преобразования, % $T_A=25^\circ\text{C}$	I_{NP}	±0,8 %
Нелинейность, %	ε_L	<0,2 %
Время задержки, мкс	t_3	40мкс

Сигналы с датчика напряжения ДН1 и датчика тока ДТ2 поступают на вход встроенного аналого-цифрового преобразователя контроллера DD1 (рисунок 3.6).

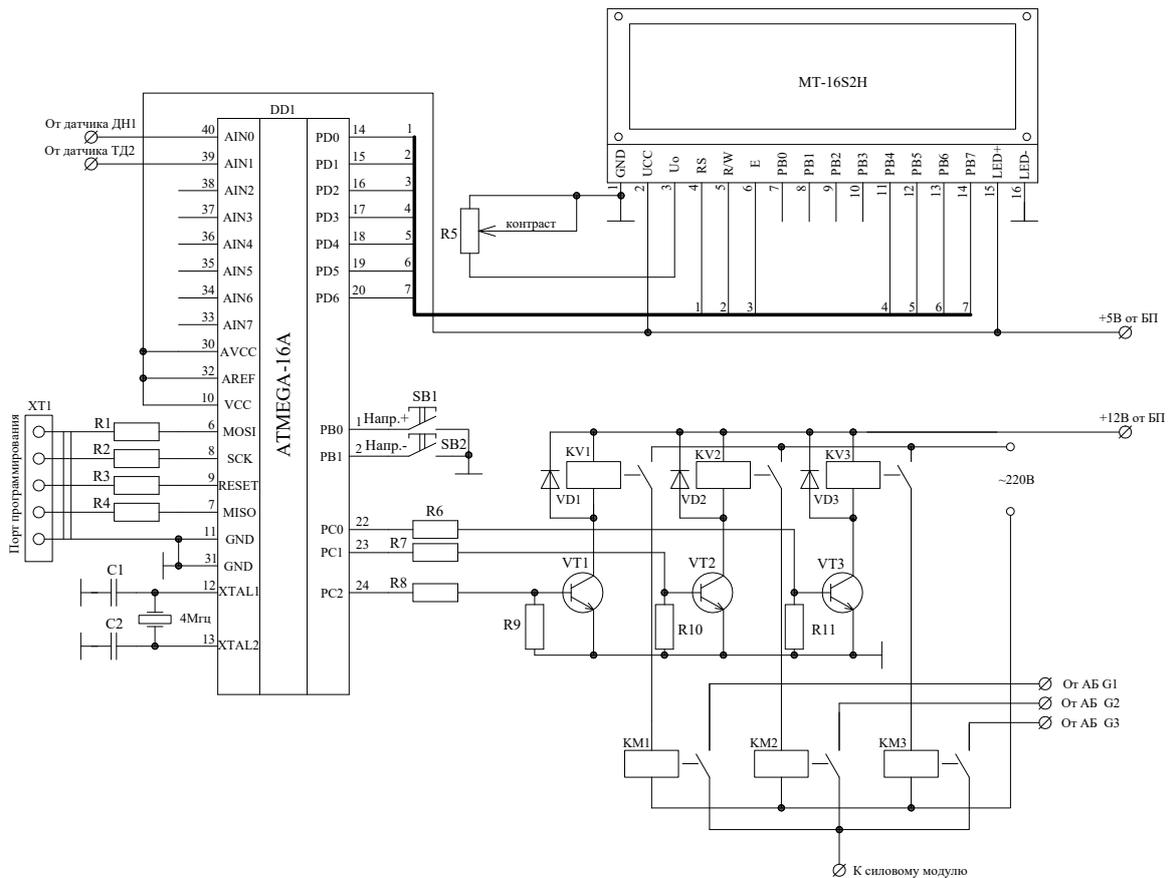


Рисунок 3.6. Принципиальная схема контроллера DD1

Измеренные значения тока и напряжения выводятся на экран двухстрочного жидкокристаллического индикатора МТ-16S2Н, используемого для визуального контроля тока и подаваемого напряжения на обмотку измеряемого двигателя.

Жидкокристаллический индикатор МТ-16S2Н состоит из БИС контроллера управления и ЖК-панели. Контроллер управления КБ1013ВГ6 производства ОАО «АНГСТРЕМ». Индикатор выпускается со светодиодной подсветкой (рисунок 3.7).



Рисунок 3.7. Внешний вид индикатора

Индикатор позволяет отображать 2 строки по 16 символов. Символы отображаются в матрице 5x8 точек. Между символами имеются интервалы шириной в одну отображаемую точку. Каждому отображаемому на ЖКИ символу соответствует его код в ячейке ОЗУ индикатора. Индикатор содержит два вида памяти – кодов отображаемых символов и пользовательского знакогенератора, а также логику для управления ЖК-панелью.

Изменение напряжения производится ступенчато путем подключения разного количества аккумуляторов на вход силового модуля, для этого на плате управления установлены кнопки «↑», «↓» (рис. 3.8). При нажатии соответствующей кнопки контроллер DD1 посредством транзисторных ключей VT1...VT3 производит включение одного промежуточного реле KV1... KV3 (рис. 3.6), которые в свою очередь управляют магнитными пускателями KM1...KM3. Силовые контакты магнитных пускателей подключены к аккумуляторам, в зависимости от замыкания которых на силовой модуль подается напряжение 36В от всех трех аккумуляторов G1, G2, G3 (рис. 3.8) либо от двух 24В, или одного 12В.

На рисунке 3.8 показан внешний вид платы управления.



Рисунок 3.8. Внешний вид платы управления

3.2 Измерительная подсистема и конструктивное исполнение установки

Измерительная часть (рис. 3.9) состоит из датчика тока ДТ1 с прецизионным резистором R15 390 Ом и отдельным стабилизированным блоком питания. Сигнал с прецизионного резистора поступает на аналоговый вход 16-ти канальной 12-ти

разрядной платы устройства сбора данных (АЦП) LA20USB, которое по USB кабелю соединяется с ноутбуком.

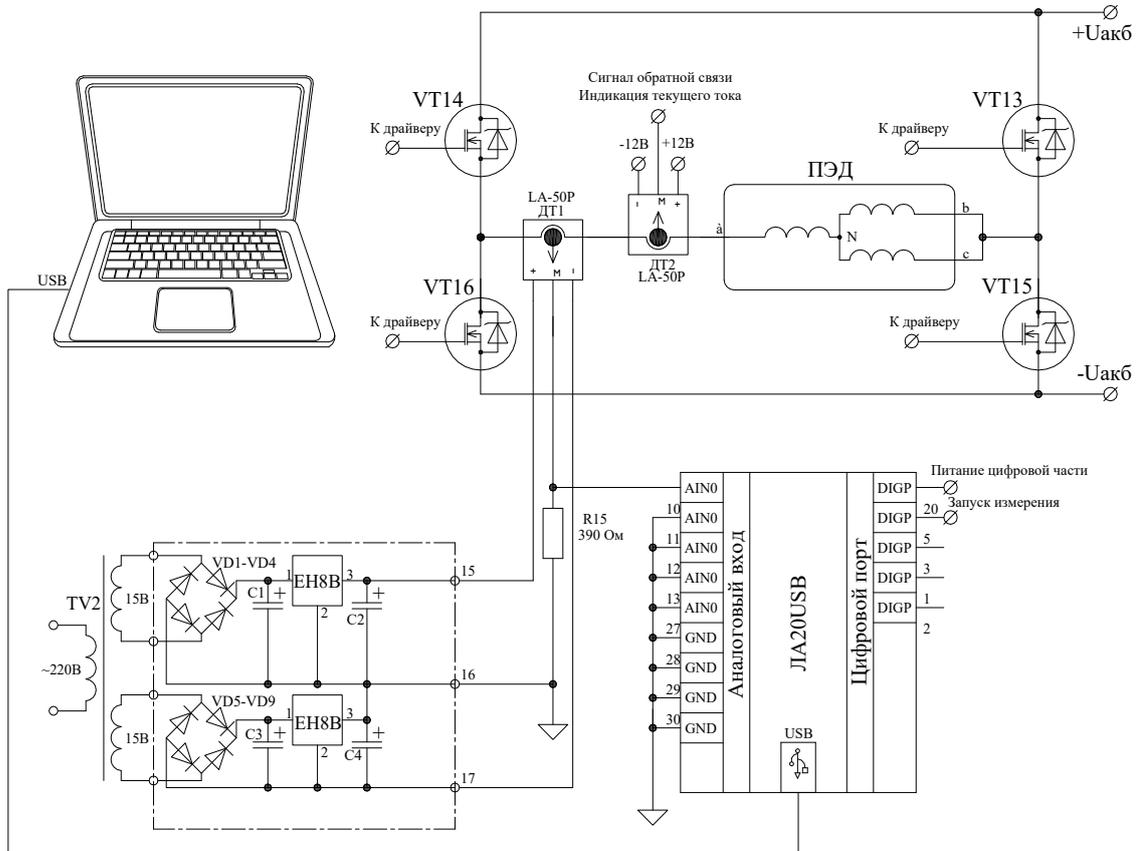


Рисунок 3.9. Принципиальная схема измерительной части

Устройство содержит следующие независимые узлы (рис. 3.10): аналогово-цифровой канал (АЦК), опорный кварцевый генератор, цифровой порт ввода/вывода, внутренний интерфейс управления и конфигурации, USB интерфейс, совместимый с USB 2,0, и вторичный источник питания.

АЦК состоит из входного мультиплексора, мультиплексора режимов измерения, полного инструментального усилителя с программируемым коэффициентом усилителя, АЦП. Режим работы АЦК (однополюсный или дифференциальный, а также коэффициент усиления) задаётся программно. С помощью программируемого усилителя можно задать входной диапазон АЦК. При задании для работы одновременно нескольких каналов (группы каналов) – коэффициент усиления в каждом канале может быть задан отдельно на каждый канал.



Рисунок 3.10. Блок-схема LA-20USB

Управление микроконтроллером DD2 осуществляется через соответствующие регистры.

1. Трехбитный регистр номера канала (0...7 и 8...15).
2. Двухбитный регистр режима (дифференциальный режим, однополюсный режим каналы 0...7, однополюсный режим каналы 8...15, режим калибровки нуля).
3. Двухбитный регистр коэффициента усиления – 1, 5, 10, 50.

АЦП входит в состав управляющего микроконтроллера. Микроконтроллер состоит из ядра 8051, работающего на частоте 24 МГц, памяти данных, программ, USB контроллера. Источник тактовой частоты АЦП – внутренний. Запуск процедуры измерения может происходить и от внешнего импульса запуска – ТТЛ-совместимый сигнал, передний фронт импульса отрицательной полярности; длительность импульсов не менее 1 мкс.

Внутренний источник тактовых импульсов АЦП – выход счетчика-таймера. Программируемый делитель частоты используется для задания тактовой частоты счётчика-таймера. На его вход подаётся частота 2 МГц от задающего кварцевого генератора. Коэффициент деления частоты внутреннего источника задаётся 16-битным программируемым делителем частоты. Наличие программируемого

делителя позволяет задавать «сетку» частот запуска АЦП от 16 Гц до 50 кГц, основные технические характеристики приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4. Основные технические данные АЦП LA-20USB

Наименование параметра	Значение
Количество аналоговых каналов	32 однополюсных или 16 дифференциальных каналов с мультиплексированием
Диапазоны входного сигнала	$\pm 10 \text{ В} \dots \pm 0,05 \text{ В}$
Входное сопротивление	не менее 5 МОм
Защита по напряжению	$\pm 15 \text{ В}$ (при включенном питании)
АНАЛОГО-ЦИФРОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ (АЦП)	
Тип АЦП	Последовательного приближения
Количество бит в выходном регистре АЦП	12
Диапазон частот выборок	16 Гц...50 кГц
Время преобразования	20 мкс
ЦИФРОВОЙ ПОРТ	
Количество линий	8 вывода и 8 ввода (с защёлкой)
Уровни и пороговые значения	КМОП (ТТЛ совместимые)

Внутренняя структура портов ввода-вывода предусматривает передачу информации по 4-битной шине, поэтому при смене данных новая информация появляется сначала на младших, а затем на старших 4 битах порта. Операция считывания происходит в 2 этапа: сначала регистрируется информация о младших 4-х битах, затем старших. При считывании данных время неопределенности – 0,6 мкс, а при записи – также не более 0,6 мкс. Внутренний интерфейс управления и конфигурации представляет собой набор регистров и управляющего контроллера, необходимого для программного задания всех параметров работы преобразователя, таких, например, как:

- режим работы АЦК;
- число опрашиваемых каналов;
- режим работы цифрового порта ввода/вывода и другие параметры.

Конструктивные узлы измерителя (рис. 3.11–3.12) выполнены на печатных платах, монтаж выполнен несколькими ярусами для установки в защитный кейс. В нижней части установлена основная плата (рис. 3.12) с АЦП, над платой на DIN-рейке установлены магнитные пускатели КМ1, КМ2, КМ3.

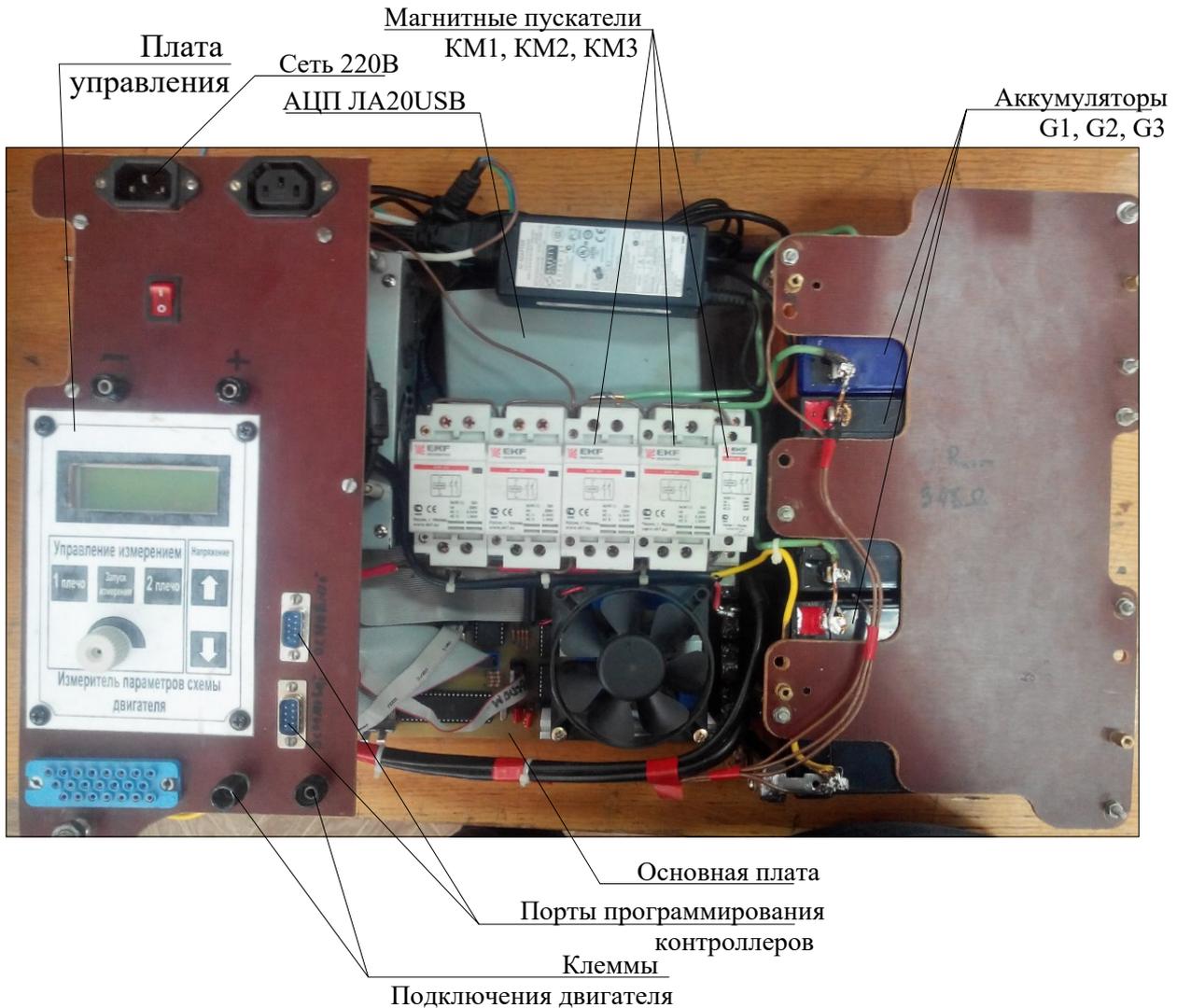


Рисунок 3.11. Основные узлы измерителя (ноутбук не показан)

Аккумуляторные батареи и блок питания установлены по краям от основной платы, на которых закреплена ниша для установки ноутбука.

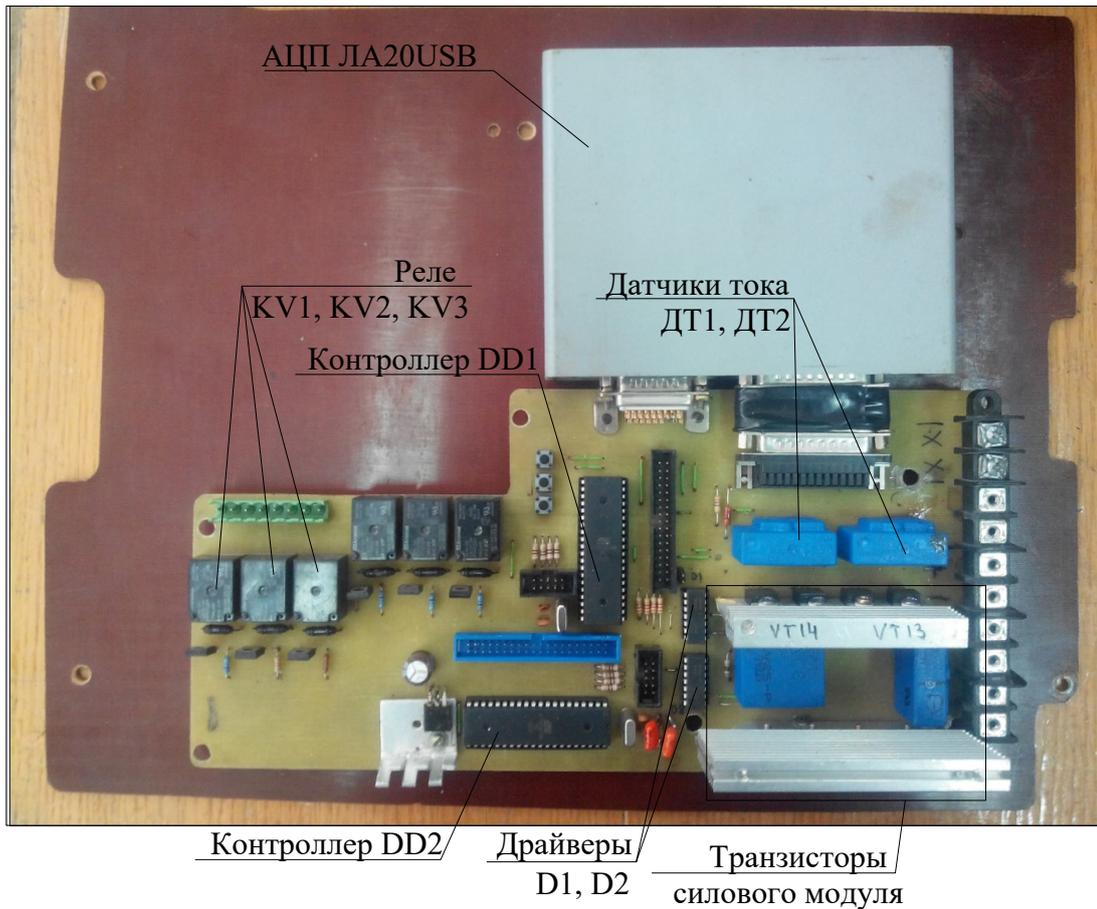


Рисунок 3.12. Печатная плата основной платы

3.3 Силовой модуль

Силовой модуль (СМ) представляет собой энергоэффективный коммутатор, выполненный по однофазной мостовой схеме (рис. 3.5) на МДП транзисторах типа IRL 2505 (рис. 3.5), работающих в ключевом режиме. К выходной диагонали моста, оснащенной датчиками тока ДТ1 и ДТ2, подключается в однофазном режиме обмотка статора испытуемого ПЭД. На входную диагональ, снабженную датчиком напряжения типа LV-25-P, подается ступенчато-регулируемое напряжение $U_{G1..G3}$ с аккумуляторной батареи G1...G3 (рис. 3.5). Согласно справочным данным (datasheet) [116] сопротивление IRL2505 ключа $R_{(DC)on}$ в замкнутом (проводящем) состоянии, максимальное, составляет 0,008 Ома. При этом внутреннее сопротивление СМ при замкнутых МДП-ключах VT14, VT15 (либо VT13, VT16), с учетом входного сопротивления датчиков тока ДТ1, ДТ2 и сопротивления

монтажных проводов, имеет значение от 0,01 до 0,011 Ома [113], которое можно практически не учитывать в сравнении с активным сопротивлением обмотки статора при однофазном включении ПЭД по схеме неполной звезды.

Быстродействие IRL2505 ключей характеризуется типовым значением времени включения $t_r=160$ нс [116] и типовым временем выключения $t_f=84$ нс. При таких динамических параметрах влияние переходных процессов и коммутационных выбросов напряжения на значение производной $i'_{1\text{эксп}}(0)$ в точке измерения, отделенной от начала характеристики затухания интервалом $\Delta t_{\text{и}}$ порядка $4,0 \cdot 10^{-6}$ с, также можно пренебречь. Как известно [117], в мостовых схемах возможны симметричный и несимметричный способы переключения силовых транзисторов. В СМ применено нереверсивное и реверсивное несимметричное управление транзисторами VT13...VT16, обеспечивающее меньший уровень пульсаций тока в обмотке статора ПЭД в сравнении с симметричным управлением.

При реверсивном несимметричном управлении магнитопровод ПЭД перемагничивается под действием выходного напряжения СМ также, как в реальных условиях эксплуатации по симметричному частному гистерезисному циклу ON (рис. 3.13) за счет изменения направления тока в обмотке статора ПЭД в течение двух полупериодов.

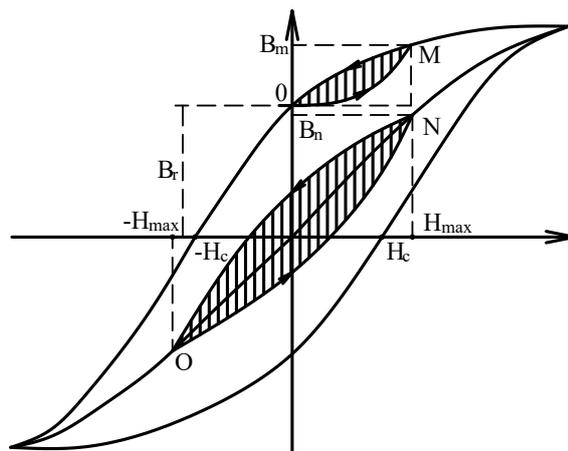


Рисунок 3.13. Циклы перемагничивания магнитопровода статора электрической машины: B_r – остаточная индукция, H_c – коэрцитивная сила

Во время первого полупериода постоянно открыт верхний ключ (VT14), а нижний (VT15) коммутируется драйвером D2 (рис. 3.4) в соответствии с законом широтно-импульсного регулирования (ШИР), формируемого контроллером DD2. Последний подбирает и устанавливает программным путем скважность $\chi_{и} = t_{и}/T$ коммутации VT15 (рис. 3.14, а), обеспечивающую в обмотке статора ПЭД протекание необходимого начального тока I_0 , задаваемого потенциометром R_1 и равного среднему значению тока $I_{1\text{эксп.ср}}$ (рис. 3.17, б) в этой обмотке, который регистрируется на экране ЖКИ МТ-16S2Н.

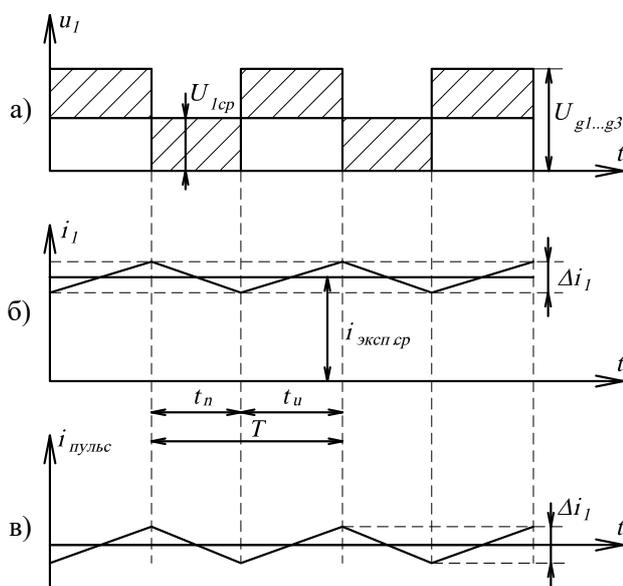


Рисунок 3.14. Временные диаграммы напряжений и токов в обмотке статора ПЭД

Электромагнитные процессы в СМ при данном ШИР управлении протекают следующим образом. В течение времени $t_{и}$ периода коммутации T замкнут транзистор VT15; обмотка статора ПЭД запасает энергию в электромагнитном поле за счет нарастающего тока $i_{1\text{эксп}}$, протекающего по контуру “плюс $U_{G1..G3}$ – VT14 – ДТ1 – ДТ2 – ПЭД – VT15 – минус $U_{G1..G3}$ ”. В течение интервала $t_{п} = T - t_{и}$ (рис. 3.14, в) транзистор VT15 находится в непроводящем состоянии. Запасенная энергия частично рассеивается на активном сопротивлении r_1 обмотки статора ПЭД и поддерживает протекание спадающего тока $i_{1\text{эксп}}$ по контуру “ПЭД – диод

VT13 – VT14 – ДТ1 – ДТ2 – ПЭД”. Индуктивности обмотки статора ПЭД подавляют пульсации тока $\Delta i_{1 \text{эксп}}$, выполняя роль сглаживающего фильтра.

Для приблизительной оценки относительных пульсаций $\delta i_{1 \text{эксп}}$ тока обмотки статора (рис. 3.14, в) принимаем из практических соображений несущую частоту ШИР $f = 1/T$ равной порядка единиц кГц, а интервалы коммутации транзисторов T , соответственно, равными от долей до единиц миллисекунд, что характерно для крутого участка переходной характеристики затухания тока обмотки статора. Как было установлено ранее, для этого участка без какой-либо значительной ошибки можно пренебречь влиянием элементов параллельной ветви намагничивания L_0, r_0 схемы замещения ПЭД (рис. 2.2) и сопротивлением $R_{\text{вн}}$ на величину пульсации $\Delta i_{1 \text{эксп}}$ тока статора. Учитывая, что последние создаются переменной составляющей напряжения обмотки статора ПЭД (рис. 3.14, а), можно составить уравнения баланса напряжений для интервала $t_{\text{и}}$

$$U_{G1..G3} - U_{1cp} = (L_1 + L_2) \cdot \frac{di_{1\text{эксн}}}{dt} + (r_1 + r_2) \cdot i_{1\text{эксн}} \quad (3.1)$$

и интервала $t_{\text{н}}$

$$U_{1cp} = (L_1 + L_2) \cdot \frac{di_{1\text{эксн}}}{dt} - (r_1 + r_2) \cdot i_{1\text{эксн}}, \quad (3.2)$$

в которых путем замены производных, соответственно, на отношения

$\Delta i_{1\text{эксн}}/\chi_{\text{и}} \cdot T$ и $\Delta i_{1\text{эксн}}/(1 - \chi_{\text{и}}) \cdot T$ определить пульсации тока как

$$\Delta i_{1\text{эксн}} = X_u \cdot (1 - X_u) \cdot U_{G1..G3} \cdot T / (L_1 + L_2) \quad (3.3)$$

и, используя далее соотношение $\delta i_{1\text{эксн}} = \Delta i_{1\text{эксн}} / I_0$, получить следующее уравнение:

$$\delta i_{1\text{эксн}} = \gamma_u \cdot (1 - X_u) \cdot U_{G1..G3} / I_0 \cdot f \cdot (L_1 + L_2). \quad (3.4)$$

Замена в (3.4) отношения $U_{G1..G3} / I_0$ на $r_1 \approx 0,5 \cdot (r_1 + r_2)$ дает следующее выражение для оценки относительных пульсаций тока в обмотке статора ПЭД, питающейся по однофазной схеме от СМ

$$\delta i_{1\text{эксн}} = \frac{\gamma_u (1 - X_u)}{f \cdot T_2}, \quad (3.5)$$

где $T_2 = (L_1 + L_2)/(r_1 + r_2)$ – постоянная времени крутого участка переходной характеристики затухания тока статора ПЭД (формула 2.78). При $\gamma_{и} = 0,5$ относительные пульсации тока приобретают наибольшее значение. Подстановка в (3.5) приемлемой величины пульсаций $\delta i_{1 \text{ эксп}} = 0.01$ и значения $T_2 = 2,3 \cdot 10^{-3}$ из данных табл. 2.3 дает при $\chi = 0,5$ следующую оценку необходимой частоты ШИР-коммутации транзисторов в СМ: $f = 12,5$ кГц. Учитывая высокое быстродействие МДП транзисторов IRL2505, полученный результат является реальным и практически выполнен в СМ.

Во втором полупериоде МДП-транзисторы СМ меняются ролями – постоянно открыт ключ VT13, а VT16 коммутируется контроллером DD2 со скважностью $\chi_{и}$, что обеспечивает перемагничивание магнитопровода ПЭД по симметричному гистерезисному циклу. Число тактов перемагничивания задается управляющей программой. Возможно также ручное управление поочередным нажатием кнопок SB3 и SB4. Следует подчеркнуть, что использование на данном этапе работы СМ несимметричного ШИР управления приводит к одностороннему намагничиванию магнитопровода ПЭД по ветвям несимметричного предельного гистерезисного цикла МО* (рис. 3.13), который отличается от симметричного цикла NO своей формой, площадью и магнитной проницаемостью, что приводит к методической погрешности измерения, достигающей по информации [118] 8...11 %.

По завершении установленного числа циклов симметричного перемагничивания магнитопровода ПЭД контроллер DD2 переводит СМ в режим нереверсивного несимметричного управления, в очередной раз меняя состояние верхних ключей СМ. Возможен также ручной перевод путем нажатия кнопки SB5 (рис. 3.2). В этом режиме скважность ШИР коммутации соответствующего нижнего ключа плавно меняется программным путем от значения равного нулю до $\gamma_{и}$ (рис. 3.15), что дает возможность визуально наблюдать процесс нарастания тока $I_{1 \text{ эксп.ср}}$ до значения I_0 на экране ЖКИ МТ-16S2Н.

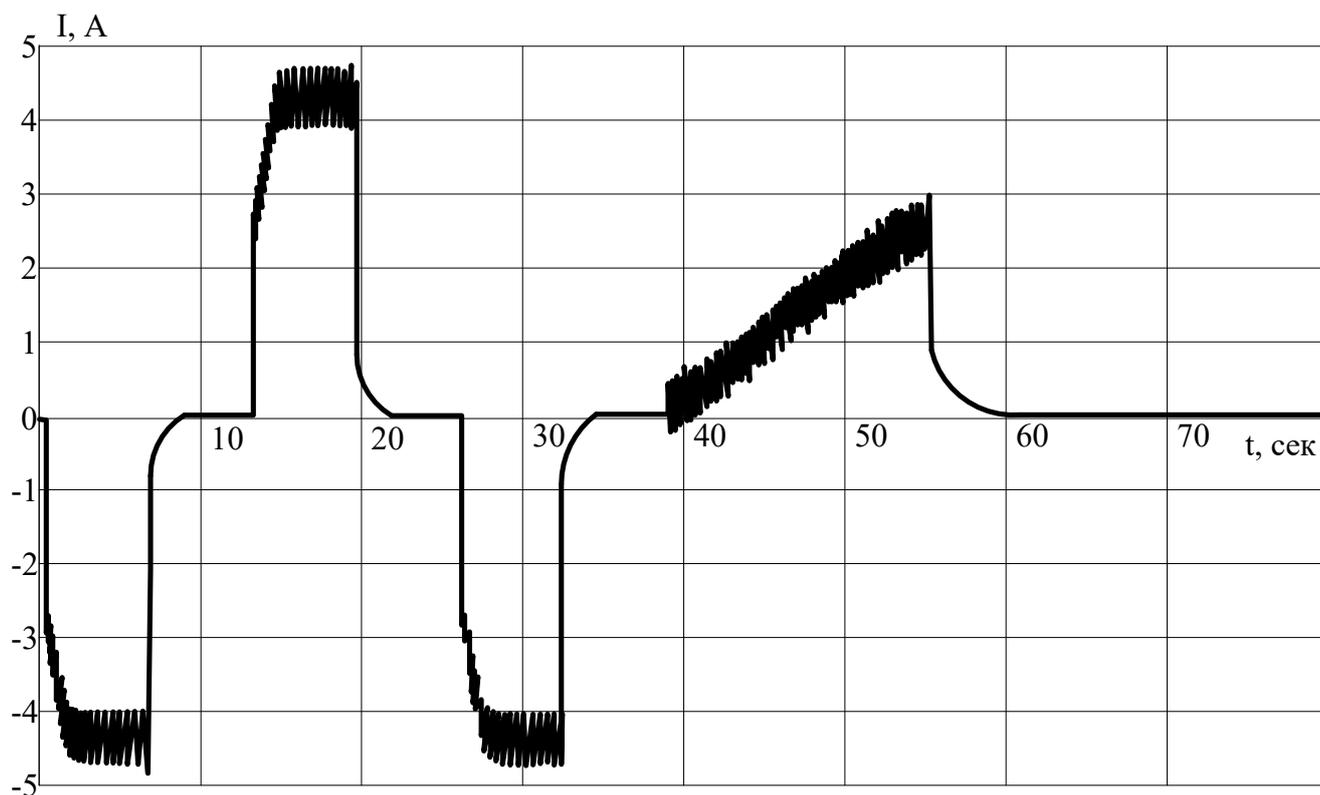


Рисунок 3.15. Циклограмма работы СМ. Несущая частота ШИР равна 1кГц

При достижении током значения I_0 контроллер DD2 переводит соответствующий нижний ключ СМ в непроводящее состояние. Начинается переходный процесс затухания тока статора, замыкающегося по контуру “ПЭД – диод VT13 – VT14 – ДТ1 – ДТ2 – ПЭД”. Одновременно приводится в действие старт-стопный режим платы сбора данных ЛА-20USB для оцифровки снимаемой с измерительного датчика ДТ1 характеристики затухания $i_{лэксн}(t)$ тока обмотки статора ПЭД. По завершении старт-стопного режима оцифрованный массив данных, накопленный в оперативной памяти ЛА-20USB, автоматически экспортируется в формате DAT в ноутбук для дальнейшей программной обработки.

До сих пор обсуждались вопросы, связанные с исполнением СМ для кейсовой и передвижной установок (рис. 3.1, а, б) в виде однофазного мостового коммутатора с несимметричным реверсивным и нереверсивным ШИР-управлением. Целесообразно и важно расширить подход к исполнению СМ и рассмотреть возможность его реализации непосредственно на элементах

трехфазного мостового коммутатора, каким является автономный инвертор напряжения (АИН) – выходной каскад ПЧ в СУ УЭЦН. Как известно [119], АИН может эксплуатироваться в одном из двух режимов работы, а именно в шестипульсном квазисинусоидальном и в режиме синусоидальной широтно-импульсной модуляции. Наиболее подходит для реализации опыта затухания постоянного тока шестипульсный режим работы АИН [30]. Схемы включения АИН, приведенные в табл. 3.5., свидетельствуют о шести различных состояниях АИН в этом режиме, интервалы существования которых обозначены в эл. градусах.

В каждом состоянии фазы статора ПЭД через три замкнутых транзисторных ключа АИН в разных комбинациях подключаются, как показано в табл. 3.5, к шине постоянного напряжения ПЧ по схеме неполной звезды. Питание фаз от этой шины организуется при реализации СМ в режиме неподвижного регулируемого по закону ШИР модуля вектора напряжения. При размыкании соответствующего транзисторного ключа фазы статора ПЭД за счет энергии, накопленной в их магнитном поле, замыкаются между собой практически накоротко через антипараллельный диод и два транзисторных ключа. При этом в фазе ПЭД, включенной последовательно с параллельным соединением двух других фаз, формируется переходная характеристика затухания тока статора.

Таблица 3.5. Схемы соединения обмоток статора ПЭД в структуре ПЧ СУ УЭЦН

Угол	Схема включения обмоток статора ПЭД	Схема замыкания обмоток статора ПЭД
0-60		
60-120		
120-180		
180-240		
240-300		
300-360		

3.4 Программный модуль мобильной переносной установки РПХ-20

Работа микроконтроллеров AVR DD1, DD2 (рис. 3.2) в системе управления РПХ-20 производится в соответствии с заранее загруженной во Flash-память программой управления, написанной на языке программирования «С» в среде программирования CodeVisionAVR.

CodeVisionAVR представляет собой интегрированную среду разработки программного обеспечения для микроконтроллеров AVR (рис. 3.16).

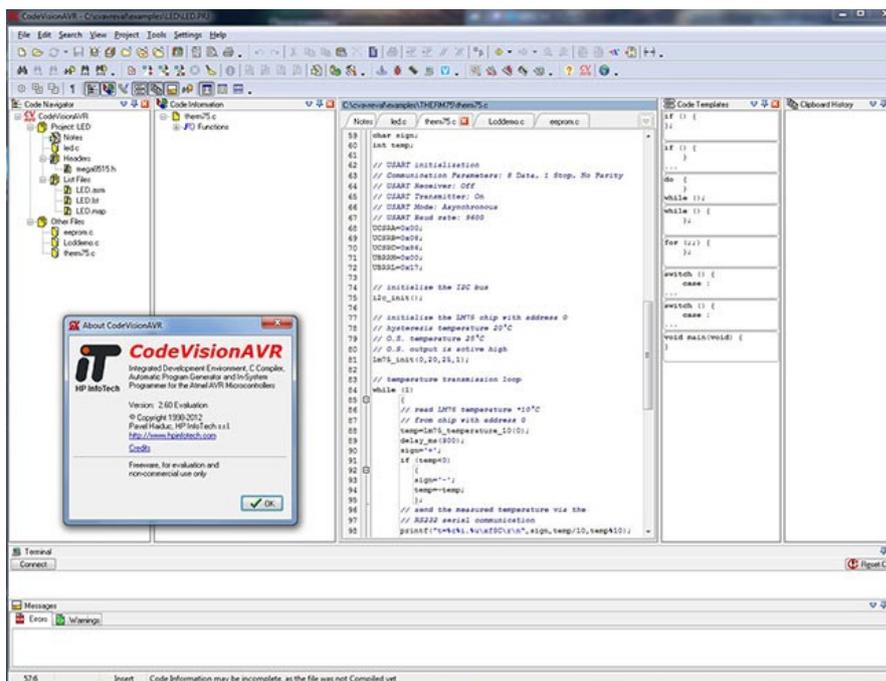


Рисунок 3.16. Интерфейс программы CodeVisionAVR

CodeVisionAVR поддерживает все многочисленное семейство микроконтроллеров AVR (включая чипы с ядром ATxmega), формирует емкий и результативный программный код. Помимо компиляции среда разработки способна записать созданную программу в память микроконтроллера. Модуль прошивки может взаимодействовать со всеми популярными программаторами (AVR910, STK200/300).

Основными модулями, входящими в состав CodeVisionAVR, являются:

- трансляторы программ, составленных на Си-подобных языках или ассемблере, в машинный код для AVR;
- элементы для инициализации периферийных устройств;

- модуль для работы с платой отладки STK-500;
- компоненты взаимодействия с внешними программаторами;
- редактор первичного кода;
- терминальный модуль.

Результат работы в программе CodeVisionAVR может быть представлен в виде HEX, ROM или BIN-файла для прямой прошивки микроконтроллера путем использования стороннего программатора или непосредственно внутрисхемно через интерфейс SPI контроллера.

Микроконтроллер в соответствии с заложенной программой работы (рис. 3.17) осуществляет инициализацию узлов установки, объявление необходимых переменных и функций.

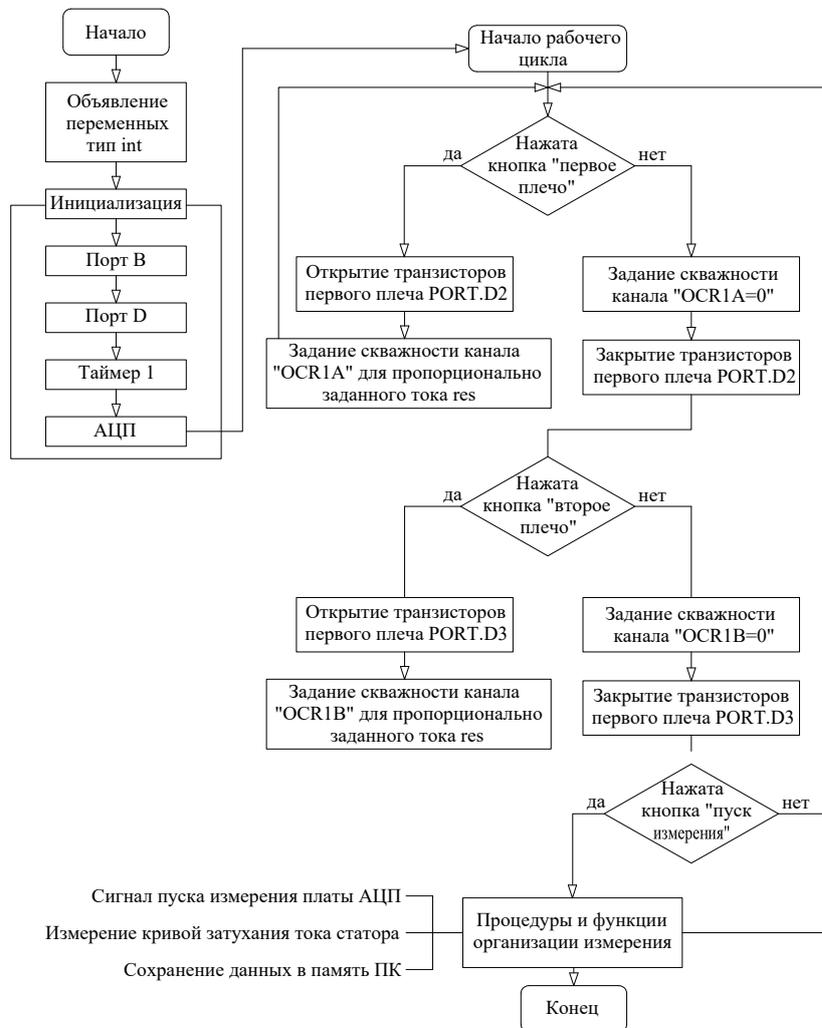


Рисунок 3.17. Блок-схема программного обеспечения контроллера

После инициализации выполняется основной рабочий цикл, в котором сначала происходит опрос кнопок клавиатуры, нажатие кнопок «Первое плечо», «Второе плечо», в результате чего с интегрированного АЦП измеряется напряжение потенциометра R1 и устанавливается пропорционально скважность на соответствующем транзисторе нижнего ключа. После задания необходимого тока скважность сохраняется в переменной «ges», используемой в измерительном цикле (рис. 3.18).

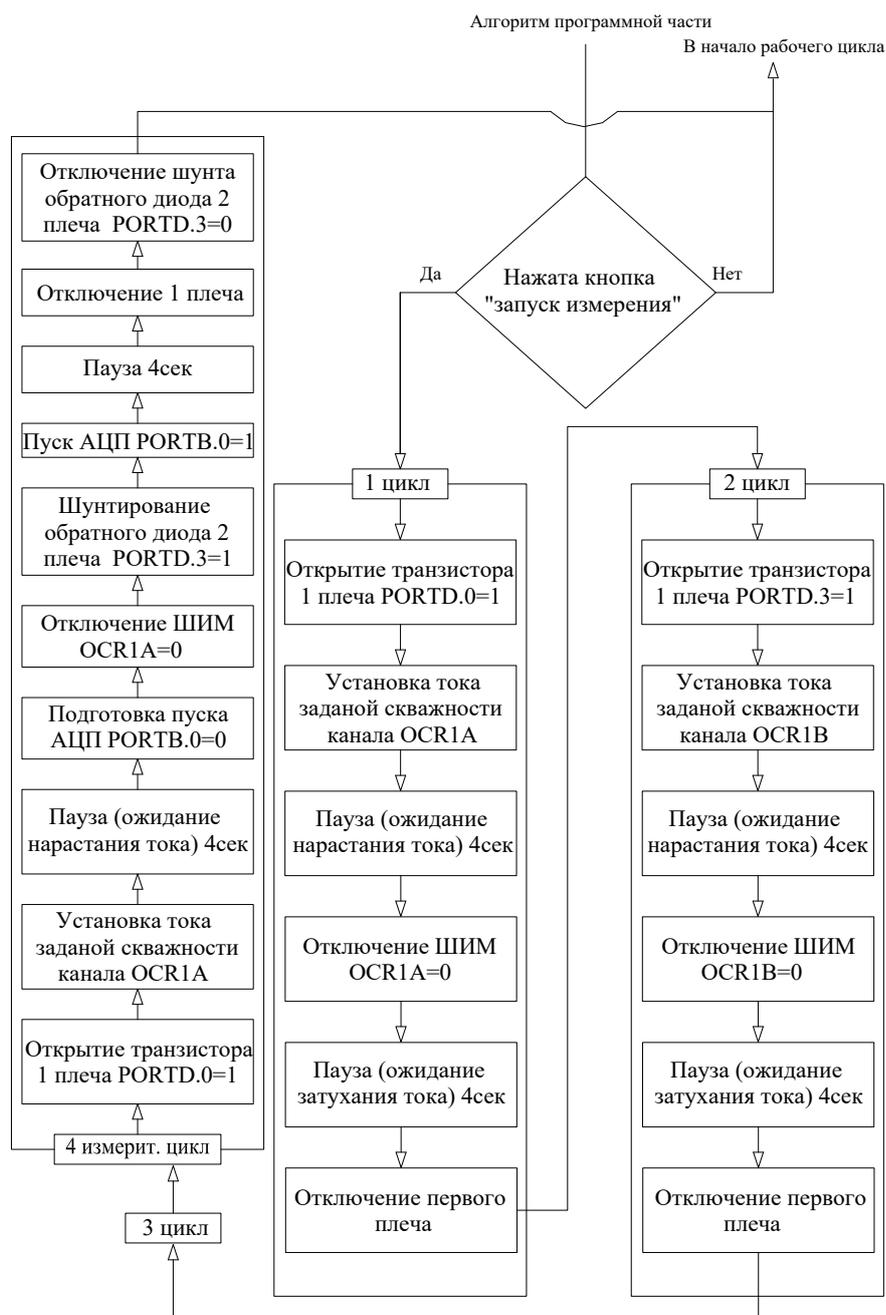


Рисунок 3.18. Рабочий цикл организации измерения

3.5 Протокол испытаний мобильной переносной установки РПХ-20

Испытания проводились в ФБУ «Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в Омской области».

Характеристика объекта испытаний. Мобильная установка предназначена для проведения испытаний электротехнического объекта с индуктивной реакцией методом затухания постоянного тока. Принцип действия мобильной установки основан на цифровой регистрации переходной характеристики затухания тока $i(t)$, протекающего в индуктивной части электротехнического объекта, от начального значения этого тока I_0 до завершения переходного процесса, и выдаче результатов регистрации в удобной для пользователя форме. В состав установки входят аккумуляторная батарея, коммутатор тока на силовых транзисторах, датчики тока и напряжения *LAN 50-P*, *LV-25P* фирмы *LEM*, схема управления на микропроцессоре *Atmega16A*, плата сбора данных *ЛА-20USB*, ноутбук.

В качестве объекта с индуктивной реакцией используется рабочая катушка индуктивности, выполненная медным проводом сечением $2,5 \text{ мм}^2$ на деревянном каркасе без магнитопровода, обладающая известным активным сопротивлением r_k и индуктивностью L_k .

Цель испытаний

- аттестация точности снятия и регистрации переходной характеристики затухания тока $i(t)$ в рабочей катушке индуктивности;
- измерение внутреннего сопротивления $r_{\text{вн}}$ мобильной установки;
- измерение величины индуктивности и активного сопротивления рабочей катушки индуктивности.

При испытании использовано следующее измерительное оборудование:

- Анализатор компонентов WK6440B № 14400030; базовая погрешность $\pm 0,052 \%$; свидетельство о поверке № 41201 от 28.03.2014 г.
- Мост постоянного тока P3009 № 1041, класс точности 0,01...2; свидетельство о поверке № 2563 от 20.03.2014 г.

– Вольтамперметр М2044 № 2721; класс точности 0,2; свидетельство о поверке № 1832 от 14.01.2014 г.

– Мультиметр цифровой 34410А № МУ47019302; погрешность $\pm (0,0035 \dots 0,005) \%$; свидетельство о поверке № 11056 от 04.04.2014 г.

– Мультиметр 34401 А № МУ47003715; погрешность $\pm (0,0035 \dots 0,005) \%$; свидетельство о поверке № 4909 от 20.03.2014 г.

– Источник регулируемого тока SPS-1230 № D33251 – вспомогательное оборудование.

Порядок проведения испытаний. Индуктивность рабочей катушки L_k определена с помощью анализатора компонентов WK6440B, активное сопротивление катушки r_k измерено мостом постоянного тока P3009. Полученные результаты приведены в табл. 3.6.

Таблица 3.6. Параметры рабочей катушки индуктивности

L_k , мГн	4,6354
r_k , Ом	0,46178

Внутреннее сопротивление $r_{вн}$ мобильной установки, состоящее из сопротивления транзисторного коммутатора тока и проводников, соединяющих мобильную установку с рабочей катушкой индуктивности, измерено по схеме, изображенной на рис. 3.19.

Элементы схемы: I_0 – источник регулируемого тока SPS-1230; PA – мультиметр цифровой 34410А; PV – мультиметр 34401А. Значение сопротивления $r_{вн}$ в диапазоне токов от 1 А до 15 А определено методом амперметра-вольтметра

$$r_{вн} = \frac{U_{12}}{I_0} . \quad (3.6)$$

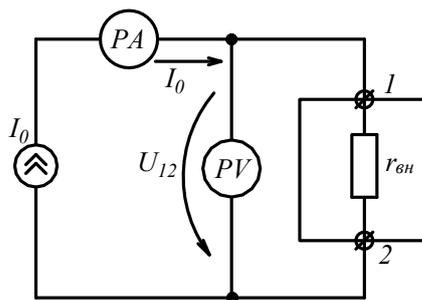


Рисунок 3.19. Схема измерения внутреннего сопротивления $r_{вн}$

Результаты измерений приведены в табл. 3.7.

Таблица 3.7. Сопротивление $r_{вн}$ мобильной установки

I_0, A	1	5	10	15
$r_{вн}, МОм$	10,0	10,3	10,7	11,1

Аттестация точности снятия и регистрации переходной характеристики затухания тока $i(t)$ в рабочей катушке индуктивности выполнена по следующей методике:

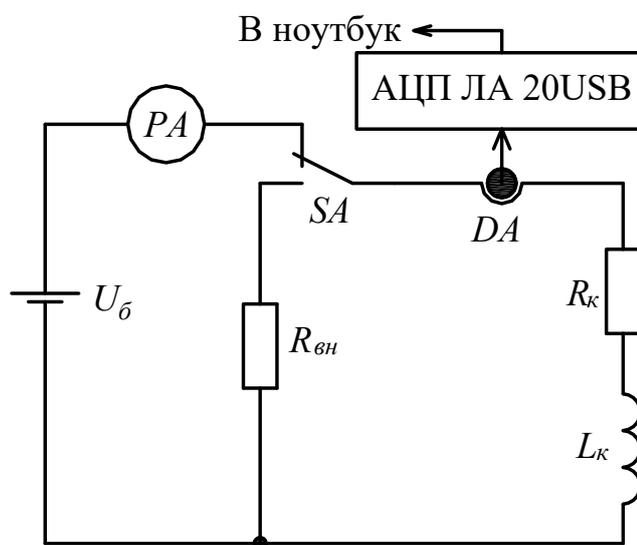


Рисунок 3.20. Схема снятия переходной характеристики затухания тока в рабочей катушке индуктивности

- рабочая катушка индуктивности подключается к встроенной в установку аккумуляторной батарее U_0 (рис. 3.20) через транзисторный коммутатор тока SA ;
- мобильная установка настраивается на длительность цикла измерения до 2...3 с;
- методом широтно-импульсной модуляции в рабочей индуктивности с панели управления мобильной установки задается необходимая величина начального тока I_0 ;
- нажатием кнопки «Пуск» запускается микропроцессорная управляющая система, под действием которой катушка индуктивности $L_k r_k$ отключается от аккумуляторного источника напряжения U_0 и одновременно замыкается на внутреннее сопротивление $r_{вн}$ мобильной установки;

– одновременно с этим управляющая программа активизирует плату сбора данных ЛА-20USB, работающую в старт-стопном режиме. Переходный процесс затухания тока I_0 в катушке индуктивности отображается с помощью платы ЛА-20USB на дисплее ноутбука в виде кривой напряжения $u_{дт}(t)$ с выхода датчика тока DA . Оцифрованные текущие значения этой кривой заносятся с частотой дискретизации в буферную память платы;

– по окончании цикла измерения экспортом из буферной памяти платы ЛА-20USB в ноутбук создается массив экспериментальных значений $u_{дт}^{эксп.}(t_j)$. Для аттестации точности снятия переходной характеристики создается также массив расчетных значений $u_{дт}^{расч.}(t_j)$ с использованием классического выражения

$$u_{дт}^{расч.}(t) = U_0 \cdot e^{-t/\tau}, \quad (3.7)$$

где $\tau = L_k/(r_k + r_{вн})$ – расчетная величина постоянной времени цепи затухания тока $i(t)$. Она определяется через известные параметры L_k и r_k рабочей катушки индуктивности и измеренное значение внутреннего сопротивления $r_{вн}$ установки (как правило $r_k \gg r_{вн}$). Величина U_0 в формуле (3.7) принимается равной первому отсчету $u_{дт}^{эксп.}(t_j = 1)$ в массиве экспериментальных значений $u_{дт}^{эксп.}(t_j)$ поскольку ток $i(t_j)$, протекающий в индуктивности, и напряжение $u_{дт}^{эксп.}(t_j)$ связаны между собой соотношением

$$i(t) = k_{пр} \cdot u_{дт}^{эксп.}(t_j), \quad (3.8)$$

где коэффициент преобразования $k_{пр}$ мобильной установки – величина практически постоянная, то погрешность снятия и регистрации переходной характеристики тока $i(t)$ рассчитывается по выражению

$$\delta i(t_j)\% = \frac{u_{дт}^{расч.} - u_{дт}^{эксп.}(t_j)}{u_{дт}^{расч.}(t_j)} \cdot 100. \quad (3.9)$$

Все расчеты по определению погрешности $\delta i(t_j)\%$ реализованы в мобильной установке с использованием программного комплекта Matlab. Полученные экспериментальные $u_{дт}^{эксп.}(t_j)$ и расчетные $u_{дт}^{расч.}(t_j)$ зависимости для значений токов $I_0 = 1A, 5A, 10A$ и $15A$, а также относительные погрешности регистрации

переходных характеристик затухания тока приведены в приложении 1. На основании этих данных установлены:

Метрологические характеристики мобильной установки в диапазоне токов от 1А до 15А, включая показатели точности:

Внутреннее сопротивление установки, мОм,	от 10,0 до 11,1
Пределы допускаемой относительной погрешности снятия и регистрации переходного процесса затухания тока, %, не более в диапазоне токов от 15А до 1А	2
в диапазоне токов от 1А до 0,1А	6
при длительности переходного процесса затухания тока, с	0,07
Предел допускаемой относительной погрешности поддержания установленного тока I_0 в циклах измерения, %, не более	1
Массогабаритные характеристики мобильной установки:	
Габаритные размеры, мм, не более	600x400x240
Масса, кг, не более	27

Таким образом, мобильная установка способна достоверно регистрировать в электротехнических объектах с индуктивной реакцией переходные процессы затухания тока в диапазоне от 15А до 1А с относительной погрешностью не более 2 % и в диапазоне тока от 1А до 0,1А с относительной погрешностью не более 6 % при длительности переходных процессов от 0,07 с.

Выводы по главе 3

1. Разработан и изготовлен аппаратно-программный комплекс в виде мобильной переносной установки для регистрации характеристики затухания тока обмотки статора послеремонтного ПЭД. Аппаратно-программный комплекс обеспечивает энергоэффективную плавную регулировку начального тока I_0 до 20А без подмагничивания магнитопровода ПЭД, как в реальных условиях его эксплуатации.

2. Установлена возможность реализации силового модуля на аппаратных средствах АИН ПЧ УЭЦН без применения дополнительного оборудования и средств, кроме доработки программного обеспечения АИН.

3. Мобильная установка РПХ-20 способна достоверно регистрировать в электротехнических объектах с индуктивной реакцией переходные процессы затухания тока в диапазоне от 15А до 1А с относительной погрешностью не более 2 % и в диапазоне тока от 1А до 0,1А с относительной погрешностью не более 6 % при длительности переходных процессов от 0,07 с.

4. 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.

5. 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.

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

4 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МЕТОДИК ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ПОГРУЖНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК ПЭД

4.1 Определение параметров экспонент, аппроксимирующих характеристику затухания тока статора ПЭД

Для эффективной реализации разработанных методов аналитического определения параметров эквивалентных схем замещения ПЭД с одноконтурной цепью ротора необходимо осуществить адекватное представление экспериментальных переходных характеристик тока статора $i_{I_{эксн}}(t)$ суммой экспоненциальных составляющих по уравнению (1.10), в котором $n=3$ для схемы с одноконтурной цепью ротора. В настоящее время в системах Mathcad, Matlab, Mathematica и др. имеются программные средства (TableCurve, CurveExpert, SIMPLE FORMULA), позволяющие полностью автоматизировать процессы решения задач такого рода при известной аппроксимирующей функции [90, 91, 92].

Однако если автоматизация осуществляется без тщательного анализа экспериментальных данных и полученных аналитических соотношений, можно прийти к некорректным результатам, т. к. выбранное решение из множества других может оказаться не самым лучшим, либо может вообще являться моделью физически нереализуемого электродвигателя. В рассматриваемом случае, как уже отмечалось выше, используется аппроксимация экспериментальной характеристики затухания $i_{I_{эксн}}(t)$ суммой экспоненциальных функций

$$i_1(t) = \sum_{k=1}^n I_{mk} e^{\lambda_k t}, \quad (4.1)$$

в которых токи I_{m1}, \dots, I_{mn} и коэффициенты затухания $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ подлежат численному определению. При этом между коэффициентами I_{mk} действует соотношение (1.11), вытекающее из естественных начальных условий (1.12). Фактически вектор неизвестных включает в себя следующие компоненты:

$$C_n = \{I_{m1}, I_{m2}, \dots, I_{mm-1}, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}. \quad (4.2)$$

Мерой близости между экспериментальными данными и аппроксимирующей функцией является среднеквадратичное отклонение $\chi^2(I_{mkj}, \lambda_{mkj})$, представляющее собой целевую функцию вида [93]

$$\chi^2(I_{mkj}, \lambda_{mkj}) = \sum_{j=1}^M \frac{[i_{1\text{эксп}}(t_j) - i_1(I_{mkj}, \lambda_{mkj}, t_j)]^2}{\sigma^2}, \quad (4.3)$$

где M – количество точек, в которых производились измерения, t_j – моменты времени измерения тока $i_{1\text{эксп}}(t_j)$ на j -ом участке, σ – ошибка измерения (дисперсия), характеризующая отклонение случайного процесса от его среднего значения. Если значение σ неизвестно, на практике оно принимается для всех точек одинаковым, в частности значение σ можно принять равным единице [94]. На рис. 4.1 представлена блок-схема алгоритма минимизации (оптимизации) целевой функции (4.3). Определение набора параметров I_{mkj}, λ_{mkj} , при которых целевая функция минимальна, производится в п. 4 алгоритма минимизации.

Поскольку аппроксимирующая функция (4.1) содержит часть неизвестных коэффициентов в составе нелинейных экспоненциальных функций, используется обобщенная регрессия. В этом случае аппроксимирующая функция (4.1) не обязательно проходит через все экспериментальные точки, как это имеет место при интерполяции.

В параграфе 2.4 отмечались сложности прямого применения метода Левенберга-Марквардта. Поскольку при решении задач идентификации указанный метод показывает высокие вычислительные характеристики на задачах с «глубокими» локальными экстремумами, то далее предлагается модификация, учитывающая особенности задачи, сформированной в данной работе. К основным вычислительным особенностям минимизации функционала $\chi^2(I_{mkj}, \lambda_{mkj})$ относятся мультимодальность и высокий коэффициент жесткости, осложненный наличием внутренних пограничных слоев.

Переобозначим I_{mkj}, λ_{mkj} как последовательность x_1, x_2, \dots, x_N , тогда задача минимизации среднеквадратичного отклонения (4.3) представима в виде:

$$Z(x_1, x_2, \dots, x_N) \rightarrow \min,$$

где $Z(x_1, x_2, \dots, x_N)$ – целевая функция.

Традиционное построение рассматриваемого метода сводится к вычислению серии векторов вида $x^{(k)} = [x_1^{(k)} \quad x_2^{(k)} \quad \dots \quad x_N^{(k)}]^T$, при обязательном условии $Z(x^{(k+1)}) < Z(x^{(k)})$. Здесь приняты традиционные обозначения: $x^{(k)}$ – предыдущая точка (отметим, что значение начальной точки $x^{(0)}$ требует предварительной информации); значение $x^{(k+1)}$ определяется из выражения:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - [H(x^{(k)}) + \mu^{(k)} E]^{-1} \nabla Z(x^{(k)}).$$

Здесь $\mu^{(k)}$ – некоторая последовательность, обеспечивающая положительную определенность обратной матрицы $[H(x^{(k)}) + \mu^{(k)} E]^{-1}$, E – диагональная матрица размером $N \times N$; вектор $\nabla Z(x^{(k)}) = \left[\frac{\partial Z}{\partial x_1} \quad \frac{\partial Z}{\partial x_2} \quad \dots \quad \frac{\partial Z}{\partial x_N} \right]^T$, $H(x^{(k)})$ – матрица Гессе. Отметим, в данной задаче матрица Гессе вычисляется численным способом, что значительно увеличивает время счета.

В общем виде задача идентификации искомых параметров модели формулируется в виде системы дифференциально-алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial x_1}{\partial \tau} = - \frac{\partial Z(x_1, x_2, \dots, x_N)}{\partial x_1} \\ \frac{\partial x_2}{\partial \tau} = - \frac{\partial Z(x_1, x_2, \dots, x_N)}{\partial x_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial x_N}{\partial \tau} = - \frac{\partial Z(x_1, x_2, \dots, x_N)}{\partial x_N}, \\ g_1(x_1 \dots x_N) = 0 \\ g_2(x_1 \dots x_N) = 0 \\ \vdots \\ g_p(x_1 \dots x_N) = 0 \end{cases}$$

где $g_i(x_1 \dots x_p), i = 1, (1), p$ – некоторые ограничения, как правило, несущие требование обеспечения физической реализуемости моделируемого процесса, например: неотрицательность активных сопротивлений в принятой схеме замещения и/или соблюдение баланса мощностей. Отметим, что при данной постановке задачи процесс идентификации параметров математических моделей ЭТК рассматривается как условный переходный процесс, протекающий в фиктивном времени $\tau = \sum_{i=0}^k h_i$. Выявленное свойство метода, а именно наличие в его

структуре многократного расчёта переходного процесса, ведет к росту времени счета. Для «парирования» указанного обстоятельства применим следующую модификацию метода [6]:

$$x^{k+1} = x^k + \text{diag}(h^k) \cdot [E - a \cdot \text{diag}(h^k) \cdot A_f]^{-1},$$

где $\text{diag}(h^k)$ – матрица шагов интегрирования, имеющая диагональное представление. Шаги интегрирования h_i^k здесь определяются локальными свойствами задачи в момент, соответствующий интервалу вычисления, и, как правило, различаются по величине: $h_j^k, i \neq j, j = 1, (1), N$, где N – размерность задачи. Предложенная «многоскоростная» модификация существенно снижает время счета при поиске глобального оптимума. Предложенный алгоритм реализован в среде MathCAD 14.

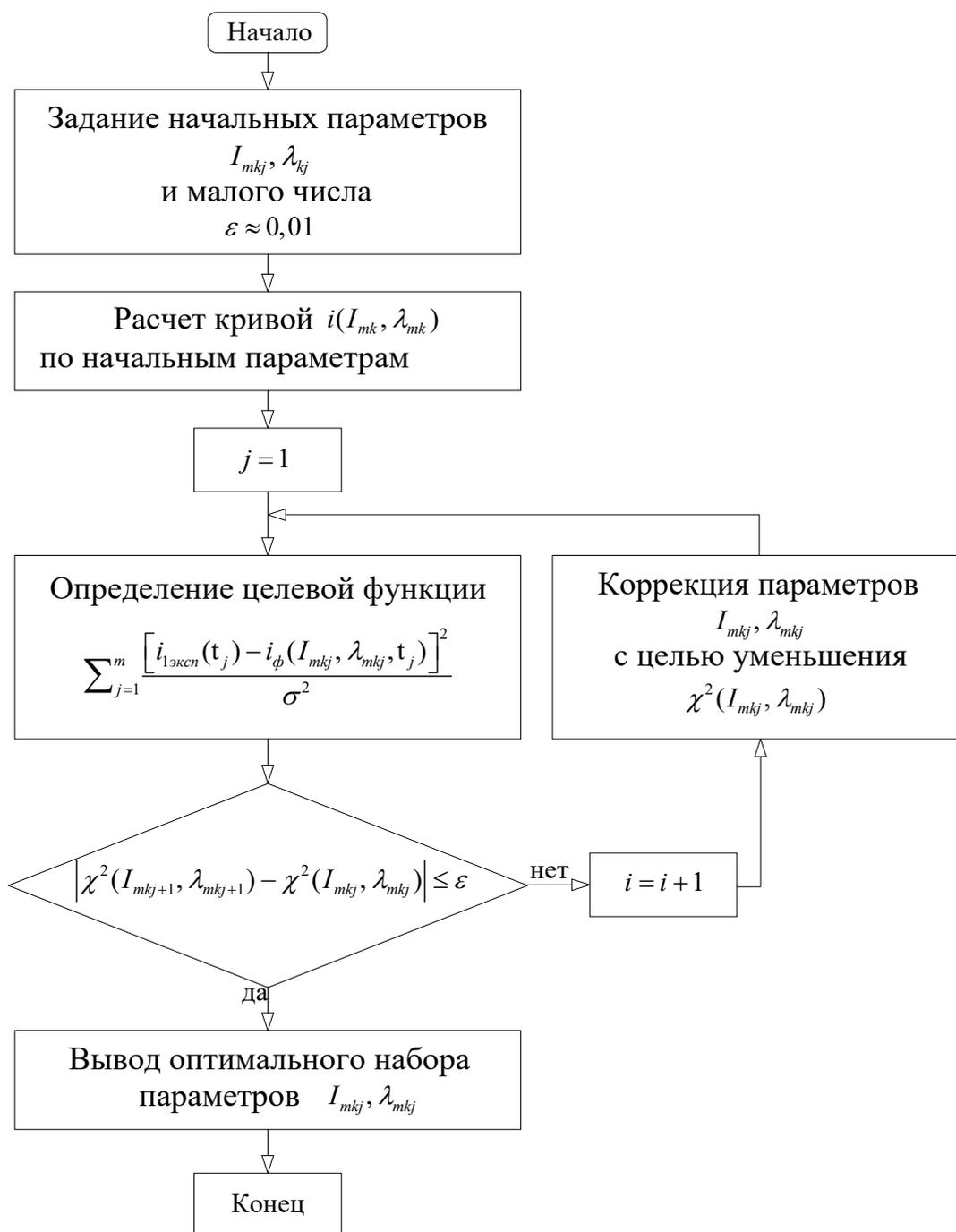


Рисунок 4.1. Алгоритм определения параметров аппроксимирующих экспоненциальных функций

Для определения параметров экспоненциальных функций, аппроксимирующих характеристику затухания $i_{1\text{эксп}}(t)$, разработано программное обеспечение [32, приложение Г] в пакете MathCAD 14 (рис. 4.2), позволяющее автоматизировать определение коэффициентов затухания λ_k и начальных токов I_{mk} экспонент, а также электромагнитных параметров ПЭД по массиву

оцифрованных мгновенных значений затухающего тока статора $i_{1\text{эксп}}(t)$. В алгоритмах определения параметров аппроксимирующей функции (4.1) применена функция нелинейной регрессии общего вида, имеющая следующее представление:

$$K = \text{genfii}(x, y, C, F). \quad (4.4)$$

В (4.4) вектор x является совокупностью значений моментов времени t_j , с, регистрации тока $i_{1\text{эксп}}(t_j)$, разделенных постоянным шагом h , зависящим от частоты дискретизации f_d , Гц, в оцифрованном массиве характеристики затухания $h = 1/f_d$

$$x = t_j = \{0, h, 2h, 3h, \dots, (M-1)h, Mh\}. \quad (4.5)$$

Вектор y представляет собой совокупность значений переходной характеристики затухания $i_{1\text{эксп}}(kh)$, $k = 0, 1, \dots, M$, определенных при $t_j = kh$

$$y = i_{1\text{эксп}}(kh) = \{i_{1\text{эксп}}(0), i_{1\text{эксп}}(h), \dots, i_{1\text{эксп}}((M-1)h), i_{1\text{эксп}}(Mh)\}. \quad (4.6)$$

Вектор C представляет собой совокупность исходных значений начальных токов I_{mk} и показателей затухания λ_k экспоненциальных функций (2.38), необходимых для организации вычислительного процесса [95]

$$C = \{I_{m10}, I_{m20}, \dots, I_{(m-1)0}, \lambda_{10}, \lambda_{20}, \dots, \lambda_{n0}\}. \quad (4.7)$$

В (4.7) учтено, что между токами I_{mk0} , $k = 1, 2, \dots, n$ согласно соотношению (1.11) существует взаимосвязь

$$I_{mno} = I(0) - I_{m10} - I_{m20} - I_{m20} - \dots - I_{m(n-1)0}. \quad (4.8)$$

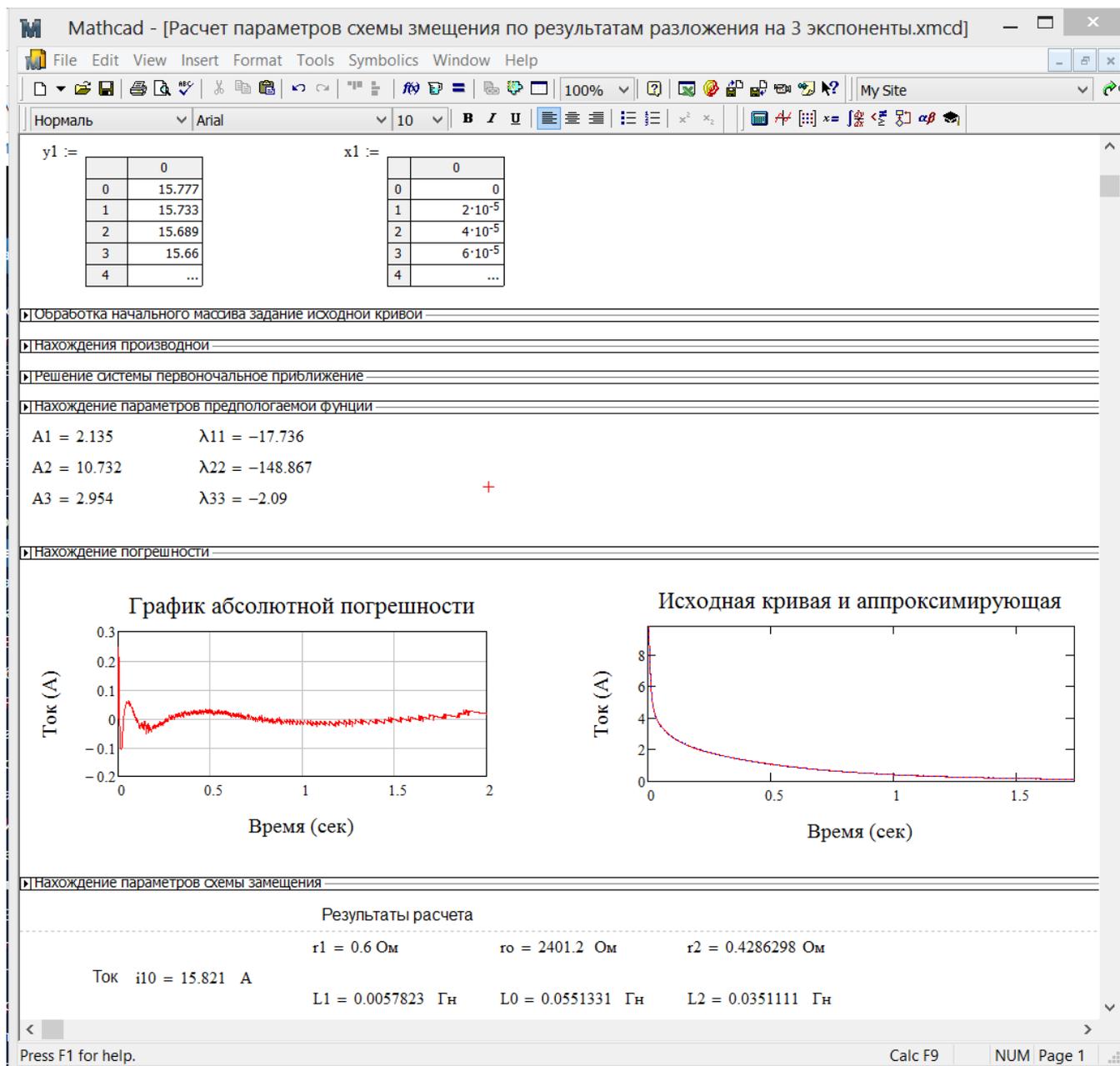


Рисунок 4.2. Экранный интерфейс программы: $y1$ – ток, А; $x1$ – время, с; $A1$, $A2$, $A3$ – начальные токи экспоненциальных аппроксимирующих функций, А; λ_{11} , λ_{22} , λ_{33} – показатели затухания экспонент, 1/с

Вектор-функция F содержит аппроксимирующую функцию (4.1) и ее частные производные относительно компонент вектора C_n [96].

$$F(t, I_{m1}, I_{m2}, \dots, I_{mn-1}, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) = \quad (4.9)$$

$$= \begin{pmatrix} I_{m1}e^{\lambda_1 t} + \dots + I_{mn-1}e^{\lambda_{n-1} t} + I(0) - I_{m10} - \dots - I_{(mn-1)0}e^{\lambda_{mn-1} t} + I_{n0}e^{\lambda_n t} \\ e^{\lambda_1 t} - e^{\lambda_n t} \\ e^{\lambda_2 t} - e^{\lambda_n t} \\ \vdots \\ e^{\lambda_7 t} - e^{\lambda_n t} \\ I_{m1}te^{\lambda_1 t} \\ I_{m2}te^{\lambda_2 t} \\ \vdots \\ I_{m7}te^{\lambda_{N-1} t} \\ -t(I_{m1} + I_{m2} + \dots + I_{mn-1} - I(0)) \end{pmatrix}$$

Результатом работы функции $genfit(x, y, C, F)$ являются численные значения коэффициентов и показателей аппроксимирующей функции (4.1), обеспечивающей приближение к оцифрованной экспериментальной характеристике $i_{1эксп}(t_j)$ с минимальным среднеквадратичным отклонением.

Рассчитанные показатели аппроксимирующей функции используются для определения параметров схемы замещения ПЭД с одноконтурной цепью ротора по формулам 2.40–2.51.

4.2 Оценка эффективности и достоверности обрабатывающей программы и методики идентификации, основанной на дифференцировании начального участка характеристики затухания тока обмотки статора ПЭД

Оценка эффективности и достоверности предлагаемой программы и методики идентификации выполнена путем проведения вычислительного эксперимента с формированием тестовых характеристик $i_1(t)$ у погружных электродвигателей типов ЭД(Т)12-117-380, 1ЭД(Т)45-117-1000, 1ЭД(Т)63-117-1000, ЭД(Т)90-117-1300. Тестовые переходные характеристики получены моделированием режима внезапного короткого замыкания в Т-образных эквивалентных схемах данных электродвигателей, реализованного в программном пакете Multisim 12 при

начальных токах I_0 , равных номинальному намагничивающему току электродвигателей. При моделировании ток намагничивания принят равным току холостого хода I_{xx} ПЭД. Информация о токе I_{xx} дается в [97].

Схема формирования тестовой переходной характеристики $i_1(t)$ затухания тока статора АД (рис. 4.3) помимо элементов Т-образной схемы замещения АД содержит источник напряжения U_0 , задающий постоянный ток I_0 в обмотке статора АД, и источник ступенчатого напряжения U_1 . Значения элементов приведены для АД типа 1ЭД (Т) 63-117-1000. Ток $I_0=24A$.

При запуске моделирования источник ступенчатого напряжения U_1 формирует перепад 10.8В, который нейтрализует действие постоянного напряжения U_0 , в результате чего на стороне входных зажимов эквивалентной схемы (рис. 4.3) создается режим короткого замыкания [88].

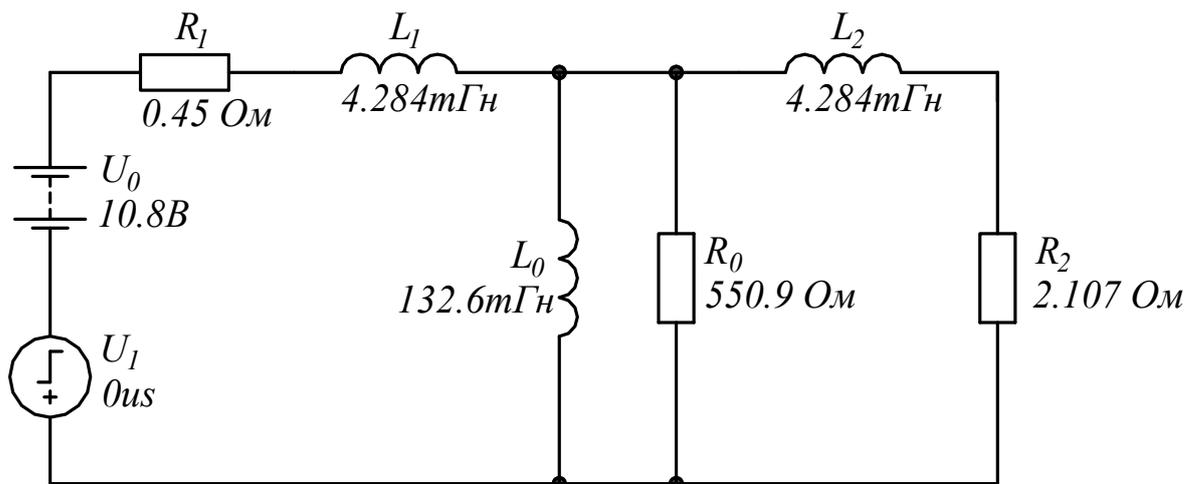


Рисунок 4.3. Схема формирования тестовой переходной характеристики $i_1(t)$ в программной среде Multisim 12

При этом формируется кривая затухания тока статора $i_1(t)$, протекающего по элементам L_1, r_1, U_0, U_1 , которую можно вывести на экран (рис. 4.4) с помощью редактора Grapher View программы Multisim 12 и экспортировать в виде цифрового массива в Excel.

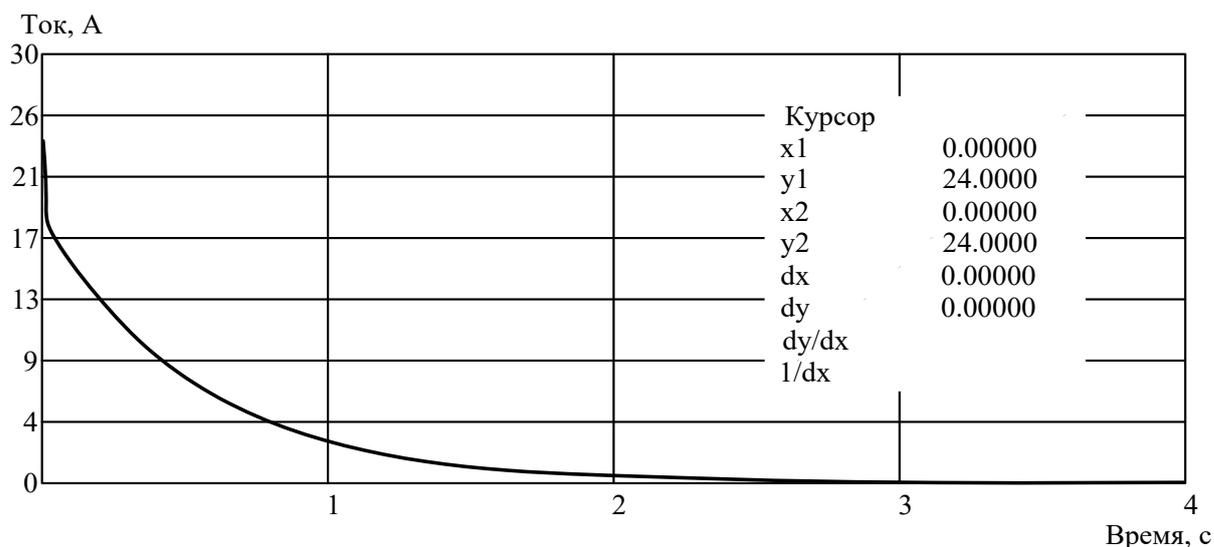


Рисунок 4.4. Переходная характеристика затухания $i_l(t)$ ПЭД типа 1ЭД(Т) 63-117-1000, сформированная средствами Multisim 12

Параметры экспонент (2.38), аппроксимирующих тестовые переходные характеристики погружных электродвигателей ЭД(Т)12-117-380, 1ЭД(Т)45-117-1000, 1ЭД(Т)63-117-1000, ЭД(Т)90-117-1300, определены с помощью программы [32] и представлены в табл. 4.1. Известные значения параметров этих экспонент определены путем решения системы уравнений (2.43), выполненного в программе Mathematica, и также представлены в табл. 4.1 [101]. Из табл. 4.1 видно, что наибольшие расхождения (до 5 %) по параметрам аппроксимирующих экспонент получены для постоянной времени T_3 сверхпереходного участка характеристики $i_l(t)$. Для остальных параметров расхождения не превышают 1.5 %.

По параметрам аппроксимирующих экспонент и формулам (2.25)...(2.34), т. е. непосредственно по тестовым характеристикам затухания тока обмотки статора ПЭД с помощью разработанной программы [32], рассчитаны значения параметров их схем замещения, размещенные в табл. 4.2 вместе с известными значениями этих параметров.

Таблица 4.1. Параметры аппроксимации переходных характеристик $i_{эксн}(t)$ затухания тока статора ПЭД

Двигатель		Параметры аппроксимации					
ЭД(Т) 12-117-380	Параметры	I_{m1}, A	I_{m2}, A	I_{m3}, A	T_1, c	$T_2, мс$	$T_3, мкс$
		Известные	8,335	2,1609	0,0040	0,2872	2,377
	Расчетные	8,396	2,1001	0,0040	0,2871	2,376	4,332
	Расхождение, %	-0,73	0,27	0	0,028	0,023	3,2
ЭД(Т) 45-117-1000	Известные	14,35	3,6452	0,0047	0,345	3,176	3,591
	Расчетные	14,35	3,6461	0,0047	0,345	3,175	3,761
	Расхождение, %	0	-0,027	0	0	0,015	-4,72
ЭД(Т) 63-117-1000	Известные	19,90	4,093	0,005	0,366	3,33	3,82
	Расчетные	19,90	4,085	0,005	0,366	3,33	3,74
	Расхождение, %	0	0,09	0	0	0	2,11
ЭД(Т) 90-117-1300	Известные	23,77	5,212	0,009	0,2880	2,367	3,16
	Расчетные	23,70	5,2	0,0089	0,2886	2,388	3,02
	Расхождение, %	0,3	0,24	1,0	-0,23	-0,9	4,40

Таблица 4.2. Эквивалентные параметры асинхронных электродвигателей

Параметры Двигатель	I_0, A	$r_1, Ом$	$r_2, Ом$	$L_1, мГн$	$L_2, мГн$	$r_0, Ом$	$L_0, мГн$
фактические ЭД(Т)12-117-380 расчет	10,5	0,517	0,510	2,050	2,050	155,293	63,809
			0,528	2,060	2,149	164,595	64,312
фактические 1ЭД(Т)45-117-1000 расчет	18	0,660	0,968	4,428	4,428	252,609	129,398
			0,975	4,513	4,518	241,737	130,798
фактические 1ЭД(Т)63-117-1000 расчет	24	0,45	0,719	3,197	3,197	181,717	87,557
			0,701	2,994	3,003	192,631	88,634
фактические ЭД(Т)90-117-1300 расчет	29	0,63	0,888	3,567	3,567	191,375	90,887
			0,975	3,411	3,779	212,852	91,766

Из табл. 4.2. следует, что параметры схем замещения ПЭД типов ЭД(Т)12-117-380, 1ЭД(Т)45-117-1000, 1ЭД(Т)63-117-1000, ЭД(Т)90-117-1300, определенные непосредственно по характеристике затухания тока обмотки статора, отличаются от фактических значений не более чем на 6,5 %. Исключение составляет сопротивление ветви намагничивания r_0 , где отклонение достигает 11,5 %. Все в

целом показывает достаточную степень адекватности программы [32] и методик определения параметров T-образной схемы замещения.

4.3 Оценка эффективности и достоверности программного обеспечения методики идентификации, основанной на интегральном преобразовании характеристики затухания тока обмотки статора ПЭД

Для обработки экспериментальных и тестовых переходных характеристик, определения производной $i'_1(0)$, постоянных времени $T_k = \lambda_k^{-1}$, начальных токов I_{mk} , аппроксимирующих экспонент и вычисления эквивалентных параметров ПЭД разработана программа SHEM_ZAM [32], реализованная в системе MATLAB 7. Программа позволяет автоматизировать определение коэффициентов затухания λ_k и начальных токов I_{mk} экспонент, а также электромагнитных параметров ПЭД по массиву оцифрованных мгновенных значений затухающего тока статора $i_{1\text{эксп}}(t)$. В программе используются функции регрессионного анализа и начальные условия

$$\begin{aligned} I_0 &= I_{m1} + I_{m2} + I_{m3}, \\ i'_1(0) &= -(I_{m1}/T_1 + I_{m2}/T_2 + I_{m3}/T_3), \\ \int_0^{\infty} i_1(t) dt &= I_{m1} \cdot T_1 + I_{m2} \cdot T_2 + I_{m3} \cdot T_3, \end{aligned} \quad (4.10)$$

вытекающие из выражения (4.1) и связывающие между собой начальные токи I_{m1}, I_{m2}, I_{m3} с исходным постоянным током I_0 , производную $i'_1(0)$ и интеграл $\int_0^{\infty} i_1(t) dt = I_{m1}$ с постоянными времени $T_1 = -1/\lambda_1$, $T_2 = -1/\lambda_2$, $T_3 = -1/\lambda_3$, что позволяет оптимизировать выбор наиболее рациональных значений токов I_{m1}, I_{m2}, I_{m3} и постоянных времени T_1, T_2, T_3 из множества возможных вариантов решений при аппроксимации характеристики $i_{1\text{эксп}}(t)$ суммой экспоненциальных функций.

Обработка экспериментальных и тестовых массивов данных для ПЭД проводится в опциях регрессионного анализа с учетом начальных условий (4.10) по алгоритму Левенберга-Марквардта. Инструмент имеет графический интерфейс и

набор функций для создания моделей кривых и поверхностей, позволяет выполнять анализ данных, предварительную обработку и постобработку, сравнение различных моделей. Инструмент поддерживает также непараметрические методы моделирования, такие как сплайны, интерполяция и сглаживание.

В результате работы инструмента Curve Fitting на панель управления программы SHEM_ZAM 01 (рис. 4.5) выводятся параметры I_{mk} λ_k пользовательской модели (2.38) и значения элементов $r_1, L_1, L_2, r_2, L_0, r_0$ Т-образной схемы замещения ПЭД. Панель управления разработана с учетом удобства применения в цеховых условиях ремонтных предприятий и кустовых площадок скважин, настроена на обработку оцифрованных массивов данных формата «DAT», применяемого в устройствах сбора данных типа LA-20 USB, ЛА-2USB-14 и формата «TXT».

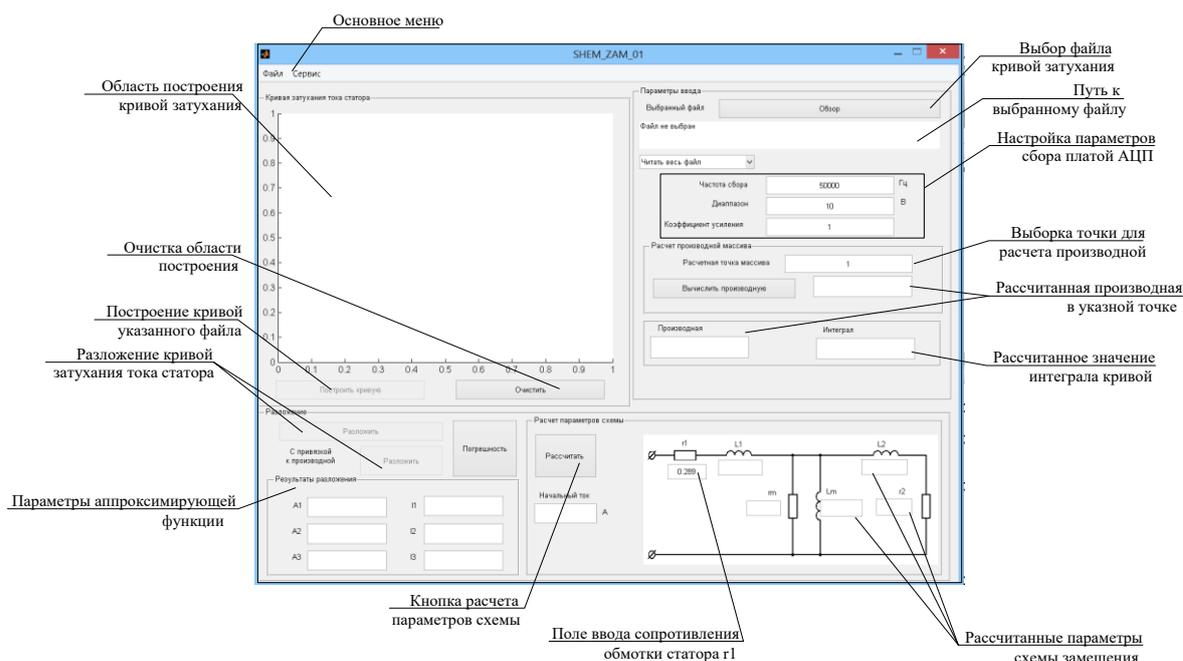


Рисунок 4.5. Панель управления (интерфейс) программы SHEM_ZAM, принятые обозначения: A1 – ток I_{m3} ; I_1 – коэффициент затухания λ_3 ; A2 – ток I_{m1} ; I_2 – коэффициент затухания λ_1 ; A3 – ток I_{m2} ; I_3 – коэффициент затухания λ_2

Оценка достоверности программного обеспечения SHEM_ZAM методики идентификации, основанной на интегральном преобразовании характеристики затухания тока обмотки статора, и эффективности мобильной переносной

установки РПХ-20 проведена на ПЭД типов ЭД(Т)12-117-380, 1ЭД(Т)45-117-1000, 1ЭД(Т)63-117-1000. Оцифрованные массивы данных экспортировались в формате «DAT» в ноутбук установки РПХ-20 для последующей обработки программой SHEM-ZAM. Результаты идентификации представлены в табл. 4.3, где для сравнения приведены значения параметров Т-образной схемы замещения ПЭД, полученные ранее по каталожным (паспортным) данным.

Таблица 4.3. Результаты идентификации параметров схем замещения ПЭД в программе SHEM_ZAM

Двигатель \ Параметры	I_0 , А	r_1 , Ом	r_2 , Ом	L_1 , мГн	L_2 , мГн	r_0 , Ом	L_0 , мГн
Каталожные	10,5	0,517	0,510	2,050	2,050	155,293	63,809
Получены			0,516	2,173	1,938	194,736	63,686
Каталожные	18	0,66	0,968	4,428	4,428	252,609	129,398
Получены			1,019	4,677	4,718	231,475	130,798
Каталожные	24	0,45	0,719	3,197	3,197	181,717	87,557
Получены			0,650	2,815	2,864	212,793	89,946

Согласно данным табл. 4.3, наибольшее расхождение между «каталожными» и найденными в результате идентификации параметрами Т-образной схемы замещения ПЭД составляет 15,1 % и получено для сопротивления r_0 , параллельной ветви намагничивания. Отклонения остальных параметров схемы замещения ПЭД от «каталожных значений» не превышали 8 %.

Анализ и сопоставление этих результатов с аналогичными данными, полученными ранее в разделе 4.2 (см. табл. 4.1 и 4.2) для методики идентификации, основанной на дифференцировании начального участка характеристики затухания тока обмотки статора ПЭД, позволяет сделать следующие выводы.

Предлагаемые в диссертационной работе методики идентификации обеспечивают определение параметров схем замещения рассмотренных типов ПЭД примерно с одинаковой точностью, зависящей в основном от погрешности аппроксимации $i_{1экен}(t)$ экспоненциальным рядом, и в этом смысле равноценны.

Методики, основанные на дифференцировании начального участка характеристики затухания, используют производную $i'_1(0)$ тока обмотки статора в начальный момент времени, через которую вычисляются параметры всех элементов схемы замещения ПЭД, начиная с индуктивности рассеяния L_1 . Прецизионное определение производной $i'_1(0)$ на начальной стадии кривой затухания в области малых времен, имитирующих условие $t_1 \rightarrow 0$, где может проявляться действие коммутационных помех и шумов, включает ряд вопросов, требующих своего рассмотрения и исследования.

Методика идентификации, основанная на интегральном преобразовании оцифрованной характеристики $i_1(t)$ затухания тока статора ПЭД, эффективно подавляет действие помех и шумов, наиболее проявляющихся на конечном (хвостовом) участке характеристики затухания, а операция определения интеграла $\int_0^{\infty} i_1 t(dt)$ с высокой точностью реализуется современными измерительными и программными средствами.

При использовании данной методики индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора ПЭД вычисляются в виде суммы по (2.50), и ее разделение на L_1 и L_2 , необходимое в частности для определения сопротивления r_0 параллельной ветви намагничивания схемы замещения ПЭД, может быть выполнено следующим образом:

- путем вычисления L_1 по (2.35) с использованием результатов определения производной $i'_1(0)$;

- выбором с учетом рекомендации [9] $L_1 = L_2$, что можно считать допустимым, поскольку влияние r_0 на величину и расположение пространственных векторов напряжения, тока и потокосцепления асинхронных электродвигателей незначительно [26];

- снятием и регистрацией двух характеристик затухания тока статора, одну из которых получают при соединении обмоток статора ПЭД по схеме неполной

звезды (рис. 2.3, а), а другую – по схеме встречного соединения двух фаз (рис. 2.3, б) при разомкнутой третьей фазе.

4.4 Разработка подблока идентификации параметров модели ПЭД

Для реализации в микроконтроллерной системе управления подблока идентификации (рис. 1.11), обеспечивающей корректную работу блока формирования обратных связей, разработан алгоритм (рис. 4.6, рис. 4.7), 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. 2.3). 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 4.6. Алгоритм обработки массива экспериментальных данных

Для расчета исходных данных, процедуры определения параметров T-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 4.11.

$$i(t) = A_1 \cdot e^{-\lambda_1 t} + A_2 \cdot e^{-\lambda_2 t} + A_3 \cdot e^{-\lambda_3 t} \quad (4.11)$$

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. 4.7).

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

- интеграл экспериментальной характеристики затухания;
- производная на начальном участке;
- коэффициенты аппроксимирующей функции 4.11.

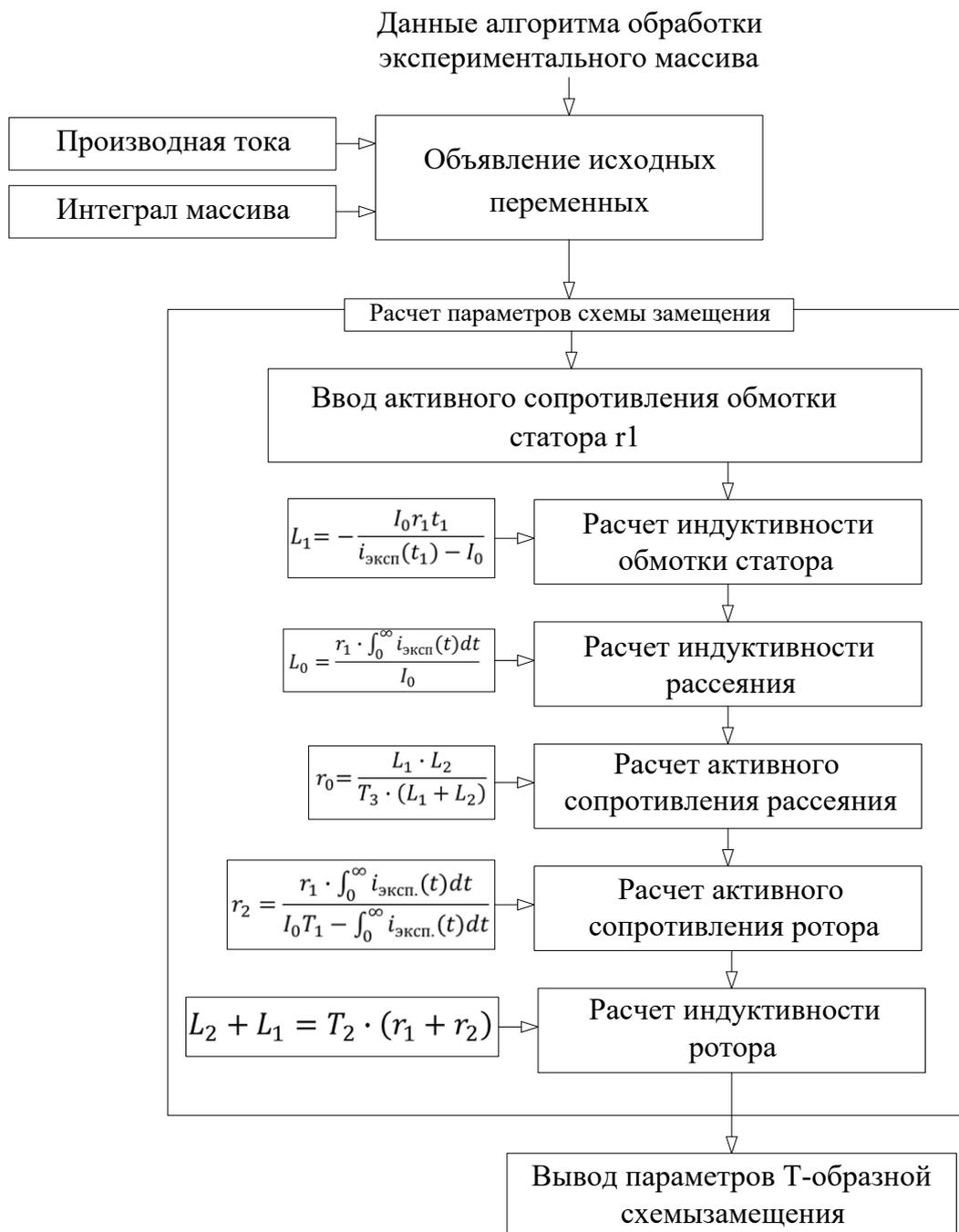


Рисунок 4.7. Алгоритм получения параметров схемы замещения

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 .

4.5 Определение энергетических параметров и характеристик ПЭД по идентификационным параметрам схем замещения

Разработанные в диссертации методики идентификации параметров схем замещения ПЭД позволяют определять эксплуатационные параметры и характеристики электродвигателя, необходимые для контроля его измененного технического состояния после ремонтного обслуживания и для оптимального согласования ПЭД с нагрузочным ЭЦН на глубине спуска в скважине. Определение параметров и характеристик ПЭД через идентификационные параметры Т-образной схемы замещения в зависимости от скольжения можно свести к последовательному применению следующих расчетных соотношений.

Сопротивление эквивалентной последовательной ветви намагничивания:

$$r_m = \frac{r_0 \cdot x_0^2}{r_0^2 + x_0^2}, \quad x_m = \frac{x_0 \cdot r_0^2}{r_0^2 + x_0^2}. \quad (4.12)$$

Полное сопротивление Т-образной схемы замещения ПЭД:

$$z = r_1 + x_1 + \frac{(r_m + jx_m) \cdot \left(\frac{r_2}{s} + jx_2\right)}{(r_m + jx_m) + \left(\frac{r_2}{s} + jx_2\right)}. \quad (4.13)$$

Ток в обмотке статора ПЭД:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{\sqrt{3} \cdot z}. \quad (4.14)$$

Приведенное падение напряжения в обмотке ротора ПЭД:

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_1 \cdot \frac{(r_m + jx_m) \cdot \left(\frac{r_2}{s} + jx_2\right)}{(r_m + jx_m) + \left(\frac{r_2}{s} + jx_2\right)}. \quad (4.15)$$

Приведенный ток в обмотке ротора ПЭД:

$$i_2 = \frac{\dot{U}_2}{\frac{r_2}{s} + jx_2}. \quad (4.16)$$

Выходная мощность ПЭД:

$$P_2 = m_1 \cdot |I_2|^2 \cdot \frac{r_2}{s} \cdot (1-s). \quad (4.17)$$

Вращающий момент на валу ПЭД:

$$M_2 = \frac{m_1 \cdot P}{100 \cdot \pi} \cdot |I_2|^2 \cdot \frac{r_2}{s} \cdot (1-s). \quad (4.18)$$

Потери мощности в обмотке ротора ПЭД:

$$\Delta P_2 = m_1 \cdot |I_2|^2 \cdot r_2. \quad (4.19)$$

Ток в ветви намагничивания ПЭД:

$$I_m = \frac{U_2}{r_m + jx_m}. \quad (4.20)$$

Суммарные потери мощности в ПЭД:

$$\Delta P = m_1 \times |I_1|^2 \times r_1 + x_1 \times |I_m|^2 \times r_m + m_1 \times |I_2|^2 \times r_2. \quad (4.21)$$

Коэффициент полезного действия ПЭД:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P}. \quad (4.22)$$

Реактивная мощность ПЭД:

$$Q = m_1 \times |I_1|^2 \times x_1 + m_1 \times |I_m|^2 \times x_m + m_1 \times |I_2|^2 \times x_2. \quad (4.23)$$

Полная (кажущаяся) мощность ПЭД:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (4.24)$$

Коэффициент мощности ПЭД:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}. \quad (4.25)$$

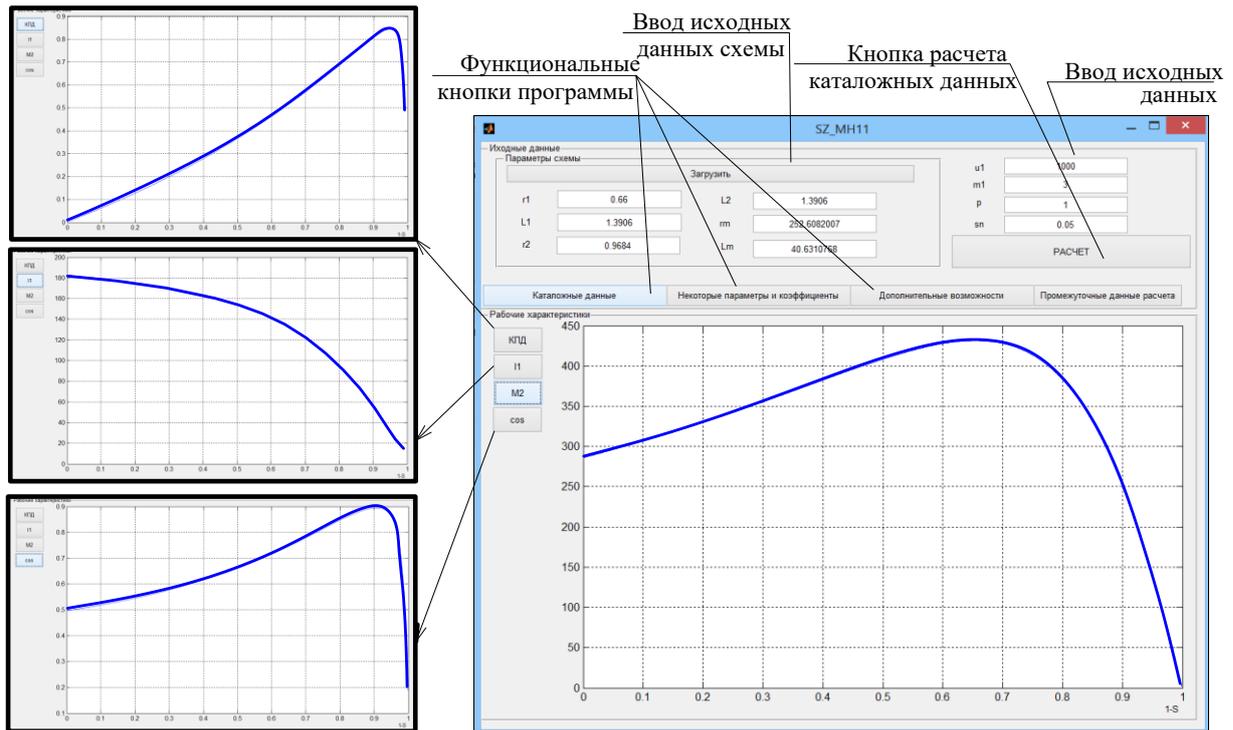
Критическое скольжение:

$$s_{kp} = \frac{r_2}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2)^2}}. \quad (4.26)$$

Пусковой момент [121]:

$$M_n = \frac{2M_{кр} \times (1 + s_{кр} \times \frac{r_1}{r_2})}{s_{кр} + \frac{1}{s_{кр}} + s_{кр} \times \frac{2r_1}{r_2}} \quad (4.27)$$

Подстановка в формулы 4.18...4.32 величин скольжений номинального $s=s_{ном}$, критического, пускового $s=1$ режимов и режима идеального холостого хода $s=0$ позволяет получить значения параметров ПЭД, относящихся к данным условиям их эксплуатации. На основе формул 4.18...4.32 разработана программа SHEM_PAR для оперативного определения энергетических параметров ПЭД по результатам испытаний на установке РПХ-20, реализованная в системе Matlab 7. Панель управления программой (рис. 4.8.) имеет интерфейс, удобный для использования в цеховых условиях предприятий по ремонту электродвигателей. Исходные данные для программы SHEM_PAR – параметры Т-образной схемы замещения ПЭД (x_1, x_2' – индуктивные сопротивления рассеяния обмотки статора и приведенной обмотки ротора, x_m – индуктивное сопротивление параллельной ветви намагничивания), величина U_n и частота f напряжения, подводимого к обмотке статора ПЭД, число фаз ПЭД m_1 , номинальное значение скольжения s_n и число пар полюсов $2p$ – заносятся пользователем в соответствующие окна панели управления непосредственно с клавиатуры ноутбука установки РПХ-20.



а)

Исходные данные

Параметры схемы

Загрузить

r1: 0.66, L1: 1.3906, r2: 0.9684, L2: 1.3906, rm: 252.6982007, Lm: 40.6310768

u1: 1000, m1: 3, p: 1, sn: 0.05

РАСЧЕТ

Каталожные данные | **Некоторые параметры и коэффициенты** | Дополнительные возможности | Промежуточные данные расчета

Некоторые параметры и коэффициенты

Пусковой режим (s=1)

Сопротивление последовательной ветви намагничивания z1: 3.16285

Потребляемый из сети ток I1: 182.541 A, Приведенный ток в обмотке ротора I2: 175.821 A

Напряжение ветви намагничивания um: 297.942 В

Полезная мощность развиваемая ротором P2: 0 Вт, Вращательный момент на валу создаваемый ротором M2: 0 Нм

Коэффициент полезного действия двигателя kрп: 0, Коэффициент мощности двигателя cos φ: 0.496059

Номинальный режим (s=sn)

Сопротивление последовательной ветви намагничивания z1: 17.3381

Потребляемый из сети ток I1: 33.2996 A, Приведенный ток в обмотке ротора I2: 27.6958 A

Напряжение ветви намагничивания um: 535.851 В

Полезная мощность развиваемая ротором P2: 42036.5 Вт, Вращательный момент на валу создаваемый ротором M2: 133.803 Нм

Коэффициент полезного действия двигателя kрп: 0.84318, Коэффициент мощности двигателя cos φ: 0.864383

Режим идеального холостого хода (s=0)

Сопротивление последовательной ветви намагничивания z1: 41.5955

Потребляемый из сети ток I1: 13.8901 A, Приведенный ток в обмотке ротора I2: 5.74977e-09 A

Напряжение ветви намагничивания um: 556.808 В

Полезная мощность развиваемая ротором P2: 9.60455e-06 Вт, Вращательный момент на валу создаваемый ротором M2: 3.05722e-08 Нм

Коэффициент полезного действия двигателя kрп: 2.36363e-09, Коэффициент мощности двигателя cos φ: 0.169022

б)

Рисунок 4.8. Панель управления (интерфейс) программы SHERM_PAR: а) с каталожными (паспортными) параметрами ЭД(Т)12-117-380; б) с параметрами пускового режима и идеального холостого хода

Запуск программы осуществляется нажатием кнопки «Расчет». С помощью кнопки «каталожные данные» на панель управления выводятся каталожные (паспортные) параметры испытуемого ПЭД (рис. 4.8, а). Кнопка «некоторые параметры и коэффициенты» служит для вывода на панель управления SHEM_PAR сведений о параметрах ПЭД в режимах пуска и идеального холостого хода (рис. 4.8, б).

Результаты, представленные на рис. 4.8, получены для ПЭД типа ЭД(Т)12-117-380 на основании идентификационных параметров Т-образной схемы замещения, приведенных в табл. 4.2. Эти результаты, а также данные по определению каталожных параметров ПЭД типов 1ЭД(Т)45-117-1000, 1ЭД(Т)63-117-1000 на основе идентификации параметров их схем замещения (см. табл. 4.1) приведены в табл. 4.2 вместе с известными каталожными параметрами этих ПЭД, представленными в [97]. Там же указаны отклонения полученных параметров ПЭД от номинальных значений. Данные, приведенные в табл. 4.4, свидетельствуют о следующем. Энергетические параметры рассматриваемых типов ПЭД получены средствами программы SHEM_PAR на основе идентификационных параметров их схем замещения, которые, в свою очередь, были определены по переходным характеристикам затухания тока статора с использованием расчетных соотношений 2.79...2.83. Наблюдаются положительные и отрицательные отклонения полученных энергетических параметров от их номинальных значений.

Наименьшие отклонения имеют энергетические параметры ПЭД – коэффициент полезного действия η и коэффициент мощности $\cos\varphi$ (не более -2 % у обоих). Наибольшее отклонение, достигающее -9,67 %, имеет входной ток ПЭД. Все в целом показывает достаточную степень адекватности программ SHEM_PAR, SHEM_ZAM, методики идентификации, установки РПХ-20 и определяет целесообразность их применения на предприятиях по ремонту погружного электрооборудования для определения измененного технического состояния ПЭД после ремонтного обслуживания и контроля его эксплуатационных параметров.

Таблица 4.4. Результаты определения энергетических параметров ПЭД

Двигатель	Эксплуатационные параметры погружных асинхронных электродвигателей							
	I_1 , А	P_2 , кВт	η , %	$\cos\varphi$ о.е.	n_2 , об/мин	$M_{п}/M_{н}$, о.е.	$M_{кр}/M_{н}$, о.е.	$I_{п}/I_{н}$, о.е.
ЭД(Т) 12-117-380, $I_0=10.5A$								
Известные	26	12	84	0,85	2850	—	—	—
Полученные	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, $I_0=18A$								
Известные	36,5	45	85	0,86	2850	—	—	—
Полученные	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, $I_0=24A$								
Известные	51,5	63	85	0,85	2844	—	—	—
Полученные	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	—	—	—

4.6 Моделирование функционирования ЭТК УЭЦН, содержащих послеремонтные ПЭД при вариациях внешних температурных воздействий

В соответствии с принятой идеологией математического моделирования электропривода [158] при моделировании эксплуатационных режимов работы ЭТК УЭЦН, содержащего послеремонтные ПЭД, введем допущения:

- режим работы всех компонент, входящих в моделируемую часть ЭТК УЭЦН, симметричен, соответственно, параметры фазных величин покомпонентно равны;
- магнитное поле в воздушном зазоре ПЭД синусоидально в радиальном направлении и не меняется вдоль образующей расточки статора (пренебрегаем зубцовыми гармониками, магнитной несимметрией, краевыми эффектами...);
- напряжение на выходе преобразователя частоты имеет синусоидальную форму;
- изменение потерь в стали ПЭД и насыщение магнитной цепи ПЭД учитываем в рамках модели идентификации ПЭД (глава 2);

- эффект вытеснения токов в проводниках ПЭД учитываем в рамках модели идентификации ПЭД (глава 2);
- активные сопротивления кабеля, находящейся в скважине, зависят от температуры окружающей среды;
- активные сопротивления статорной и роторной обмоток ПЭД зависят от режима работы и температуры окружающей среды;
- в установившемся режиме работы температура активной части ПЭД в радиальном и осевом направлении постоянна;
- многомассовая система (вал ПЭД, электроцентробежный насос, газосепаратор, жидкость в НКТ, ПЖ) моделируется одностепенной системой без учета вязкоупругих свойств;
- напряжение на выходе трансформатора имеет синусоидальную симметричную форму, действующее значение напряжения задается соответствующей отпайкой ТМПН.

Соответственно, приходим к следующим математическим моделям основных компонент динамики ЭТК УЭЦН.

Асинхронный электродвигатель (ПЭД) 4.28:

$$\begin{aligned}
 \frac{d\psi_A}{dt} &= -\{R_{A.25}[1 + \alpha_t(\tau_{п1} - \tau_{ai})] + R_{A.25}[1 + \alpha_t(\tau_{л1} - \tau_{ai})]\}i_A + U \sin(\omega_1 t), \\
 \frac{d\psi_B}{dt} &= -\{R_{B.25}[1 + \alpha_t(\tau_{п1} - \tau_{ai})] + R_{B.25}[1 + \alpha_t(\tau_{л1} - \tau_{ai})]\}i_B + U \sin(\omega_1 t + 120^\circ), \\
 \frac{d\psi_C}{dt} &= -\{R_{C.25}[1 + \alpha_t(\tau_{п1} - \tau_{ai})] + R_{C.25}[1 + \alpha_t(\tau_{л1} - \tau_{ai})]\}i_C + U \sin(\omega_1 t - 120^\circ), \\
 \frac{d\psi_a}{dt} &= -R_{a.25}[1 + \alpha_t(\tau_{п2} - \tau_{ai})] \cdot i_a, \\
 \frac{d\psi_b}{dt} &= -R_{b.25}[1 + \alpha_t(\tau_{п2} - \tau_{ai})] \cdot i_b, \\
 \frac{d\psi_c}{dt} &= -R_{c.25}[1 + \alpha_t(\tau_{п2} - \tau_{ai})] \cdot i_c.
 \end{aligned} \tag{4.28}$$

Здесь

– потокосцепления обмоток 4.29:

$$\begin{aligned}
 \Psi_A &= L_A i_A - \frac{1}{2} L_m (i_B + i_C) + L_m [i_a \cos \theta + i_b \cos(\theta + 120^\circ) + i_c \cos(\theta - 120^\circ)], \\
 \Psi_B &= L_B i_B - \frac{1}{2} L_m (i_A + i_C) + L_m [i_a \cos(\theta - 120^\circ) + i_b \cos \theta + i_c \cos(\theta + 120^\circ)], \\
 \Psi_C &= L_C i_C - \frac{1}{2} L_m (i_A + i_B) + L_m [i_a \cos(\theta + 120^\circ) + i_b \cos(\theta - 120^\circ) + i_c \cos \theta],
 \end{aligned} \tag{4.29}$$

$$\Psi_a = L_a i_a - \frac{1}{2} L_m (i_b + i_c) + L_m [i_a \cos \theta + i_b \cos(\theta - 120^\circ) + i_c \cos(\theta + 120^\circ)],$$

$$\Psi_b = L_b i_b - \frac{1}{2} L_m (i_a + i_c) + L_m [i_a \cos(\theta + 120^\circ) + i_b \cos \theta + i_c \cos(\theta - 120^\circ)],$$

$$\Psi_c = L_c i_c - \frac{1}{2} L_m (i_a + i_b) + L_m [i_a \cos(\theta - 120^\circ) + i_b \cos(\theta + 120^\circ) + i_c \cos \theta];$$

– активные сопротивления фаз обмоток статора и ротора, приведённые к температуре окружающей среды 25⁰С:

$$R_{A.25} = R_{B.25} = R_{C.25};$$

$$R_{a.25} = R_{b.25} = R_{c.25};$$

– температура частей асинхронного двигателя:

$$\tau_{п1}, \tau_{\alpha i}, \tau_{л1}, \tau_{п2};$$

– токи фаз статора и ротора асинхронного двигателя:

$$i_A, i_B, i_C, i_a, i_b, i_c;$$

в дальнейшем принимаем:

$$L_A = L_B = L_C = L_1,$$

$$L_a = L_b = L_c = L_2,$$

$$L_m = \text{const};$$

– температурный коэффициент сопротивления меди:

$$\alpha_t = 0,0038 \cdot 10^{-3} \text{ (1/Кельвин)}.$$

Механическая подсистема. Уравнения динамики данной подсистемы представляют собой систему двух уравнений:

$$\begin{aligned} J \frac{d\omega}{dt} &= p(M_E - M_C) \\ \frac{d\theta}{dt} &= \omega, \end{aligned} \tag{4.30}$$

где ω – скорость вращения ротора ПЭД; J – момент инерции вращающихся масс, приведённых к валу двигателя; p – число пар полюсов ПЭД; M_E – момент электромагнитный развиваемый ПЭД; M_C – момент сопротивления на валу ПЭД, с учетом собственного момента сопротивления.

Момент электромагнитный ПЭД определяется выражением 4.31:

$$M_{\text{Э}} = -L_m p [i_A (i_a \sin \theta + i_b \sin(\theta + 120^\circ) + i_c \sin(\theta - 120^\circ)) + \tag{4.31}$$

$$+i_B(i_a \sin(\theta - 120^\circ) + i_b \sin \theta + i_c \sin(\theta + 120^\circ)) + \\ +i_C(i_a \sin(\theta + 120^\circ) + i_b \sin(\theta - 120^\circ) + i_c \sin \theta)].$$

Момент сопротивления определяется характеристикой гидравлической сети и энергетической характеристикой насоса, в случае когда возможно не учитывать упруговязкие характеристики системы, после преобразований, принимают вид [6, 158]:

– момент статический

$$M_C = CQ\omega + D\omega^2,$$

– энергетическая характеристика

$$P = \omega^2(CQ + D\omega),$$

где $C = \frac{b_1}{\omega_{\text{НОМ}}^2}, D = \frac{b_0}{\omega_{\text{НОМ}}^3},$

$\omega_{\text{НОМ}}$ – номинальная угловая частота вращения насоса,

b_0, b_1 – паспортные коэффициенты насоса.

Для кабельной линии учитывается характер реактивной проводимости, ее омическое сопротивление и его температурные зависимости [159]. Для трансформатора учтены: r_m – эквивалентное активное сопротивление провода первичной и вторичной обмоток трансформатора; x_m – эквивалентное индуктивное сопротивление рассеяния первичной и вторичной обмоток трансформатора; b_m – индуктивная проводимость намагничивания; g_m – активная проводимость, учитывающая магнитные потери.

Соответственно, схемы замещения принимают вид, представленный на рис. 4.9 и рис. 4.10.

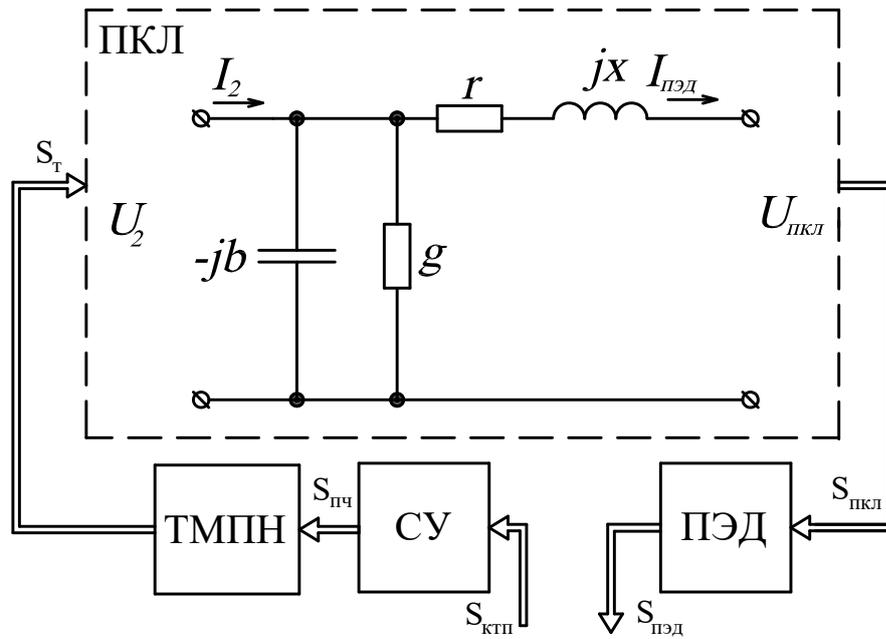


Рисунок 4.9. Схема замещения погружной кабельной линии в составе УЭЦН для промышленной частоты 50 Гц

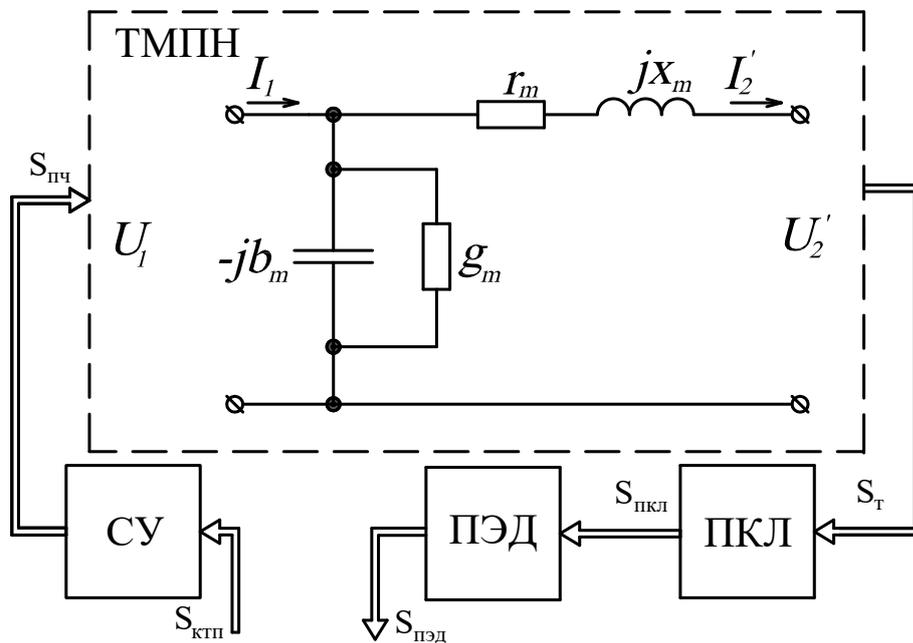


Рисунок 4.10. Схема замещения нефтепромыслового трансформатора в составе УЭЦН

Расчетная энергетическая диаграмма ЭТК УЭЦН широко распространенного типоразмера погружного агрегата в износостойком исполнении ЭЦНИ-160 с электродвигателем ПЭД-35 приведена на рис. 4.11.

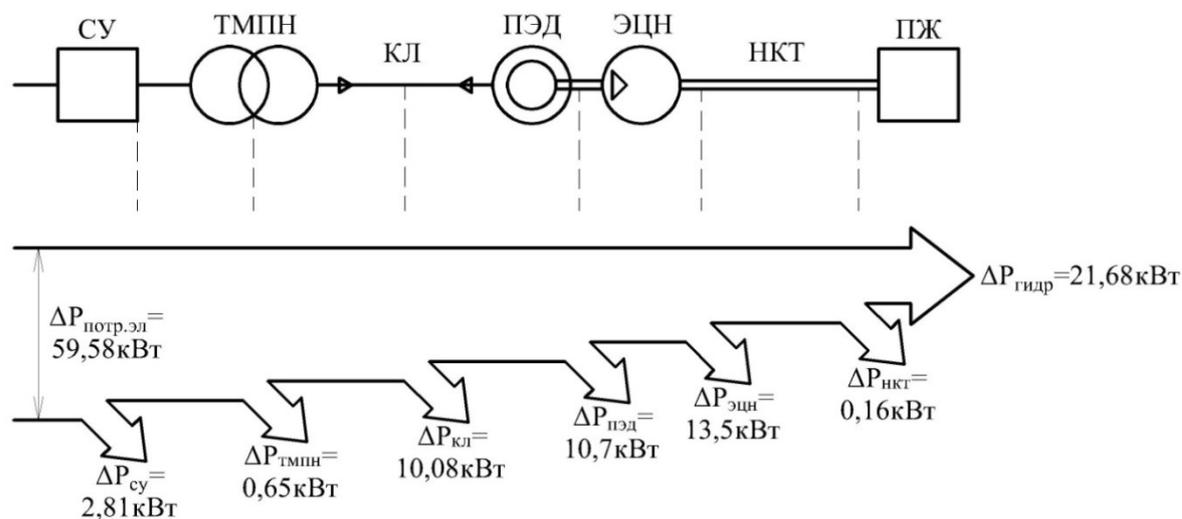


Рисунок 4.11. Энергетическая диаграмма ЭТК УЭЦН с ЭЦНИ-160, ПЭД-35, КРБК-3х25; $\eta_{уэцн} = 0,363$

Как видно из диаграммы, в данном случае лишь 36,3 % энергии, потребляемой ЭТК УЭЦН, затрачивается на совершение полезной работы по подъему пластовой жидкости из скважины на поверхность, а остальная часть энергии приходится на непроизводительные расходы. При этом наибольшие потери мощности происходят в электроцентробежном насосе и погружном электродвигателе, что обуславливает особую важность энергоэффективного управления режимами их работы.

В этих условиях рациональный подбор элементов ЭТК УЭЦН, учитывающих реальные энергетические характеристики ПЭД и других элементов УЭЦН в их взаимосвязях как в статике, так и в динамике, имеет важнейшее значение для обеспечения качества функционирования всего комплекса и определения принципов построения и настройки системы управления.

Радикальным способом энергосбережения в УЭЦН является переход от нерегулируемого электропривода к регулируемому (рис. 1.11), который обеспечивает подачу к ЭЦН оптимальной в каждый момент времени мощности при

минимизации потерь во всех элементах силовой части ЭТК УЭЦН. На практике это осуществить возможно при реализации регулируемого электропривода УЭЦН по системе ПЧ – ПЭД с короткозамкнутым ротором [160].

Применение ПЧ с развитой системой микропроцессорного управления в составе СУ УЭЦН позволяет помимо экономии электроэнергии:

- снизить нагрузки на промышленную электрическую сеть;
- увеличить межремонтный период эксплуатации и наработку на отказ УЭЦН;
- реализовать плавный пуск и останов УЭЦН, энергосберегающее регулирование производительности при изменении дебита скважины с целью предотвращения неэффективной работы установки;
- обеспечить управление широким классом ПЭД как отечественного, так и зарубежного производства мощностью до 500–600 кВт;
- устранить негативное влияние большого пускового тока на электродвигатель и ударных механических нагрузок, сопутствующих прямому пуску;
- увязать в единую автоматизированную систему технологический процесс добычи нефти от скважины до товарного парка;
- увеличить объем добычи нефти без замены оборудования путем управления частотой питающего напряжения;
- обеспечить временный вывод скважин из эксплуатации без опасности ее парафинирования;
- реализовать раскочку и плавный вывод скважин на режим;
- разрабатывать законсервированные малодебитные скважины (10–15 м³/сут), которых в России насчитывается более 3 тыс.;
- получать косинус «фи» на входе СУ, практически равный единице, что немаловажно для «чистоты» питающей промышленной сети.

Особенность ЭТК УЭЦН – недоступность ПЭД (в рабочих режимах) для прямых измерений, что обостряет проблему предварительной послеремонтной идентификации электромагнитных параметров ПЭД при нестабильных характеристиках внешних воздействий.

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

Выше было показано, что послеремонтный ПЭД является ключевой частью исследуемых ЭТК, выполняет основную технологическую роль по преобразованию электрической энергии в механическую и передаче ее электроцентробежному насосу при решении задач оптимального регулирования его напора. ПЭД оказывает основное влияние на качество функционирования ЭТК УЭЦН как единого комплекса энергопреобразования. Соответственно, система управления электроприводом ЭТК УЭЦН требует учета реальных энергетических характеристик ПЭД, которые существенно варьируются из-за особенностей существующих ремонтных технологий. Ранее было экспериментально показано, что разброс по таким параметрам ПЭД, как активные сопротивления цепи ротора, индуктивные сопротивления цепей ротора и статора, может достигать 25 % [5, 20]. В свою очередь, нелинейные зависимости параметров ТМПН, КЛ и ПЭД от температуры окружающей среды и характера нагрузки усугубляют указанную ситуацию (рис. 4.12).

Для оценки влияния температурных флуктуаций на эксплуатационные характеристики ЭТК УЭЦН и оценки влияния на качество функционирования ЭТК УЭЦН идентифицированных отклонений параметров послеремонтных ПЭД при вариациях внешних температурных воздействий был проведен вычислительный эксперимент. В качестве показателей функционирования ЭТК УЭЦН приняты время выхода на установившийся режим и скольжение.

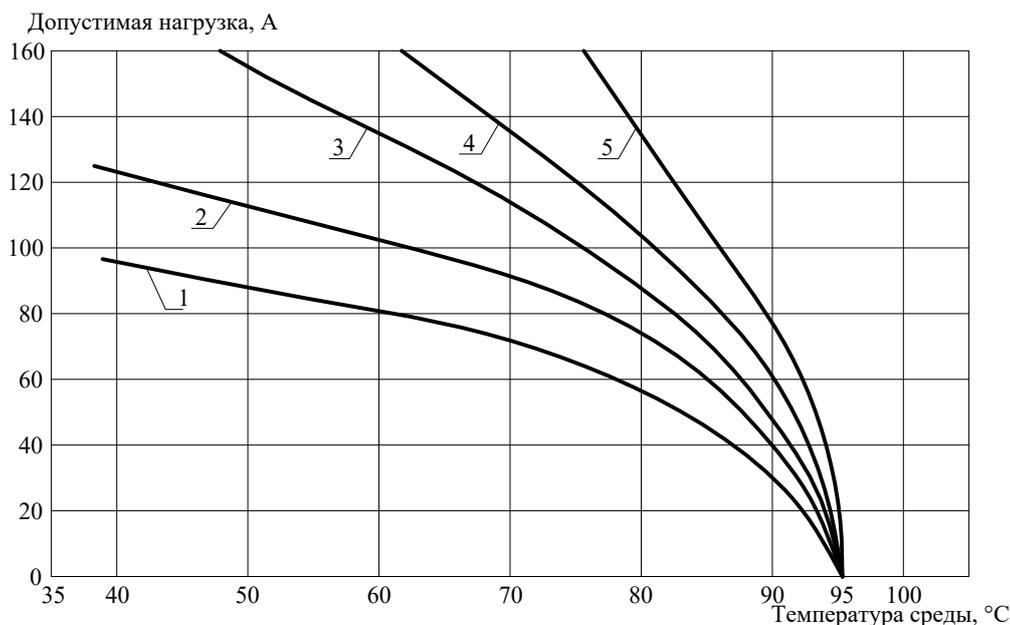


Рисунок 4.12. Зависимость допустимых токовых нагрузок кабеля КПК и КПП от температуры скважинной среды, цифрами обозначены сечения жил, мм²: 1 – 10, 2 – 16, 3 – 25, 4 – 35, 5 – 50

Математическая модель реализует систему уравнений, построенную в параграфе 4.6, и построена в среде MatLab для ЭТК УЭЦН в составе: ПЭД 1ЭД(Т)45-117-1000, кабель, насос, ТМПН.

Длина кабеля принята равной средней глубине погружения на месторождениях ХМАО-Югры, которая составляет три километра.

Характеристика гидравлической сети и энергетическая характеристика насоса приняты из условий независимости момента сопротивления от температуры.

Серия расчетов проводилась для трех сочетаний температур ПЭД и кабеля, обусловленных различной температурой пластовой жидкости. Температуры наземной части УЭЦН приняты постоянными. При каждом сочетании температур последовательно моделировался ЭТК УЭЦН, содержащий послеремонтный ПЭД с номинальными параметрами, послеремонтный ПЭД с максимальными отклонениями параметров от номинальных в большую сторону и послеремонтный ПЭД с максимальными отклонениями параметров в меньшую сторону. Для кабеля учитывались только температурные изменения параметров.

Фрагменты вычислительных экспериментов при условии постоянного момента, создаваемого механической частью ЭТК УЭЦН, приведены на рис. 4.13–4.15 и в табл. 4.5.

Фрагменты вычислительных экспериментов при условии постоянного действующего значения тока ЭТК УЭЦН приведены в табл. 4.6 [161].

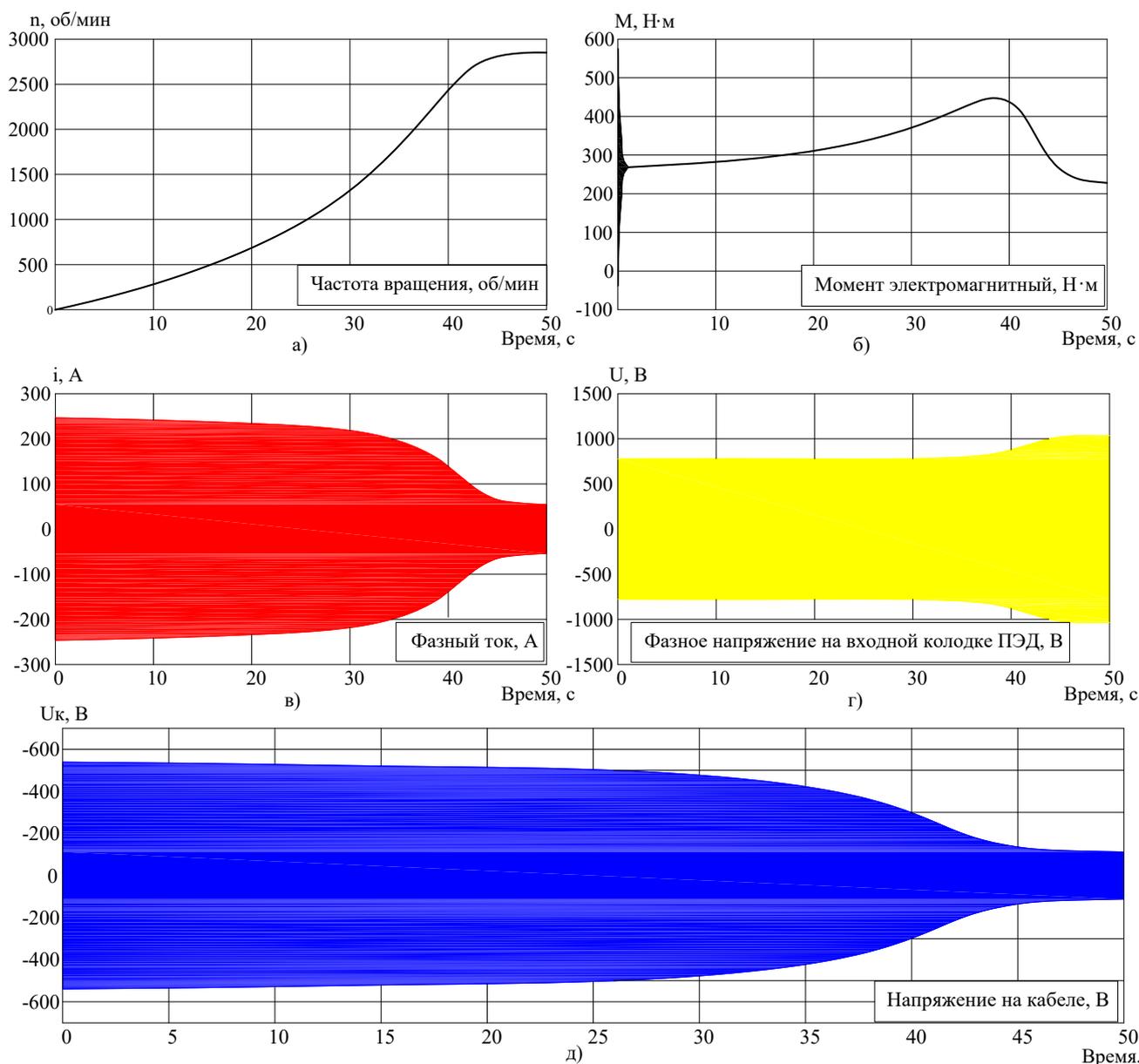


Рисунок 4.13. Динамика пуска ЭТК УЭЦН при температуре внешней среды 25°C, а – частота вращения, б – момент электромагнитный, в – фазный ток, г – напряжение на входной колодке ПЭД, д – падение напряжения на кабеле

Таблица 4.5. Отклонения параметров ЭТК УЭЦН при вариациях внешних температурных воздействий, при постоянном моменте нагрузки

№ Эксп-та	t_k , °C	t_D , °C	Тип модели ПЭД	$\Delta U_{\text{дв}}$, В	$\Delta U_{\text{дв}}^{\text{пуск}}$, В	$\Delta U_{\text{к}}^{\text{уст}}$, В	$I_{\text{уст}}$, А	s , %	M_{max} , Н*м	$t_{\text{уст}}$, сек	$\Delta t_{\text{уст}}$, %
1	25	25	«Ном»	740,4	556	85,55	39,24	4,86	447	49,8	
2	25	25	Откл+25	740,7	602	83,03	38,09	6,03	413	59,7	+20
3	25	25	Откл-25	739,5	492	91,41	41,93	3,53	483	48,9	-2
4	70	100	«Ном»	722,4	521	104,6	40,24	6,70	386	64,5	
5	70	100	Откл+25	717,4	556	107,9	39,52	8,70	352	83,2	+29
6	70	100	Откл-25	726,7	472	104,9	42,46	4,90	424	56,1	-13
7	100	150	«Ном»	711,4	507	116,2	40,9	8,13	356	77,6	
8	100	150	Откл+25	705,4	542	120,5	40,41	10,56	327	102	+31
9	100	150	Откл-25	716,2	462	115,8	42,92	3,90	389	68	-12

$\Delta U_{\text{дв}}$, В – фазное напряжение ПЭД в установившемся режиме;

$\Delta U_{\text{дв}}^{\text{пуск}}$, В – фазное напряжение ПЭД в пусковом режиме;

$\Delta U_{\text{к}}^{\text{уст}}$, В – падение напряжения на кабеле в установившемся режиме;

$I_{\text{уст}}$, А – фазный ток УЭЦН в установившемся режиме;

s , % – скольжение ПЭД;

M_{max} , Н*м – максимальный момент ПЭД;

$t_{\text{уст}}$, сек – время выхода УЭЦН на установившийся режим;

«Ном» – параметры модели ПЭД соответствуют паспортным;

«Откл+25» – параметры модели ПЭД отклоняются от паспортных в большую сторону на 25 %;

«Откл-25» – параметры модели ПЭД отклоняются от паспортных в меньшую сторону на 25%;

t_k , °C – установившаяся температура кабеля;

t_D , °C – установившаяся температура активной части ПЭД;

$\Delta t_{\text{уст}}$, % – отклонение времени выхода на установившийся режим.

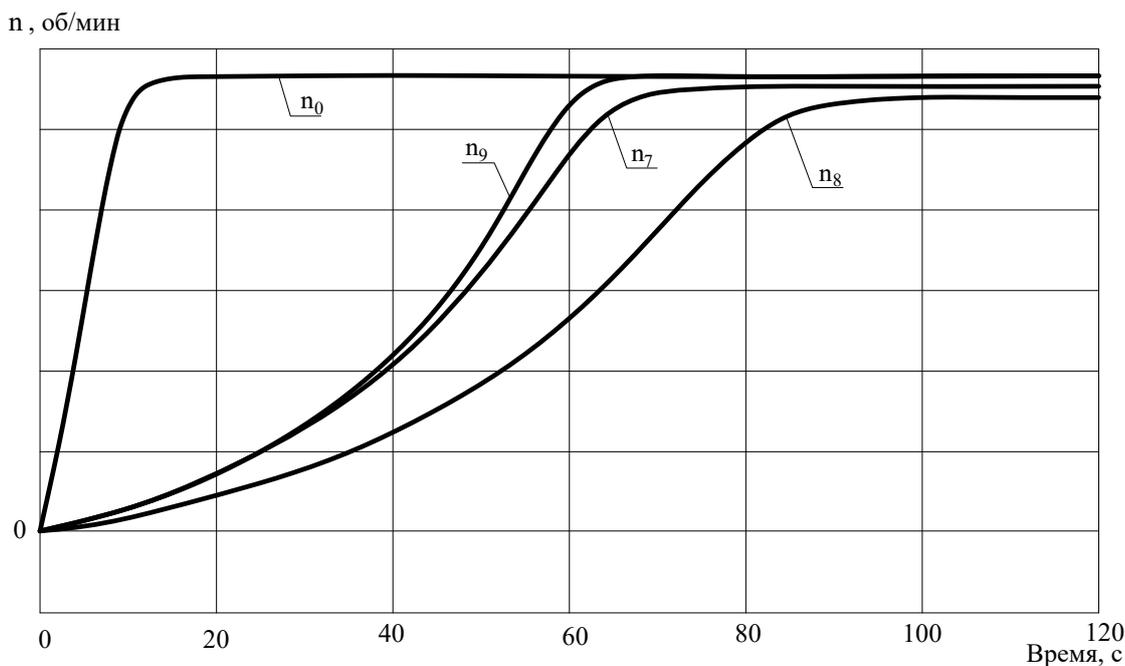


Рисунок 4.14. Частота вращения насоса ЭТК УЭЦН при температуре пластовой жидкости 70°C ; w – вычислительный эксперимент № 7; w_p – вычислительный эксперимент № 8; w_m – вычислительный эксперимент № 9; w_wk – вычислительный эксперимент, параметры модели ПЭД соответствуют паспортным, температура активной части ПЭД – 150°C , падение напряжения на кабеле не учитывается

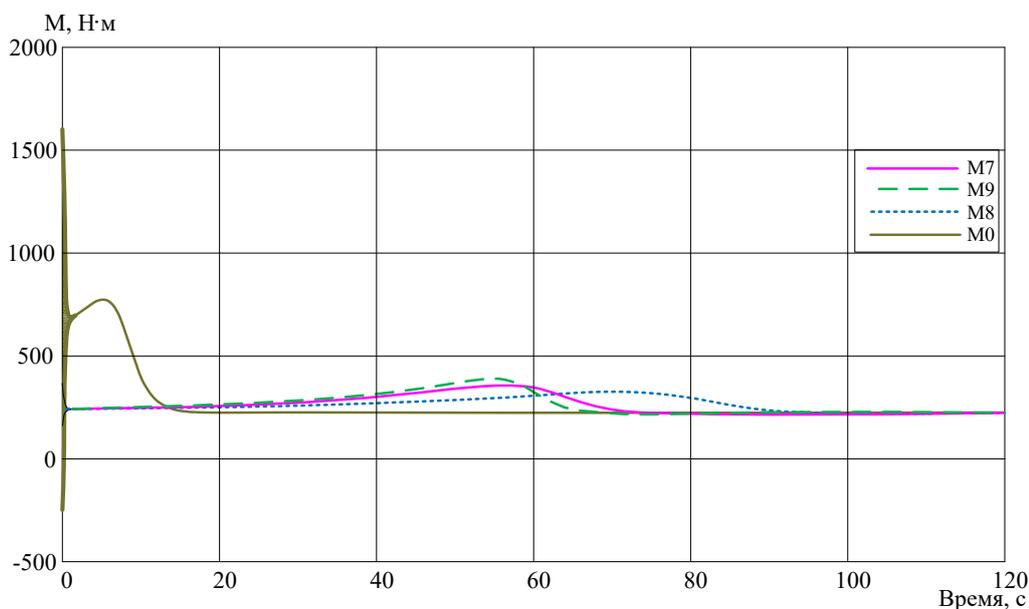


Рисунок 4.15. Момент электромагнитный при пуске ЭТК УЭЦН при температуре пластовой жидкости 70°C ; T_e – вычислительный эксперимент № 7; T_{ep} – вычислительный эксперимент № 8; T_{em} – вычислительный эксперимент № 9;

T_{ewk} – вычислительный эксперимент, параметры модели ПЭД соответствуют паспортным, температура активной части ПЭД – 150°C , падение напряжения на кабеле не учитывается

Таблица 4.6. Отклонения параметров ЭТК УЭЦН при вариациях внешних температурных воздействий, при действующем значении тока 26 А

Погружной электродвигатель ЭДТ45		I, А	$\Delta U_{\text{кабеля}}, \text{В}$	$U_{\text{пэд}}, \text{В}$	$P_2, \text{кВт}$	$\eta, \%$	$n_2, \text{об/мин}$	s, о,е,
t=25°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°C, %			2,08	0,13	4,63	1,39	0,97	23,60
t=100°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°C, %			2,23	0,17	1,70	2,33	0,21	3,74
t=150°C	паспорт	26	86,66	913,3	28,3	80,71	2810,9	0,0630 333
	эксперимент	26	88,67	911,3	27,76	78,89	2817	0,061
Отклонение при 150°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°C до 150°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. [161, 162].

Таким образом:

- 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;

- построение электромеханической системы с регулируемым асинхронным двигателем с подблоком идентификации параметров и блоком оценивания переменных состояния ПЭД позволит достоверно прогнозировать и учитывать при управлении ЭТК УЭЦН внешние воздействия, в том числе и температурные.

Выводы по главе 4

1. Разработана и сертифицирована программа в пакете Mathcad, реализующая методику идентификации эквивалентных параметров ПЭД, основанную на дифференцировании начальной стадии оцифрованного переходного процесса затухания тока статора.

2. Проведен вычислительный эксперимент по идентификации параметров схем замещения ПЭД типов ЭД(Т)12-117-380, 1ЭД(Т)45-117-1000, 1ЭД(Т)63-117-1000, ЭД(Т)90-117-1300 на основании тестовых кривых затухания их токов статора, сформированных в программной среде схемотехнического моделирования Multisim 12. Параметры схем замещения, определенные непосредственно по характеристике затухания тока статора, отличались от фактических значений не более чем на 6,5 %. Исключение составляло сопротивление ветви намагничивания r_0 , где отклонение достигало 11,5 %.

3. Разработана и сертифицирована программа в пакете Matlab, реализующая методику идентификации эквивалентных параметров ПЭД, основанную на интегральном преобразовании $\int_0^{\infty} i_1(t)dt$ оцифрованного переходного процесса затухания тока статора. Применение методики и установки РПХ-20 позволило идентифицировать параметры Т-образной схемы замещения ПЭД с одноконтурным ротором ПЭД типов ЭД(Т)12-117-380, 1ЭД(Т)45-117-1000, 1ЭД(Т)63-117-1000 с отклонением, не превышающим 12 % относительно известных значений.

4. Разработан и создан программный модуль управления силовым модулем мобильной установки на контроллере ATmega16, выполненный на языке программирования «С» в среде CodeVisionAVR.

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

6. 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.

7. Перспективы дальнейших исследований по теме диссертации:

1) Исследование и реализация алгоритмов для идентификации параметров подключенного ПЭД штатными средствами станции управления, установленной в условиях кустовой площадки; 2) Исследование других источников тока для проведения опыта затухания при неподвижном роторе с целью уменьшения массы и габаритов регистратора переходных процессов; 3) Обоснование повышения эксплуатационной надежности 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 схема 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 T-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 $\int_0^{\infty} i_1(t)dt$ 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 9 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 T-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:

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

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

- ЭТК – электротехнический комплекс;
- УЭЦН – установка электроцентробежных насосов;
- СУ – станция управления;
- КЛ – кабельная линия;
- ПЭД – погружной электродвигатель;
- ТМС – система погружной телеметрии;
- ЭЦН – электроцентробежный насос;
- ПБВ – переключение без возбуждения;
- НКТ – насосно-компрессорная труба;
- КТУ – комплектно-трансформаторное устройство;
- КПД – коэффициент полезного действия;
- АД – асинхронный двигатель;
- ХХ – холостой ход;
- КЗ – короткое замыкание;
- АЦП – аналого-цифровой преобразователь;
- ДТ – датчик тока;
- ШИМ – широтно-импульсная модуляция;
- ЖК – жидкокристаллический индикатор;
- АЦК – аналого-цифровой канал;
- СМ – силовой модуль;
- АИН – автономный инвертор напряжения;
- РПХ – регистратор переходных характеристик.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ковалёв В.З. Моделирование электротехнических комплексов и систем как совокупности взаимодействующих подсистем различной физической природы: дис. ... д-ра. техн. наук. – Омск, 2000. – 197 с.
2. Ковалев А.Ю., Ковалев Ю.З., Солодянкин А.С. Электротехнологические установки насосной эксплуатации скважин : монография. – Нижневартовск : Изд-во НГГУ, 2010. – 105 с.
3. Аникин В.В., Ковалев А.Ю., Кузнецов Е.М. Электротехнологические установки для нефтедобычи : монография. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2015. – 160 с.
4. Ковалев Ю.З., Ковалев А.Ю., Ковалева Н.А., Щербаков А.Г. Моделирование электротехнических комплексов и систем с позиции системного анализа: препринт. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2006. – 38 с.
5. Ковалев В.З., Ковалев А.Ю., Чертов Р.А. Математическое моделирование электропогружных установок как электротехнических комплексов // Динамика систем, механизмов и машин: V международная научно-техническая конференция; Кн.1. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2004. – С. 251–253.
6. Ковалев В.З., Мальгин Г.В., Архипова О.В. Математическое моделирование электротехнических комплексов нефтегазодобычи в задачах энергосбережения: монография. – Ханты-Мансийск: Полиграфист, 2008 – 222 с.
7. Ивановский В.Н., Пекин С.С., Сабиров А.А. Установки погружных центробежных насосов для добычи нефти. – М.: «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2002. – 256 с.
8. Система погружной телеметрии Электон - ТМС – 3: руководство по эксплуатации ЦТКД 228 РЭ 2016. – Радужный, Владимирская обл. : ЗАО Электон, 2016. – 35 с.
9. Кади-Оглы Е.Ф. Сравнительный анализ и оценка эффективности способов регулирования погружных асинхронных двигателей: дисс. ... канд. техн. наук. – СПб, 2002. – 134 с.

10. Ведерников В.А. Модели и методы управления режимами работы и электропотреблением погружных центробежных установок: дис. ... д-ра. техн. наук. – Тюмень, 2006. – 276 с.
11. Нурбосынов Д.Н. Минимизация потерь энергии в электротехнических комплексах предприятий нефтедобычи: дис. ... д-ра. техн. наук. – Альметьевск, 2003. – 327 с.
12. Зюзев А.М. Развитие теории и обобщение опыта разработки автоматизированных электроприводов, агрегатов нефтегазового комплекса: дис. ... д-ра. техн. наук. – Екатеринбург, 2004. – 300 с.
13. Григорьев Г.Я. Повышение эффективности управления энергетическими комплексами в нефтегазодобыче: дис. ... канд. техн. наук. – Тюмень, 2005. – 174 с.
14. Сипайлов В.А. Оптимизация режимов работы установок электроцентробежных насосов механизированной добычи нефти: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2009. – 154 с.
15. Кади-Оглы Е.Ф. Систематизация параметров и характеристик некоторых погружных асинхронных двигателей с учетом насыщения // Вестник ХГПУ «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». – 1998. – № – С. 305–306.
16. Меньшов Б.Г., Суд И.И. Электротехнические установки и комплексы в нефтегазовой промышленности. – М.: Недра, 1984. – 416 с.
17. Ковалев Ю.З. Системное моделирование погружных асинхронных двигателей в составе установок электроцентробежных насосов // Промышленная энергетика. – 2012. – № 1. – С. 31–34.
18. Трубы бесшовные холоднотянутые особо высокой точности для корпусов погружных электродвигателей и насосов. Технические условия ТУ 14-3-1941-94
19. Трубы стальные электросварные прямошовные для корпусов погружных насосов и электродвигателей повышенной коррозионной стойкости и хладостойкости. Технические условия ТУ 1303-190-0147016-2001.

20. Ковалев А.Ю. Моделирование погружных асинхронных электрических двигателей в составе установок электроцентробежных насосов: дис. ... канд. техн. наук. – Омск, 2010. – 157 с.
21. Электродвигатели асинхронные погружные серии ПЭДН 96, 103, 117 и 130 габаритов. Технические условия ТУ 3381-003-12058737-2010.
22. Аникин В.В., Ковалев А.Ю., Ковалев Ю.З., Солодянкин А.С. Электротехнологические установки насосной эксплуатации скважин: препринт. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. – 52 с.
23. Общая схема установки электроцентробежного насоса [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.agrovod.com/ru> (дата обращения: 12.10.2017).
24. Ивановский В.Н. и др. Скважинные насосные установки для добычи нефти. – М.: «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2002. – 824 с.
25. Аникин В.В., Ковалев А.Ю., Кузнецов Е.М. Станции управления электропогружными установками насосной эксплуатации скважин: монография; Минобрнауки России, ОмГТУ, Нижневартовский филиал. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. – 128 с.: ил.
26. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока; ГОУВПО Ивановский государственный технический университет. – Иваново, 2008. – 298 с.
27. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учеб. для студентов высших учебных заведений. – 2-е изд-е испр. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 272 с.
28. Белоусенко И.В. и др. Новые технологии и современное оборудование в электроэнергетике газовой промышленности. – М.: Недра – Бизнесцентр, 2007. – 478 с.
29. Anikin V.V., Kovalev A.Yu., Kuznetsov Ye.M. The Parameter identification of submersible motors of electrical centrifugal pump units for oil production // International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON – Proceeding, Pages. – 2015. – 4 p.

30. Chung J., Dolen M., Kim H., Lorenz R. Continuous – time observer to estimate electrical parameters of induction machine // IEEE Trans. on Industry Applications. – 2001. – Issue 30. – № 3. – Pp. 259–263.
31. 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 октября 2012 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 11 декабря 2012 г.
32. Vandevier Joseph E. Generator selection for the reliable operation of subsurface centrifugal pump motors // IEEE Trans. on Industry Applications. – 2008. – Vol. 1A – Issue 1.
33. Патент на изобретение. Способ сборки электрической машины. Свидетельство регистрации № 2320063. Регистрационный № 2005109602. Приоритет регистрации 04.04.2005г. Ковалев Ю.З., Ковалев В.З., Ковалев А.Ю., Ковалева Н.А., Кузнецов Е.М., Щербаков А.Г.
34. Патент на изобретение. Способ контроля магнитного состояния статора погружного асинхронного электродвигателя (ПЭД). Свидетельство регистрации № 2319160. Регистрационный № 2005130112. Приоритет регистрации 27.09.2005 г. Ковалев Ю.З., Ковалев В.З., Ковалев А.Ю., Ковалева Н.А., Кузнецов Е.М.
35. Vandevier Joseph E. Generator selection for the reliable operation of subsurface centrifugal pump motors [Electronic resource] // IEEE Trans. on Industry Applications. – 2008. – Vol. 1A – Issue 1.
36. Стенд приемосдаточных и периодических испытаний ПЭД с нагрузкой до 160 кВт [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.novomet.ru>.
37. Аникин В.В., Ковалев А.Ю., Кузнецов Е.М. Идентификация параметров погружных асинхронных электродвигателей установок электроцентробежных насосов для добычи нефти // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы V Международной науч.-прак. конф. – Саратов: ФГБОУ ВПО Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова, 2014. – С. 178–183.

38. Главные приводы SIMOVERT. Векторное управление. Инструкция по эксплуатации [Электронный ресурс] // Техническая документация фирмы Siemens. – URL: www.siemens.com. (дата обращения: 18.03.2014 г.)
39. Инструкция по эксплуатации привода VLT Automation Drive FC300 [Электронный ресурс] // Техническая документация фирмы Danfoss. – URL: www.danfoss.com. (дата обращения: 18.03.2014 г.)
40. Инвертор общего назначения с векторным управлением. Varispeed F7. Руководство по эксплуатации и описание параметров [Электронный ресурс] // Техническая документация фирмы Yaskawa. – URL: www.proavtomatika.ru. – (дата обращения: 17.03.2014 г.)
41. FR-D700. Преобразователь частоты. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс] // Техническая документация фирмы Mitsubishi. – URL: chastotnik.info.ru. (дата обращения: 17.03.2014 г.)
42. Виноградов А.Б., Чистосердов В.Л., Сибирцев А.Н. Адаптивная система векторного управления асинхронным электроприводом // Электротехника. – 2003. – № 7. – С. 7–17.
43. Виноградов А.Б., Сибирцев А.Н., Матисон В.А., Степанов В.Б. Новое поколение преобразователей частоты серии ЭПВ // Силовая электроника. – 2006. – № 2. – С. 64–66.
44. Ковалев Ю.З., Ковалев А.Ю., Солодянкин А.С., Ряхина Е.Ю. Условия физической реализуемости математических моделей асинхронных двигателей // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2009. – № 4. – С. 10.
45. Солодянкин А.С. Моделирование электротехнических комплексов установок электроцентробежных насосов: дис. ... канд. техн. наук. – Омск, 2010. – 175 с.
46. Глазырин А.С. Способы и алгоритмы эффективной оценки переменных состояния и параметров асинхронных двигателей регулируемых электроприводов: дис. д-ра. техн. наук. – Омск, 2017. – 343 с.

47. Старостин С.Г. Разработка методики расчета переходных процессов установок электроцентробежных насосов с погружными асинхронными электрическими двигателями: дис. канд. техн. наук. – Омск, 2012. – 155 с.
48. Савченко А.А. Разработка моделей и методов расчета переходных процессов установок электроцентробежных насосов: дис. канд. техн. наук. – Омск, 2013. – 139 с.
49. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока. – СПб.: Изд-во Питер, 2010. – 543 с.
50. ГОСТ 7217-87. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний; введен 01. 01. 1988. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 52 с.
51. Рогозин Г.Г. Определение электромагнитных параметров машин переменного тока. – Киев: Техніка, 1992. – 168 с.
52. IEEE standart test procedure for polyphase induction motors and generators: IEEE Std. 112 – 1996. – New York: IEEE Power Engineering Society, 1997. – 64 p.
53. Ковалев Ю.З., Ковалев А.Ю., Солодянкин А.С., Ряхина Е.Ю. Условие согласования каталожных данных из условий физической реализуемости // Омский научный вестник. Серия Приборы, машины и технологии. – 2009. – № 2(80). – С. 162–164.
54. Мощинский Ю.А., Беспалов В.Я., Кирякин А.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным // Электричество. – 1998. – № 4. – С. 38–42.
55. Гридин В.М. Расчет параметров схемы замещения асинхронных двигателей по каталожным данным // Электричество. – 2012. – № 5. – С. 40–44.
56. Lee K., Frank S., Sen P. K., Gentile Polese L., Alahmad M., Waters C. Estimate of induction motor equivalent circuit parameters from nameplate data // Proceeding 2012 North American Power Symposion (NAPS), 9–11 Sept. 2012. – Urbana, Illinois, 2012. – P. 1–6. – Doi: 10.1109/NAPS.2012. 6336384.

57. ТУ 3631-025-21945400-97. Двигатели асинхронные погружные унифицированные серии ПЭД модернизации. М. – Альметьевск; ОАО «Алнас», 1998 г.
58. Сидельников Б.В., Кади-Оглы Е.Ф. Определение параметров и характеристик погружных асинхронных двигателей с комбинированным ротором // Proceedings of 4-th International Scientific Conference on UEES, St-Petersburg, Russia, June 21–24, 1999. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej Szczecin, – P. 473–478.
59. Сивокобыленко В.Ф., Павлюков В.А., Хенниуи Х. Метод расчета схем замещения и пусковых характеристик глубоководных асинхронных двигателей // Электротехника. – 1998. – № 3. – С. 38–41.
60. Родькин Д.И., Калинов А.П., Ромашихин Ю.В. Эффективность метода энергодиагностики параметров двигателей переменного тока // Электроприводы переменного тока: труды Международной 14 НТК. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ. – 2007. – С. 273–278.
61. Каширских В.Г., Завьялов В.М., Соколов Д.В. Идентификация параметров асинхронного электродвигателя с помощью расширенного фильтра Калмана // Вестн. КузГТУ. – 2002. – № 2. – С. 18–20.
62. Zein I., Loren L., Forgez C. An extended Kalman filter and in appropriate Model for the real-time estimation of the induction motor variables and parameters [Electronic resource]. – URL: http://www.utc.fr/lec/publications/articles/IASTED_MECO2001
63. Каширских В.Г. Динамическая идентификация параметров и управление состоянием электродвигателей приводов горных машин: дис. ... д-ра. техн. наук. – Кемерово, 2005. – 356 с.
64. Holtz J. Sensorless Control of Induction Motor Drives // Proceedings of the IEEE. – 2002. – Vol. 90, № 8. – Pp. 1359–1394.
65. Ткачук Р.И., Глазырин А.С., Полищук В.И. Идентификация параметров асинхронных двигателей с применением генетического алгоритма // Омский научный вестник. – 2012. – № 3(113). – С. 245–248.
66. Megherbi A.C., Megherbi H., Benmahamed K., Aissaoui A.G., Tahour A. Parameter identification of induction motors using variable – weight cost function of

genetic algorithms // Journal of Electrical Engineering (11 CHLIE), Saragossa University (Spain), 1–4 July, 2009. – Saragossa, 2009. – P. 137–143.

67. Непрерывные генетические алгоритмы – математический аппарат [Электронный ресурс]. – URL: [http //www. basegroup.ru /library/ optimization/ real_coded_ga.2.4](http://www.basegroup.ru/library/optimization/real_coded_ga.2.4)

68. Kim, S. H., Park, T. S., Yoo, J. N., & Park, G. T. (2001). Speed-sensorless vector control of an induction motor using neural network speed estimation // IEEE Transactions on Industrial Electronics, 48(3). – 609–614. – DOI: 10.1109/41.925588.

69. Zhao J., Bose B. K. Evaluation of membership functions for fuzzy logic controlled induction motor drive // 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society, IECON 02, 5–8 November 2002. – Sevilla, Spain, 2002. – Vol. 1. – P. 229–234. – DOI: 10.1109/IECON.2002.1187512.

70. Аникин В.В., Ковалев А.Ю., Кузнецов Е.М. Выбор метода идентификации параметров двигателей установок электроцентробежных насосов для добычи нефти // Теория и практика науки третьего тысячелетия: сборник статей Международной научно-практической конференции. – Уфа: РИЦ БашГУ, 2014. – С. 149–152.

71. Аникин В.В., Ковалев А.Ю., Кузнецов Е.М. Эффективность методов идентификации электромагнитных параметров погружных электродвигателей установок электроцентробежных насосов // Динамика систем механизмов и машин. – 2014. – № 1. – С. 288–292.

72. Данилевич Я.Б., Домбровский В.С., Казовский Е.Я. Параметры электрических машин переменного тока – М.; Л: Наука, 1965. – 340 с.

73. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: учебник для вузов. В 2-х томах. Т. 1. – 3-е изд. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 652с.

74. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высшая школа, 1994. – 318 с.

75. Сивокобыленко В.Ф., Костенко В.И. Определение параметров и характеристик машин переменного тока из опытов пуска и выбега // Изв. Вуз. СССР Энергетика. – 1978. – № 3. – С. 44–48.

76. Гучапшев Х.М. Идентификация параметров моделей асинхронных двигателей для систем электроснабжения по частотным характеристикам: дис. ... канд. техн. наук. – Краснодар, 1998. – 158 с.
77. Казовский Е.Я., Лернер Л.Г., Сидельников А.В. Синтез схем замещения машин переменного тока по переходным процессам и частотным характеристикам // Электротехника. – 1979. – № 5. – С. 6–13.
78. Induction motor parameter identification in elevator drive modernization [Electronic resource]. – URL: <http://www.lib.tkk.fi>. > Dipl / 2009/ urn 012920.
79. Аникин В.В., Кузнецов Е.М. Экспериментальный стенд исследования пакетов роторов погружных асинхронных электродвигателей // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность: материалы III Всероссийской молодежной науч.-техн. конф. Кн. 2. – Омск: ОмГТУ, 2010. – С. 38–42.
80. Evandro B. Couto, Manoel de Aguiar "Parameter Identification of Induction Motors Using DC Step Excitation at Standstill", IEEE, 1998.
81. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
82. Ковач К.П., И. Рац. Переходные процессы в машинах переменного тока. – М.; Л: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.
83. Blaschke F. The principle of field orientation as applied to the new TRANSVECTOR closed-loop control system for rotating field machines. – Siemens Rev., 1972. – 217 p.
84. Беспалов В.Я., Мощинский Ю.А., Петров А.П. Математическая модель асинхронного двигателя в обобщенной ортогональной системе координат // Электричество. – № 8. – 2002. – С. 33–39.
85. Усольцев А.А. Векторное управление асинхронными двигателями: учебное пособие по дисциплинам электромеханического цикла. – Спб., 2002. – 323 с.
86. Buja G., Kazmierkowski M. P. Direct Torque Control of PWM Inverter-Fed AC Motors – A Survey: III Summer Seminar on Nordick Network for Multi Disciplinary Electric Devices (21–23 June, 2003). – Zegrze. – Poland, 2003. – Pp. 1–19.

87. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: учебник для вузов в 3-х Т. Т. 2. – 4-е изд. – Спб.: Питер, 2003. – 576 с.
88. Аникин В.В., Кузнецов Е.М. Вычислительные аспекты определения параметров погружных электродвигателей установок электроцентробежных насосов // Динамика систем, механизмов и машин. – 2016. – Т. 3, № 1. – С. 100–104.
89. Anikin V.V., Kuznetsov Ye. M. Determining computational aspects of submersible electric centrifugal pump installations electric motors parameters // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). – 2016. – Pp.15–17.
90. Носач В.В. Решение задач аппроксимации с помощью персональных компьютеров. – М.: МИКАП, 1994. – 382 с.
91. Макаров Е.Г. Инженерные расчеты в MathCAD: учебный курс. – СПб.: Питер, 2005. – 448 с.
92. Кетков Ю.Л., Кетков А.Ю. Шульц М.М. MATLAB 7 программирование, численные методы. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 737 с.
93. Ledvij M. Curve Fitting Made Easy / American Institute of Physics, The Industrial Physicist. – April / May. – 2003. – P. 24–27.
94. Capolino G. A., Boussak M. Induction machine parameter identification: Comparison of different algorithms. Proc. Int. Conf. on Electrical Machinery. 1990. – Pp. 940–945.
95. Аникин В. В., Ковалев А. Ю., Кузнецов Е. М. Экспериментальный стенд диагностики пакетов роторов погружных асинхронных электродвигателей // Актуальные проблемы и перспективы инновационного развития современной России: материалы Междунар. науч.-техн. конф (15–17 мая 2014 г.). – Нижневартовск: НВГУ, 2014. – С. 98–100.
96. Аникин В.В., Ковалев А.Ю., Кузнецов Е.М. Переносная установка для диагностики погружных асинхронных электродвигателей // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы V Международной науч.-практ. конф. – Саратов: ФГБОУ ВПО Саратовский государственный аграрный университет им. Н. И. Вавилова, 2014. – С. 157–162.

97. Электродвигатели погружные асинхронные теплостойкие. ТУ3381-026-21945400-97.
98. Копылов И.П. Электрические машины: учеб. для вузов. – М.: Высшая школа; Логос, 2000. – 607 с.
99. Счастливый Г.Г., Семак В.Г., Федоренко Г.М. Погружные асинхронные электродвигатели. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 169 с.
100. Патент на изобретение. Способ определения индуктивности рассеяния фазы обмотки статора асинхронного электродвигателя и устройство для его реализации. Свидетельство регистрации № 2422839 С1. Регистрационный № 2009139123. Приоритет регистрации 22.10. 2009 г. Ковалев Ю.З., Ковалев А.Ю., Кузнецов Е.М.
101. Аникин В.В., Е.М. Кузнецов, Осинкин С.А. Оценка достоверности и адекватности программного обеспечения для расчета параметров схемы замещения асинхронного погружного электродвигателя // Информационные технологии в науке и производстве: материалы III Всерос. молодеж. науч.-техн. конф. (8–9 февр. 2016 г.) – Омск: ОмГТУ, 2016. – С. 154–160.
102. Кузнецов Е.М., Аникин В.В. Определение электромагнитных параметров погружных электродвигателей установок электроцентробежных насосов // Динамика систем, механизмов и машин. – 2016. – Т. 3, № 1. № 2. – С. 95–99.
103. Kovalev A.Yu., Kuznetsov E.M., Aninkin V.V. Diagnostic unit for electrical submersible motors and their rotor packs // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). – 2014. – Pp. 11–13.
104. Пат. 2 623 834 РФ, МПК G01R 27/26. Способ определения электромагнитных параметров асинхронных электродвигателей / Е.М. Кузнецов, А.Ю. Ковалев, В.В. Аникин (РФ). – № 2016104186; заявл. 09.02.16; опубл. 29.06.17, Бюл. № 19. – 12 с.
105. Кузнецов Е.М., Аникин В.В. Методическая погрешность идентификации эквивалентных параметров асинхронных электродвигателей, определенных методом затухания фазного тока статора // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность: матер. V Всероссийской молодеж. науч.-техн. конф. с междунар. участием. Кн. 2. – Омск, 2013. – С. 275–279.

106. Кузнецов Е.М., Аникин В.В. Оценка погрешности измерения параметров схем замещения асинхронного двигателя по переходной характеристике затухания фазного тока // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность: матер. III Всероссийской молодежной. науч.-техн. конф. Кн. 2. – Омск: ОмГТУ, 2010. – С. 83–88.
107. ЛА-20USB Многофункциональная плата аналогово-цифрового преобразования для IBM PC/AT совместимых компьютеров на шину USB. Руководство пользователя ВКФУ. 411619.042РП, 2004 г.
108. Датчики тока и напряжения [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.lem.com/ru>.
109. ЛА-2USB-14. Внешнее устройство сбора аналоговой и цифровой информации с USB портом [Электронный ресурс]. – URL: https://www.rudshel.ru/daq_board.html.
110. Аникин В.В., Кузнецов Е.М., Ковалев А.Ю. Схемотехническое исследование переходной характеристики затухания тока статора погружного асинхронного электродвигателя // Теория и практика науки третьего тысячелетия: сборник статей. – Уфа: РИЦБашгу, 2014. – С. 149–152.
111. Аникин В.В., Кузнецов Е.М., Ковалев А.Ю. Установка для определения параметров схем замещения асинхронных электродвигателей // Приборы и техника эксперимента. – 2010. – № 3. – С. 162.
112. АТТЕСТАТ № 0573. Мобильная установка регистрации переходных характеристик в электротехнических объектах РПХ-20. Регистрационный № 0573. Дата выдачи «09» октября 2014 г / РОССТАНДАРТ Федеральное бюджетное учреждение «Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в Омской области».
113. Аникин В.В., Кузнецов Е.М., Ковалев А.Ю. Установка диагностики погружных электродвигателей и их пакетов ротора // Динамика систем механизмов и машин. – Омск: ОмГТУ, 2014. – № 1. – С. 279–282.
114. Aninkin V.V., Kovalev A.Yu., Kuznetsov E.M. Diagnostic unit for electrical submersible motors and their rotor packs // 2014 Dynamics of Systems, Mechanisms and

Machines (Dynamics). – 11-13 Nov. – 2014. – DOI: 10.1109 / Dynamics. 2014. 7005670.

115. IRL2505 Datasheet (PDF) – International Rectifier [Electronic resource]. – URL: <https://www.irf.com/irl2505.pdf>.

116. Герман-Галкин С.Г., Лебедев В.Д., Марков Б.А., Чичерин Н.И. Цифровые электроприводы с транзисторными преобразователями. Л.: Энергоатомиздат. – 1986. – 248 с.

117. Бронский Е.А. Определение частотных характеристик гидрогенератора СВ – 1500/200 – 88. // Сб. Теория, расчет и исследование высокоиспользованных электрических машин, Наука. – 1965. – С 85–94.

118. Станция управления Электон-05 ПЧ-ТТПТ-380-50-1 УХЛ1: руководство по эксплуатации. ЦТКД 065 РЭ. Версия 9.16. – Радужный, Владимирской обл.: ЗАО Электон, 2007. – 73 с.

119. Анвельт М.Ю., Герасимов В.Г., Данильченко В.П. и др. Сборник задач по электротехнике и основам электроники: учеб. пособие для вузов / под ред. В.С. Пантюшина – М.: Высш. школа, 1979. – 253 с.

120. Качин С.И., Чернышев А.Ю., Качин О.С. Автоматизированный электропривод: учебно-методическое пособие ; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 162 с.

121. Ковалев В.З., Хамитов Р.Н., Кузнецов Е.М., Аникин В.В., Бессонов В.О. Определение эксплуатационных параметров погружных асинхронных электродвигателей по идентификационным параметрам Т-образной схемы замещения // Омский научный вестник. – 2018. – № 6. – С. 36–40.

122. Аникин В.В., Кузнецов Е.М. Послеремонтное определение эквивалентных параметров асинхронного электродвигателя без применения нагрузочного устройства – электродвигатель с короткозамкнутым ротором // Омский научный вестник. – 2017. – № 6. – С. 76–79.

123. Аникин В.В., Кузнецов Е.М., Дегтярев А.В., Старостин С.Г. Экспериментальное исследование переходных процессов в системе станция

управления – электродвигатель с короткозамкнутым ротором // Омский научный вестник. – 2012. – № 3. – С. 213–216.

124. Аникин В.В., Кузнецов Е.М., Старостин С.Г. Системное моделирование станций управления в составе установок электроцентробежных насосов // Промышленная энергетика. – 2012. – №1. – С. 12–16.

125. Аникин В.В., Кузнецов Е.М., Дегтярев А.В., Старостин С.Г. Исследование потерь электроэнергии, вызванных наличием высших гармоник в напряжениях и токах силового канала преобразования энергии установок электроцентробежных насосов // Промышленная энергетика. – 2012. – № 1. – С. 54–58.

126. 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 августа 2018 г.

127. Аникин В.В., Кузнецов Е.М., Ковалев А.Ю. Моделирование синусных фильтров // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность. Материалы IV Всероссийской молодежной науч.- техн. конф. Кн. 2. – Омск: ОмГТУ, 2011. – С. 83–85.

128. Аникин В.В., Кузнецов Е.М., Старостин С.Г. Моделирование силового канала станций управления в составе установок электроцентробежных насосов // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность: материалы IV Всероссийской молодежной науч.- техн. конф. Кн. 2. – Омск: ОмГТУ, 2011. – С. 95–99.

129. Аникин В.В., Кузнецов Е.М., Ковалев А.Ю., Протченко А.В. Измерительная система компьютеризированного стенда ПЭД-ПП // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность: материалы V Всероссийской молодежной науч.- техн. конф. Кн. 2. – Омск: ОмГТУ, 2013. – С. 266–272.

130. Аникин В.В., Кузнецов Е.М. Методическая погрешность идентификации эквивалентных параметров асинхронных электродвигателей, определенных методом затухания фазного тока статора // Россия молодая: передовые

технологии – в промышленность: матер. V Всероссийской молодеж. науч.-техн. конф. с междунар. участием. Кн. 2. – Омск: ОмГТУ, 2013. – С. 275–279.

131. Аникин В.В., Кузнецов Е.М., Ковалев А.Ю. Экспериментальные исследования гармонического состава тока и напряжения на шинах станций управления установками электроцентробежных насосов // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность. Кн. 2. – Омск: ОмГТУ, 2015. – С. 266–272.

132. Аникин В.В., Кузнецов Е.М. Исследование энергетических показателей станций управления установками электроцентробежных насосов // Динамика систем, механизмов и машин. Кн. 2. – Омск, 2012. – С. 143–147.

133. Аникин В.В., Кузнецов Е.М., Ковалев А.Ю. Опции станций управления погружными установками электроцентробежных насосов для добычи нефти: учебное пособие. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2012. – 48 с.

134. Аникин В.В., Ковалев А.Ю., Кузнецов Е.М. Электрооборудование станций управления погружными установками электроцентробежных насосов для добычи нефти: учебное пособие. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. – 84 с.

135. Аникин В.В., Ковалев А.Ю., Кузнецов Е.М. Станции управления электропогружными установками насосной эксплуатации скважин: монография; Минобрнауки России, ОмГТУ, Нижневартовский филиал. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. – 128 с.: ил.

136. Аникин В.В. Оценка погрешности измерения параметров схем замещения асинхронного двигателя по переходной характеристики (ϵ) затухания фазного тока // Ученые Омска – региону: материалы IV Региональной научно-технической конференции – Омск, 2019. – С. 24–27.

137. Аникин В.В., Хамитов Р.Н. Способ определения электромагнитных параметров погружных асинхронных электродвигателей // Омский научный вестник. – № 3. – 2019. – № 3(165). – С. 33–37.

138. Ковалев В.З., Хамитов Р.Н., Кузнецов Е.М., Аникин В.В., Бессонов В.О. Определение эксплуатационных параметров погружных асинхронных

электродвигателей по идентификационным параметрам Т-образной схемы замещения // Омский научный вестник. – 2018. – № 6(162). – С. 36–40.

139. Аникин В.В. Оценка погрешности измерения параметров схем замещения асинхронного двигателя по переходной характеристики (ϵ) затухания фазного тока // Ученые Омска – региону: материалы IV Региональной научно-технической конференции – Омск, 2019. – С. 24–27.

140. Аникин В.В., Хамитов Р.Н. Способ определения электромагнитных параметров погружных асинхронных электродвигателей // Омский научный вестник. – № 3. – 2019. – № 3(165). – С. 33–37.

141. Чернышева Т.А., Аникин В.В., Чернышев И.А., Чернышев А.Ю. Частотно-регулируемый электропривод центробежных насосных установок добычи нефти // Известия ТПУ № 12. – 2019. – Т. 330, № 1. – С. 168–178.

142. Аникин В.В., Хамитов Р.Н. Способ определения электромагнитных параметров погружных асинхронных электродвигателей // Омский научный вестник. – 2019. – № 3(165). – С. 33–37.

143. Чернышева Т.А., Аникин В.В., Чернышев И.А., Чернышев А.Ю. Частотно-регулируемый электропривод центробежных насосных установок добычи нефти // Известия ТПУ №12.– 2019. – Т. 330, № 1. – С. 168–178.

144. Глазырин А.С., Аникин В.В., Буньков Д.С., Антяскин Д.И., Старцева Ю.Н., Ковалев В.З., Хамитов Р.Н., Кладиев С.Н., Филипас А.А. Нелинейное алгебраическое оценивание индуктивности вибрационного электромагнитного активатора по кривой затухания тока // Известия ТПУ №1.– 2020. – Т. 331, № 1. – С. 148–157.

145. Пат. 2 193 834 РФ, МПК G01R 27/02, G01R 27/14. Способ определения индуктивного сопротивления электродвигателей / А. Г. Гарганеев, Ю. А. Шурыгин (РФ). – № 2001117780/09; заявл. 26.06.01; опубл. 20.11.02, Бюл. № 32. – 12 с.

146. Полищук В.И. Развитие теории построения систем диагностики синхронных машин: дис. ... д-ра техн. наук. – Самара, 2016. – 294 с.

147. Chernysheva T.A., Anikin V.V., Chernyshev I.A., Chernyshev A.Yu. Variable speed electric drive of centrifugal pump in oil lifting plants // Bulletin of the Tomsk

Polytechnic University. Geo Assets Engineering. – 2019. – Vol. 330, № 12. – Pp. 168–178.

148. Glazyrin A.S. Нелинейное алгебраическое оценивание индуктивности вибрационного электромагнитного активатора по кривой затухания тока / V.V. Anikin, D.S. Bunkov, D.I. Antyaskin, Yulia N. Startseva, V.Z. Kovalev, R.N. Khamitov, S.N. Kladiev, A.A. Filipas // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. – 2020. – Vol. 331, № 1. – Pp.148–157.

149. Anikin V.V., Kuznetsov Ye. M. Determination of the electromagnetic parameters of submersible electric moors of electric centrifugal pumps installation // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). – 2016. – 17 p.

150. Аникин В.В., Ковалев В.З., Бессонов В.О, Хамитов Р.Н. Исследование асинхронных электродвигателей в составе электротехнического комплекса добычи нефти // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность: материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции (2–3 апреля 2019 года). Кн. 1. – Омск: ОмГТУ, 2019. – С. 24–28.

151. Хамитов Р.Н., Аникин В.В. Методика идентификации параметров схемы замещения погружного электродвигателя с интегральным преобразованием характеристики затухания тока статора // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность: материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции (2–3 апреля 2019 года). Кн. 1. – Омск: ОмГТУ, 2019. – С. 109–113.

152. Аникин В.В. Установка для идентификации параметров схем замещения погружных асинхронных электродвигателей // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность: материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции (2–3 апреля 2019 года). Кн. 1. – Омск: ОмГТУ, 2019. – С. 28–33.

153. Ковалев В.З., Аникин В.В., Бессонов В.О., Хамитов Р.Н. Стенд для диагностики пакетов роторов погружных асинхронных электродвигателей // Актуальные вопросы энергетики. Кн. 1. – Омск: ОмГТУ, 2019. – С. 110–115.

154. Хамитов Р.Н., Аникин В.В. Методика идентификации параметров схемы замещения погружных асинхронных электродвигателей с одноконтурной цепью ротора // Актуальные вопросы энергетики. Кн.1.– Омск: ОмГТУ, 2019. – С. 116–122.
155. Аникин В.В. Методика определения параметров асинхронного двигателя с помощью аппроксимации кривой затухания фазного тока статора // 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.
156. Аникин В.В. Совершенствование методики и средств идентификации параметров схем замещения погружных асинхронных электродвигателей в составе электротехнических комплексов добычи нефти // Новые технологии в газовой промышленности (газ, нефть, энергетика): сборник тезисов XIII Всероссийской конференции молодых ученых, специалистов и студентов (22–25 октября 2019 г.).– Москва: РГГУ, 2019. – С. 624–625.
157. Аникин В.В. Расчет и построение рабочих характеристик погружного асинхронного электродвигателя по параметрам Т-образной схемы замещения // 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. Т. 2 / отв. ред. А. Н. Халин. – Тюмень: ТИУ, 2019. – С. 212–216.
158. Гарганеев, А.Г., Каракулов А.С., Ланграф С.В. Электропривод запорной арматуры: монография; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). – Томск: Изд-во ТПУ. – 157 с.
159. Букреев В.Г., Шандарова Е.Б., Рулевский В.М. Нелинейная модель системы электропитания погружных объектов с учетом изменения длины кабель-троса // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329, № 11. – С. 114–123.
160. Букреев В.Г., Сипайлова Н.Ю., Сипайлов В.А. Стратегия управления электротехническим комплексом механизированной добычи нефти на основе

экономического критерия // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328, № 3. – С. 75–84.

161. 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.

162. Хамитов Р. Н., Аникин В. В., Ковалев В. З., Парамзин А. О. Исследование функционирования электротехнических комплексов установок электроцентробежных насосов при вариациях внешних температурных воздействий // Омский научный вестник. 2020. № 4 (172). С. 19–25.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2623834

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Омский государственный технический университет" (RU)*

Авторы: *Кузнецов Евгений Михайлович (RU), Ковалев Александр Юрьевич (RU), Аникин Василий Владимирович (RU)*

Заявка № 2016104186

Приоритет изобретения 09 февраля 2016 г.

Дата государственной регистрации в

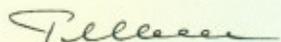
Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 29 июня 2017 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 09 февраля 2036 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



ПРИЛОЖЕНИЕ 2

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2012661265

**Программное обеспечение для расчета параметров схемы
замещения асинхронного погружного электродвигателя**

Правообладатель(и): *Негосударственное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Академический институт прикладной энергетики» (RU)*

Автор(ы): *Ковалев Александр Юрьевич,
Кузнецов Евгений Михайлович,
Аникин Василий Владимирович (RU)*

Заявка № 2012619023

Дата поступления 23 октября 2012г.

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ

11 декабря 2012г.



*Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной
собственности, патентам и товарным знакам*

Б.П. Симонов

ПРИЛОЖЕНИЕ 3



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное научное учреждение
ИНСТИТУТ УПРАВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЕМ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ
ОБРАЗОВАНИЯ

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ФОНД ЭЛЕКТРОННЫХ РЕСУРСОВ "НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ"
(основан в 1991 году)

**СВИДЕТЕЛЬСТВО О РЕГИСТРАЦИИ
ЭЛЕКТРОННОГО РЕСУРСА**

№ 23747

Настоящее свидетельство выдано на электронный ресурс, отвечающий
требованиям новизны и приоритетности:

**Идентификация параметров схемы замещения погружного
асинхронного электродвигателя**

Дата регистрации: 27 августа 2018 года

Авторы: Аникин В.В., Ковалев В.З., Кузнецов Е.М.

Организация-разработчик: ФГБОУ ВО «Омский государственный
технический университет»



Директор ФГБНУ ИУО РАО,
доктор экономических наук  С.С. Неустроев

Руководитель ОФЭРНИО, почетный
работник науки и техники России  А.И. Галкина



ПРИЛОЖЕНИЕ 4

РОССТАНДАРТ
Федеральное бюджетное учреждение
«Государственный региональный центр стандартизации,
метрологии и испытаний в Омской области»
(ФБУ «Омский ЦСМ»)

Адрес: 644116, г. Омск, ул. 24-я Северная, 117а, тел. (3812) 68-07-99, факс 68-04-07
 http://csm.omsk.ru E-mail: info@ocsm.omsk.ru

АТТЕСТАТ № 0573

Дата выдачи « 09 » октября 2014 г.

Удостоверяется, что

МОБИЛЬНАЯ УСТАНОВКА РЕГИСТРАЦИИ ПЕРЕХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ РПХ -20

принадлежащее **НВФ ОмГТУ, ИНН 5502013556**

по результатам первичной (периодической) аттестации, протокол № 1 от 09.10.2014

признано пригодным для использования при испытаниях электротехнических объектов
 методом заужения постоянного тока

по

Периодичность аттестации 36 месяцев

Аттестат выдан ФБУ «Омский ЦСМ»

Заместитель директора по метрологии
 ФБУ «Омский ЦСМ»



А.В.Бессонов

г. Омск,

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Ф5



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

«Ойлпамп Сервис»

Limited Liability Company «Oilpump Service»

Филиал «Ойлпамп Сервис – Мегион»

626680, ул.Кузьмина, д.34, г.Мегион, Ханты-Мансийский автономный округ - Югра, Тюменская обл.,
приёмная - тел. (34663) 46-334 факс (3466) 46-334

11.02.2019г.

г. Мегион

ОПИ РПХ-20

АКТ

Об использовании результатов диссертационной работы Аникина В.В.

На производственной территории ООО «Ойлпамп Сервис» на участке ремонта погружного оборудования УЭЦН провели опытно-промышленные испытания установки диагностики погружных электродвигателей и их пакетов роторов РПХ-20, основанные на результате диссертационной работы Аникина В.В., а именно:

- способ идентификации параметров погружных электродвигателей;
- программные средства для практической идентификации электрических параметров погружных электродвигателей;

Принятые научные и технических разработки позволяют идентифицировать электрические параметры погружных электродвигателей, а именно активные и индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора, а также ветви намагничивания.

Это дает возможность определять и контролировать эксплуатационные параметры электродвигателей и повысить тем самым межремонтный срок эксплуатации электродвигателей, способствуя повышению эксплуатационной надежности центробежных насосных установок для добычи нефти.

Установка регистрации переходных характеристик РПХ-20, методики проверки и диагностики, приняты для опытной эксплуатации и использованию в «Ойлпамп Сервис», используется при испытаниях погружных электродвигателей.

Члены комиссии:

Начальник ОНИА

Балаев В.Ф.

Инженер-технолог ЦПО

Моторин И.В.



ПРИЛОЖЕНИЕ 6

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе ОмГТУ

О.В. Кронотин

« 18 » 03 2019



АКТ

**использования в учебном процессе результатов диссертационной работы
на соискание ученой степени кандидата технических наук
Аникина Василия Владимировича**

Результаты диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук Аникина Василия Владимировича внедрены в практику деятельности Омского государственного технического университета. В частности:

1. Материалы по теме диссертации систематически используются на кафедре «Электрическая техника» Энергетического института Омского государственного технического университета при чтении лекций, при выполнении расчетных работ по дисциплине «Проектирование и конструирование электроэнергетического и электротехнического оборудования и систем» для студентов направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» профиль «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений».

2. Материалы по теме диссертации систематически используются на кафедре «Электрическая техника» Энергетического института Омского государственного технического университета при чтении лекций, при курсовом проектировании по дисциплине «Электротехнические комплексы и системы управления механизмами электроустановок» для студентов направления подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» профиль «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений».

3. Для внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс подготовлены и изданы учебное пособие и монография:

- 1) Электрооборудование станций управления погружными установками электроцентробежных насосов для добычи нефти: учеб. пособие/ А.Ю. Ковалев, Е.М. Кузнецов, В.В. Аникин.– Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013.– 84 с. (Тираж 100 экз.);
- 2) Электротехнологические установки для нефтедобычи: монография/ А.Ю. Ковалев, Е.М. Кузнецов, В.В. Аникин.– Омск: Изд-во ОмГТУ, 2015.– 160 с. (Тираж 500 экз.)

Заведующий кафедрой «Электрическая техника»
д.т.н., профессор

 Бубнов А.В.