

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Энергетический

Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Кафедра Электропривода и электрооборудования

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Динамическая идентификация погружных асинхронных двигателей для скважинной нефтедобычи

УДК 621.313.333:622.276

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГЗА	Быстров Евгений Андреевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Глазырин Александр Савельевич	К.Т.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Грахова Елена Александровна			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Король Ирина Степановна	К.Х.Н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ЭПЭО	Дементьев Юрий Николаевич	Ph.D., К.Т.Н.		

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Энергетический
Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
Кафедра Электропривода и электрооборудования

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой
_____ Дементьев Ю.Н.
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
5ГЗА	Быстрову Евгению Андреевичу

Тема работы:

Динамическая идентификация погружных асинхронных двигателей для скважинной нефтедобычи	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№873/с от 13.02.2017

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объектами исследования являются:</p> <ol style="list-style-type: none">1. Математическая модель погружного асинхронного двигателя;2. Лабораторные установки, включающие в себя асинхронные двигатели. <p>Требования, предъявляемые к процедуре идентификации:</p> <ul style="list-style-type: none">- быстроедействие;- высокая точность;- надежность;- несмещенность и состоятельность оценок;- наименьшие затраты на процедуру идентификации.
---	---

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Составление математического описания погружного асинхронного двигателя. 2. Разработка метода идентификации параметров погружных асинхронных двигателей. 3. Решение трудностей, связанных с цифровым дифференцированием. 4. Решение задачи фильтрации полученных оценок. 5. Проверка работоспособности метода динамической идентификации параметров погружного асинхронного двигателя на математической модели. 6. Проверка работоспособности метода динамической идентификации параметров погружного асинхронного двигателя на лабораторной установке.
<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Графики переходных режимов асинхронного электродвигателя и процессов динамической идентификации</p>

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

Раздел	Консультант
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Доцент кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности Король Ирина Степановна</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Ассистент кафедры менеджмента Грахова Елена Александровна</p>

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	
--	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<p>Доцент</p>	<p>Глазырин Александр Савельевич</p>	<p>к.т.н.</p>		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<p>5Г3А</p>	<p>Быстров Евгений Андреевич</p>		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5ГЗА	Быстрову Евгению Андреевичу

Институт	Энергетический	Кафедра	ЭПЭО
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	Электропривод и автоматика

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Стоимость материальных ресурсов научного исследования составляет 266750 тысяч рублей и определялась по средней стоимости по г. Томску. Оклады определялись в соответствии с окладами сотрудников НИ ТПУ.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	30 % премии, 20 % надбавки, 16% накладные расходы, 13% районный коэффициент.
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Отчисления по страховым взносам – 27,1% от ФОТ.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Анализ конкурентных технических решений. Оценки перспективности проекта по технологии QuaD.
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	Формирование плана и графика разработки: определение структуры работ, определение трудоемкости работ, разработка графика Ганта. Формирование бюджета затрат на научное исследование: материальные затраты, заработная плата (основная и дополнительная), отчисления на социальные цели, накладные расходы.
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	Определение ресурсоэффективности проекта.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Оценочная карта QuaD
2. Матрица SWOT
3. График Ганта
4. График проведения и бюджет НИ
5. Определение ресурсоэффективности проекта

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Грахова Елена Александровна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГЗА	Быстров Евгений Андреевич		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5ГЗА	Быстрову Евгению Андреевичу

Институт	Энергетический	Кафедра	ЭПЭО
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	Электропривод и автоматика

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения.	Объектом исследования является погружной асинхронный двигатель с помощью методики динамической идентификации параметров. Рабочей зоной является скважина месторождения. Область применения – погружные асинхронные двигатели для скважинной нефтедобычи.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Производственная безопасность 1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения.	Выявленные вредные факторы производственной среды: – повышенное содержание паров нефти и газа в воздухе (превышение ПДК H_2S – 0,1 мг/м ³ ГОСТ 12.1.005-88); – отсутствие естественного света в ночное время (СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03); – повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны (превышение допустимой величины показателей микроклимата в теплый период года 21°C, в холодный период года -19°C СанПиН 2.2.2.540-96, МР 2.2.7.2129-06); – повышенная или пониженная влажность воздуха (несоответствие допустимым величинам показателя относительной влажности воздуха 15-75% СанПиН 2.2.4.548-96, МР 2.2.7.2129-06); – повышенный уровень шума на рабочем месте (эквивалентный уровень звука превышает допустимые 85 дБА СН 2.2.4/2.1.8.562-96). Средства защиты для обеспечения безопасности (ГОСТ 12.4.011-89): – для органов дыхания (противогазы, респираторы, пневмошлемы, пневмомаски, пневмокуртки);

	<ul style="list-style-type: none"> – для органа слуха (противошумные шлемы, противошумные вкладыши, противошумные наушники); – для защиты от холода (рукавицы, обувь, головные уборы).
<p>1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения.</p>	<p>Выявленные опасные факторы производственной среды:</p> <ul style="list-style-type: none"> – расположение рабочего места на значительной высоте (3-5 м) относительно поверхности земли (Приказ Минтруда России №155н от 28.03.2014); – повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека (рабочее напряжение 2500 В ГОСТ Р 12.1.019-2009); – подвижные части производственного оборудования (ГОСТ 12.4.011-89). <p>Средства защиты для обеспечения безопасности (ГОСТ 12.4.011-89):</p> <ul style="list-style-type: none"> – устройства, препятствующие появлению человека в опасной зоне (ограждения, защитные сетки, знаки безопасности); – для защиты от поражения электрическим током (оградительные устройства, устройства защитного заземления и зануления, предохранительные устройства, знаки безопасности).
<p>2. Экологическая безопасность.</p>	<p>При добыче нефти происходит загрязнение атмосферы, поверхностных водотоков, подземных вод, недр и почвы. Месторождение находится вне селитебной зоны вследствие чего отсутствует влияние на жилую зону. Защита окружающей среды возлагается на производство при дальнейшем внедрении и применении данной методики.</p>
<p>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях.</p>	<p>Наиболее вероятной ЧС являются пожар или взрыв на рабочем месте вследствие:</p> <ul style="list-style-type: none"> – нарушения технологического процесса и неисправности оборудования; – неосторожного обращения с огнем и бытовыми электроприборами; – короткого замыкания электрических проводов и перегрева электрооборудования; – нарушения правил пожарной безопасности при производстве электрогазосварочных и других огневых работ. <p>Обоснованы мероприятия по предотвращению ЧС и разработан порядок действий в случае возникновения ЧС (ППБ)</p>

	01-93* «Правила пожарной безопасности в Российской Федерации»).
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.	<p>Специальные правовые нормы трудового законодательства (приведен перечень ГОСТов и СНИПов и другие).</p> <p>Закон РФ от 19.02.1993 N 4520-1 (ред. от 31.12.2014) "О государственных гарантиях и компенсациях для лиц, работающих и проживающих в районах Крайнего Севера и приравненных к ним местностях".</p> <p>ТК РФ, Глава 50. Особенности регулирования труда лиц, работающих в районах крайнего севера и приравненных к ним местностях.</p>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Король Ирина Степановна	к.х.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГЗА	Быстров Евгений Андреевич		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 139 с., 34 рис., 23 табл., 50 источников.

Ключевые слова: динамическая идентификация, погружной асинхронный двигатель, скважинная нефтедобыча, прогнозирующий фильтр низких частот, установка с электроцентробежным насосом, цифровое дифференцирование.

Объектом исследования являются математическая модель погружного асинхронного двигателя и лабораторные установки, включающие в себя асинхронные двигатели.

Цель работы – составление и апробирование метода динамической идентификации погружных асинхронных двигателей для скважинной нефтедобычи по мгновенным значениям статорных токов и напряжений.

В процессе исследования проводились работы, связанные с математическим описанием процессов, происходящих в погружных асинхронных двигателях, разработкой метода динамической идентификации параметров погружных асинхронных двигателей и его проверкой на математической модели и лабораторной установке.

В результате исследования были разработаны методы динамической идентификации погружных асинхронных двигателей с проверкой на математических моделях и лабораторных установках. Были получены оценки параметров двигателей, отвечающие требованиям, предъявляемые к процедуре идентификации и оценкам.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: быстродействие, высокая точность, надежность процедуры идентификации, несмещенность и состоятельность оценок, наименьшие затраты на процедуру идентификации.

Степень внедрения: разработка и лабораторное апробирование метода динамической идентификации погружных асинхронных двигателей для скважинной нефтедобычи.

Область применения: погружные асинхронные двигатели для скважинной нефтедобычи.

Экономическая эффективность/значимость работы заключается в улучшении адаптивных систем управления асинхронными электроприводами, за счет подстройки системы управления на основании получаемых оценок параметров погружного асинхронного двигателя в реальном времени.

В будущем планируется улучшение разработанного метода динамической идентификации погружных асинхронных двигателей для скважинной нефтедобычи.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений.....	12
Введение.....	13
1. ЭЛЕКТРОПОГРУЖНЫЕ УСТАНОВКИ НАСОСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СКВАЖИН.....	16
1.1. Состояние и перспективы электроприводного способа добычи нефти в России.....	16
1.2. Обзор и анализ факторов, приводящих к усложненной эксплуатации.....	18
1.3. Проблема построения блок-схемы специализированного электропривода для УЭЦН и варианты ее решения.....	20
1.3.1. Проблема заклинивания или подклинивания насоса.....	20
1.3.2. Блок-схема специализированного электропривода для УЭЦН.....	25
1.4. Погружные электродвигатели.....	29
1.5. Проблема идентификации параметров погружного асинхронного двигателя.....	32
1.6. Математическая модель погружного асинхронного двигателя.....	35
1.7. Разностные уравнения.....	56
1.8. Выводы по главе.....	57
2. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОГРУЖНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ.....	59
2.1. Разработка метода идентификации параметров погружных асинхронных двигателей.....	59
2.2. Решение трудностей, связанных с цифровым дифференцированием.....	62
2.3. Решение задачи фильтрации полученных оценок.....	69
2.4. Проверка работоспособности метода динамической идентификации параметров погружного асинхронного двигателя с помощью математической модели.....	71
2.5. Выводы по главе.....	75

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ МЕТОДА ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ.....	77
3.1. Описание экспериментальной установки и методики эксперимента.....	77
3.2. Обработка экспериментальных данных.....	92
3.3. Выводы по главе.....	94
4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	96
4.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	96
4.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования.....	96
4.1.2. Технология QuaD.....	98
4.1.3. SWOT-анализ.....	100
4.2. Определение возможных альтернатив проведения научных исследований.....	103
4.3. Планирование научно-исследовательских работ.....	104
4.3.1. Структура работ в рамках научного исследования.....	104
4.3.2. Определение трудоемкости выполнения работ.....	105
4.3.3. Разработка графика проведения научного исследования.....	106
4.4. Бюджет научно-технического исследования (НТИ).....	110
4.4.1. Основная заработная плата исполнителей темы.....	110
4.4.2. Дополнительная заработная плата исполнителей темы.....	114
4.4.3. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)....	114
4.4.4. Накладные расходы.....	115
4.4.5. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта.....	116

4.5. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	116
5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	119
5.1. Производственная безопасность.....	119
5.1.1. Анализ вредных и опасных производственных факторов.....	119
5.1.2. Обоснование мероприятий по защите персонала предприятия от действия опасных и вредных факторов.....	122
5.2. Экологическая безопасность.....	127
5.3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	128
5.3.1. Анализ вероятных ЧС.....	128
5.3.2. Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС.....	130
Заключение.....	134
Список использованных источников.....	135

Список сокращений

АД – асинхронный двигатель;

КПД – коэффициент полезного действия;

ПЧ – преобразователь частоты;

ПЭД – погружной электродвигатель;

СУ – система управления;

УЭЦН – установка с электроцентробежным насосом;

ЦН – центробежный насос;

ЧРП – частотно-регулируемый привод;

ЭД – электродвигатель;

ЭЦН – электроцентробежный насос.

Введение

В наши дни нефтепроизводство трудно представить без электропривода, в котором применяются различные двигатели в зависимости от структуры и назначения. Надежность и эффективность электроприводов машин нефтедобывающего предприятия является определяющим фактором качества работы самого предприятия в целом. В качестве таких машин применяются:

1. Частотно-регулируемые асинхронные привода (ЧРП), которые применяются в насосных установках и использующие для управления преобразователи частоты. Существуют два основных метода частотного управления – скалярный и векторный, которые позволяют решать различные задачи при регулировке скорости и изменения момента. Оба метода управления в значительной степени зависят от правильной оценки параметров асинхронного двигателя и особенно чувствительны к их изменению.

2. Разновидность ЧРП – это адаптивные системы управления электроприводами, которые являются современными высокоэффективными системами, обеспечивающими контроль состояния, функционального диагностирования, а также защиты приводов и технического процесса в целом.

Известным фактом является то, что оба метода управления в значительной степени зависят от правильной оценки параметров асинхронного двигателя и особенно чувствительны к их изменению. Стоит отметить, что текущие значения параметров электродвигателей, например, как активное сопротивление и индуктивность статорной обмотки, взаимные индуктивности обмоток статора и ротора, активное сопротивление и индуктивность роторной обмотки существенно влияют на эффективность работы систем управления электроприводов. Впрочем, во время процесса наладки электроприводов измерениям подвергаются лишь активное сопротивление статорной обмотки, другие же параметры получают из каталожных данных, являющихся расчетными вследствие чего они могут достаточно сильно отличаться от реальных значений.

Вместе с тем, значения параметров асинхронных электродвигателей зависят как от теплового состояния, так и от режима работы. К примеру, в

режиме прямого пуска индуктивность варьируется на 30-40%, а активное сопротивление ротора может измениться более чем в полтора раза. Стоит заметить, что в зависимости от теплового состояния активное сопротивление статорной обмотки подвергается изменения, которые достигают 20-30% в течении рабочего цикла двигателя. Данное явление преимущественно присуще повторно-кратковременному режиму работы.

Таким образом, существует необходимость определения текущих значений параметров электродвигателей непосредственно в процессе работы электропривода. Все же большая часть переменных состояния электродвигателей и электромагнитных параметров является недоступной прямому измерению. Измерение потокосцепления статора и ротора, индуктивности и активного сопротивления роторной обмотки не представляется возможным или является нетривиальной задачей, однако в течении работы асинхронного двигателя параметры статора становятся недоступными для прямого измерения.

При проведении динамической идентификации переменных состояния и параметров электродвигателя является возможным решение таких задач. В общем случае под динамической идентификацией модели понимают определение ее параметров и структуры с помощью анализа входных и выходных данных модели, а компьютерная обработка информации – основа для такой модели. Необходимая информация содержится в токах и напряжениях электродвигателя, которая становится доступна с применением метода идентификации.

Существует значительное количество методов идентификации, однако проведение идентификации при помощи пассивных методов, которые основаны на фиксации реальных сигналов в работающем объекте с последующей обработкой данных сигналов является наиболее предпочтительным. Данным требованиям соответствует идентификация, которая основана на методах оценивания: метод наименьших квадратов, метод максимального правдоподобия, байесовские оценки, марковские оценки и фильтры Калмана.

Стоит отметить, что применение дорогих и неудобных в эксплуатации датчиков является отдельной проблемой, например, в электроприводе такими датчиками являются датчики крутящего момента, потокосцепления, ускорения, температуры и другие. Следовательно, внимание исследователей в последнее время приковано к области методов построения бездатчиковых систем управления электропривода. Отдельное внимание уделяется методам динамической идентификации, которые используют сигналы с датчиков тока и напряжения, а в некоторых случаях с датчиков скорости, более того работоспособным во всех необходимых эксплуатационных режимах: пуск, сброс-наброс нагрузки, реверс и торможение.

Однако частым явлением в системах, которые работают в реальных промышленных условиях является невозможность полного избавления от импульсных и стационарных шумов в измерительной системе, а вследствие этого методы динамической идентификации параметров объектов управления должны обладать робастностью к этим возмущениям.

Другой проблемой является дискретизация сигналов измерительной системы по времени и квантование по уровню при использовании микропроцессорных систем управления. Следует отметить, что причиной наиболее эффективной реализации процесса идентификации параметров объекта управления является описание его динамики при помощи систем разностных уравнений, тривиально получаемые из имеющихся систем дифференциальных уравнений.

Все вышеизложенное представлено в виде разработки и проверки метода динамической идентификации погружного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором для скважинной нефтедобычи, обеспечивающего нахождение оценок параметров с допустимой погрешностью и обладающего очень высоким быстродействием.

1. ЭЛЕКТРОПОГРУЖНЫЕ УСТАНОВКИ НАСОСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СКВАЖИН

1.1. Состояние и перспективы электроприводного способа добычи нефти в России

Согласно прогнозу научно-технологического развития отраслей топливно-энергетического комплекса Российской Федерации, на этап до 2035 года, нефтедобыча по-прежнему остается одной из приоритетных отраслей народной хозяйства Российской Федерации [1]. На сегодняшний день отрасль нефтедобычи играет ключевую роль в экономике России, вследствие чего повышение эффективности добычи нефти (оптимизация затрат, направленных с целью поддержания функциональности нефтедобывающего комплекса) становится актуальной задачей [2, 3].

Нефтедобыча отличается высокой энергоемкостью, в частности расходы, которые приходятся на долю электроэнергии составляют 30-50% от общей суммы затрат. Однако по мнению некоторых экспертов, в странах запада затраты на электроэнергию составляют лишь 10% издержек на добываемое сырье [6]. Следовательно, доля затрат на электроэнергию при нефтедобыче в условиях постоянного роста тарифов на электроэнергию будет только увеличиваться.

На повышение издержек также влияют следующие факторы, такие как качество запасов на разрабатываемых и открываемых месторождениях, изменение состояния сырьевой базы, условия нефтедобычи (высокий газовый фактор, повышенная обводненность, вязкость откачиваемой продукции и давление насыщения) [4]. Большинство месторождений с активными запасами находятся на заключительном этапе разработки, в связи с чем доля трудноизвлекаемых запасов повышается (60-70% в отечественной базе), однако вновь открытые месторождения характеризуются низкими показателями нефтенасыщенности и проницаемости пород коллекторов.

Исходя из обозначенных проблем возрастает ценность исследований связанных с решением задач оптимизации технологии добычи, особенно в осложненных условиях. Важность проблемы подтверждается серией целевых программ, например: Федеральная программа «Энергоэффективная экономика»

(Постановление Правительства Российской Федерации от 17.10.2001 №796), с отдельным разделом «Нефтедобывающий комплекс».

Оптимизация работы предприятий нефтедобычи выполняется с помощью организационно-управленческих и технических мероприятий. Как следствие усовершенствование электротехнических комплексов (ЭТК) применяемых в технологической системе нефтедобычи занимают важное место.

Целью мероприятий по усовершенствованию ЭТК являются: снижение затрат на электроэнергию за счет повышения энергетических показателей комплексов; модернизация оборудования; оптимизация функциональных характеристик и режимов работы ЭТК, обеспечивающих повышение добываемых возможностей скважины, надежности и долговечности. Вместе с тем в первую очередь усовершенствованию подлежат ЭТК, которые потребляют наибольшее количество электроэнергии. В основном это установки механизированной добычи нефти.

В связи с вышеперечисленными факторами установки с электроцентробежными насосами (УЭЦН) являются одним из основных способов механизированной добычи нефти. В Российской Федерации доля нефтяных скважин, которые оборудованы УЭЦН, достигает 35%. Этими скважинами обеспечивается основной объем добычи нефти и жидкости (более 65%) [5]. В Западной Сибири с применением УЭЦН осуществляется добыча до 90% нефти, а количество скважин, оборудованных УЭЦН, превышает 20000 штук [4].

Изменение удельного вклада УЭЦН в сравнении приведено в таблице 1.1.

Таблица 1.1. Изменение удельного вклада УЭЦН в сравнении

Способ эксплуатации	Год											
	1988				1994				2001			
	Фонд скважин		Добыча нефти		Фонд скважин		Добыча нефти		Фонд скважин		Добыча нефти	
	Шт	%	Тыс. т	%	Шт	%	Тыс. т	%	Шт	%	Тыс. т	%
УЭЦН	45102	29,7	342809	56,5	47014	33,2	188908	59,4	51174	33,2	205374	65,4

В связи с этим можно сделать вывод о том, что количество нефтяных скважин, оборудованных УЭЦН, будет увеличиваться.

Приведены факты доказывающие, что при имеющихся в реальности России осложненных условий эксплуатации нефтедобывающих установок электроприводный способ добычи является наиболее перспективным.

1.2. Обзор и анализ факторов, приводящих к усложненной эксплуатации

В нефтедобывающей отрасли Российской Федерации вследствие неблагоприятной геолого-технологической структуры, доля традиционных (технологически освоенных) запасов нефти составляет лишь 35%, остальные запасы приходятся на долю трудноизвлекаемых запасов нефти (остаточные запасы, низкопроницаемые пласты, глубокопогружённые горизонты, высоковязкие нефти, подгазовые зоны) [4].

Приоритетным направлением освоения трудноизвлекаемых запасов нефти является освоение ресурсов остаточных нефтей и низкопроницаемых пластов. Следствием повышения эффективности освоения этих ресурсов будет являться вовлечение в разработку нескольких миллиардов тонн промышленных запасов нефти.

Наравне с вышеперечисленным, отмечается перемещение основных районов нефтедобычи вглубь на северо-восток, в частности – в зону арктического шельфа, которые приравниваются к районам Крайнего Севера и приравненной к ним местности. Неблагоприятные геолого-технические и природно-географические условия открываемых месторождений вызывают осложнения в скважинах и трудоемкость различных видов подземельных и околоскважинных работ, что является следствием увеличения себестоимости добычи нефти.

Также высокая температура пластовых жидкостей и вязкость нефти и эмульсий, коррозионная активность среды, большие значения давления насыщения и газовых факторов, являются осложняющими факторами.

Результатом анализа состояния и перспектив развития нефтяной промышленности Российской Федерации является заключение о важности нефтяных скважин, в которых эксплуатация насосов осложнена различными

факторами, например: высокое содержание механических примесей и газа, искривленность ствола скважины, значительная коррозионная активность откачиваемой жидкости, высокая обводненность продукции пласта и другие.

Следует также отметить явления засорения и подклинивания рабочих органов насоса, которые во время работы установки проявляются в виде забивания проточных каналов мелкими частицами породы скважины проппантом и налипания солей на рабочих колесах и направляющих аппаратах насоса. Явления залипания и заиливание появляются лишь после запуска простоявшей скважины, так как мелкие частицы и ил со ствола скважины осаждаются на рабочие элементы насоса, характеризующихся клейкими свойствами. Определить наличие этих негативных явлений в насосе является сложной задачей, если не поднимать его на поверхность.

Однако если своевременно предупреждать солеотложение и предусматривать специальные превентивные мероприятия по выносу механических примесей, то заклинивание вала установки насоса можно избежать.

Таким образом вопросы эксплуатации нефтепромыслового оборудования и научно-обоснованного создания начинают привлекать все большее внимание, и в первую очередь это задевает: насосное оборудование у которого эффективность всего процесса эксплуатации нефтяного месторождения определяется производительностью и надежностью. Согласно изменениям условий нефтедобычи, происходит изменение степени распространенности различных способов ее добычи.

Анализом длительных наблюдений является выявление устойчивой тенденции возрастания удельного веса нефтедобычи механизированными способами эксплуатации. Причем все более заметное место занимают установки электроприводных погружных насосов среди механизированных способов добычи с помощью которых добывается более 70% всей нефти Российской Федерации. При это стоит учитывать, что доля фонда скважин, которые оснащены этими установками, составляет около трети от общего количества.

Обобщенные сведения о возможностях электроприводного способа эксплуатации нефтяных скважин представлены в таблице 1.2 [4].

Таблица 1.2. Обобщенные сведения о возможностях электроприводного способа эксплуатации нефтяных скважин

Факторы, осложняющие эксплуатацию нефтедобывающих скважин	Пригодность электроприводного способа нефтедобычи при указанных факторах
Море	Хорошо
Пустыня	Хорошо
Городская зона	Хорошо
Одиночные скважины	Хорошо
Куст скважин	Хорошо
Большая глубина	Хорошо
Низкое забойное давление	Хорошо
Высокая температура	Удовлетворительно
Вязкая жидкость	Плохо
Коррозийная жидкость	Удовлетворительно
Наличие песка	Удовлетворительно
Солеотложения	Удовлетворительно
Опасность образования эмульсии	Плохо
Высокий газовый фактор	Удовлетворительно

Проведен анализ факторов, вызывающих осложнения при эксплуатации скважин с применением УЭЦН, что необходимо учитывать при проектировании специализированных ЭП.

1.3. Проблема построения блок-схемы специализированного электропривода для УЭЦН и варианты ее решения

1.3.1. Проблема заклинивания или подклинивания насоса

Одной из возможных проблем во время эксплуатации нефтяной скважины является засорения и подклинивания рабочих органов насоса, которые во время работы установки проявляются в виде забивания проточных каналов мелкими частицами породы скважины пропантом и налипания солей на рабочих колесах и направляющих аппаратах насоса. Явления залипания и заиливания появляются лишь после запуска простоявшей скважины, так как мелкие частицы и ил со ствола скважины осаждаются на рабочие элементы насоса, характеризующихся клейкими свойствами. Определить наличие этих

негативных явлений в насосе является сложной задачей, если не поднимать его на поверхность.

Осадки, которые образуются в насосе, в первую очередь, являются следствием износа его рабочих органов, трущихся пар и уплотнительных колец, вдобавок износ имеет неравномерный характер, как в продольном, так и в радиальном направлениях.

Причиной простоя скважины являются частые остановки погружного оборудования вследствие аварий, происходящих в сети электроснабжения месторождения, а также при срабатывании систем защит системы управления УЭЦН по сопротивлению изоляции, по вибрации, по недогрузке и др. Таким образом, повышается вероятность заклинивания ЦН при пуске УЭЦН.

В зависимости от характера заклинивания насосного агрегата, его можно разделить на два типа мягкое и жесткое. Жесткое заклинивание вызывается отложениями в рабочих органах насоса. Устранение данного типа заклинивания достаточно сложно, так как преимущественно отложения являются плотными, то есть с поверхностью рабочих органов погружного насоса имеют прочное сцепление. В частности, прочность и плотность на первых ступенях ЦН больше, чем на последующих. Преимущественно, попытка расклинивания ЦН является причиной деформации вала, среза шпонок или даже выхода ЭЦН из строя.

Мягкое заклинивание вызывается засорением, заиливанием, залипанием или выбросом песка в рабочие органы насоса. В таких случаях возвращение ЦН на свою рабочую характеристику происходит после однократного срыва залипших рабочих органов, а ил, мелкий сор и песок вымываются потоком восходящей жидкости. Обычно, шанс успешного расклинивания в этой ситуации намного больше, чем при жестком заклинивании.

Однако и в рабочих режимах отложение солей также может иметь место. В такой ситуации момент сопротивления на валу насоса увеличивается, что является следствием повышения нагрузки на ПЭД с последующим снижением производительности ЭЦН и увеличением износа погружного оборудования.

Расклинивание рабочих колес ЦН является сложной операцией, которая требует специального подхода. На практике все методы восстановления работоспособного состояния ЭЦН ограничиваются работой установки при повышенном напряжении и токе, то есть в режиме перегрузки. Это приводит к ускорению процесса растрачивания ресурса УЭЦН, а именно, начинается интенсивное старение изоляции обмоток статора ПЭД, усиленный износ механических узлов насоса, например, срыв шпонок, слом вала, разрушение изоляции погружного кабеля и т.д.

Факторы, затрудняющие процесс расклинивания ЦН:

- расположение ЭЦН (глубоко под поверхностью земли, на большом расстоянии от станции управления);
- требование учета сопротивления длинной кабельной линии;
- Работа в режимах неудовлетворяющих условиям нагрева ПЭД в процессе расклинивания (отсутствие охлаждающей циркуляции эмульсий).

Проведем анализ существующих методов расклинивания ЦН. Падение напряжения на длинном кабеле вызывает смещение механической характеристики двигателя (1) влево (2), а сдвиг механической характеристики насоса (3) вправо (4) вызывается наличием солеотложений и выносом механических примесей в его рабочие органы (рис. 1.3.1.1). При дальнейшем перемещении механической характеристики ЦН вправо в процессе работы УЭЦН, а характеристики ПЭД – влево, то в определенный момент времени рабочая точка (В) сместится вправо настолько, что будет являться причиной достижения критического момента электродвигателя и УЭЦН отключится защитой от «перегрузки». При длительном простое после останова скважина с УЭЦН подвергается проявлению дополнительных негативных факторов такие как заиливание, залипание и засорение. В таком случае происходит переход характеристики насоса на (5), при этом происходит превышение моментом холостого хода насоса (точка D) пускового момента двигателя (точка E). Следствием этого является невозможность запуска УЭЦН после простоя.

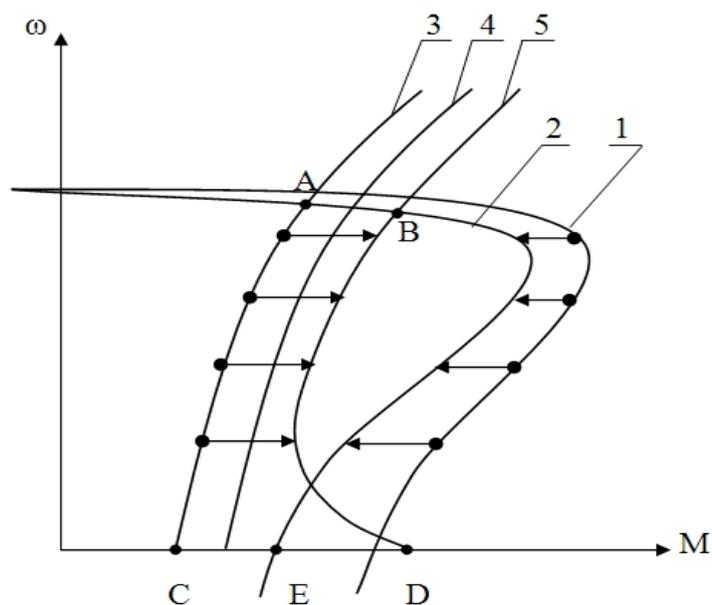


Рисунок 1.3.1.1. Механические характеристики двигателя (1, 2) и насоса (3, 4, 5)

В станциях управления, которые оборудованы ПЧ, расклинивание ЦН ограничивается ручным заданием параметров разгона двигателя ПЭД. Специальные режимы расклинивания ЦН реализуются в современных СУ с ПЧ при помощи которых осуществляется разворот установок ЭЦН. Среди таких режимов наиболее распространены два режима пуска: «толчковый» и «с раскачкой» [12,13,14].

Режим «толчковый» характеризуется увеличением частоты на выходе ПЧ с указанным темпом до нужного значения, затем увеличивается напряжение на выходе до повышенного «напряжения толчков», соответствующего данной частоте по характеристике U/F (рис. 1.3.1.2). Время действия повышенного напряжения определяется частотой толчков, количество толчков задается программно. По окончании толчков происходит дальнейшее увеличение напряжения и частоты в соответствии с заданной характеристикой U/F (рис. 1.3.1.2) [15].

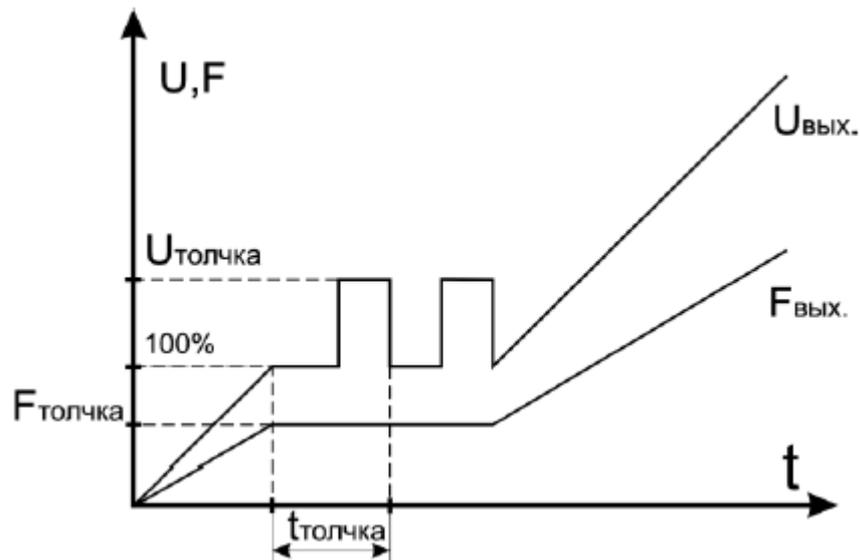


Рисунок 1.3.2. Изменение выходного напряжения и частоты в режиме разгона «толчковый»

В режиме «с раскачкой» при тяжелых условиях пуска двигатель запускается сначала в прямом направлении, затем в обратном и затем снова в прямом (рис. 1.3.1.3). Изменение выходной частоты происходит с заданным темпом, количество циклов «раскачки» задается программно. Количество циклов и темп изменения частоты напряжения также задаются вручную оператором.

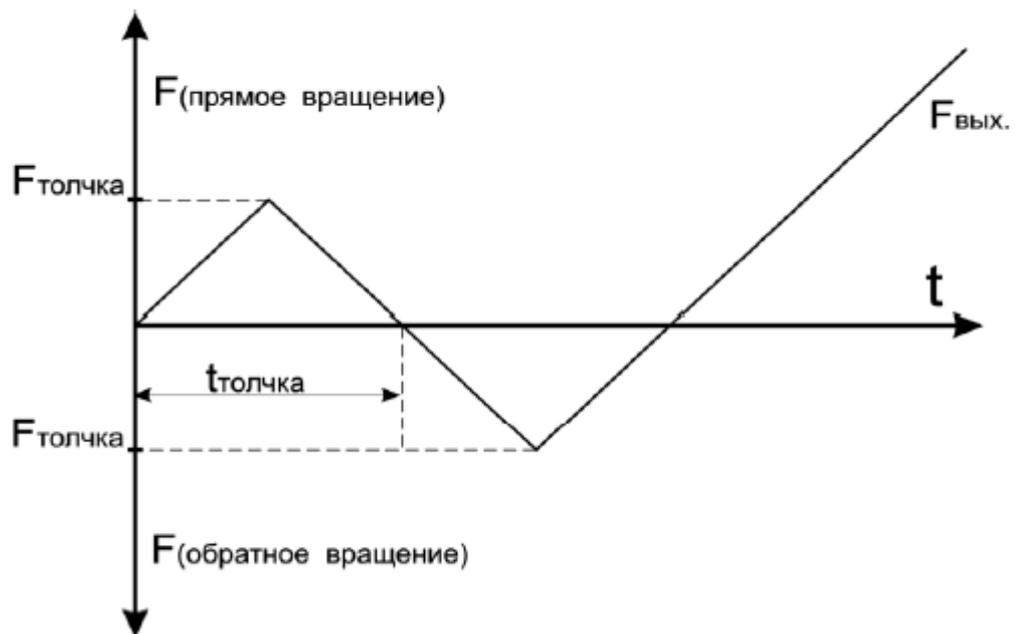


Рисунок 1.3.1.3. Изменение выходной частоты в режиме разгона «с раскачкой»

Обусловлено существование проблемы заклинивания или подклинивания насоса вследствие осложненных условий эксплуатации. Для решения данной проблемы современные производители электрооборудования для УЭЦН предусматривают специальные программно-алгоритмические решения такие как толчковые режимы и смена направления вращения ротора.

1.3.2. Блок-схема специализированного электропривода для 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. 1.3.2.1).

Отличительной особенностью данного варианта компоновки электромеханической системы 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.



Рисунок 1.3.2.1. Электромеханическая система с регулируемым асинхронным двигателем и косвенным методом измерения переменных состояния

Силовой канал электромеханической системы с регулируемым асинхронным двигателем и косвенным методом измерения переменных состояния (рис. 1.3.2.1) включает в себя:

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. Кабельная линия установок, предназначенная для снабжения электроэнергией электродвигателя погружного агрегата

4. Регулируемый 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, при этом измерению подлежат, как правило, угловая скорость ротора и крутящий момент на валу двигателя.

5. Погружная часть скважинной насосной установки, предназначенная непосредственно для добычи нефти.

Внутренний интерфейс электромеханической системы (рис. 1.3.2.1) 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.

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

Микроконтроллерная система управления (рис. 1.3.2.1) 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 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 оценивания параметров АД, который позволяет оценивать параметры Т-образной схемы замещения регулируемого АД и параметры механической системы электропривода в процессе работы.

5. 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.

Вышеперечисленным обоснована необходимость построения специализированного электропривода для установок ЭЦН с позиции теории адаптивных систем управления электроприводов. Предложен и обоснован вариант построения адаптивного электропривода УЭЦН позволяющий приспособливаться к осложненным условиям эксплуатации скважин.

1.4. Погружные электродвигатели

Основным видом погружных электродвигателей, служащих для привода центробежных насосов, являются асинхронные маслозаполненные двигатели с короткозамкнутыми роторами. Они используются как приводы для центробежных насосов, служащих для откачки пластовой жидкости из нефтяных скважин. Мощность погружных электродвигателей может достигать величины 500 кВт [5].

Сравнительно небольшие диаметры и значительные мощности вызывают надобность увеличения длины двигателей, которая иногда может превышать 22 м [5]. В результате соотношения между главными размерами ПЭД, габариты которых от аналогичных соотношений асинхронных двигателей общепромышленного исполнения, которые выпускаются серийно, отличаются в десятки и сотни раз (рис. 1.4.1). Данное обстоятельство существенно влияет на конструкцию и свойства ПЭД [15].

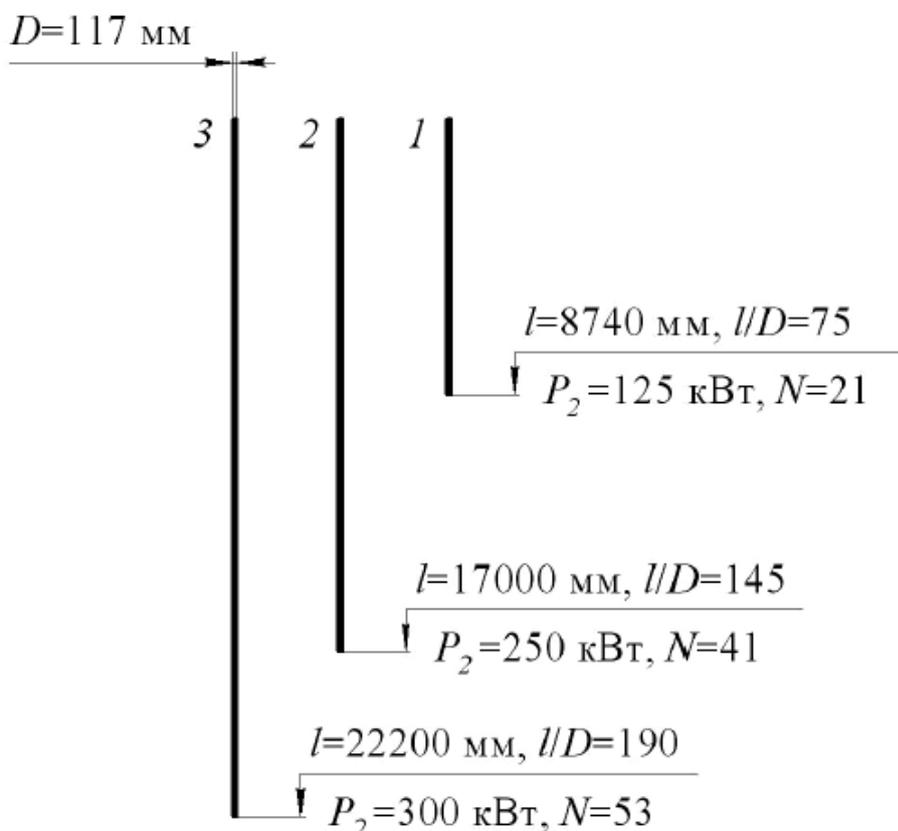


Рисунок 1.4.1. Фактическое соотношение между главными размерами погружных асинхронных электрических двигателей: 1, 2, 3 – одно-, двух- и трехсекционные двигатели

Электродвигатель (рис. 1.4.2) состоит из статора, ротора, узла токоввода, головки и основания.

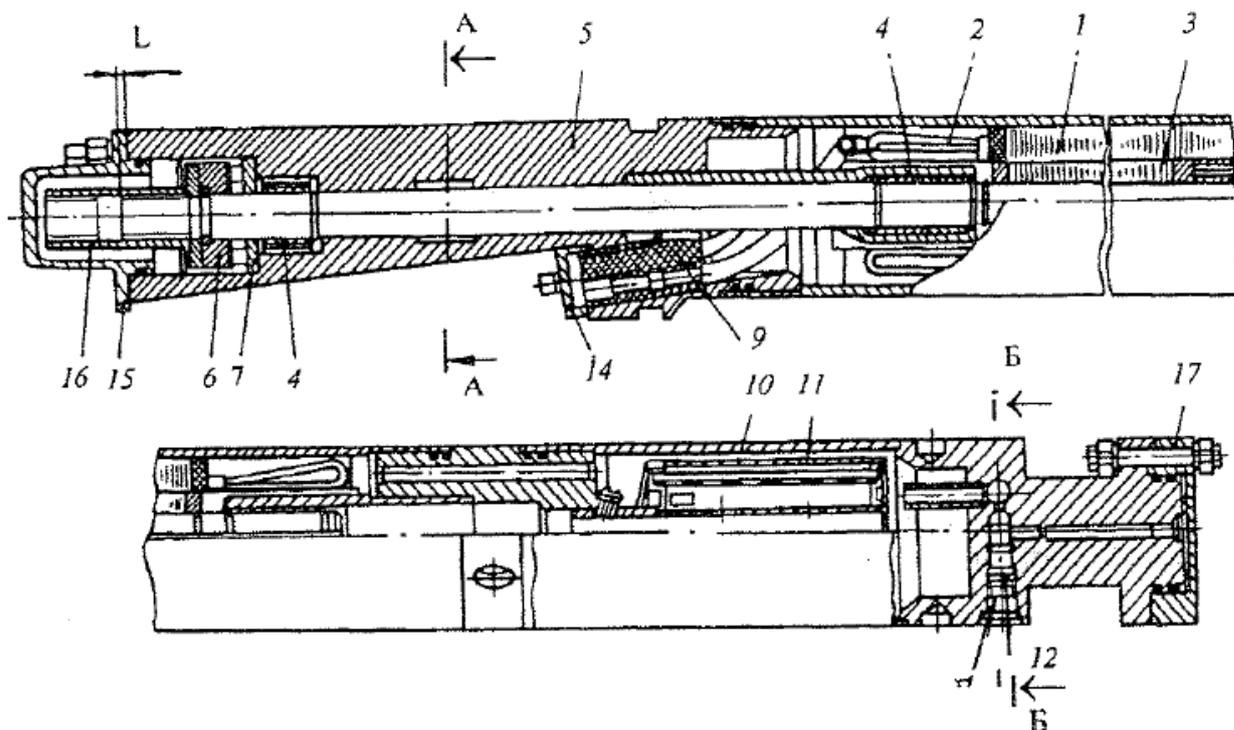


Рисунок 1.4.2. Конструкция погружного электродвигателя:
 1 – статор, 2 – обмотка статора, 3 – ротор, 4- втулка подшипника, 5 – головка, 6 –
 – пята, 7 – подпятник, 8 – клапан обратный, 9 – колодка, 10 – основание, 11 –
 фильтр, 12 – клапан перепускной, 13 – клапан обратный, 14 – крышка
 кабельного ввода, 15 – крышка верхняя, 16 – муфта шлицевая, 17 крышка
 нижняя

Статор – это корпус, который выполняется из специальной трубы. В этот корпус запрессовывается магнитопровод, состоящий из листов электротехнической стали. Его пазы заполняются трехфазной обмоткой из специального обмоточного провода. Соединение фазы обмотки - «звезда». Выводы статорной обмотки соединяются с колодкой кабельного ввода.

Число пазов статора относительно небольшое: $Z_1 = 18$ или 24 и зависит от того, что наружный диаметр сердечника статора ограничивается принятыми габаритами двигателя. В частности, в конструкциях ПЭД, выпускаемых в последнее время, пазы обмотки статора выполняются закрытыми для того, чтобы упростить технологию сборки (рис. 1.4.3) [15].

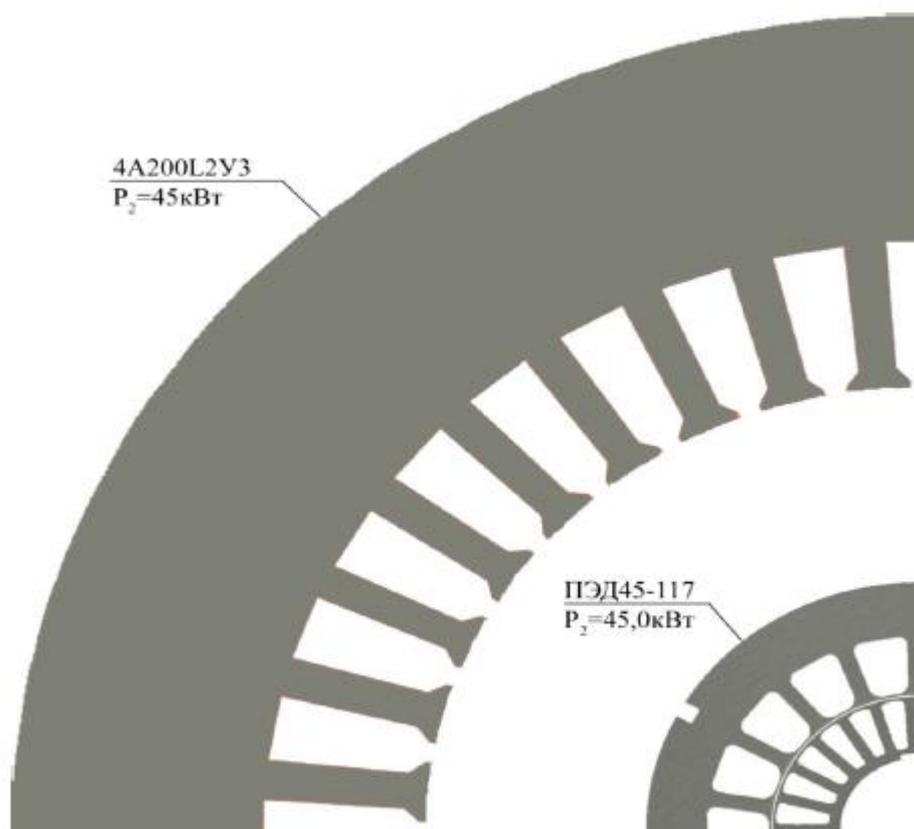


Рисунок 1.4.3. Листы магнитопроводов общепромышленного и погружного асинхронных двигателей

Ротор – это набор пакетов из листов электротехнической стали, которые разделяются между собой промежуточными подшипниками. Он размещается внутри статора. Медные стержни вставляются в пазы пакетов и завариваются на концах с медными кольцами («белые колесо»). Для обеспечения циркуляции масла необходимо, чтобы вал ротора был полым. Узел упорного подшипника, воспринимающий осевые нагрузки от веса ротора, находится в головке электродвигателя и состоит из подпятника и пяты. Основание располагается в нижней части электродвигателя. В нем размещается фильтр для очистки масла. Соединение двигателя с насосом обеспечивается шлицевой муфтой.

В состав секционных двигателей входят верхняя и нижняя секции, соединяющихся при монтаже двигателя на скважине. Конструкция секций включает в себя статор и ротор, устройство которых идентично односекционному электродвигателю. Между собой секции соединяются электрически и осуществляются при помощи трех наконечников. Герметизация

такого соединения обеспечивается с помощью уплотнения при стыковке секций. Соединение корпусов обеспечивается фланцами, а валов – шлицевой муфтой. Вверху нижней секции располагается межсекционная колодка (муфта), включающая в себя подпружиненный стопор, который служит для предотвращения ее проворачивание. В головке нижней секции располагается ловитель для установки правильного положения секций и защиты наконечников выводных проводов при сочленении.

В производстве находятся более 100 модификаций ЭД с различной мощностью, что в свою очередь позволяет сделать выбор в пользу наиболее оптимального сочетания двигатель – насос с максимально возможным КПД, обеспечивающим оптимальную работу установки [5].

Использование специальных электротехнических материалов допускает эксплуатацию погружных двигателей при температуре пластовой жидкости до 120°C, а в термостойком исполнении – до 150°C.

Только после сборки на специальных стендах, с помощью которых производится контроль качества отдельных узлов, электродвигатель подвергается испытаниям на станции в условиях, которые максимально приближены к реальным, в том числе с нагревом до рабочих температур. Данной процедуре подвергается 100% двигателей и после испытаний каждый двигатель разбирается и тщательно проверяется.

В данном разделе показаны особенности конструкции погружных асинхронных ЭД как объектов идентификации.

1.5. Проблема идентификации параметров погружного асинхронного двигателя

В наши дни такое понятие как модель применяется во многих (если не во всех) областях науки и техники, которые занимаются решением нетривиальных задач. Такие задачи появляются во время изучения различных свойств и особенностей объектов для последующего управления, а также во время

создания адаптивных систем, вырабатывающих оптимальные управляющие воздействия на основе построенной модели объекта [7].

Различные типы моделей рассматриваемых объектов, систем или процессов применяются на стадии создания систем управления этими объектами и на стадии их эксплуатации. Из этого следует актуальность проблемы построения эффективных моделей объектов технических, технологических, экономических или социальных процессов.

Создание математических моделей различного типа с помощью наблюдения за поведением объектов и исследования их свойств составляет основное содержание науки идентификации [8].

Известно, что методы управления электроприводами во многом зависят от правильной оценки параметров асинхронного двигателя и очень чувствительны к их изменению. Также эффективность работы систем управления электроприводов, зависит от текущих значений параметров электродвигателей, таких как активного сопротивления и индуктивности статорной обмотки, взаимные индуктивности обмоток статора и ротора, активного сопротивления и индуктивности роторной обмотки. Однако при наладке электроприводов измеряют лишь активное сопротивление статорной обмотки, другие же параметры берутся из каталожных данных, которые являются расчетными и могут сильно отличаться от реальных значений [9].

Более того, значения параметров асинхронных электродвигателей зависят также от теплового состояния и режима работы. Например, величина индуктивности может измениться на 30-40% в режиме прямого пуска, а активное сопротивление ротора – более чем в полтора раза. Также стоит отметить, что и в течении работы двигателя его активное сопротивление статорной обмотки, которое напрямую зависит от теплового состояния, может изменяться на 20-30%.

Таким образом можно утверждать о необходимости определения текущих значений параметров электродвигателей непосредственно в процессе работы электропривода. Однако, большая часть переменных состояния электродвигателей и электромагнитных параметров недоступна прямому

измерению. В асинхронных электродвигателях не представляется возможным или крайне сложно измерить потокосцепления статора и ротора, индуктивность и активное сопротивление роторной обмотки, а во время работы асинхронного двигателя параметры статора становятся недоступными для прямого измерения.

Решение таких задач возможно при проведении динамической идентификации переменных состояния и параметров электродвигателя. Под динамической идентификацией модели в общем случае понимают определение ее параметров и структуры путем анализа выходных и входных данных модели. Основой для такой модели является компьютерная обработка информации, которая содержится в токах и напряжениях электродвигателя на основе методов идентификации и модели электродвигателя.

Существует множество методов идентификации, но ее целесообразно проводить с помощью пассивных методов, основанных на фиксации реальных сигналов в работающем объекте с последующей обработкой данных сигналов.

В соответствии с [10, 11] частной проблемой является использование дорогих или не удобных в эксплуатации датчиков, например, в электроприводе можно выделить такие: датчики крутящего момента, потокосцепления, ускорения, температуры. Следовательно, важнейшую роль занимают исследования в области методов построения бездатчиковых систем управления электропривода, где наибольшее внимание уделяется методам динамической идентификации, которые используют сигналы с датчиков тока, напряжения, а в частных случаях с датчиков скорости, причем с обеспечением работоспособности во всех необходимых эксплуатационных режимах: пуск, наброс и сброса нагрузки, реверс и торможение.

В системах, применяющихся в реальных промышленных условиях, весьма часто не удаётся полностью избавиться от стационарных и импульсных шумов в измерительной системе, а, следовательно, и методы динамической идентификации параметров объектов управления необходимы обладать грубостью к этим возмущениям.

Еще одной проблемой является дискретизация сигналов измерительной системы по времени и квантование по уровню при использовании микропроцессорных систем управления. Поэтому динамику объекта управления необходимо описывать с помощью систем разностных уравнений с целью наиболее эффективной реализации процесса идентификации параметров, которые возможно тривиально получить из имеющихся систем дифференциальных уравнений.

Все вышеизложенное можно разрешить в виде разработки и проверки метода динамической идентификации параметров погружного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, обеспечивающего нахождение оценок параметров с допустимой погрешностью и обладающего очень высоким быстродействием.

В итоге исследуемый погружной АД представлен как нестационарная динамическая система. С этих позиций доказана необходимость динамической идентификации параметров погружного ЭД.

1.6. Математическая модель погружного асинхронного двигателя

Первостепенной задачей при построении модели асинхронного электропривода является выбор системы координат, рассматривающей электромагнитные процессы в двигателе. Впрочем, от выбора той или иной системы координатных осей не зависит влияние на реальные физические процессы, которые протекают в электроприводе, а является лишь методом их описания. Исходя от решаемой задачи существуют различные математические модели, в частности: модели в естественных координатах машины, в ортогональных координатах, неподвижных или вращающихся с определенной частотой, в полярных координатах либо бескоординатные (тензорные) модели. Рассмотрим эти модели и их взаимное соответствие друг другу [16].

На рис. 1.6.1 приведена схема трехфазного асинхронного двигателя. Обмотки фаз трехфазного двигателя сдвинуты на 120 электрических градусов относительно друг друга. Трехфазная система обмоток статора расположена со

сдвигом на $\frac{120}{z_p}$ угловых градусов по окружности неподвижного статора, где z_p – число пар полюсов машины. Следовательно, для многополюсного двигателя приведенная на рис. 1.6.1 схема будет соответствовать угловому сектору статора в $\frac{360}{z_p}$ угловых градусов [17].

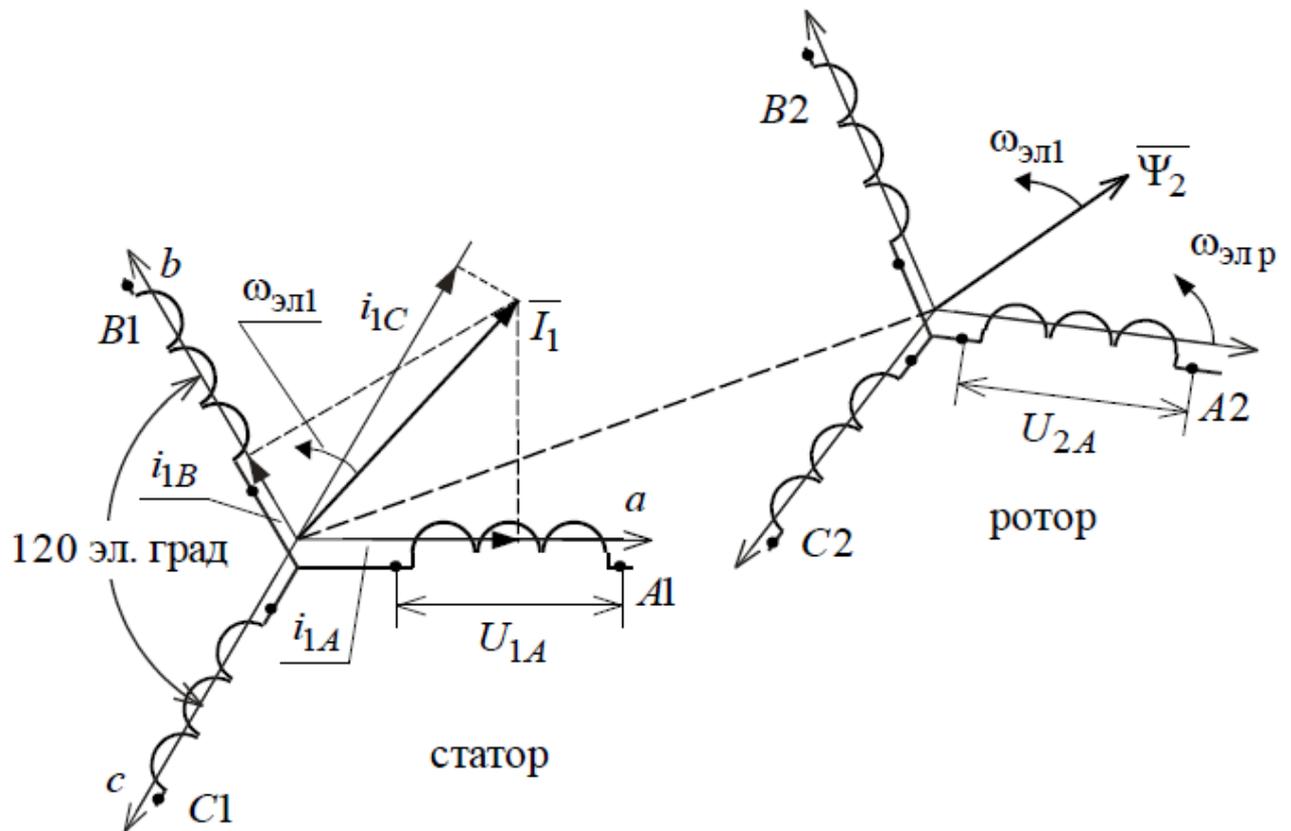


Рисунок 1.6.1. Схема трехфазного асинхронного двигателя

В симметричной машине с идеальными обмотками при питании их симметричными напряжениями U_{1A}, U_{1B}, U_{1C} и с угловой частотой $\omega_{эл1}$ токами обмоток создается вращающееся магнитное поле той же частоты с постоянной амплитудой намагничивающей силы [18]. Вращающуюся намагничивающую силу можно представить вращающимся пространственным вектором \vec{I}_1 , определяющимся мгновенными значениями фазных токов i_{1A}, i_{1B} и i_{1C}

$$\vec{I}_1 = \frac{2}{3} \cdot (i_{1A} + i_{1B} \cdot e^{j2\pi/3} + i_{1C} \cdot e^{j4\pi/3}).$$

Мгновенные значения фазных токов являются проекциями вектора \vec{I}_1 на оси обмоток статора и тогда

$$\text{mod } \vec{I}_1 = I_{1m} = \sqrt{2} \cdot I_1,$$

где I_{1m} и I_1 – соответственно амплитудное и действующее значения фазных токов обмотки статора.

Следует заметить, что вектор \vec{I}_1 не является суммой векторов фазных токов, сумма которых равна $\frac{3}{2} \cdot \vec{I}_1$.

Вектор \vec{I}_1 вращается относительно неподвижного статора с угловой частотой поля

$$\omega_{\text{эл}} = 2 \cdot \pi \cdot f_1, \frac{\text{эл. рад}}{\text{с}},$$

где f_1 – частота питающего напряжения, Гц;

Ротор электродвигателя вращается с угловой скоростью

$$\omega = (1 - s) \cdot \omega_0, \frac{\text{эл. рад}}{\text{с}},$$

где $\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f_1}{z_p} = \frac{\omega_{\text{эл}}}{z_p}$ – скорость идеального холостого хода (синхронная)

электродвигателя, $\frac{\text{угл. рад}}{\text{с}}$;

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \tag{1.6.1}$$

– скольжение, о. е.

Скорость ротора в установившемся режиме определяется механической характеристикой двигателя $M(s)$ и зависит от статического момента нагрузки. Один оборот ротора соответствует z_p периодам поля статора. Тогда электрическая частота вращения ротора

$$\omega_{\text{эл.р}} = z_p \cdot \omega = (1 - s) \cdot \omega_{\text{эл1}}, \frac{\text{эл. рад}}{\text{с}},$$

где значение скольжения (1.6.1) определяется также отношением

$$s = \frac{\omega_{эл1} - z_p \cdot \omega}{\omega_{эл1}}.$$

Следствием отличия электрической скорости ротора от угловой частоты поля статора

$$\Delta\omega_{эл.р} = \omega_{эл1} - \omega_{эл.р}$$

является наводимая в обмотках ротора ЭДС с угловой частотой

$$\omega_{эл2} = \omega_{эл.р}, \frac{\text{эл. рад}}{\text{с}}$$

или, соответственно,

$$f_2 = \frac{\Delta\omega_{эл.р}}{2\pi}, \text{ Гц.}$$

В результате вектор потокосцепления ротора $\vec{\Psi}_2$ вращается относительно вращающегося ротора с угловой частотой

$$\omega_{эл2} = z_p \cdot (\omega_0 - \omega) = 2\pi \cdot f_1 - z_p \cdot \omega, \frac{\text{эл. рад}}{\text{с}},$$

а относительно неподвижного статора с результирующей угловой скоростью

$$\omega_{эл.р} + \omega_{эл2} = \omega_{эл1} = 2 \cdot \pi \cdot f_1, \frac{\text{эл. рад}}{\text{с}}.$$

Векторы тока статора \vec{I}_1 и потокосцепления ротора $\vec{\Psi}_2$ вращаются синхронно, но их относительное положение характеризуется некоторым углом, который при работе электродвигателя не остается постоянным. Далее обозначения электрического и углового радиана в размерности угловой частоты и угловой скорости вращения будут для простоты опущены.

На рис. 1.6.1 неподвижная, жестко связанная со статором трехфазная система координат обозначена a, b, c . Вращающаяся, жестко связанная с ротором трехкоординатная система не обозначена, т. к. в дальнейшем не используется. Следует отметить, что трехкоординатные системы статора и ротора расположены в плоскости, перпендикулярной оси вращения, и не являются трехмерными координатными системами.

Динамика трехфазного асинхронного электродвигателя в трехкоординатных системах, жестко связанных со статором или ротором, описывается шестью уравнениями электрического равновесия в цепях обмоток статора и ротора, уравнением электромеханического преобразования энергии (электромагнитного момента) и уравнением механического движения. Для упрощения математического описания и анализа процессов в трехфазном электродвигателе его, прежде всего, заменяют эквивалентной двухфазной моделью, а затем путем выбора общей системы координат и линейных преобразований исходной системы уравнений осуществляют замену действительных переменных новыми переменными с учетом сохранения адекватности математического описания физического объекта. Новые переменные связаны с реальными переменными формулами прямого и обратного преобразования.

На рис. 1.6.2 приведена схема двухфазного асинхронного двигателя. Две обмотки статора расположены со сдвигом на 90 эл. градусов по окружности неподвижного статора и запитываются одна синусоидальным, а другая – косинусоидальным по форме переменными напряжениями.

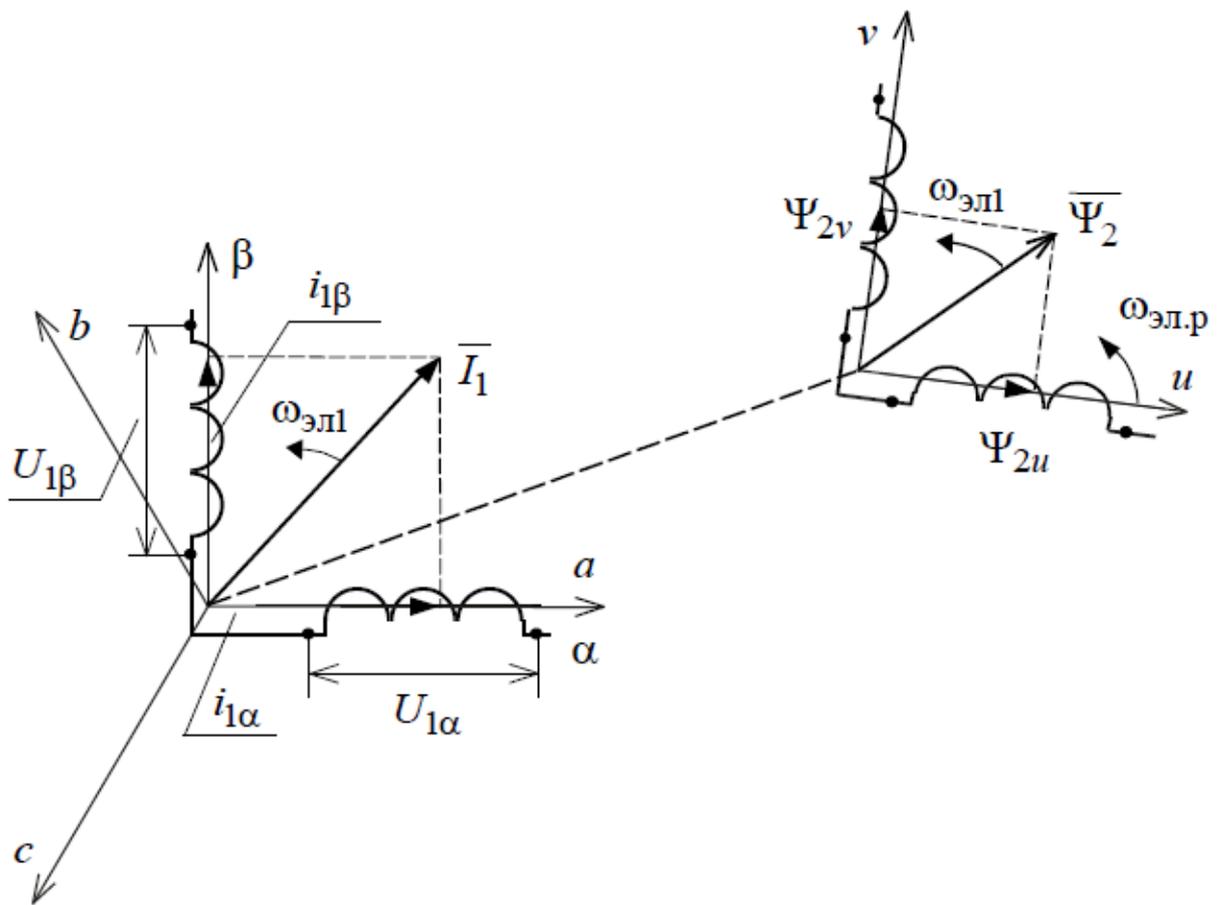


Рисунок 1.6.2. Схема двухфазного асинхронного двигателя

Неподвижная, жестко связанная со статором координатная система α, β выбирается так, чтобы ее ось α совпадала с осью a координатной системы a, b, c трехфазного статора (рис. 1.6.1). Тогда проекции вектора тока статора \vec{I}_1 на оси α и β будут определять фазные токи двухфазной обмотки статора I_α и I_β . Выражения для преобразования фазных токов трехфазной обмотки статора в фазные токи эквивалентной двухфазной обмотки статора имеют вид:

– прямое преобразование

$$I_{1\alpha} = i_{1A}; \quad I_{1\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot i_{1A} + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot i_{1B} = \frac{i_{1B} - i_{1C}}{\sqrt{3}}; \quad (1.6.2)$$

– обратное преобразование

$$i_{1A} = I_{1\alpha}; \quad i_{1B} = -\frac{1}{2} \cdot I_{1\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{1\beta}; \quad i_{1C} = -\frac{1}{2} \cdot I_{1\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{1\beta}. \quad (1.6.3)$$

Аналогичные преобразования можно сделать для других переменных статора, а также ротора в своей координатной системе, оси которой на рис. 1.6.2 обозначены u, v .

Динамика двухфазного электродвигателя описывается четырьмя уравнениями электрического равновесия в цепях обмоток статора и ротора, уравнением электромагнитного момента и уравнением движения. Математическое описание асинхронного электродвигателя целесообразно проводить в одной общей координатной системе. Это приводит к введению новых переменных, что должно выполняться при обстоятельстве сохранения адекватности нового математического описания физического объекта. Обозначим новую общую координатную систему x, y и в общем случае примем, что она вращается в пространстве с произвольной угловой скоростью $\omega_{\text{КС}}$ (рис. 1.6.3, *a*). Положение координатной системы x, y относительно неподвижной системы координат α, β характеризуется углом $\varphi_{\text{КС}} = \int \omega_{\text{КС}} \cdot dt$. Формулы преобразования для статорных переменных (на примере тока) имеют следующий вид:

– прямое преобразование

$$\begin{aligned} I_{1x} &= I_{1\alpha} \cdot \cos \varphi_{\text{КС}} + I_{1\beta} \cdot \sin \varphi_{\text{КС}}, \\ I_{1y} &= -I_{1\alpha} \cdot \sin \varphi_{\text{КС}} + I_{1\beta} \cdot \cos \varphi_{\text{КС}}; \end{aligned} \quad (1.6.4)$$

– обратное преобразование

$$\begin{aligned} I_{1\alpha} &= I_{1x} \cdot \cos \varphi_{\text{КС}} - I_{1y} \cdot \sin \varphi_{\text{КС}}, \\ I_{1\beta} &= I_{1x} \cdot \sin \varphi_{\text{КС}} + I_{1y} \cdot \cos \varphi_{\text{КС}}. \end{aligned} \quad (1.6.5)$$

Для роторных переменных (на примере потокосцепления) формулы преобразования имеют вид:

– прямое преобразование

$$\begin{aligned} \Psi_{2x} &= \Psi_{2u} \cdot \cos(\varphi_{\text{КС}} - \varphi_{\text{эл.р}}) + \Psi_{2v} \cdot \sin(\varphi_{\text{КС}} - \varphi_{\text{эл.р}}), \\ \Psi_{2y} &= -\Psi_{2u} \cdot \sin(\varphi_{\text{КС}} - \varphi_{\text{эл.р}}) + \Psi_{2v} \cdot \cos(\varphi_{\text{КС}} - \varphi_{\text{эл.р}}); \end{aligned}$$

– обратное преобразование

$$\begin{aligned}\Psi_{2u} &= \Psi_{2x} \cdot \cos(\varphi_{\text{КС}} - \varphi_{\text{ЭЛ.Р}}) - \Psi_{2y} \cdot \sin(\varphi_{\text{КС}} - \varphi_{\text{ЭЛ.Р}}), \\ \Psi_{2v} &= \Psi_{2x} \cdot \sin(\varphi_{\text{КС}} - \varphi_{\text{ЭЛ.Р}}) + \Psi_{2y} \cdot \cos(\varphi_{\text{КС}} - \varphi_{\text{ЭЛ.Р}}).\end{aligned}$$

Таким образом, для преобразования переменных из одной координатной системы в другую необходимо знать в исходной системе координат проекции вектора на ее оси или модуль вектора и угол, определяющий его положение, а также угол, определяющий взаимное положение координатных систем.

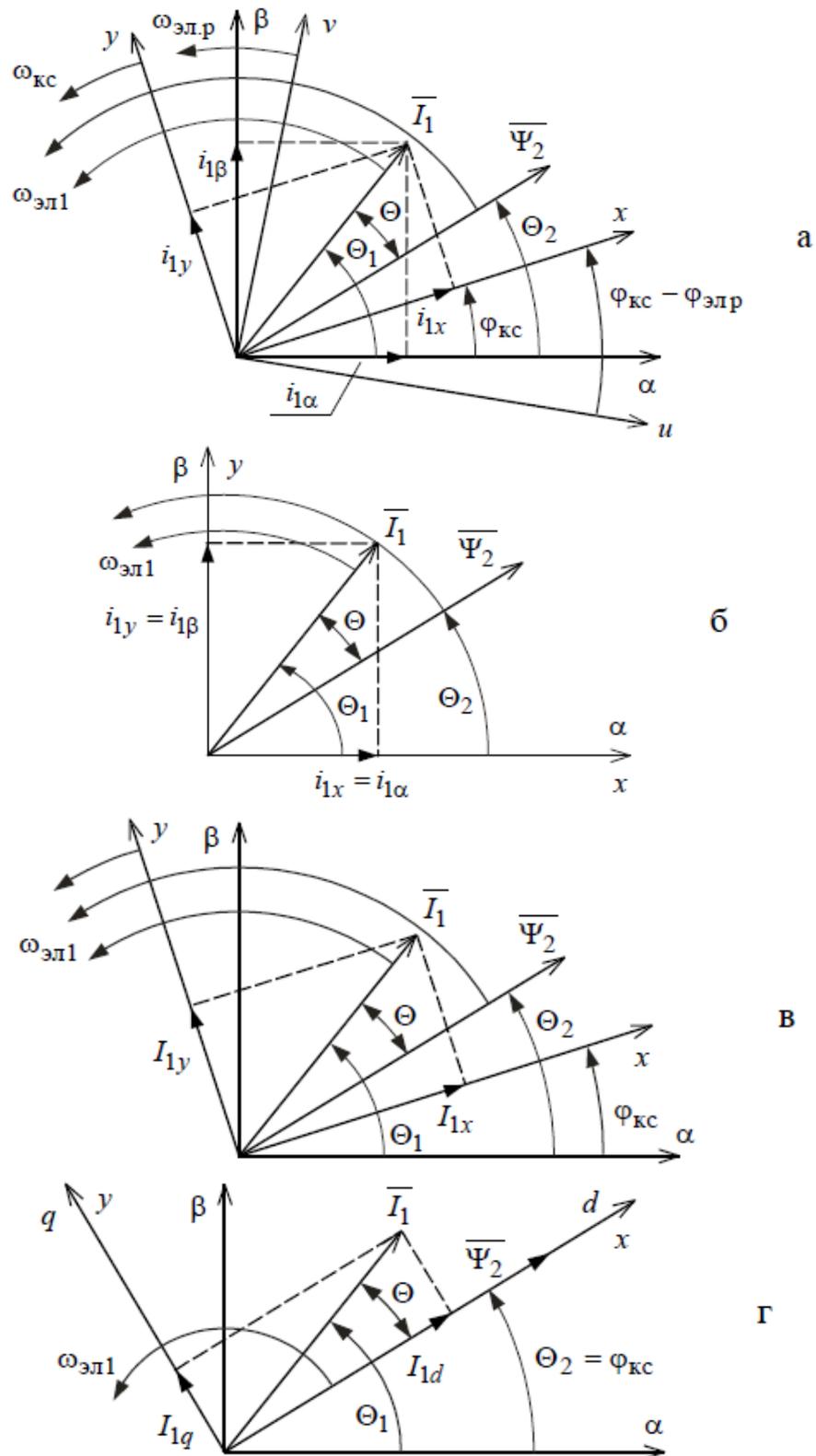


Рисунок 1.6.3. Преобразование статорных переменных двухфазного двигателя в системе координат x, y : а – вращающейся с произвольной скоростью $\omega_{кc}$; б – неподвижной и совпадающей с двухфазной системой координат α, β ; в – вращающейся со скоростью $\omega_{кc} = \omega_{эл1}$ и произвольно ориентированной; г – вращающейся со скоростью $\omega_{кc} = \omega_{эл1}$ и ориентированной по вектору потокосцепления ротора

На практике наиболее часто используется математическое описание и структурные схемы асинхронного двигателя в следующих системах координат:

– неподвижной ($\omega_{\text{КС}} = 0$) системе координат α, β жестко связанной со статором (рис. 1.6.3, б);

– вращающейся синхронно с магнитным полем ($\omega_{\text{КС}} = \omega_{\text{ЭЛ1}}$) и произвольно ориентированной системе координат x, y (рис. 1.6.3, в);

– вращающейся синхронно с магнитным полем ($\omega_{\text{КС}} = \omega_{\text{ЭЛ1}}$) системе координат d, q и осью d , ориентированной по вектору потокосцепления ротора $\vec{\Psi}_2$ (рис. 1.6.3, г).

При реализации САУ частотно-регулируемых асинхронных электроприводов практически доступным оказывается измерение напряжений и токов обмоток фаз статора, магнитного потока в воздушном зазоре машины и угловой скорости вращения двигателя. Остальные переменные приходится рассчитывать на основе эталонных моделей двигателя.

Для математического описания процессов в асинхронной машине обычно используются дифференциальные уравнения обобщенной двухфазной машины переменного тока [18,19,20], полученные при общепринятых допущениях: без учета потерь в стали и насыщения магнитной цепи, при равномерном воздушном зазоре и питании двигателя системой симметричных синусоидальных напряжений.

Рассмотрим неподвижную жестко связанную со статором координатную систему α, β .

Уравнения напряжений двухфазной электрической машины в векторной форме записи:

$$\begin{aligned} \vec{U}_{1\alpha\beta} &= R_1 \cdot \vec{I}_{1\alpha\beta} + \frac{d\vec{\Psi}_{1\alpha\beta}}{dt} = R_1 \cdot \vec{I}_{1\alpha\beta} + p \cdot \vec{\Psi}_{1\alpha\beta}; \\ \vec{U}_{2uv} &= R_2 \cdot \vec{I}_{2uv} + \frac{d\vec{\Psi}_{2uv}}{dt} = R_2 \cdot \vec{I}_{2uv} + p \cdot \vec{\Psi}_{2uv}, \end{aligned} \quad (1.6.6)$$

где $\vec{U}_{1\alpha\beta}$, $\vec{I}_{1\alpha\beta}$ и $\vec{\Psi}_{1\alpha\beta}$ – векторы напряжения, тока и потокосцепления статора в неподвижной, жестко связанной со статором системе координат α, β ;

\vec{U}_{2uv} , \vec{I}_{2uv} и $\vec{\Psi}_{2uv}$ – векторы напряжения, тока и потокосцепления ротора в неподвижной, жестко связанной с ротором системе координат u, v ;

$p \equiv \frac{d}{dt}$ – оператор дифференцирования.

Поскольку обмотки ротора асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором замкнуты накоротко, то напряжения обмоток ротора

$$u_{2A} = u_{2B} = u_{2C} = 0,$$

следовательно $\vec{U}_{2uv} = 0$.

После приведения роторных переменных к неподвижной статорной системе координат α, β уравнения напряжений асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором имеют вид:

$$\begin{aligned}\vec{U}_{1\alpha\beta} &= R_1 \cdot \vec{I}_{1\alpha\beta} + p \cdot \vec{\Psi}_{1\alpha\beta}; \\ 0 &= R_2' \cdot \vec{I}_{2\alpha\beta} + p \cdot \vec{\Psi}_{2\alpha\beta} - j \cdot \omega_{\text{эл.р}} \cdot \vec{\Psi}_{2\alpha\beta},\end{aligned}$$

(1.6.7)

где R_2' – приведенное к статору сопротивление обмотки ротора.

Векторы результирующего потокосцепления в любой системе координат:

$$\vec{\Psi}_1 = L_1 \cdot \vec{I}_1 + L_m \cdot \vec{I}_2; \quad (1.6.8)$$

$$\vec{\Psi}_2 = L_2 \cdot \vec{I}_2 + L_m \cdot \vec{I}_1, \quad (1.6.9)$$

где $L_1 = L_{1\sigma} + L_m$ – эквивалентная индуктивность обмотки статора, Гн;

$L_2 = L_{2\sigma}' + L_m$ – эквивалентная индуктивность обмотки ротора, Гн;

$L_{1\sigma}$ – индуктивность рассеяния обмотки статора, Гн;

$L_{2\sigma}'$ – приведенная к статору индуктивность рассеяния обмотки ротора,

Гн;

L_m – результирующая индуктивность, которая обуславливается

магнитным потоком в воздушном зазоре машины, Гн.

Параметры асинхронного двигателя $R_1, R_2', L_{1\sigma}, L_{2\sigma}, L_m$ могут быть найдены в справочной литературе [21] или определены по методике.

С учетом уравнений (1.6.8) – (1.6.9) система (1.6.7) может быть представлена в векторной форме записи

$$\begin{aligned}\vec{U}_{1\alpha\beta} &= R_1 \cdot \vec{I}_{1\alpha\beta} + L_1 \cdot p \cdot \vec{I}_{1\alpha\beta} + L_m \cdot p \cdot \vec{I}_{2\alpha\beta}; \\ 0 &= R_2' \cdot \vec{I}_{2\alpha\beta} + L_2 \cdot p \cdot \vec{I}_{2\alpha\beta} + L_m \cdot p \cdot \vec{I}_{1\alpha\beta} - j \cdot \omega_{\text{эл.р}} \cdot \vec{\Psi}_{2\alpha\beta}.\end{aligned}\quad (1.6.10)$$

Во многих случаях выполнять анализ, а особенно синтез систем управления асинхронным двигателем, используя векторное представление переменных, оказывается неудобным. Поэтому от векторов напряжений, токов и потокосцеплений переходят к их представлению через проекции на соответствующие оси ортогональной системы координат:

$$\begin{aligned}\vec{U}_{1\alpha\beta} &= U_{1\alpha} + j \cdot U_{1\beta}; \\ \vec{\Psi}_{1\alpha\beta} &= \Psi_{1\alpha} + j \cdot \Psi_{1\beta}; \\ \vec{\Psi}_{2\alpha\beta} &= \Psi_{2\alpha} + j \cdot \Psi_{2\beta}; \\ \vec{I}_{1\alpha\beta} &= I_{1\alpha} + j \cdot I_{1\beta}; \\ \vec{I}_{2\alpha\beta} &= I_{2\alpha} + j \cdot I_{2\beta}.\end{aligned}$$

Тогда система (1.6.10) принимает вид

$$\begin{aligned}U_{1\alpha} &= R_1 \cdot I_{1\alpha} + L_1 \cdot p \cdot I_{1\alpha} + L_m \cdot p \cdot I_{2\alpha}; \\ U_{1\beta} &= R_1 \cdot I_{1\beta} + L_1 \cdot p \cdot I_{1\beta} + L_m \cdot p \cdot I_{2\beta}; \\ 0 &= R_2' \cdot I_{2\alpha} + L_2 \cdot p \cdot I_{2\alpha} + L_m \cdot p \cdot I_{1\alpha} + \omega_{\text{эл.р}} \cdot \Psi_{2\beta}; \\ 0 &= R_2' \cdot I_{2\beta} + L_2 \cdot p \cdot I_{2\beta} + L_m \cdot p \cdot I_{1\beta} - \omega_{\text{эл.р}} \cdot \Psi_{2\alpha}.\end{aligned}\quad (1.6.11)$$

Уравнениям (1.6.10) – (1.6.11) соответствуют приведенные на рис. 1.6.4 схемы замещения асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором в неподвижной системе координат α, β . Эти схемы пригодны для анализа различных режимов работы таких как установившихся и переходных при любой частоте и величине питающего напряжения и скорости двигателя ω . Производные $\frac{d\vec{\Psi}_1}{dt}$, $\frac{d\vec{\Psi}_2}{dt}$ и $\frac{d\vec{\Psi}_m}{dt}$ являются соответствующими напряжениями \vec{U}_s, \vec{U}_r и \vec{U}_m .

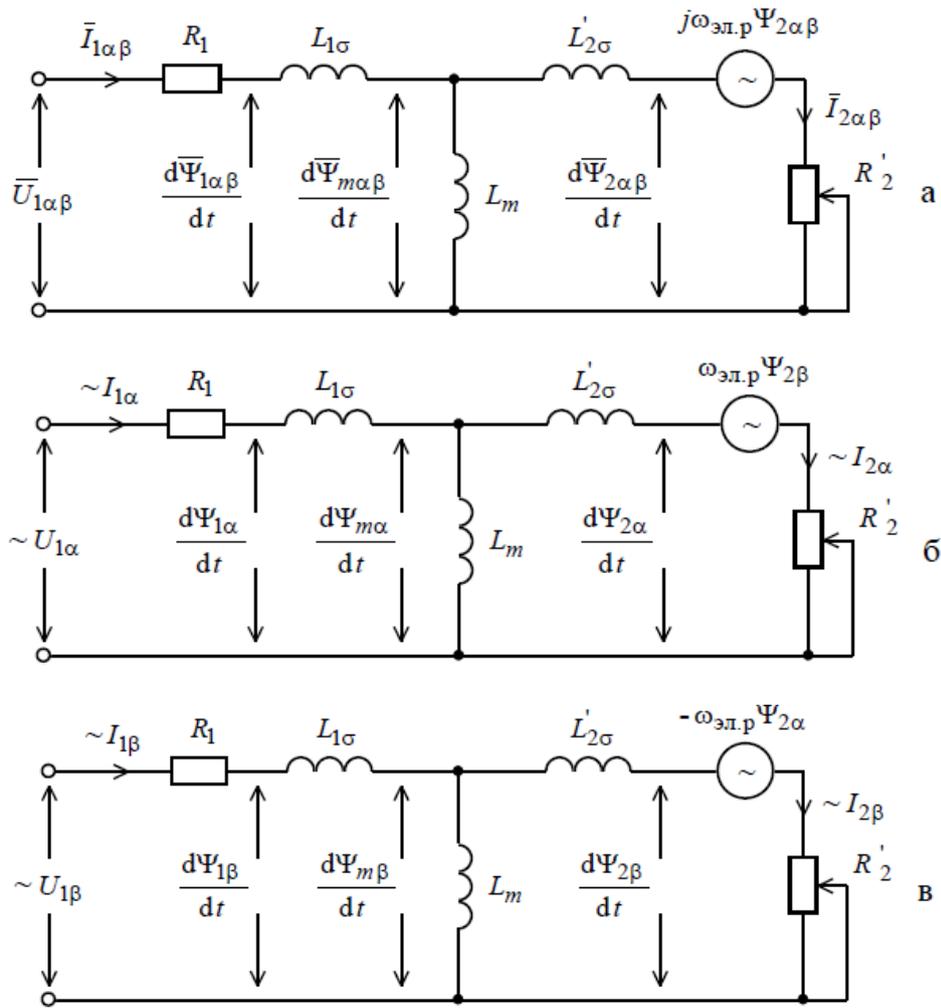


Рисунок. 1.6.4. Схема замещения асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором в неподвижной статорной системе координат α, β :
 а – в векторной форме, б – по оси α , в – по оси β

В уравнениях цепей с гармоническими входными воздействиями частоты $\omega_{эл1}$ в установившемся режиме оператор p может быть заменен на $j \cdot \omega_{эл1}$ [20]. Тогда система уравнений (1.6.10) в установившемся режиме работы при постоянной скорости двигателя ($\omega_{эл.п} = z_p \cdot \omega = \text{const}$) приводится к виду:

$$\begin{aligned} \bar{U}_{1\alpha\beta} &= R_1 \cdot \bar{I}_{1\alpha\beta} + j \cdot \omega_{эл.п} \cdot L_1 \cdot \bar{I}_{1\alpha\beta} + j \cdot \omega_{эл.п} \cdot L_m \cdot \bar{I}_{2\alpha\beta}; \\ 0 &= \frac{R_2'}{s} \cdot \bar{I}_{2\alpha\beta} + j \cdot \omega_{эл.п} \cdot L_2' \cdot \bar{I}_{2\alpha\beta} + j \cdot \omega_{эл.п} \cdot L_m \cdot \bar{I}_{1\alpha\beta}, \end{aligned} \quad (1.6.12)$$

Уравнениям (1.6.12) соответствует схема замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в неподвижной статорной системе координат α, β , приведенная на рис. 1.6.5, а, которая может быть преобразована

к виду, показанному на рис. 1.6.5, б, где $s_{abc} = \omega_{эл1} - \omega_{эл,r}$ – абсолютное скольжение.

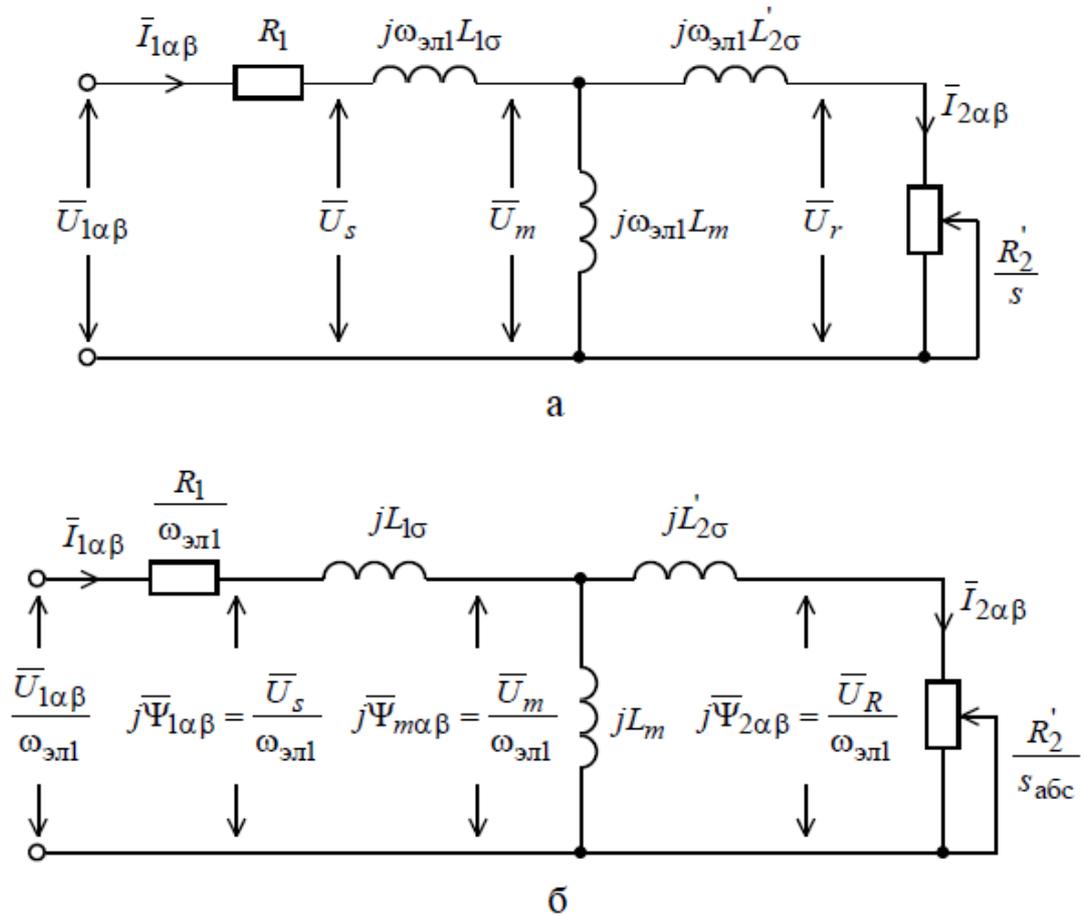


Рисунок 1.6.5. Схема замещения асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором в неподвижной статорной системе координат α, β для установившегося режима работы при постоянной скорости двигателя: а – исходная, б – преобразованная

При постоянной скорости вращения двигателя $\omega = \text{const}$ векторы напряжений, токов и потокосцеплений в установившемся режиме будут вращаться синхронно с полем статора со скоростью $\omega_{эл1} = 2\pi \cdot f_1$ и иметь постоянные амплитуды, а их проекции на оси статорной системы координат α и β будут представлять собой синусоидальные зависимости с частотой f_1 .

Рассмотрим математическое описание и структурную схему асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в неподвижной системе координат α, β приведенную на рис. 1.6.8.

С целью упрощения дальнейших расчетов является необходимым преобразование структурной схемы асинхронного двигателя с помощью выделения из апериодических звеньев, звенья идеального интегрирования, которые охвачены отрицательной обратной связью.

Эквивалентная передаточная функция звена охваченного обратной связью состоит из отношения, где в числителе находится передаточная функции звена прямой связи, а в знаменателе единица плюс произведение передаточной функции звена, находящегося в прямой связи, и передаточной функции звена, находящегося в контуре обратной связи (рис. 1.6.6). Таким образом можно провести эквивалентное преобразование тем самым заменив апериодическое звено звеном идеального интегрирования, охваченным отрицательной обратной связью [22].

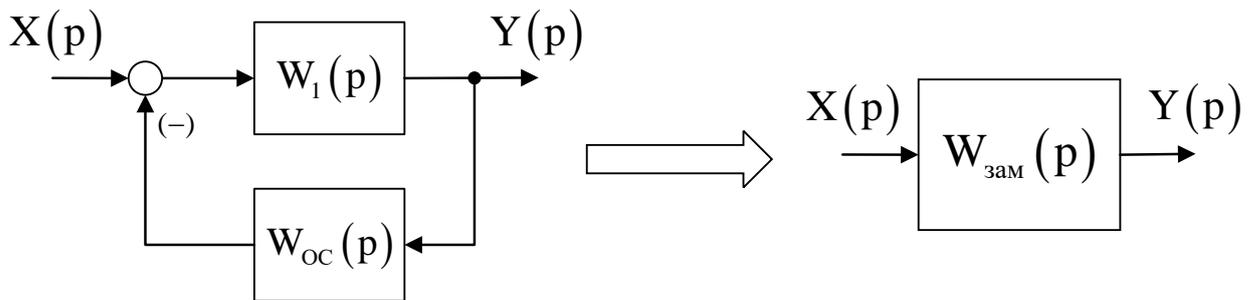


Рисунок 1.6.6. Преобразование апериодического звена как звена, охваченного отрицательной обратной связью

$$W_{\text{зам}}(p) = \frac{W_1(p)}{1 + W_1(p) \cdot W_{\text{oc}}(p)};$$

Также используя правила переноса звена через сумматор (рис. 1.6.7) [22]:

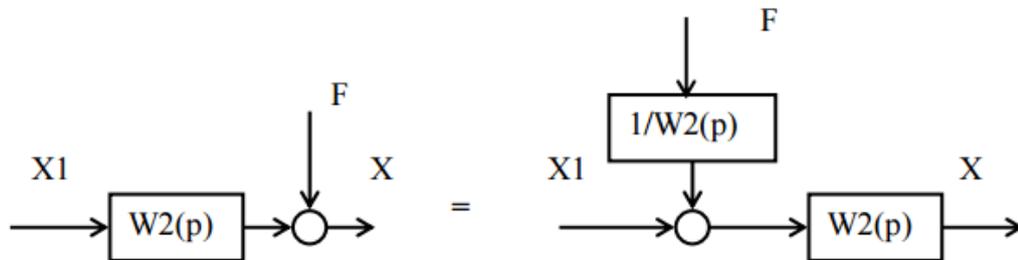


Рисунок 1.6.7. Переноса звена через сумматор

Получаем модифицированную структурную схему АД с учетом замены апериодических звеньев на интеграторы, охваченные отрицательными обратными связями (рис. 1.6.9).

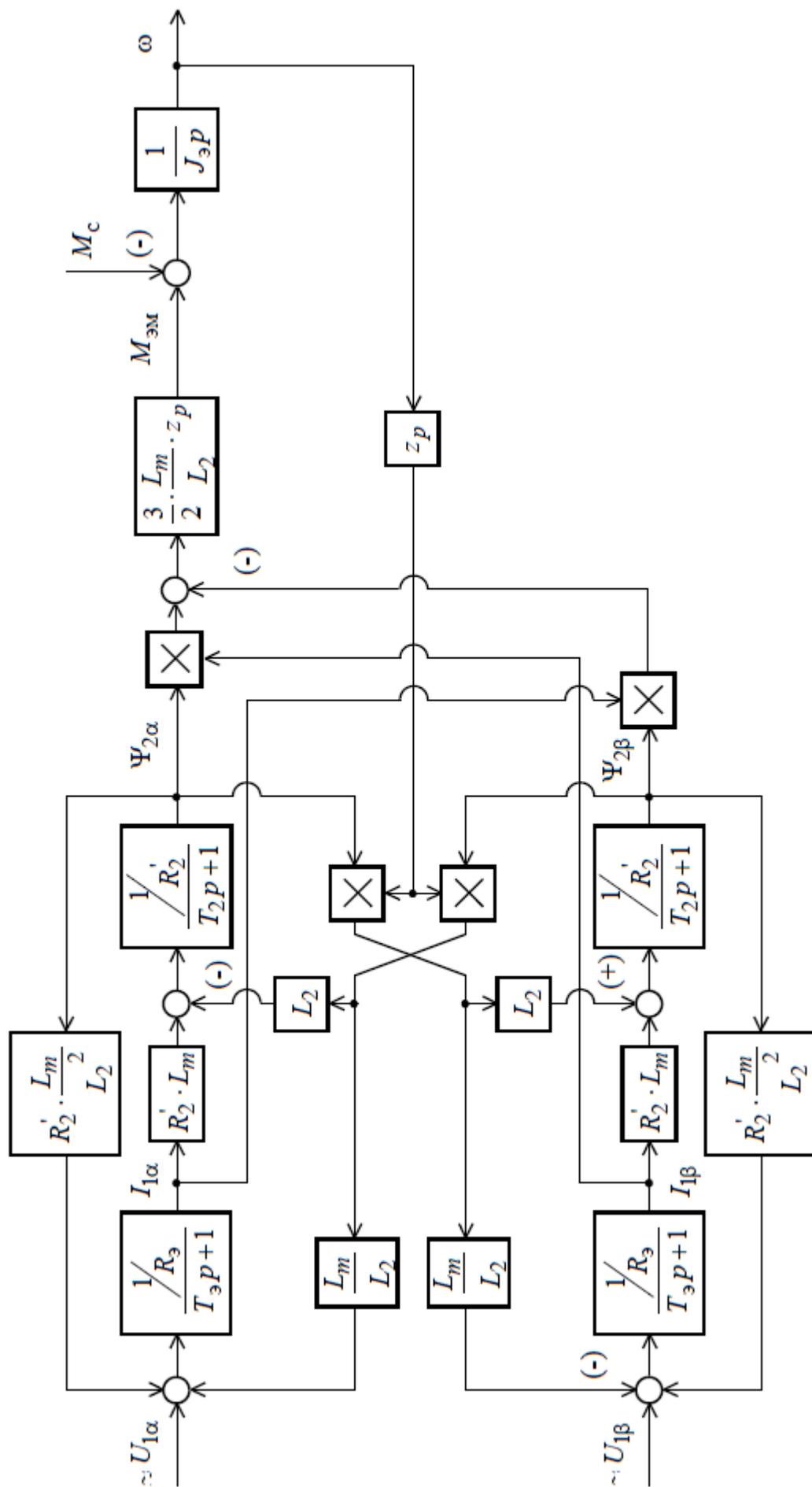


Рисунок 1.6.8. Структурная схема асинхронного электродвигателя в неподвижной системе координат статора α, β

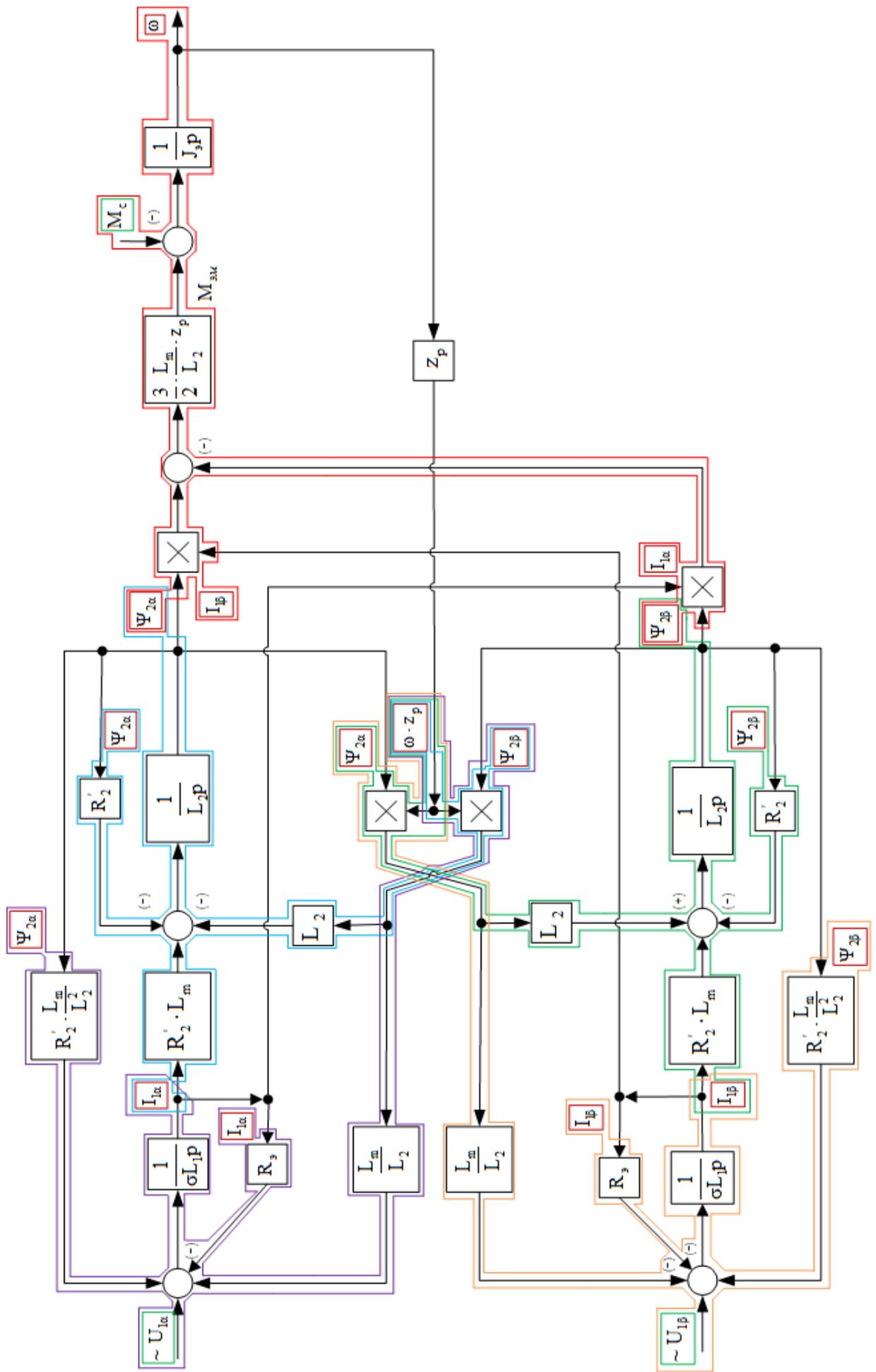


Рисунок 1.6.9. Структурная схема АД с учетом явного выделения всех интегрирующих звеньев

Обозначение на рисунке 1.6.9:

- Красный контур – контурная линия, выделяющая механическую подсистему АД в неподвижной системе координат статора α , β .
- Синий контур – контурная линия, выделяющая электромагнитную подсистему ротора по проекции α АД в неподвижной системе координат статора α , β .
- Зеленый контур – контурная линия, выделяющая электромагнитную подсистему ротора по проекции β АД в неподвижной системе координат статора α , β .
- Фиолетовый контур – контурная линия, выделяющая электромагнитную подсистему статора по проекции α АД в неподвижной системе координат статора α , β .
- Оранжевый контур – контурная линия, выделяющая электромагнитную подсистему статора по проекции β АД в неподвижной системе координат статора α , β .
- Зелеными прямоугольниками обозначены входные управляющие и возмущающие воздействия.
- Красными прямоугольниками обозначены переменные состояния модели АД.

Система уравнений, которая описывает работу асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в неподвижной системе координат α, β , полученная на основе уравнений (1.6.7) – (1.6.9), имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_{1\alpha}}{dt} = \frac{1}{\sigma \cdot L_1} \cdot U_{1\alpha} - \frac{R_3}{\sigma \cdot L_1} \cdot I_{1\alpha} + \frac{R_2' \cdot L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2} \cdot \Psi_{2\alpha} + \\ \quad + \frac{L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\beta}; \\ \frac{dI_{1\beta}}{dt} = \frac{1}{\sigma \cdot L_1} \cdot u_{1\beta} - \frac{R_3}{\sigma \cdot L_1} \cdot I_{1\beta} + \frac{R_2' \cdot L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2} \cdot \Psi_{2\beta} - \\ \quad - \frac{L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\alpha}; \\ \frac{d\Psi_{2\alpha}}{dt} = -\frac{R_2'}{L_2} \cdot \Psi_{2\alpha} + \frac{R_2' \cdot L_m}{L_2} \cdot I_{1\alpha} - z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\beta}; \\ \frac{d\Psi_{2\beta}}{dt} = -\frac{R_2'}{L_2} \cdot \Psi_{2\beta} + \frac{R_2' \cdot L_m}{L_2} \cdot I_{1\beta} + z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\alpha}; \\ M_{эм} = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot (\Psi_{2\alpha} \cdot I_{1\beta} - \Psi_{2\beta} \cdot I_{1\alpha}); \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (M_{эм} - M_c) \end{array} \right. \quad (1.6.13)$$

где

$U_{1\alpha} = U_{1m} \cdot \sin(2\pi \cdot f_1) = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \sin(2\pi \cdot f_1)$ – синусоидальная по форме составляющая напряжения статора по оси α системы координат α, β, B ;

$U_{1\beta} = U_{1m} \cdot \cos(2\pi \cdot f_1) = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \cos(2\pi \cdot f_1)$ – косинусоидальная по форме составляющая напряжения статора по оси β системы координат α, β, B ;

$U_{1m} = \sqrt{2} \cdot U_1$ – амплитудное значение фазного напряжения обмотки статора, В;

U_1 – действующее значение фазного напряжения обмотки статора, В;

f_1 – частота напряжения статора, Гц;

$I_{1\alpha}, I_{1\beta}$ – составляющие тока статора в системе координат α, β, A ;

$\Psi_{2\alpha}, \Psi_{2\beta}$ – составляющие потокосцепления ротора в системе координат α, β , Вб;

$M_{эм}$ – электромагнитный момент двигателя, Н·м;

M_c – момент статического сопротивления на валу двигателя, включая собственный момент трения двигателя, Н·м;

$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2}$ – коэффициент рассеяния;

J – момент инерции двигателя, кг·м².

Система уравнений (1.6.13) в операторной форме записи имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{1\alpha} = R_3 \cdot (T_3 \cdot p + 1) \cdot I_{1\alpha} - \frac{R_2' \cdot L_m}{L_2^2} \cdot \Psi_{2\alpha} - \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\beta}; \\ U_{1\beta} = R_3 \cdot (T_3 \cdot p + 1) \cdot I_{1\beta} - \frac{R_2' \cdot L_m}{L_2^2} \cdot \Psi_{2\beta} + \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\alpha}; \\ 0 = (T_2 \cdot p + 1) \cdot \Psi_{2\alpha} - L_m \cdot I_{1\alpha} - \frac{L_2}{R_2'} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\beta}; \\ 0 = (T_2 \cdot p + 1) \cdot \Psi_{2\beta} - L_m \cdot I_{1\beta} + \frac{L_2}{R_2'} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\alpha}; \\ M_{эм} = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot (\Psi_{2\alpha} \cdot I_{1\beta} - \Psi_{2\beta} \cdot I_{1\alpha}); \\ \omega = \frac{1}{J \cdot p} \cdot (M_{эм} - M_c), \end{array} \right. \quad (1.6.14)$$

где

$$R_3 = R_1 + R_2' \cdot \frac{L_m^2}{L_2^2}; \quad T_3 = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_3}; \quad T_2 = \frac{L_2}{R_2'}.$$

Уравнениям системы (1.6.14) соответствует структурная схема асинхронного двигателя с учетом явного выделения всех интегрирующих звеньев, приведенная на рис. 1.6.9.

В данном параграфе составлено математическое описание погружного АД в форме системы дифференциальных уравнений в нормальной форме Коши, в операторной форме и форме структурной схемы. Обоснован переход от

трехфазной естественной системы координат к двухфазной системе координат α , β .

1.7. Разностные уравнения

Перейдем разностным уравнениям необходимые для математического описания дискретных систем. По своей структуре они похожи дифференциальные уравнения в непрерывных системах. Для полного понимания разностных уравнений или схем рассмотрим рисунок 1.7, где изображена дискретная функция. Определим нулевую конечную разность, что является самим значением дискретной функции:

$$\Delta_0 x(i\Delta t) = x(i\Delta t)$$

Данное понятие аналогично нулевой производной непрерывной функции.

Первая конечная разность определяется как:

$$\Delta_1 x(i\Delta t) = x(i\Delta t) - x[(i-1)\Delta t]$$

где $x[(i-1)\Delta t]$ – значение функции на предыдущем шаге (рис. 1.7).

В свою очередь, $\Delta_1 x(i\Delta t)$ определяет приращение искомой функции на период.

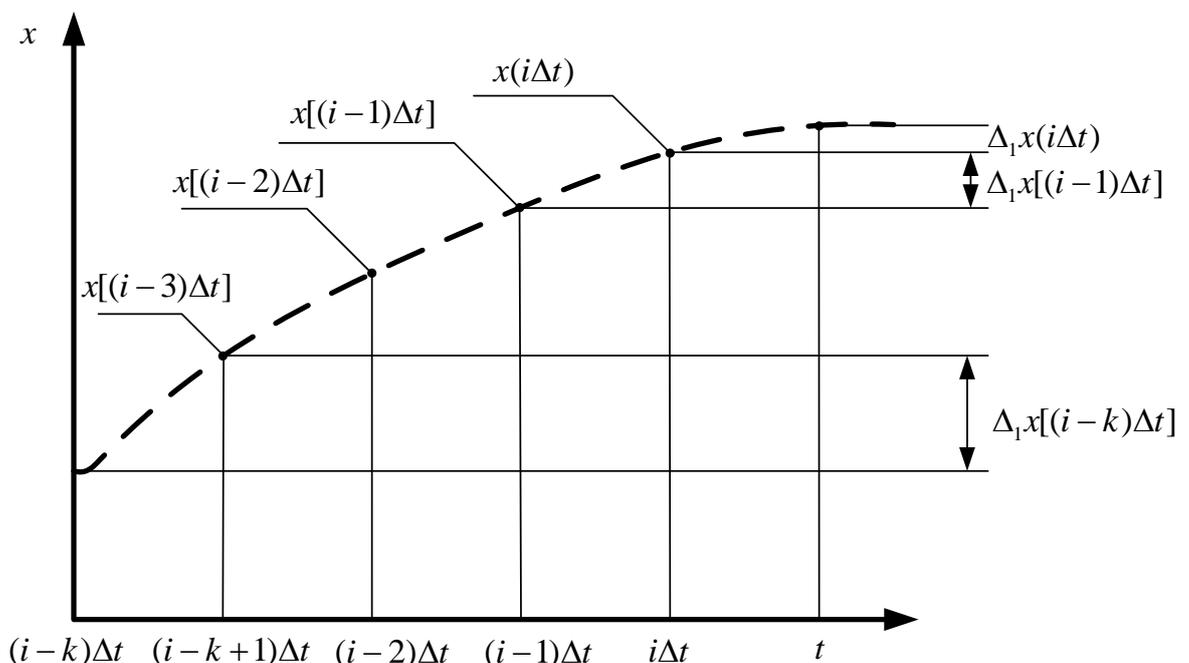


Рисунок 1.7. Определение конечных разностей

Вторая разность является разностью первых разностей:

$$\Delta_2 x(i\Delta t) = x(i\Delta t) - 2x[(i-1)\Delta t] + 2x[(i-2)\Delta t].$$

Третья разность равна:

$$\Delta_3 x[i\Delta t] = x[i\Delta t] - 3x[(i-1)\Delta t] + 3x[(i-2)\Delta t] - 3x[(i-2)\Delta t] + x[(i-3)\Delta t].$$

Соответственно, в общем случае, разность k -го порядка:

$$\begin{aligned} \Delta_k x[i\Delta t] = & x[i\Delta t] - kx[(i-1)\Delta t] + C_2 x[(i-2)\Delta t] - C_3 x[(i-3)\Delta t] + \dots \\ & \dots + C_{k-1} x[(i-k+1)\Delta t] + x[(i-k)\Delta t], \end{aligned}$$

где C_k – число сочетаний из k .

Такие разностные уравнения дискретной системы устанавливает связь между входными x и выходными y дискретными переменными и данное соотношение записывается в виде:

$$\begin{aligned} a_0 y(i\Delta t) + a_1 y[(i-1)\Delta t] + \dots + a_n y[(i-n)\Delta t] = \\ = b_0 x(\Delta t) + b_1 x[(i-1)\Delta t] + \dots + b_m x[(i-m)\Delta t] \end{aligned} \quad (1.7.1)$$

Уравнения вида (1.7.1) являются разностными в рекуррентной форме записи, из которой можно определить значение выходной переменной:

$$\begin{aligned} y(i\Delta t) = \frac{1}{a_0} \{ b_0 x(i\Delta t) + b_1 x[(i-1)\Delta t] + \dots + b_m x[(i-m)\Delta t] \} - \\ - a_1 y[(i-1)\Delta t] - a_2 y[(i-2)\Delta t] - \dots - a_n y[(i-n)\Delta t]. \end{aligned}$$

Полученная формула является алгоритмом вычисления выходной переменной, при известных значениях входной переменной в предшествующих моментах времени t и значениях выходной переменной, которая определена на предыдущих этапах вычислений.

Таким образом доказана необходимость и приведены основные приемы составления разностных уравнений.

1.8. Выводы по главе

1. Показано, что при имеющихся в реальности России осложненных условий эксплуатации нефтедобывающих установок электроприводный способ добычи является наиболее перспективным.

2. Проведен анализ факторов, вызывающих осложнения при эксплуатации скважин с применением УЭЦН, что необходимо учитывать при проектировании специализированных ЭП.

3. Показано, что существует проблема заклинивания или подклинивания насоса вследствие осложненных условий эксплуатации. Для решения данной проблемы современные производители электрооборудования для УЭЦН предусматривают специальные программно-алгоритмические решения такие как толчковые режимы и смена направления вращения ротора.

3. Обоснована необходимость построения специализированного электропривода для установок ЭЦН с позиции теории адаптивных систем управления электроприводов. Предложен и обоснован вариант построения адаптивного электропривода УЭЦН позволяющий приспосабливаться к осложненным условиям эксплуатации скважин.

4. Показаны особенности конструкции погружных асинхронных ЭД как объектов идентификации.

5. Исследуемый погружной АД представлен как нестационарная динамическая система. С этих позиций доказана необходимость динамической идентификации параметров погружного ЭД.

6. Составлено математическое описание погружного АД в форме системы дифференциальных уравнений в нормальной форме Коши, в операторной форме и форме структурной схемы. Обоснован переход от трехфазной естественной системы координат к двухфазной системе координат α , β .

7. Доказана необходимость и приведены основные приемы составления разностных уравнений.

2. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОГРУЖНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

2.1. Разработка метода идентификации параметров погружных асинхронных двигателей

Рассмотрим метод идентификации параметров динамического объекта, описанного системой дифференциальных уравнений четвертого порядка, а именно погружного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Система (1.6.13) является громоздкой и неэффективной из-за наличия переменных состояний ротора, измерение которых в реальных условиях технически нецелесообразно, поэтому следуя рекомендациям, предложенным в работе [26] систему (1.6.13) можно преобразовать следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{di_{1\alpha}}{dt} = \frac{1}{\sigma \cdot L_1} \cdot U_{1\alpha} - \gamma \cdot i_{1\alpha} + \frac{\beta}{T_2} \cdot \Psi_{2\alpha} + z_p \cdot \beta \cdot \omega \cdot \Psi_{2\beta} \\ \frac{di_{1\beta}}{dt} = \frac{1}{\sigma \cdot L_1} \cdot U_{1\beta} - \gamma \cdot i_{1\beta} + \frac{\beta}{T_2} \cdot \Psi_{2\beta} + z_p \cdot \beta \cdot \omega \cdot \Psi_{2\alpha} \\ \Psi_{2\alpha} = \int \left(\frac{L_m}{T_2} \cdot i_{1\alpha} - \frac{\Psi_{2\alpha}}{T_2} - z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\beta} \right) dt \\ \Psi_{2\beta} = \int \left(\frac{L_m}{T_2} \cdot i_{1\beta} - \frac{\Psi_{2\beta}}{T_2} - z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\alpha} \right) dt \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m \cdot z_p}{L_2 \cdot J} \cdot (\Psi_{2\alpha} \cdot i_{1\beta} - \Psi_{2\beta} \cdot i_{1\alpha}) - \frac{M_c}{J} \end{cases} \quad (2.1.1)$$

где $\beta = \frac{L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2}$, $\gamma = \frac{R_1}{\sigma \cdot L_1} + \frac{R'_2 \cdot L_m^2}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2^2}$, $\frac{1}{T_2} = \frac{R'_2}{L_2}$, T_2 – постоянная времени.

После многочисленных постановок и замен в системе (2.1.1) получаем уравнение:

$$\begin{aligned} K_1 \cdot i_{1\alpha} + K_2 \cdot U_{1\alpha} + K_3 \cdot z_p \cdot \omega \cdot i_{1\beta} + K_4 \cdot \left(\frac{dU_{1\alpha}}{dt} + z_p \cdot \omega \cdot U_{1\beta} \right) + K_5 \cdot \frac{di_{1\alpha}}{dt} = \\ = \frac{d^2 i_{1\alpha}}{dt^2} + z_p \cdot \omega \cdot \frac{di_{1\beta}}{dt}, \end{aligned} \quad (2.1.2)$$

где $K_1 = -\frac{R_1}{\sigma \cdot L_1 \cdot T_2}$, $K_2 = \frac{1}{\sigma \cdot L_1 \cdot T_2}$, $K_3 = -\frac{R_1}{\sigma \cdot L_1}$, $K_4 = \frac{1}{\sigma \cdot L_1}$, $K_5 = -\frac{R_1 \cdot L_2 + R'_2 \cdot L_1}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2}$.

С учётом интервала Δt дискретизации по времени измерительной системы перейдём от дифференциального уравнения (1.6.13) к системе разностных уравнений, записанных в матричном виде относительно текущего t_j

и предыдущих $t_{j-x\cdot k}=t_j-\Delta t\cdot k$ моментов времени при условии постоянства оценок параметров, где $x=0, 1, 2, \dots, 5$; k – коэффициент временной задержки.

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} i_{1\alpha_{j-1\cdot k}} & U_{1\alpha_{j-1\cdot k}} & z_p \cdot \omega_{j-1\cdot k} \cdot i_{1\beta_{j-1\cdot k}} & \left(\frac{dU_{1\alpha}}{dt} \right)_{j-1\cdot k} & z_p \cdot \omega_{j-1\cdot k} \cdot U_{1\beta_{j-1\cdot k}} \\ i_{1\alpha_{j-2\cdot k}} & U_{1\alpha_{j-2\cdot k}} & z_p \cdot \omega_{j-2\cdot k} \cdot i_{1\beta_{j-2\cdot k}} & \left(\frac{dU_{1\alpha}}{dt} \right)_{j-2\cdot k} & z_p \cdot \omega_{j-2\cdot k} \cdot U_{1\beta_{j-2\cdot k}} \\ i_{1\alpha_{j-3\cdot k}} & U_{1\alpha_{j-3\cdot k}} & z_p \cdot \omega_{j-3\cdot k} \cdot i_{1\beta_{j-3\cdot k}} & \left(\frac{dU_{1\alpha}}{dt} \right)_{j-3\cdot k} & z_p \cdot \omega_{j-3\cdot k} \cdot U_{1\beta_{j-3\cdot k}} \\ i_{1\alpha_{j-4\cdot k}} & U_{1\alpha_{j-4\cdot k}} & z_p \cdot \omega_{j-4\cdot k} \cdot i_{1\beta_{j-4\cdot k}} & \left(\frac{dU_{1\alpha}}{dt} \right)_{j-4\cdot k} & z_p \cdot \omega_{j-4\cdot k} \cdot U_{1\beta_{j-4\cdot k}} \\ i_{1\alpha_{j-5\cdot k}} & U_{1\alpha_{j-5\cdot k}} & z_p \cdot \omega_{j-5\cdot k} \cdot i_{1\beta_{j-5\cdot k}} & \left(\frac{dU_{1\alpha}}{dt} \right)_{j-5\cdot k} & z_p \cdot \omega_{j-5\cdot k} \cdot U_{1\beta_{j-5\cdot k}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ K_4 \\ K_5 \end{bmatrix} = \\
 & = \begin{bmatrix} \left(\frac{d^2 i_{1\alpha}}{dt^2} \right)_{j-1\cdot k} + z_p \cdot \omega_{j-1\cdot k} \cdot \left(\frac{d i_{1\beta}}{dt} \right)_{j-1\cdot k} \\ \left(\frac{d^2 i_{1\alpha}}{dt^2} \right)_{j-2\cdot k} + z_p \cdot \omega_{j-2\cdot k} \cdot \left(\frac{d i_{1\beta}}{dt} \right)_{j-2\cdot k} \\ \left(\frac{d^2 i_{1\alpha}}{dt^2} \right)_{j-3\cdot k} + z_p \cdot \omega_{j-3\cdot k} \cdot \left(\frac{d i_{1\beta}}{dt} \right)_{j-3\cdot k} \\ \left(\frac{d^2 i_{1\alpha}}{dt^2} \right)_{j-4\cdot k} + z_p \cdot \omega_{j-4\cdot k} \cdot \left(\frac{d i_{1\beta}}{dt} \right)_{j-4\cdot k} \\ \left(\frac{d^2 i_{1\alpha}}{dt^2} \right)_{j-5\cdot k} + z_p \cdot \omega_{j-5\cdot k} \cdot \left(\frac{d i_{1\beta}}{dt} \right)_{j-5\cdot k} \end{bmatrix} \quad (2.1.3)
 \end{aligned}$$

где $i_{1\alpha_{j-x\cdot k}}, i_{1\beta_{j-x\cdot k}}$ – составляющие тока статора (фазные токи обмотки статора) в системе координат α, β ; $\left(\frac{d i_{1\alpha}}{dt} \right)_{j-x\cdot k}, \left(\frac{d i_{1\beta}}{dt} \right)_{j-x\cdot k}$ – первые производные токов статора (фазные токи обмотки статора) в системе координат α, β ; $\left(\frac{d^2 i_{1\alpha}}{dt^2} \right)_{j-x\cdot k}$ – вторые производные токов по оси α ; $U_{1\alpha_{j-x\cdot k}}, U_{1\beta_{j-x\cdot k}}$ – составляющие напряжения статора по оси α и β ; $\left(\frac{d U_{1\alpha}}{dt} \right)_{j-x\cdot k}$ – производные напряжения статора по оси α на $j, j-1\cdot k, j-2\cdot k, \dots, j-5\cdot k$ шагах соответственно.

В системе (2.1.3) вектором неизвестных параметров является $[K_1, K_2, K_3, K_4, K_5]^T$, матрица

$$\begin{bmatrix} i_{1\alpha_{j-1k}} & U_{1\alpha_{j-1k}} & z_p \cdot \omega_{j-1k} \cdot i_{1\beta_{j-1k}} & \left(\frac{dU_{1\alpha}}{dt} \right)_{j-1k} & z_p \cdot \omega_{j-1k} \cdot U_{1\beta_{j-1k}} \\ i_{1\alpha_{j-2k}} & U_{1\alpha_{j-2k}} & z_p \cdot \omega_{j-2k} \cdot i_{1\beta_{j-2k}} & \left(\frac{dU_{1\alpha}}{dt} \right)_{j-2k} & z_p \cdot \omega_{j-2k} \cdot U_{1\beta_{j-2k}} \\ i_{1\alpha_{j-3k}} & U_{1\alpha_{j-3k}} & z_p \cdot \omega_{j-3k} \cdot i_{1\beta_{j-3k}} & \left(\frac{dU_{1\alpha}}{dt} \right)_{j-3k} & z_p \cdot \omega_{j-3k} \cdot U_{1\beta_{j-3k}} \\ i_{1\alpha_{j-4k}} & U_{1\alpha_{j-4k}} & z_p \cdot \omega_{j-4k} \cdot i_{1\beta_{j-4k}} & \left(\frac{dU_{1\alpha}}{dt} \right)_{j-4k} & z_p \cdot \omega_{j-4k} \cdot U_{1\beta_{j-4k}} \\ i_{1\alpha_{j-5k}} & U_{1\alpha_{j-5k}} & z_p \cdot \omega_{j-5k} \cdot i_{1\beta_{j-5k}} & \left(\frac{dU_{1\alpha}}{dt} \right)_{j-5k} & z_p \cdot \omega_{j-5k} \cdot U_{1\beta_{j-5k}} \end{bmatrix}$$

– это матрица связи между неизвестными параметрами и внешними воздействиями, а

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{d^2 i_{1\alpha}}{dt^2} \right)_{j-1k} + z_p \cdot \omega_{j-1k} \cdot \left(\frac{d i_{1\beta}}{dt} \right)_{j-1k} \\ \left(\frac{d^2 i_{1\alpha}}{dt^2} \right)_{j-2k} + z_p \cdot \omega_{j-2k} \cdot \left(\frac{d i_{1\beta}}{dt} \right)_{j-2k} \\ \left(\frac{d^2 i_{1\alpha}}{dt^2} \right)_{j-3k} + z_p \cdot \omega_{j-3k} \cdot \left(\frac{d i_{1\beta}}{dt} \right)_{j-3k} \\ \left(\frac{d^2 i_{1\alpha}}{dt^2} \right)_{j-4k} + z_p \cdot \omega_{j-4k} \cdot \left(\frac{d i_{1\beta}}{dt} \right)_{j-4k} \\ \left(\frac{d^2 i_{1\alpha}}{dt^2} \right)_{j-5k} + z_p \cdot \omega_{j-5k} \cdot \left(\frac{d i_{1\beta}}{dt} \right)_{j-5k} \end{bmatrix},$$

– матрица внешних воздействий.

вектор неизвестных параметров: $[K_1, K_2, K_3, K_4, K_5]^T$.

Однако коэффициент временной задержки не может быть принят на основании [27] в связи с усложнением матрицы взаимодействия между неизвестными параметрами и внешними воздействиями внешних и матрицы внешних воздействий. Так же особую роль играет сильное влияние каждого элемента матрицы на другие элементы, в связи с представленным математическим описанием. Соответственно необходимо провести исследования влияния коэффициента временной задержки на получения оценок. На основании [34], был принят коэффициент временной задержки $k=36$, что является оптимальным для улучшения степени обусловленности матрицы связи между неизвестными параметрами и внешними воздействиями.

2.2. Решение трудностей, связанных с цифровым дифференцированием

Цифровое дифференцирование в настоящее время - достаточно серьезная проблема при идентификации параметров [28]. Ее суть заключается в следующем: нахождение идеального метода замены алгебраических производных на специальную функцию, которая может включать в себя, только значения тока и напряжения в определенные промежутки времени. Однако при неправильной замене происходит смещение оценок или матрицы являются вырожденными, что является недостоверным результатом идентификации.

В данной работе рассмотрим три основных метода цифрового дифференцирования: метод многоточечной аппроксимации, метод обратной разности и использование фильтров Ланцоша.

1. Метод многоточечной аппроксимации, представленный в [29]. Он служит для приближения производной, основная идея которого заключается в следующем. Имея значение функции в точке $x=x_0$, мы можем определить производную в данной точке используя разложения Тейлора:

$$f(x) = f(x_0) + (x - x_0)f'(x_0) + \frac{(x - x_0)^2}{2!} f''(x_0) + \frac{(x - x_0)^3}{3!} f'''(x_0) + \dots + \frac{(x - x_0)^n}{n!} f^n(x_0),$$

где $f(x_0)$ – значение функции в точке x_0 ;

$f'(x_0), f''(x_0), f'''(x_0), f^n(x_0)$ – значения первой, второй, третьей и n-ной производных в точке x_0 соответственно.

Для расчета производной необходимо использовать дополнительные точки, назовем их x_{-2}, x_{-1}, x_1, x_2 , которые расположены друг от друга на шаг равный шагу дискретизации нашей функции Δt . Все вышесказанное проиллюстрировано на рисунке 2.2.1.

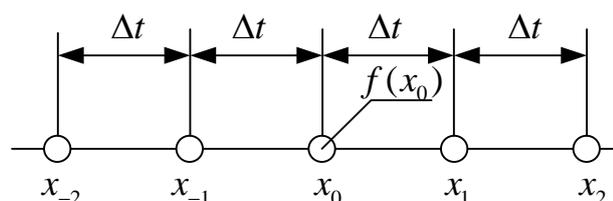


Рисунок 2.2.1. Вычисление значения в точке x_0

На основе вышеизложенного можно определить значение функции для любой точки. Рассмотрим получение значения функции в точке x_2 :

$$f_{x_2} = f_{x_0} - 2 \cdot \Delta t \cdot f'_{x_0} + 2 \cdot \Delta t^2 \cdot f''_{x_0} - \frac{4}{3} \Delta t^3 \cdot f'''_{x_0} + \frac{(2 \cdot \Delta t)^4}{4!} \cdot f^{(IV)}_{x_0} \quad (2.2.1)$$

В выражении (2.2.1) известными являются значения функций f_{x_2} и f_{x_0} , остальные же неизвестны. Таким образом, мы имеем выражение с 2-мя известными и четырьмя неизвестными значениями. Для дальнейших действий необходимо составить выражения в остальных точках x , на основе (2.2.1). Таким образом получаем четыре выражения с четырьмя неизвестными и из выражаем интересующую нас первую производную f'_{x_0} :

$$f'_{x_0} = \frac{1}{12 \cdot \Delta t} (f_{x_2} - 8f_{x_1} + 8f_{x_0} - f_{x_2}).$$

Вторую производную возможно получить таким же образом.

2. Метод обратной разности $x'(t_0) \approx \frac{x(t_0) - x(t_0 - \Delta t)}{\Delta t}$ [30]. Оценка погрешности

такой аппроксимации имеет вид: $\left| \frac{x(t_0) - x(t_0 - \Delta t)}{\Delta t} - x'(t_0) \right| \leq c_1 \int_{t_0 - \Delta t}^{t_0} |x''(\xi)| d\xi$, где c_1 –

константа, независимая от $x(t)$ и Δt и $x(t) \in C^{(2)}$ (т.е. $x(t)$ имеет на промежутке $[t_0, t_0 + \Delta t]$ непрерывные производные до второго порядка включительно).

3. Класс фильтров Ланцоша [31], общее уравнение которых имеет следующий вид:

$$y[nT] = \frac{3}{TN(N+1)(2N+1)} \sum_{k=0}^{2N} (N-k)x[(n-k)T],$$

где N – порядок фильтра.

В связи с тем, что статорные токи и напряжения двигателя в идеальном виде имеют синусоидальный характер, соответственно рассмотрим данные методы на получение первой производной от идеального синусоидального сигнала (рис. 2.2.2).

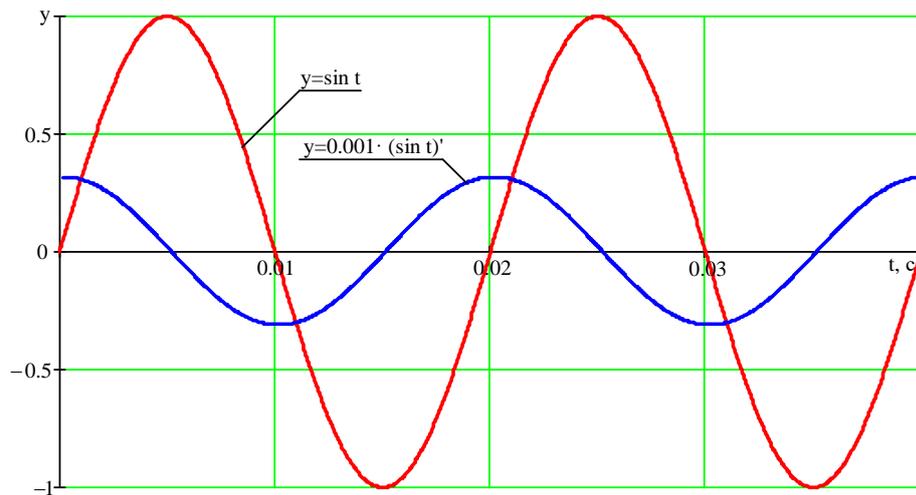


Рисунок 2.2.2. График функций $y = \sin t$ и $y = (\sin t)'$

Рассчитаем производную опорного сигнала по дискретным равноотстоящим отсчетам:

1. Методом многоточечной аппроксимации (рис. 2.2.3).

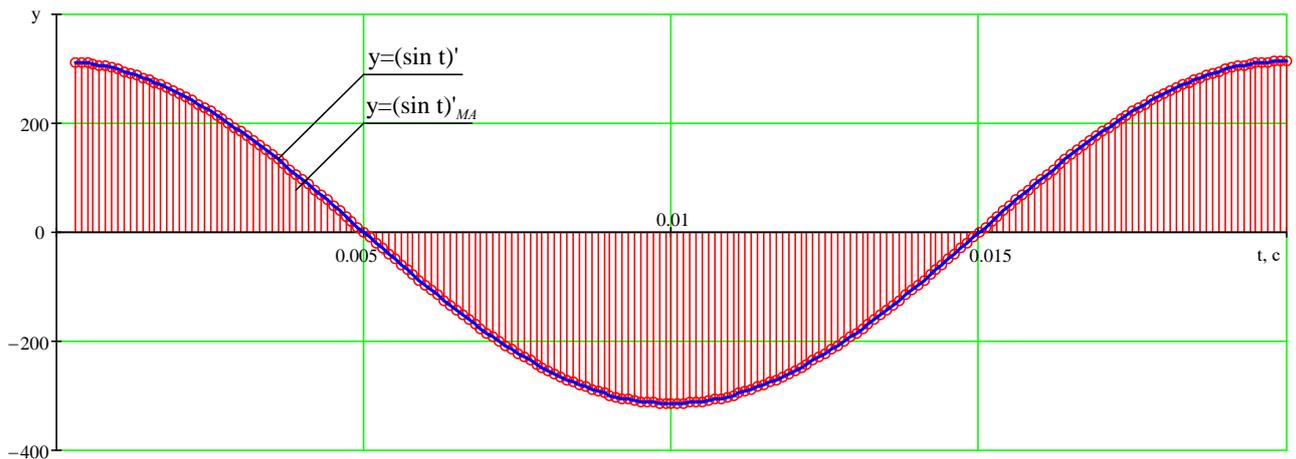


Рисунок 2.2.3. График функций $y = (\sin t)'$ и $y = (\sin t)'_{MA}$

Интегральная погрешность определяется по выражению:

$$\Delta = \frac{\sum_{j=3}^{200} \left| (\sin(t))' - (\sin(t))'_{MA} \right|}{\sum_{j=3}^{200} \left| (\sin(t))' \right|} \cdot 100\% = 3.19\%.$$

2. Методом обратной разности (рис. 2.2.4).

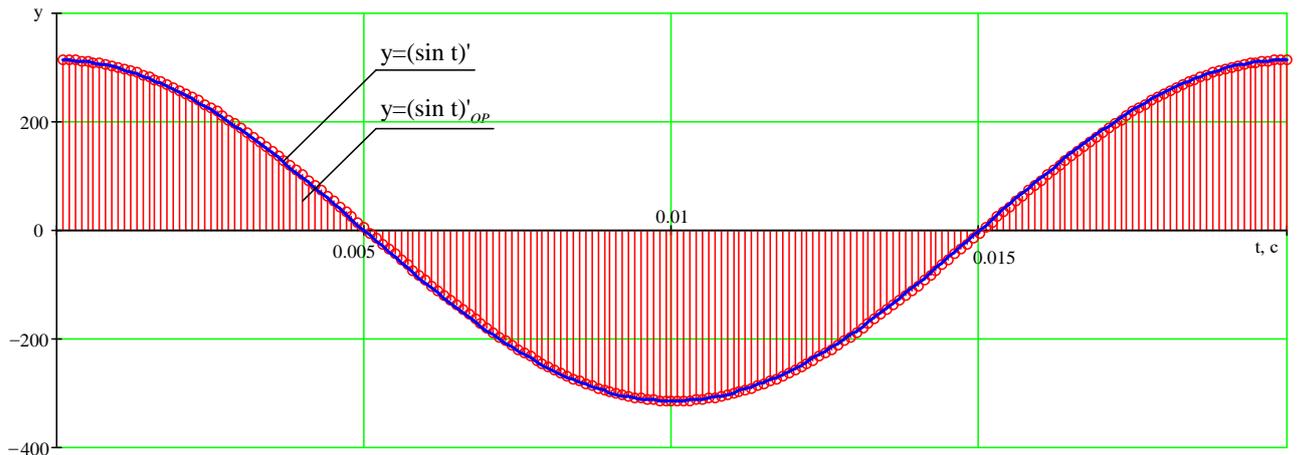


Рисунок 2.2.4. График функций $y=(\sin t)'$ и $y=(\sin t)'_{OP}$

Интегральная погрешность определяется по выражению:

$$\Delta = \frac{\sum_{j=1}^{200} |(\sin(t)' - \sin(t)'_{OP})|}{\sum_{j=1}^{200} |\sin(t)'|} \cdot 100\% = 1.571\%.$$

3. Фильтром Ланцоша 5-го порядка (рис. 2.2.5).

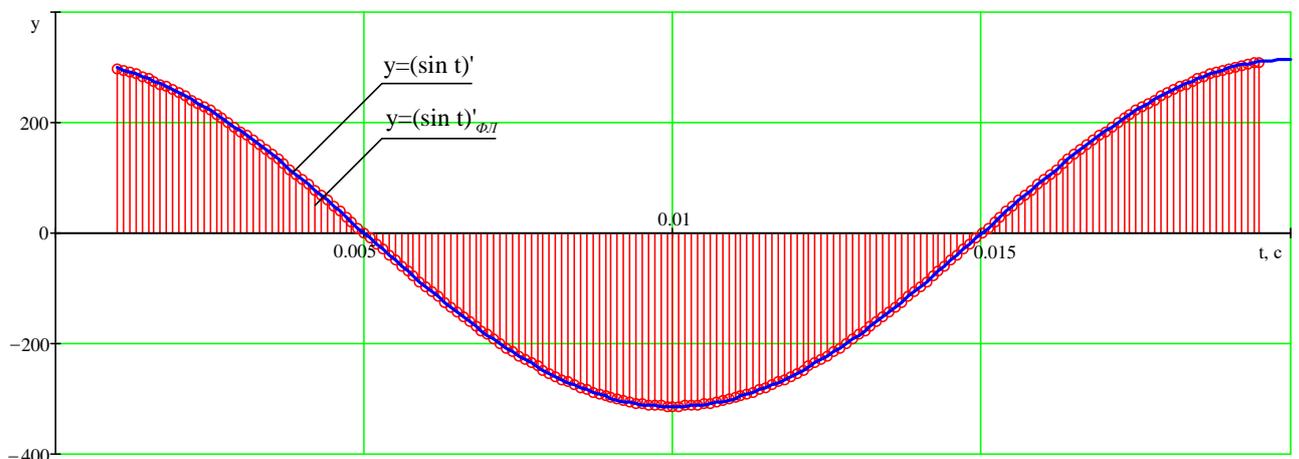


Рисунок 2.2.5. График функций $y=(\sin t)'$ и $y=(\sin t)'_{ФЛ}$

Интегральная погрешность определяется по выражению:

$$\Delta = \frac{\sum_{j=3}^{200} |(\sin(t)' - \sin(t)'_{ФЛ})|}{\sum_{j=3}^{200} |\sin(t)'|} \cdot 100\% = 0.292\%.$$

Рассчитаем производную зашумленного сигнала по дискретным равноотстоящим отсчетам:

1. Методом многоточечной аппроксимации (рис. 2.2.6).

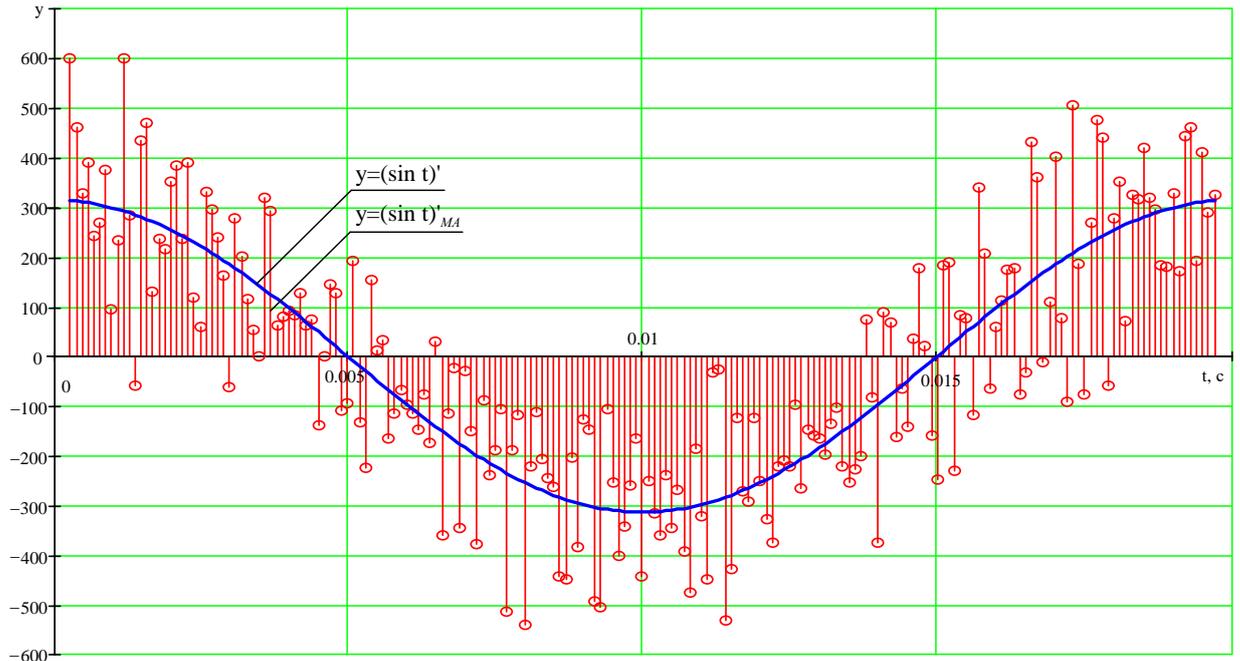


Рисунок 2.2.6. График функций $y=(\sin t)'$ и $y=(\sin t)'_{MA}$

Интегральная погрешность определяется по выражению:

$$\Delta = \frac{\sum_{j=3}^{197} \left| (\sin(t))' - \sin(t)'_{MA} \right|}{\sum_{j=3}^{197} \left| \sin(t)' \right|} \cdot 100\% = 56.103\%.$$

2. Методом обратной разности (рис. 2.2.7).

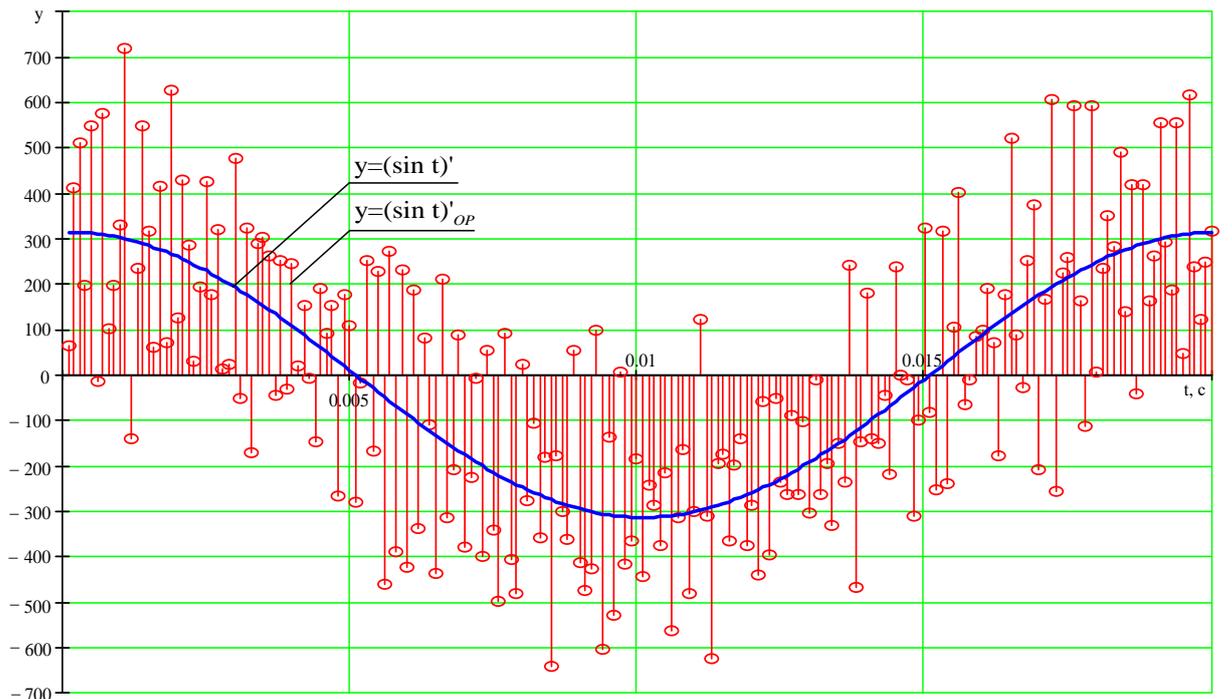


Рисунок 2.2.7. График функций $y=(\sin t)'$ и $y=(\sin t)'_{OP}$

Интегральная погрешность определяется по выражению:

$$\Delta = \frac{\sum_{j=1}^{200} \left| (\sin(t))' - \sin(t)'_{OP} \right|}{\sum_{j=1}^{200} \left| \sin(t)' \right|} \cdot 100\% = 84.108\%.$$

3. Фильтром Ланцоша 5-го порядка (рис. 2.2.8).

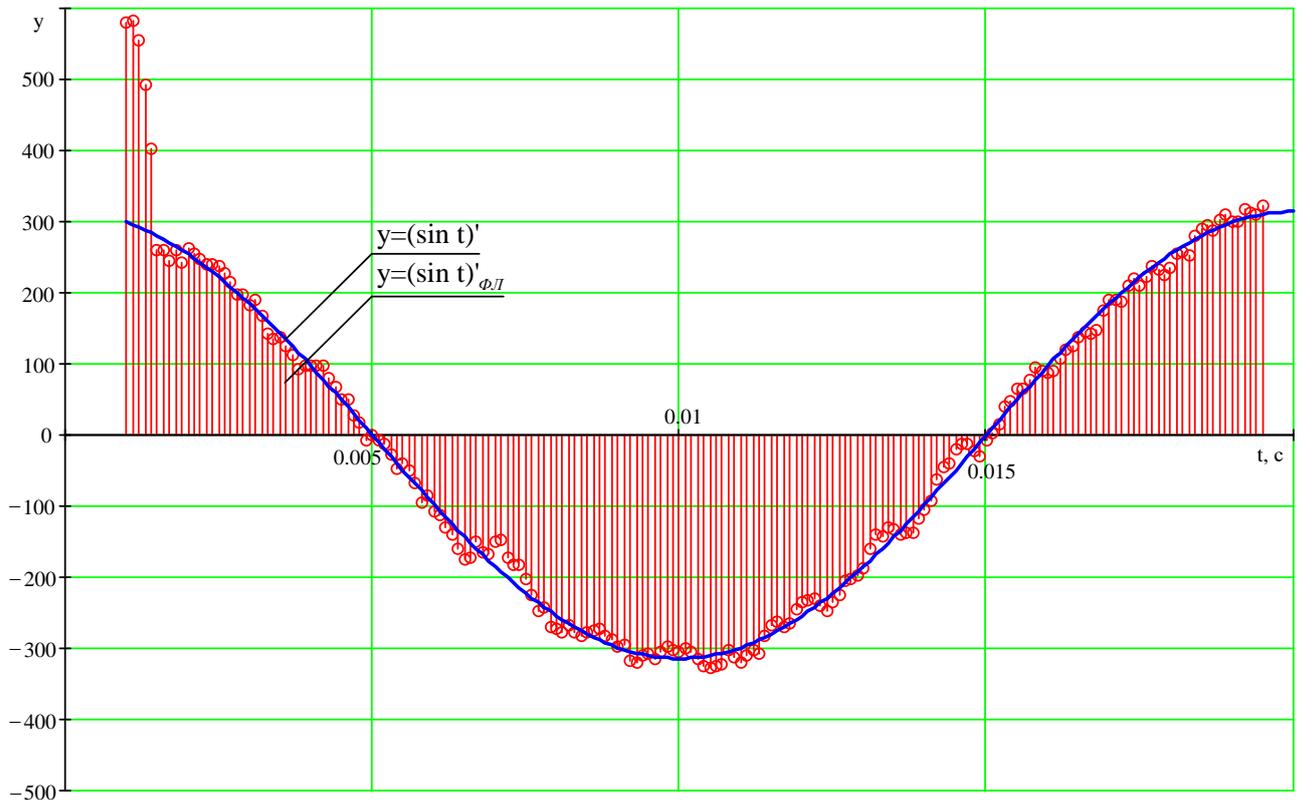


Рисунок 2.2.8. График функций $y=(\sin t)'$ и $y=(\sin t)'_{\text{ФЛ}}$

Интегральная погрешность определяется по выражению:

$$\Delta = \frac{\sum_{j=10}^{200} \left| (\sin(t))' - \sin(t)'_{\text{ФЛ}} \right|}{\sum_{j=10}^{200} \left| \sin(t)' \right|} \cdot 100\% = 5.788\%.$$

Сравнение методов цифрового дифференцирования представлено в таблице 2.2.1.

Таблица 2.2.1. Сравнение методов цифрового дифференцирования

	Погрешность		
	Метод многоточечной аппроксимации	Метод обратной разности	Фильтр Ланцоша 5-го порядка
Опорный сигнал	3,19%	1,571%	0,292%
Зашумленный сигнал	56,103%	84,108%	5,788%

Из полученных результатов можно сделать вывод о том, что наиболее перспективным решением является фильтр Ланцоша. Однако следует учитывать, что необходимо сдвигать функцию на одну точку назад, то есть получается, что в любой момент времени функция находится не на текущем шаге, а на $j-1$ шаге. Таким образом необходимо запоминать лишь одну предыдущую точку, что не сильно нагружает процессор платы сбора и обработки данных. Результаты сравнения фильтров Ланцоша различного порядка приведены ниже (рис. 2.2.9 и табл. 2.2.2)

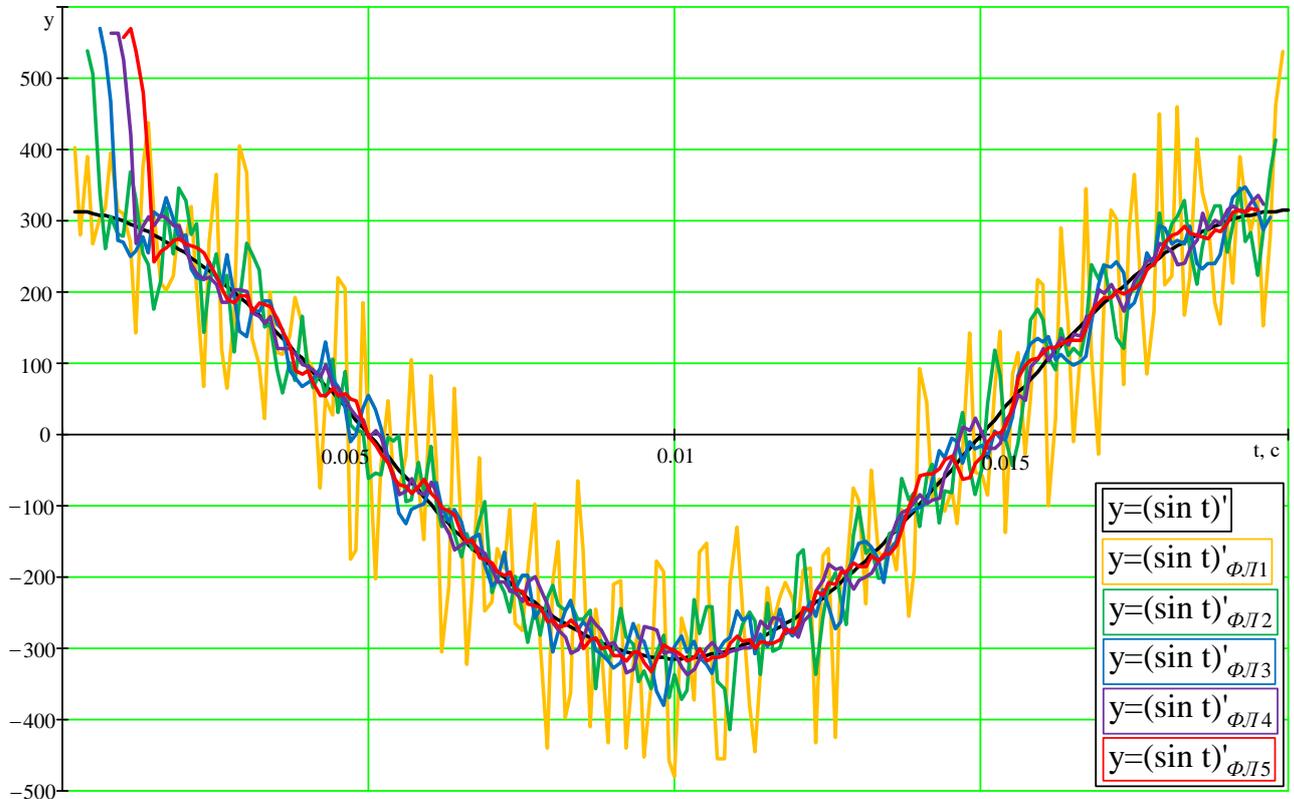


Рисунок 2.2.9. Сравнение фильтров Ланцоша различного порядка

Таблица 2.2.2. Сравнение фильтров Ланцоша различного порядка

	Погрешность				
	Фильтр Ланцоша 1-го порядка	Фильтр Ланцоша 2-го порядка	Фильтр Ланцоша 3-го порядка	Фильтр Ланцоша 4-го порядка	Фильтр Ланцоша 5-го порядка
Опорный сигнал	0,016%	0,056%	0,115%	0,194%	0,292%
Зашумленный сигнал	43,156%	20,301%	13,616%	10,655%	5,788%

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод о том, что с увеличением порядка фильтра увеличивается его точность. Однако стоит отметить, что с повышением порядка фильтра происходит задержка на большее количество шагов.

2.3. Решение задачи фильтрации полученных оценок

Для обеспечения требования несмещенности полученные оценки были подвергнуты нелинейной прогнозирующей фильтрации. В работе [32] показано, что применение такой фильтрации позволяет снизить дисперсию оценок, в это же время отфильтрованные значения практически не имеют запаздывания относительно моментов начала переходных процессов. Данный фильтр представлен на рисунке 2.3.1.

Применение стандартных цифровых фильтров низких частот в ряде случаев дает возможность уменьшить дисперсию оценок на много порядков, но при этом отфильтрованные значения получают недопустимо большое запаздывание относительно моментов начала переходных процессов, а это недопустимо при использовании оценок для задач управления идентифицируемым объектом.

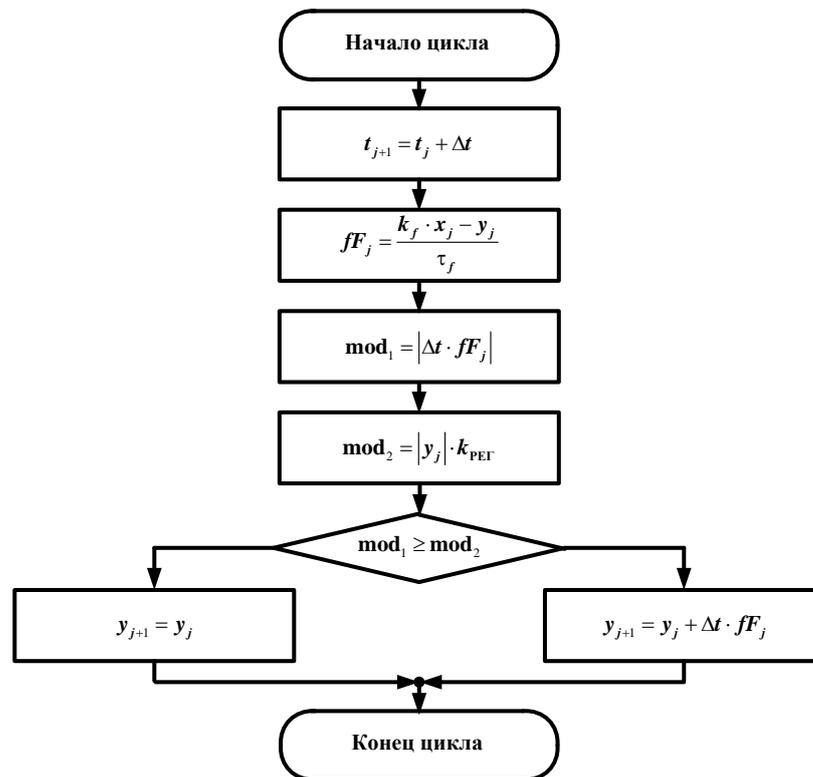


Рисунок 2.3.1. Блок-схема алгоритма расчёта выходного значения нелинейного цифрового прогнозирующего фильтр низких частот первого порядка

Еще одной проблемой является относительно большие вычислительные затраты на реализацию фильтра низких частот высокого порядка. Поэтому на основании данных замечаний предложим использовать нелинейный цифровой прогнозирующий фильтр низких частот первого порядка для уменьшения дисперсии оценок. Так как он реализуется на микроконтроллере, следовательно, его работу удобно описать при помощи блок-схемы алгоритма, приведённого на рис. 2.3.1. В зависимости от задач входной сигнал фильтра низких частот следует ограничить, что положительно сказывается на динамике оценок. Уровень ограничения входного сигнала возможно производить на основе априорной информации о характере оцениваемой величины.

На текущем шаге $j+1$ с использованием коэффициента усиления k_f и постоянной времени τ_f фильтра, а также предыдущих значений входного x_j и выходного y_j сигналов рассчитывается скорость нарастания выходного сигнала фильтра fF_j . Затем определяются модуль приращения выходного сигнала

фильтра mod_1 и модуль допустимого приращения mod_2 . Здесь важно отметить, что для настройки mod_2 используется коэффициент регуляризации $k_{\text{рег}}$, правильный подбор которого позволяет значительно снизить дисперсию искомых оценок параметров объекта управления – асинхронного двигателя. На основании модельных исследований рекомендуется выбирать $k_{\text{рег}} = 0,01 \dots 0,5$ с учётом противоречивых требований к минимизации дисперсии оценок и минимизации времени их переходного процесса.

2.4. Проверка работоспособности метода динамической идентификации параметров погружного асинхронного двигателя с помощью математической модели

Для проверки эффективности идентификации параметров АД с неподвижным короткозамкнутым ротором с применением разработанного выше метода при решении реальных задач проводилось исследование модели двигателя ПЭД 28-117 со следующими параметрами [33]:

- номинальная мощность $P_n = 28$ кВт;
- номинальное напряжение $U_n = 800/461,88$ В;
- номинальная частота $f_n = 50$ Гц;
- приведенное активное сопротивление ротора $R'_2 = 1,012$ Ом;
- активное сопротивление статора $R_1 = 1,15$ Ом;
- индуктивность рассеяния статорной обмотки $L_{1\sigma} = 3,043$ мГн;
- приведенная к статору индуктивность рассеяния роторной обмотки $L'_{2\sigma} = 3,043$ мГн;
- результирующая индуктивность, обусловленная магнитным потоком в воздушном зазоре машины $L_m = 0,105$ Гн;
- момент инерции двигателя $J_{\text{дв}} = 0,72$ кг·м²;
- число пар полюсов $z_p = 2$;
- номинальная частота вращения вала $\omega_n = 157$ рад/с.

В ходе моделирования были получены переходные характеристики тока (рис. 2.4.1) и напряжения (рис. 2.4.2) статора двигателя.

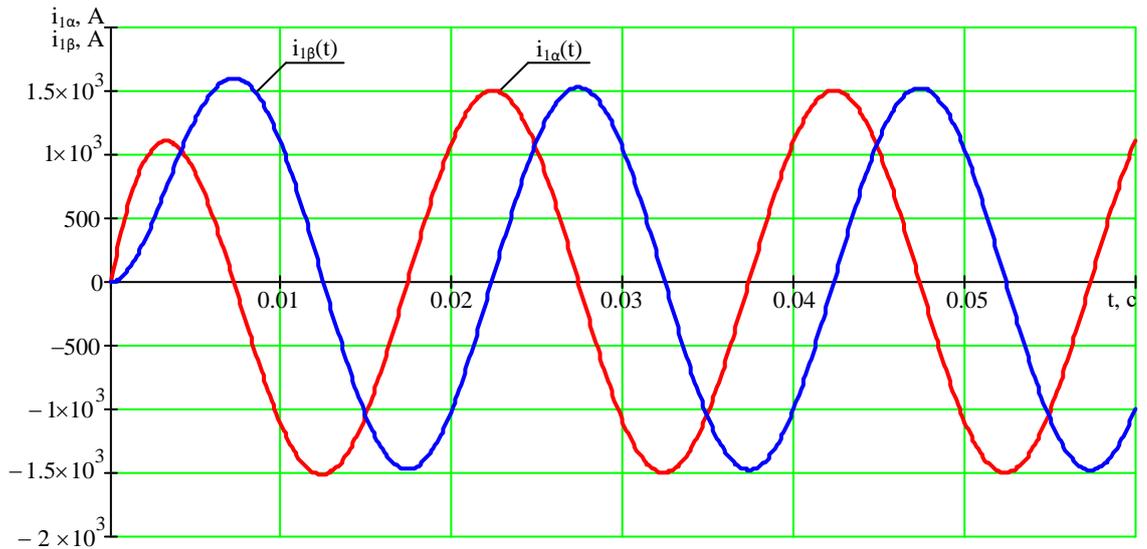


Рисунок 2.4.1. Переходные процессы тока статора асинхронного двигателя

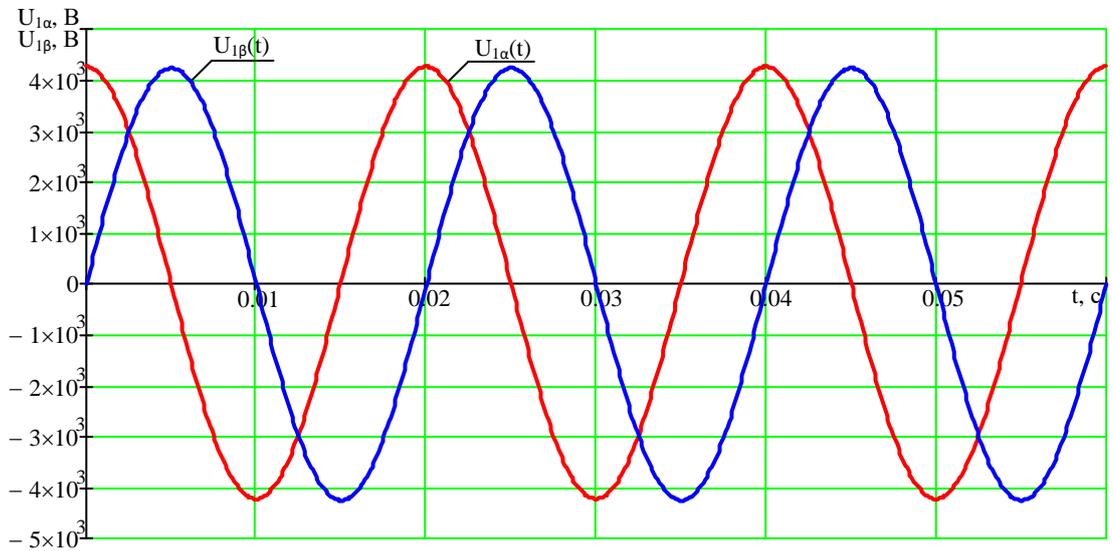


Рисунок 2.4.2. Переходные процессы напряжения статора асинхронного двигателя

Переходный процесс скорости представлен на рисунке 2.4.3.

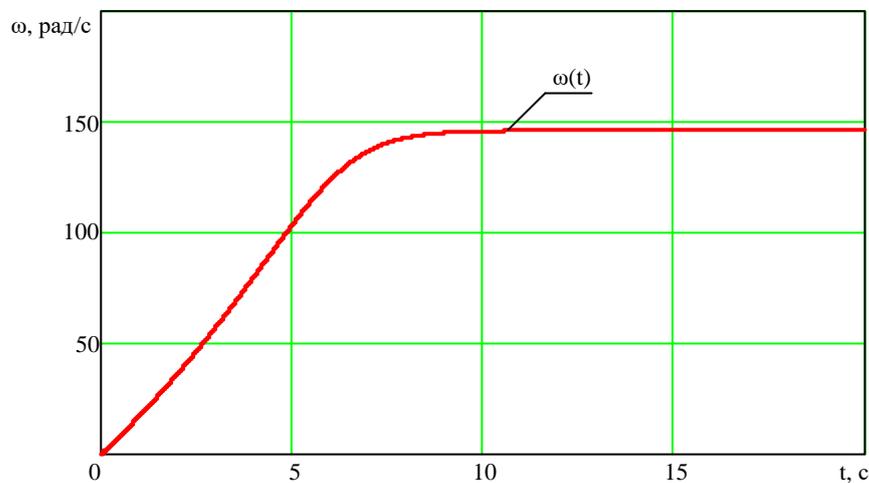


Рисунок 2.4.3. Переходный процесс скорости асинхронного электродвигателя

На основании пункта 2.1 был принят коэффициент временной задержки $k=36$, что является оптимальным для улучшения степени обусловленности матрицы связи между неизвестными параметрами и внешними воздействиями.

Для нахождения оценок параметров системы, вычислим коэффициент $\hat{K}_1, \hat{K}_2, \hat{K}_3, \hat{K}_4, \hat{K}_5$, решив систему уравнений (2.1.3) методом наименьших квадратов:

$$\begin{bmatrix} \hat{K}_1 \\ \hat{K}_2 \\ \hat{K}_3 \\ \hat{K}_4 \\ \hat{K}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{1\alpha_{j-1k}} & U_{1\alpha_{j-1k}} & z_p \cdot \omega_{j-1k} \cdot i_{1\beta_{j-1k}} & \left(\frac{dU_{1\alpha}}{dt} \right)_{j-1k} & z_p \cdot \omega_{j-1k} \cdot U_{1\beta_{j-1k}} \\ i_{1\alpha_{j-2k}} & U_{1\alpha_{j-2k}} & z_p \cdot \omega_{j-2k} \cdot i_{1\beta_{j-2k}} & \left(\frac{dU_{1\alpha}}{dt} \right)_{j-2k} & z_p \cdot \omega_{j-2k} \cdot U_{1\beta_{j-2k}} \\ i_{1\alpha_{j-3k}} & U_{1\alpha_{j-3k}} & z_p \cdot \omega_{j-3k} \cdot i_{1\beta_{j-3k}} & \left(\frac{dU_{1\alpha}}{dt} \right)_{j-3k} & z_p \cdot \omega_{j-3k} \cdot U_{1\beta_{j-3k}} \\ i_{1\alpha_{j-4k}} & U_{1\alpha_{j-4k}} & z_p \cdot \omega_{j-4k} \cdot i_{1\beta_{j-4k}} & \left(\frac{dU_{1\alpha}}{dt} \right)_{j-4k} & z_p \cdot \omega_{j-4k} \cdot U_{1\beta_{j-4k}} \\ i_{1\alpha_{j-5k}} & U_{1\alpha_{j-5k}} & z_p \cdot \omega_{j-5k} \cdot i_{1\beta_{j-5k}} & \left(\frac{dU_{1\alpha}}{dt} \right)_{j-5k} & z_p \cdot \omega_{j-5k} \cdot U_{1\beta_{j-5k}} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \left(\frac{d^2 i_{1\alpha}}{dt^2} \right)_{j-1k} + z_p \cdot \omega_{j-1k} \cdot \left(\frac{d i_{1\beta}}{dt} \right)_{j-1k} \\ \left(\frac{d^2 i_{1\alpha}}{dt^2} \right)_{j-2k} + z_p \cdot \omega_{j-2k} \cdot \left(\frac{d i_{1\beta}}{dt} \right)_{j-2k} \\ \left(\frac{d^2 i_{1\alpha}}{dt^2} \right)_{j-3k} + z_p \cdot \omega_{j-3k} \cdot \left(\frac{d i_{1\beta}}{dt} \right)_{j-3k} \\ \left(\frac{d^2 i_{1\alpha}}{dt^2} \right)_{j-4k} + z_p \cdot \omega_{j-4k} \cdot \left(\frac{d i_{1\beta}}{dt} \right)_{j-4k} \\ \left(\frac{d^2 i_{1\alpha}}{dt^2} \right)_{j-5k} + z_p \cdot \omega_{j-5k} \cdot \left(\frac{d i_{1\beta}}{dt} \right)_{j-5k} \end{bmatrix}$$

После нахождения коэффициентов, определим оценки параметров асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором следующим образом:

$$\hat{R}'_1 = -\frac{\hat{K}_3}{\hat{K}_4}, \quad \hat{R}'_2 = \frac{\hat{K}_3 - \hat{K}_5}{\hat{K}_4}, \quad \hat{L}_1 = \frac{\hat{K}_3 - \hat{K}_5}{\hat{K}_2}, \quad \hat{L}_m = \hat{L}_1 \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{\hat{K}_4} \cdot \hat{L}_1}, \quad \hat{\sigma} = -\frac{\hat{R}'_1}{\hat{K}_3 \cdot \hat{L}_1}, \quad \hat{T}_2 = \frac{1}{\hat{K}_2 \cdot \hat{\sigma} \cdot \hat{L}_1},$$

$$\hat{L}_2 = \frac{\hat{T}_2}{\hat{R}'_2}.$$

Для обеспечения требования несмещенности полученные оценки были подвергнуты нелинейной прогнозирующей фильтрации, на основании пункта

2.3. Построим процессы идентификации для параметров $\hat{R}_1, \hat{L}_1, \hat{L}_m$ (рис. 2.4.4) и \hat{R}'_2, \hat{L}_2 (рис. 2.4.5) и сравнение их с реальными значениями.

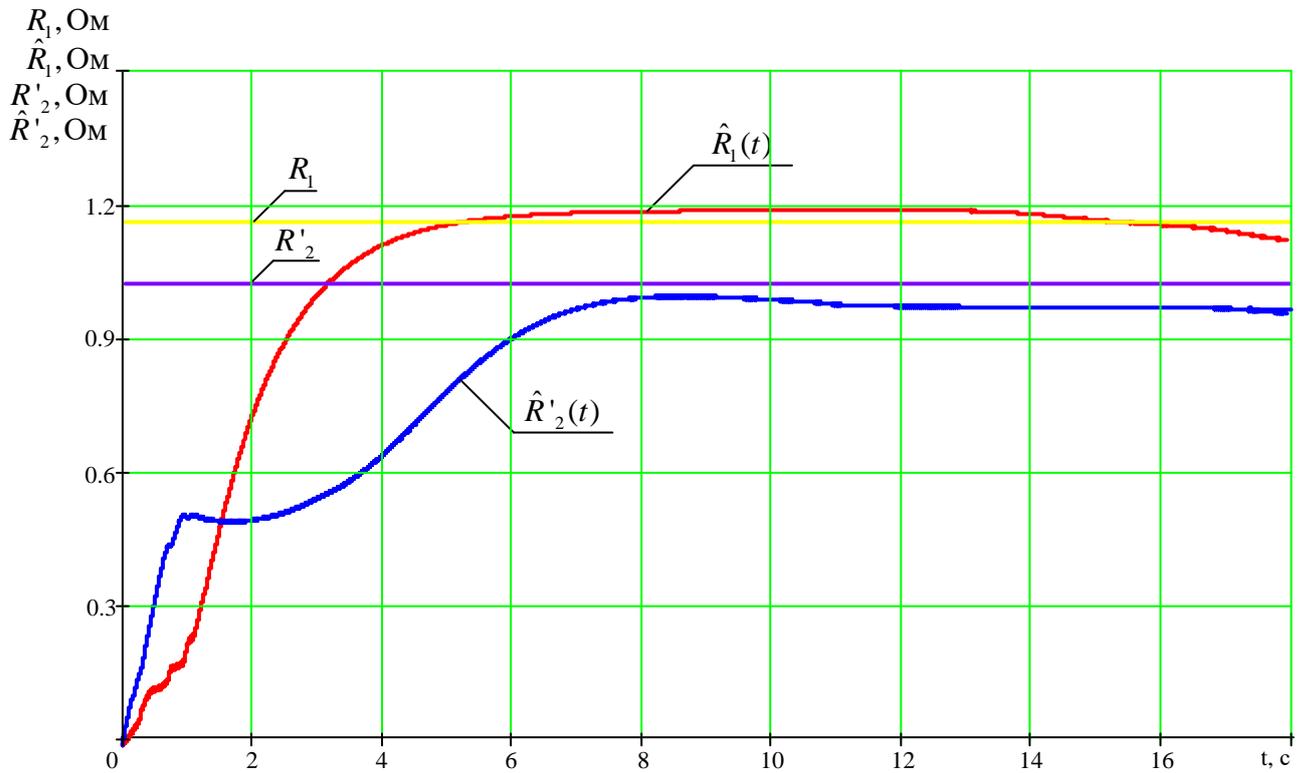


Рисунок 2.4.4. Переходные процессы оценок \hat{R}_1, \hat{R}'_2 идентификационной модели асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

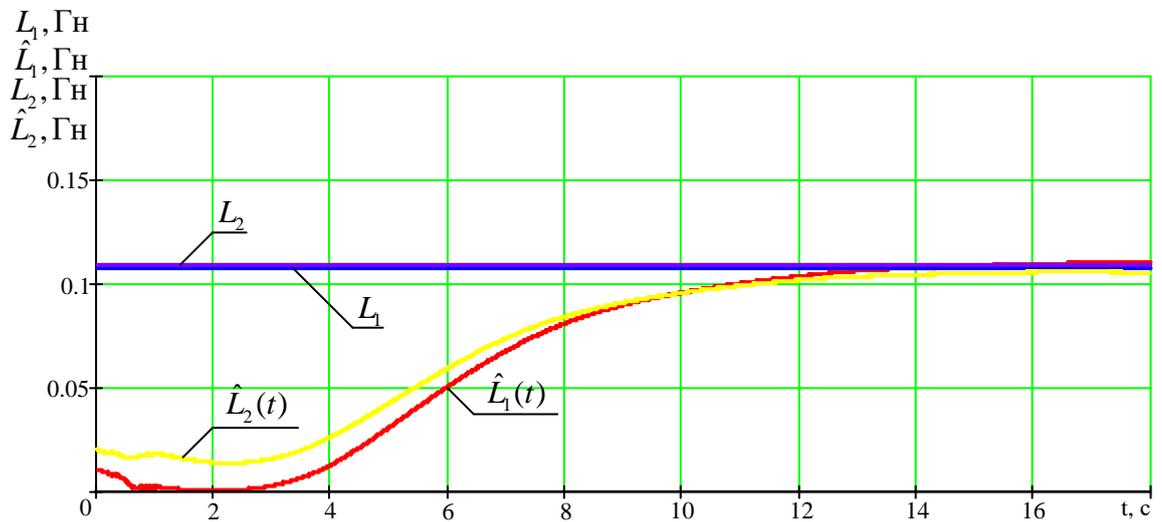


Рисунок 2.4.5. Переходные процессы оценок \hat{L}_1, \hat{L}_2 идентификационной модели асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Среднеквадратичное значение относительной погрешности оценки активного сопротивления статора асинхронного двигателя:

$$\Delta R_1 = \sqrt{\frac{1}{100000 - 50000}} \cdot \sum_{j=50000}^{100000} \left(\frac{R_1 - \hat{R}_1}{R_1} \right)^2 \cdot 100\% = 0,363\%.$$

Среднеквадратичное значение относительной погрешности оценки приведенного к статору активного сопротивления ротора асинхронного двигателя:

$$\Delta R'_2 = \sqrt{\frac{1}{100000 - 50000}} \cdot \sum_{j=50000}^{100000} \left(\frac{R'_2 - \hat{R}'_2}{R'_2} \right)^2 \cdot 100\% = 0,346\%.$$

Среднеквадратичное значение относительной погрешности оценки эквивалентной индуктивности обмотки статора асинхронного двигателя:

$$\Delta L_1 = \sqrt{\frac{1}{180000 - 140000}} \cdot \sum_{j=140000}^{180000} \left(\frac{L_1 - \hat{L}_1}{L_1} \right)^2 \cdot 100\% = 1,253\%.$$

Среднеквадратичное значение относительной погрешности оценки эквивалентной индуктивности обмотки ротора асинхронного двигателя:

$$\Delta L_2 = \sqrt{\frac{1}{180000 - 140000}} \cdot \sum_{j=140000}^{180000} \left(\frac{L_2 - \hat{L}_2}{L_2} \right)^2 \cdot 100\% = 1,373\%.$$

Расхождения между реальными и оцененными значениями параметров составляют не более пяти процентов, соответственно метод идентификации параметров погружного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором работоспособен.

2.5. Выводы по главе

1. Был разработан метод динамической идентификации параметров погружных асинхронных двигателей.

2. Обоснована проблема цифрового дифференцирования и предложены варианты ее решения, в частности применением различных методов. Произведено сравнение между ними и из полученных результатов сделан и

обоснован вывод, что наиболее перспективными решениями являются фильтры Ланцоша.

3. Представлено решение задачи фильтрации полученных оценок при помощи нелинейного прогнозирующего фильтра.

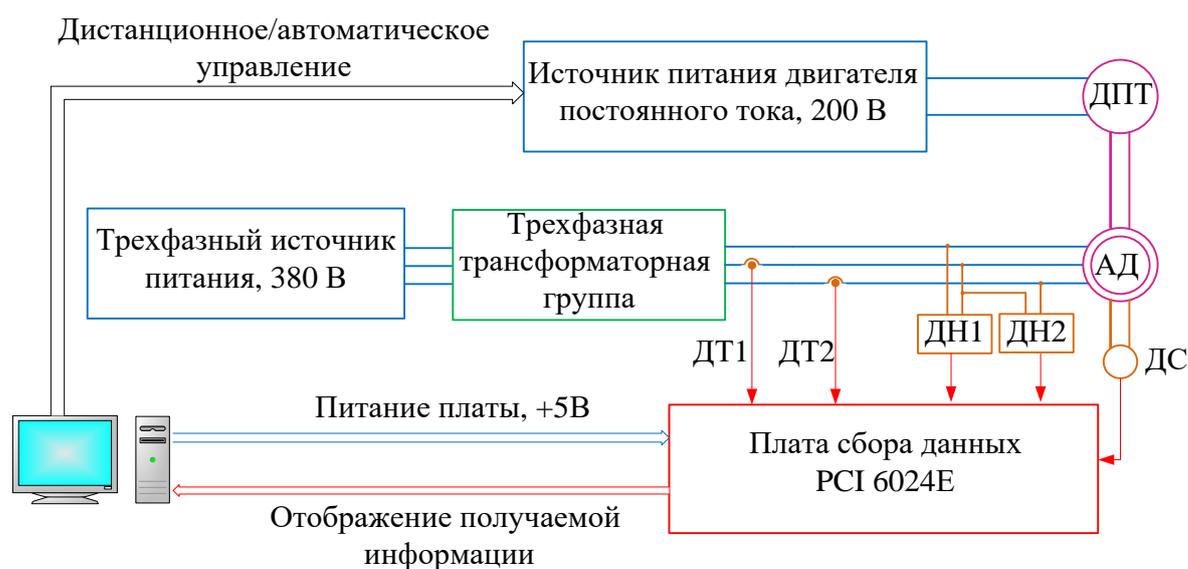
4. Выполнена проверка работоспособности метода динамической идентификации параметров погружного асинхронного двигателя с помощью математической модели. Погрешность полученных оценок параметров Т-образной схемы замещения составляет не более пяти процентов от реальных значений.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ МЕТОДА ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

3.1. Описание экспериментальной установки и методики эксперимента

Экспериментальная проверка работоспособности метода идентификации параметров асинхронного двигателя проводилась в лаборатории кафедры «Электропривода и электрооборудования» Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета, в которой установлены компьютеризированные лабораторные стенды, комплектация и принцип работы которых приведены в [23,24,25].

Схема подключения оборудования представлена на рис. 3.1.1, внешний вид экспериментальной установки представлен на рис. 3.1.2. Машина постоянного тока используется в качестве механической нагрузки.



ДТ – датчик тока; ДН – датчик напряжения; ДС – датчик скорости; АД – асинхронный двигатель.

Рис. 3.1.1. Схема подключения оборудования для экспериментальных исследований

Электромашинный агрегат предназначен для электромеханического преобразования энергии постоянного или переменного тока, получения сигналов, определяющих частоту вращения и угловое положение подвижных частей агрегата. Он включает сочлененные между собой и установленные на едином основании машину постоянного тока, машину переменного тока,

маховик и преобразователь угловых перемещений. Концы обмоток машин выведены через гнезда на терминальные панели, прикрепленные к их корпусам. Характеристики электромашинного агрегата указаны в таблице 3.1.1.

Таблица 3.1.1. Характеристики электромашинного агрегата

Наименование	Параметры
Машина постоянного тока	
Номинальная мощность, Вт	90
Номинальное напряжение якоря, В	220
Номинальный ток якоря, А	0,56
Номинальная частота вращения, мин ⁻¹	1500
Возбуждение	Независимое/параллельное/последовательное
Номинальное напряжение возбуждения, В	220
Номинальный ток обмотки возбуждения, А	0,2
КПД, %	57,2
Направление вращения	любое
Режим работы	двигательный/генераторный
Машина переменного тока	
Число фаз на статоре	3
Число фаз на роторе	3
Как асинхронная машина	
Частота тока, Гц	50
Номинальная полезная активная мощность, Вт	30
Номинальное напряжение, В	127
Схема соединения обмотки статора	Y
Схема соединения обмотки ротора	Y
Номинальный ток статора, А	0,35
КПД, %	36
cos φ _н	0,73
Номинальная частота вращения, мин ⁻¹	1250
Маховик	
Момент инерции, н·м·с ²	0,032
Масса, кг, не более	7
Преобразователь угловых перемещений	

Продолжение таблицы 3.1.1

Модель	ВЕ 178А
Количество выходных сигналов	6
Выходные сигналы	серия импульсов и опорный импульс
Число импульсов за оборот в серии	2500
Диапазон изменения рабочих частот вращения вала, мин ⁻¹	0..6000

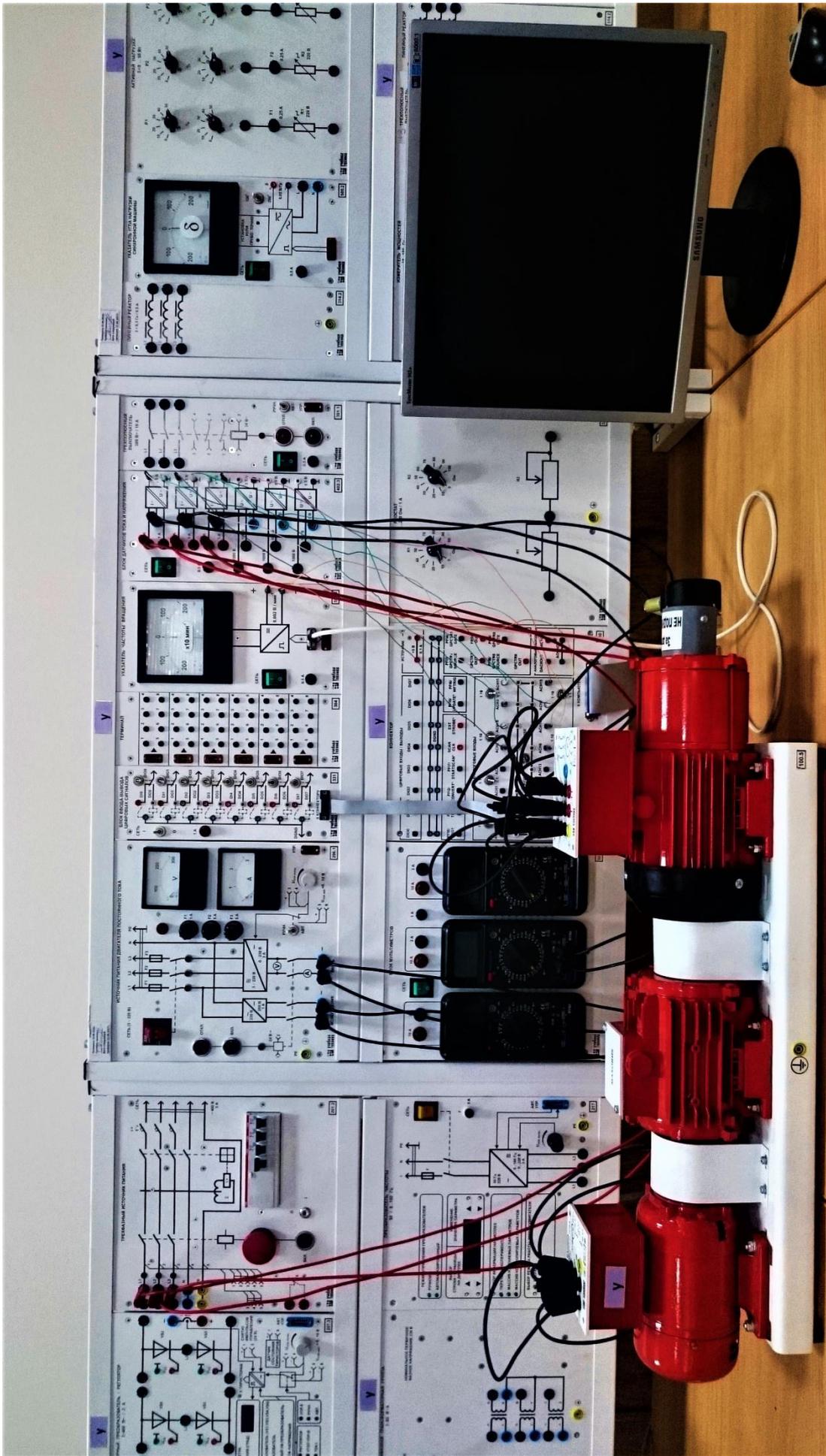


Рис. 3.1.2. Внешний вид экспериментальной установки

Трехфазный источник питания служит для питания трехфазным переменным напряжением, включается вручную и имеет устройство защитного отключения, защиту от перегрузок, ключ от несанкционированного включения и кнопку аварийного отключения. Внешний вид представлен на рис. 3.1.3.

Трехфазный источник питания имеет следующие параметры:

- Напряжение питания $U_H = 400 \text{ В}$;
- Номинальный ток $I_H = 16 \text{ А}$;
- Ток срабатывания устройства защитного токоограничения – 30 мА.

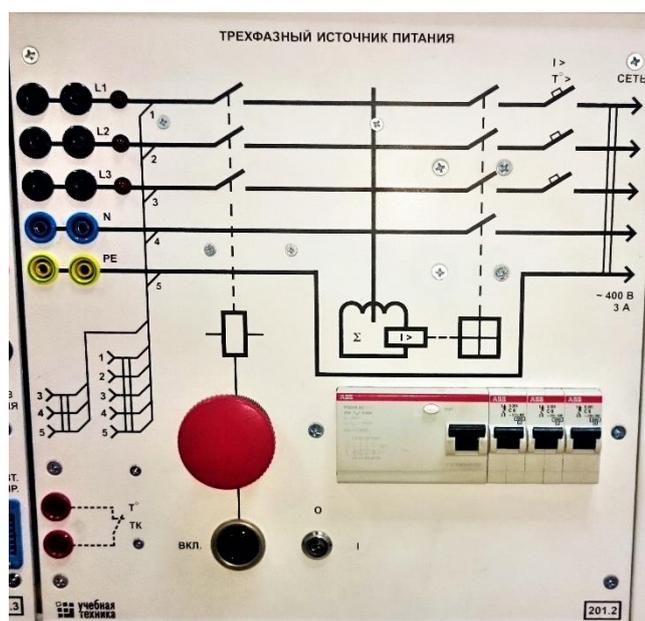


Рис. 3.1.3. Внешний вид трехфазного источника питания

Источник питания машины постоянного тока служит для питания обмоток якоря и возбуждения постоянным током, включается дистанционно/автоматически от компьютера или вручную. Таким же образом регулируется и якорное напряжение. Напряжение возбуждения нерегулируемое. Внешний вид представлен на рис. 3.1.4. Источник питания машины постоянного тока имеет следующие параметры:

- Номинальное напряжение цепи якоря $U_H = 250$ В;
- Номинальный ток цепи якоря $I_H = 3$ А;
- Номинальное напряжение цепи возбуждения $U_H = 200$ В;
- Номинальный ток цепи возбуждения $I_H = 1$ А.

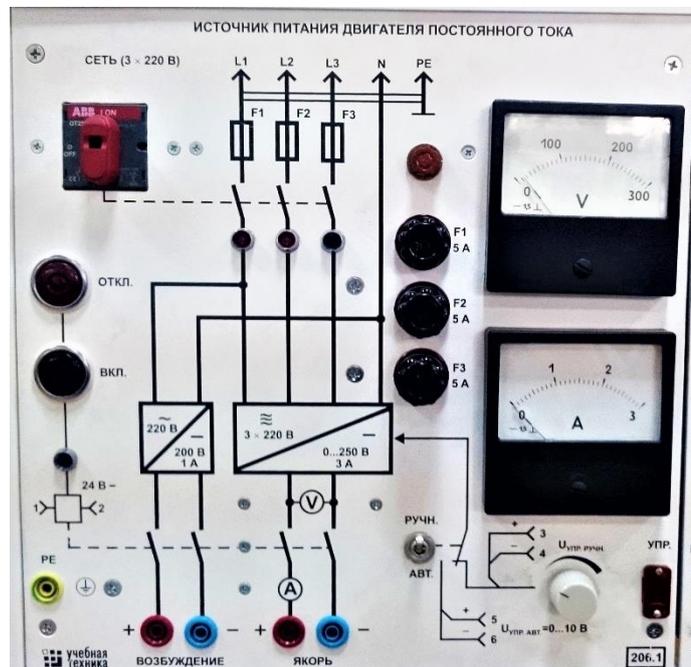


Рис. 3.1.4. Внешний вид источника питания двигателя постоянного тока

Терминал предназначен для обеспечения удобного доступа к входам/выходам управления функциональных блоков. Содержит 6 розеток с 8 контактами; 6×8 гнезд. Внешний вид представлен на рис. 3.1.5.

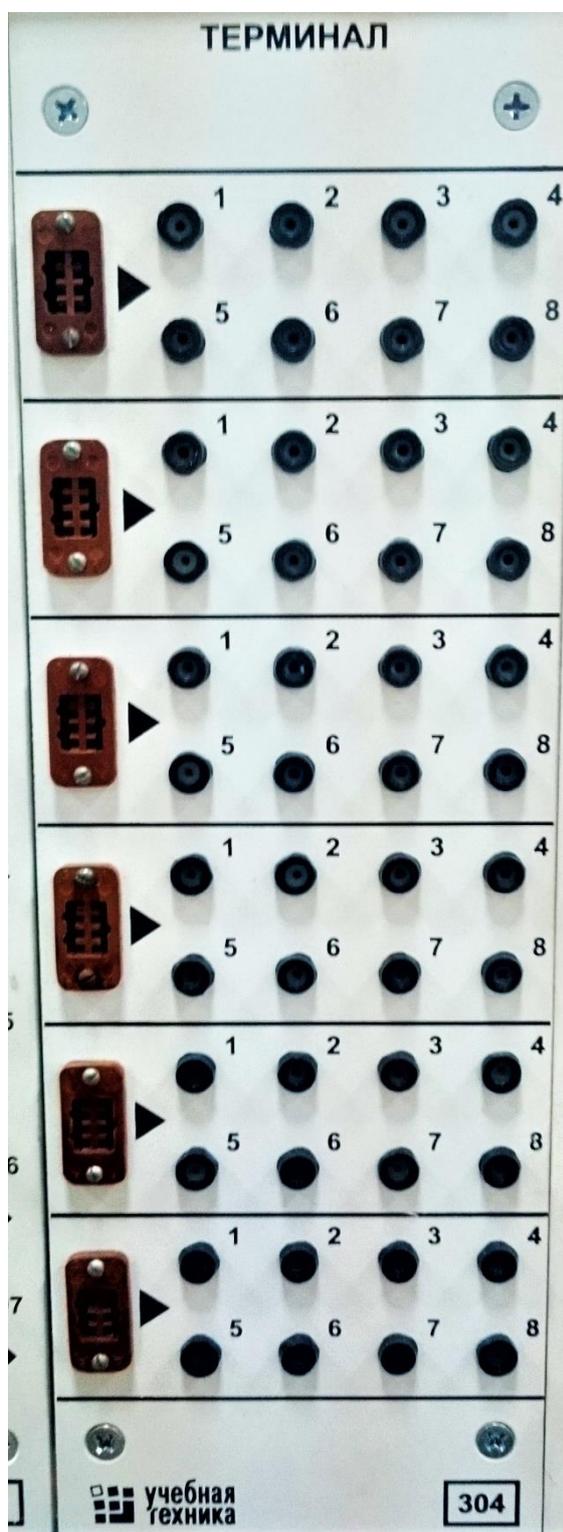


Рис. 3.1.5. Внешний вид терминала

Реостат предназначен для ограничения пускового тока в цепи якоря двигателя постоянного тока. Внешний вид представлен на рис. 3.1.6. Параметры реостата:

- Номинальное сопротивление $R_H = 200 \text{ Ом}$;
- Номинальный ток $I_H = 0,8 \text{ А}$.

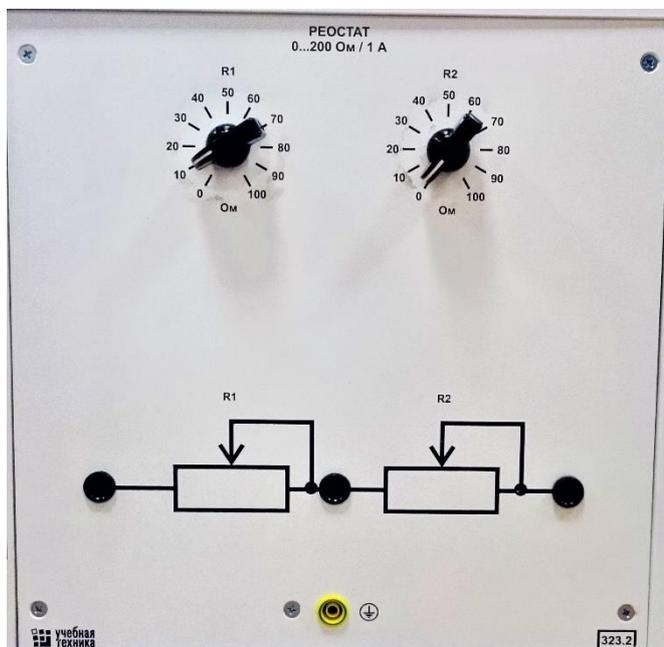


Рис. 3.1.6. Внешний вид реостата

Коннектор предназначен для обеспечения удобного доступа к входам/выходам платы сбора данных PCI 6024E персонального компьютера. Внешний вид представлен на рис. 3.1.7. Параметры коннектора:

- 8 аналоговых дифференциальных входов;
- 2 аналоговых выхода;
- 8 цифровых входов/выходов.

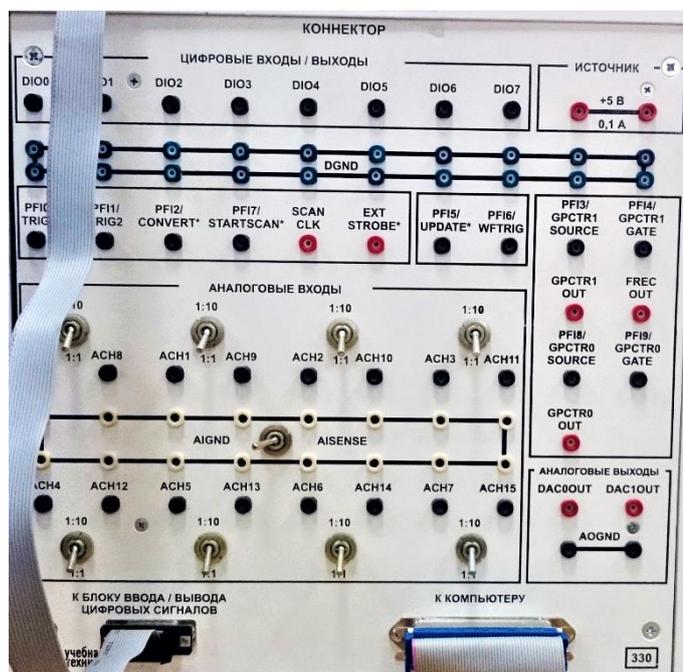


Рис. 3.1.7. Внешний вид коннектора

Блок датчиков тока и напряжения LEM AKR служит для получения нормированных электрических сигналов, пропорциональных напряжениям и токам в контролируемых силовых цепях постоянного и переменного тока и гальванически с последними не связанных. Погрешность измерения не превышает более 1%. Блок содержит три измерительных преобразователя «ток-напряжение» (5A/1A)/5V; 3 измерительных преобразователя «напряжение-напряжение» (1000V/100V)/5V. Внешний вид представлен на рис. 3.1.8.

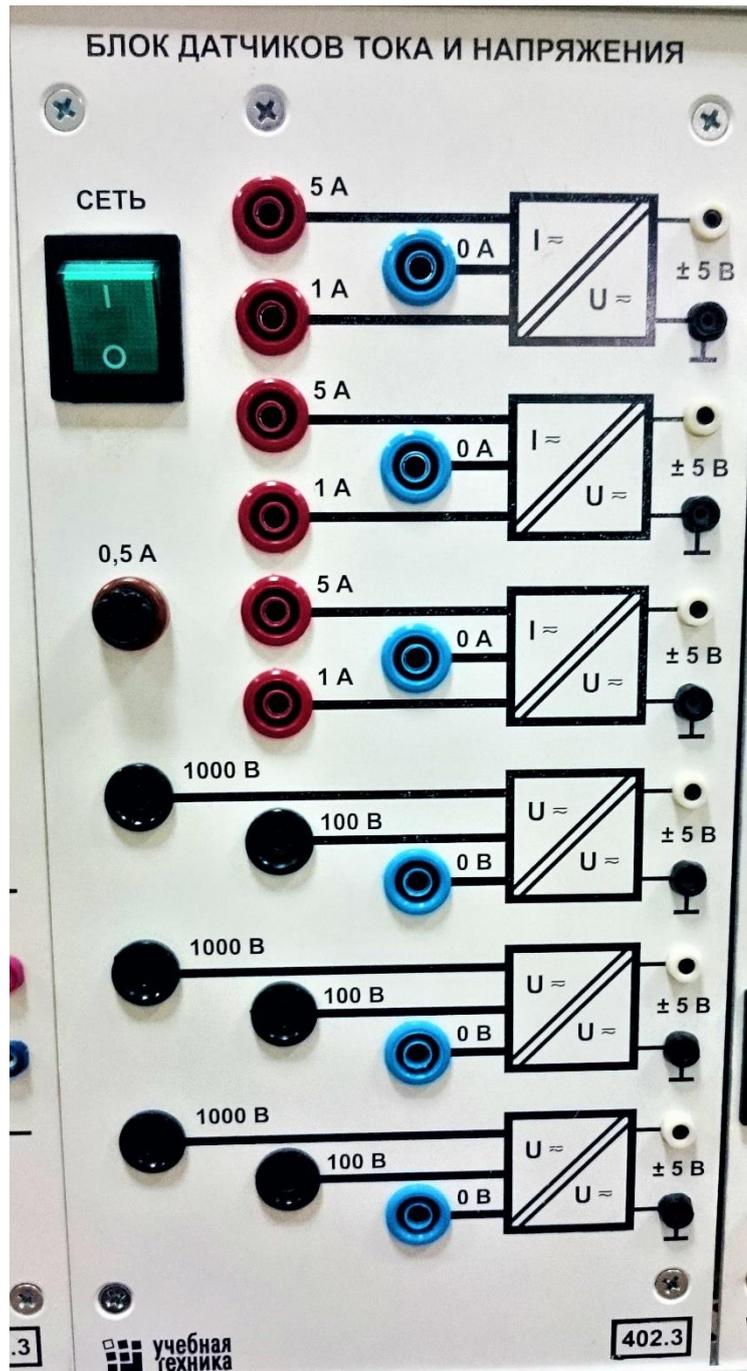


Рис. 3.1.8. Внешний вид блока датчиков тока и напряжения

Блок мультиметров предназначен для измерения токов, напряжений, омических сопротивлений, является цифровым с жидкокристаллическим дисплеем. Внешний вид представлен на рис. 3.1.9. Имеет следующие параметры:

- Номинальное напряжение $U_H = 1000$ В переменного и постоянного тока;
- Номинальный ток $I_H = 10$ А, как постоянный, так и переменный;
- Номинальное сопротивление $R_H = 20$ МОм.



Рис. 3.1.9. Внешний вид блока мультиметров

Указатель частоты вращения предназначен для отображения частоты вращения электрических машин в электромашинном агрегате в аналоговой форме $\omega_{\text{ном}} = -2000 \dots 0 \dots 2000 \text{ мин}^{-1}$. Внешний вид представлен на рис. 3.1.10.

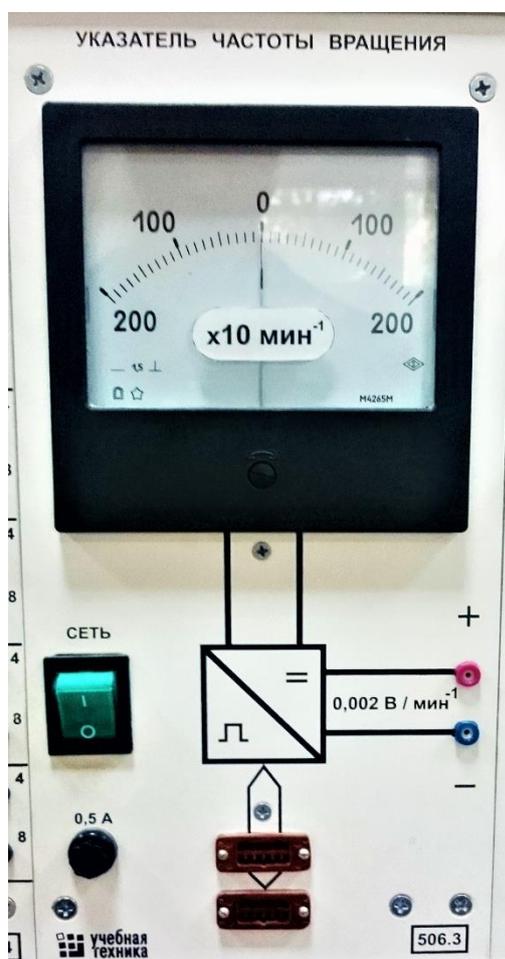


Рис. 3.1.10. Внешний вид указателя частоты вращения

Персональный компьютер предназначен для дистанционного / автоматического управления лабораторным комплексом и отображения информации о нем, является IBM-совместимым, содержит плату сбора данных PCI 6024E. PCI-6024E фирмы National Instruments является многофункциональной платой аналогового и цифрового ввода/вывода с таймером для компьютеров с шинами PCI, PXI и CompactPCI. В число поддерживаемых платой функций входят аналоговый ввод/вывод, цифровой ввод/вывод, а также ввод/вывод тактирующих сигналов. Блок-схема функционирования платы 6024E представлена на рис. 3.1.11 [35].

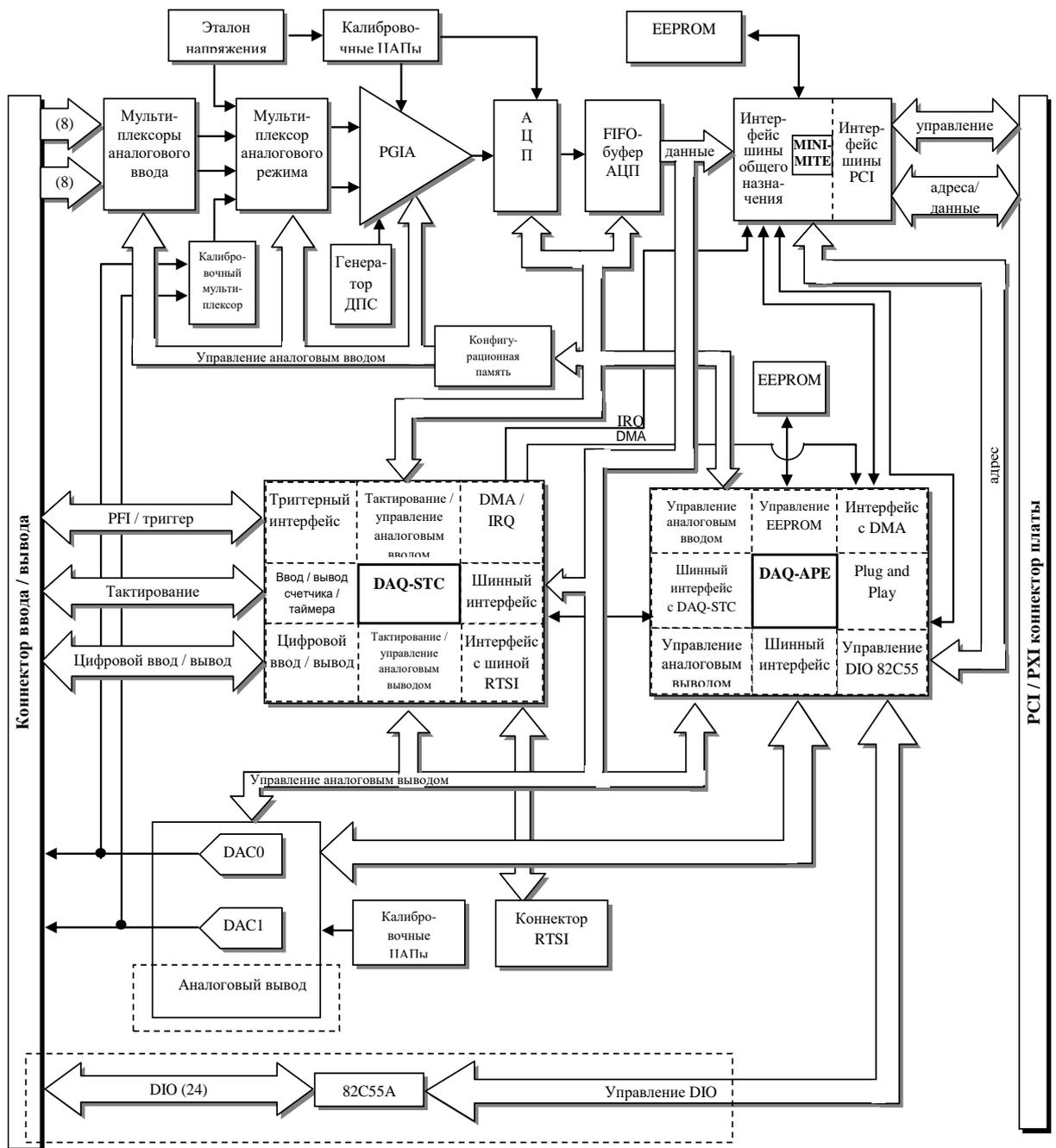


Рис. 3.1.11. Блок-схема функционирования платы 6024Е

Расшифровка сокращений, представленных на блок-схеме функционирования платы 6024Е (рис. 3.1.11), приведена ниже.

DAC0 – выходной сигнал аналогового канала 0 (analog channel 0 output signal).

DAC1 – выходной сигнал аналогового канала 1 (analog channel 1 output signal).

DAQ – сбор данных в следующих режимах:

1. Сбор и измерение электрических сигналов от датчиков, преобразователей, а также зондов или промежуточных точек и ввод их в компьютер для обработки.

2. Сбор и измерение таких же типов электрических сигналов с помощью встраиваемых плат аналого-цифровых преобразований или плат цифрового ввода/вывода, а также возможное генерирование управляющих сигналов с помощью плат цифро-аналоговых преобразований или плат цифрового ввода/вывода на том же компьютере.

DIO – цифровой ввод/вывод (Digital Input/Output).

DMA – прямой доступ в память (Direct Memory Access). Метод, при котором данные могут передаваться в память компьютера и из нее от устройства или в него или в/из памяти на шине, в то время, как процессор занят чем-то другим. DMA является наиболее быстрым методом передачи данных из памяти компьютера и в нее.

EEPROM – электрически стираемая программируемая память только для чтения (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory) – память ROM, которая может быть стерта с помощью электрического сигнала и перепрограммирована.

IRQ – запрос на прерывание (Interrupt Request).

MITE – интерфейс MXI ко всем устройствам (MXI Interface to Everything) – дополнительный ASIC, разработанный фирмой National Instruments, который реализует шинный интерфейс PCI. MITE поддерживает управление шиной для высокоскоростной передачи данных по шине PCI.

PCI – соединение периферийных компонентов (Peripheral Component Interconnect) – архитектура шины расширения высокой производительности, разработанная фирмой Intel для замены ISA и EISA. Эта архитектура получает широкое признание как стандарт для персональных компьютеров и рабочих станций. Максимальная теоретическая скорость передачи на этой архитектуре равна 132 мегабайт в секунду.

PFI – программируемый функциональный вход (Programmable Function Input).

PGIA– программируемый измерительный усилитель (Programmable Gain Instrumentation Amplifier).

PPI – периферийный программируемый интерфейс (Programmable Peripheral Interface).

STC – контроллер системного тактирования (System Timing Controller).

Шина RTSI – шина системной интеграции в реальном времени (Real-Time System Integration). Шина тактирования фирмы National Instruments, которая непосредственно подсоединяет платы сбора данных в целях точной синхронизации функций. Для плат PCI такое соединение осуществляется с помощью коннекторов, расположенных наверху платы. Для плат PXI оно осуществляется через триггерную шину PXI.

АЦП (аналого-цифровой преобразователь) – электронное устройство (обычно в виде интегральной микросхемы), преобразующее аналоговое напряжение в цифровой сигнал.

ДПС (добавочный псевдослучайный сигнал) – добавление гауссова шума ко входному аналоговому сигналу.

Плата 6024E имеет 16 каналов аналогового ввода, два канала аналогового вывода, коннектор с 68-ю контактами и восемь линий цифрового ввода/вывода. Характеристики аналогового ввода приведены в таблице 3.1.2.

Таблица 3.1.2. Характеристики аналогового ввода платы 6024E

Количество каналов	16 однопроводных и 8 дифференциальных
Тип АЦП	Последовательная аппроксимация
Разрешение	12 бит, 1 в 4096
Скорость сэмпирования	20000 сэмплов в секунду (гарантировано)
Диапазон входных сигналов	Только биполярный
Входная связь	Постоянный ток
Максимальное рабочее напряжение (сигнал + синфазный режим)	Каждый вход должен находиться в пределах ± 11 В от земли
Размер буфера FIFO	512 сканов

Передача данных	DMA, прерывания, программируемый ввод/вывод
Режим DMA	Сбор вразброс (одна передача, запрос на передачу)
Размер памяти конфигурирования	512 слов

Для программирования платы сбора данных используется пакет LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) – это среда разработки, основанная на графическом языке программирования G. LabVIEW полностью приспособлена для совместной работы с устройствами GPIB, VXI, RS-232, RS-485 и подключаемыми платами для сбора данных. Также LabVIEW содержит встроенные библиотеки функций для использования таких программных стандартов как TCP/IP и OLE.

3.2. Обработка экспериментальных данных

Для проверки эффективности разработанного метода динамической идентификации погружных асинхронных электродвигателей для скважинной нефтедобычи при решении реальных задач проводилось исследование на лабораторной установке с электродвигателями. Были получены переходные характеристики напряжений и токов статора и скорости вращения вала двигателя при пуске. Параметры асинхронного двигателя, определенные с помощью предложенного метода, сведены в таблицу 3.2.

Таблица 3.2. Результаты идентификации параметров

Параметр	R_1 , Ом	R'_2 , Ом	L_1 , Гн	L_2 , Гн	L_m , Гн
Паспортное значение	65,314	54,429	0,1	0,173	0,125
Разработанный метод	65,314	51,436	1,066	0,834	0,924

Из таблицы 3.2 можно сделать вывод, что данные, полученные на основе разработанного метода отличаются от паспортных значений. Причиной этого может служить то, что двигатель проходил неоднократные ремонты, в связи с

чем, значения параметров могли измениться. Как следствие, для оценки точности идентификации сравним графики переходных процессов асинхронного двигателя и его модели с идентифицированными параметрами (рис. 3.2.1, рис. 3.2.2), где индекс ДС, ДТ – характеристики, записанная с датчиков скорости и тока соответственно, РМ - характеристика, полученная при моделировании с учетом значений, определенных рассматриваемым в работе методом.

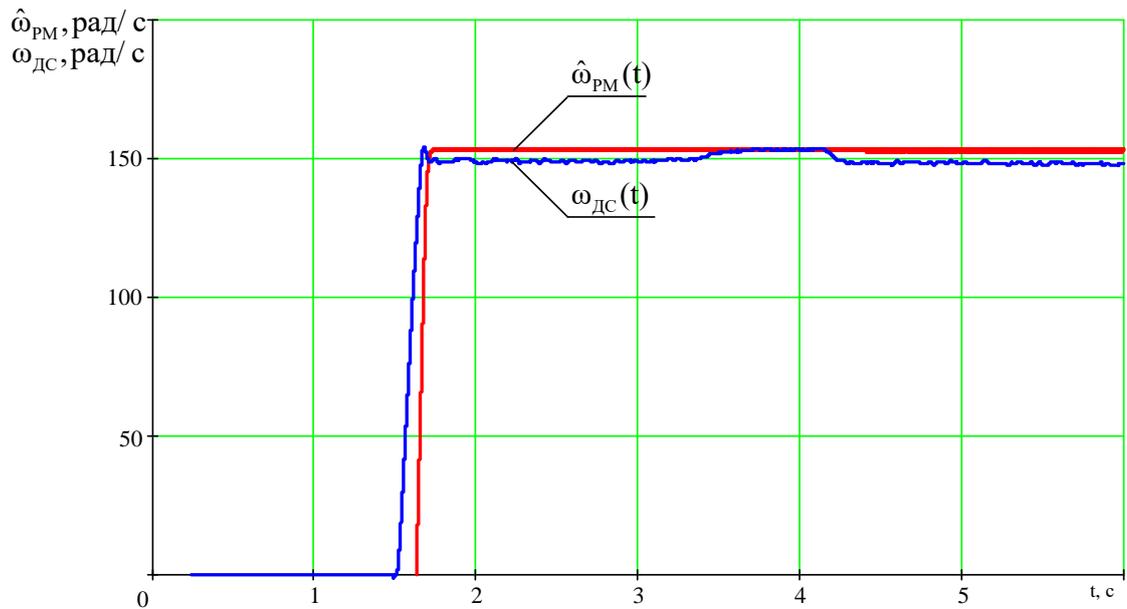


Рисунок 3.2.1. Графики скоростей вала асинхронного двигателя, снятых с датчиков и построенных с помощью математической модели с учетом оцененных параметров

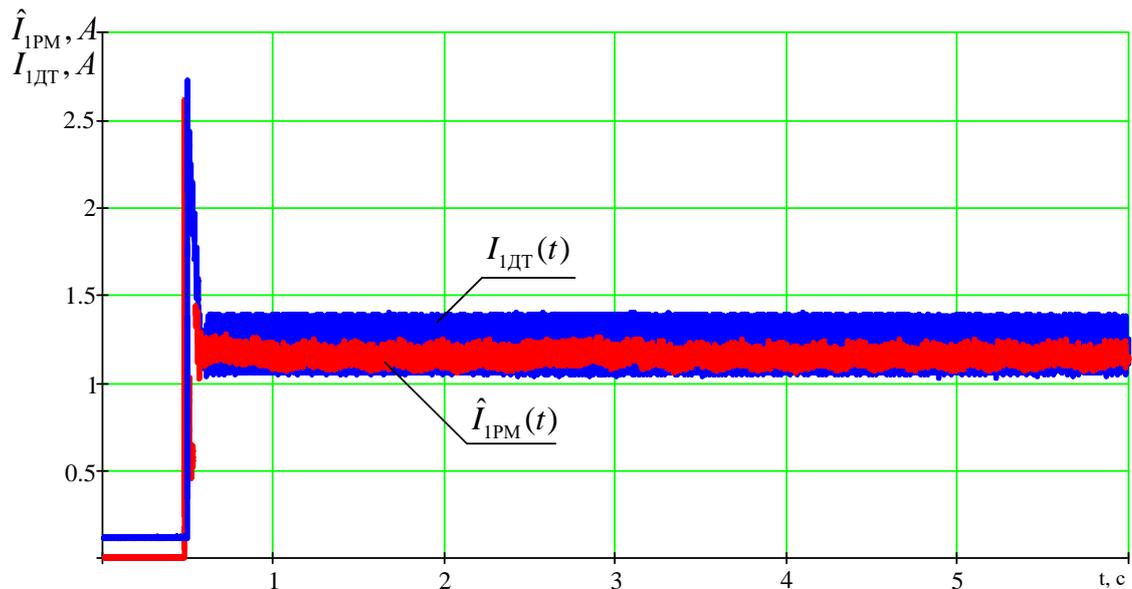


Рисунок 3.2.2. Графики вектора тока статора асинхронного двигателя, снятых с датчиков и построенных с помощью математической модели с учетом оцененных параметров

Найдем относительные интегральные значения модулей невязок фактических и модельных значений скорости вращения вала двигателя с использованием параметров, полученных на основе разностных схем:

$$\delta_{\omega_{\text{рм}}} = \frac{\int_0^{t_{\Sigma}} \left| \omega(t) - \omega_{\text{рс}}(t, \hat{R}_1, \hat{R}'_2, \hat{L}_1, \hat{L}_2, L_m) \right| dt}{\int_0^{t_{\Sigma}} |\omega(t)| dt} 100\% = 3,1\%.$$

Найдем относительные интегральные значения модулей невязок фактических и модельных значений модуля вектора тока статора с использованием параметров, полученных на основе разностных схем:

$$\delta_{I_{\text{рм}}} = \frac{\int_0^{t_{\Sigma}} \left| I_1(t) - \hat{I}_{1\text{рс}}(t, R_1, R'_2, L_1, L_2, L_m) \right| dt}{\int_0^{t_{\Sigma}} |I_1(t)| dt} 100\% = 3,5\%$$

Таким образом, по полученным экспериментальным данным можно сделать вывод о том, что характеристики двигателя, построенные на модели двигателя с использованием параметров, полученных с помощью разработанного метода, имеют погрешность не более 4 %. Соответственно можно сделать вывод, что метод динамической идентификации параметров асинхронных двигателей является работоспособным и необходим в электроприводах.

3.3. Выводы по главе

1. Приведено описание экспериментальной установки и методики эксперимента.

2. Произведена серия экспериментов, на основании которых были получены данные с датчиков тока и напряжения, установленных в питающих цепях статора асинхронного двигателя, и датчика скорости, закрепленного на валу двигателя.

3. Произведена обработка экспериментальных данных. Были получены оценки параметров Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя, на основании которых были построены графики переходных процессов скорости вала и результирующего тока статора с использованием математической модели.

Произведено сравнение данных траекторий с траекториями переходных процессов, снятых с помощью соответствующих датчиков. Относительные интегральные значения модулей невязок фактических и модельных значений переходных процессов составили не более четырех процентов, что говорит о работоспособности разработанного метода и возможности применения в реальных общепромышленных установках.

4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

В данной работе ведется разработка и проверка метода динамической идентификации параметров погружных асинхронных двигателей для скважинной нефтедобычи.

Целью данного раздела является определение перспективности и успешности НТИ, оценка его эффективности, уровня возможных рисков, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации.

Для достижения обозначенной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Оценить коммерческий потенциал и перспективность разработки НТИ;
2. Осуществить планирование этапов выполнения исследования;
3. Рассчитать бюджет затрат на исследования;
4. Произвести оценку научно-технического уровня исследования и оценку рисков.

К научно-исследовательским работам относятся работы поискового, теоретического и экспериментального характера, которые выполняются с целью расширения, углубления и систематизации знаний по определенной научной проблеме и создания научного задела.

4.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

4.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

Разработка и проверка метода динамической идентификации погружных асинхронных двигателей для скважинной нефтедобычи относится

к адаптивным системам управления электроприводами. Данная разработка может быть применена на различных электроприводах для скважинной нефтедобычи. Как и любой проект, метод динамической идентификации должен быть конкурентоспособным. Для этого проведем сравнение. Результаты сравнения приведены в таблице 4.1.1.

Таблица 4.1.1. Сравнительный анализ

	Частотно-регулируемые электропривода (вариант I)	Системы управления электроприводами с внедренной разработкой (вариант II)
Надежность	Высокая	Высокая
Количество основных составных элементов	Четыре: преобразователь частоты, электродвигатель, соединительная муфта, исполнительный механизм (нагрузка)	Четыре: преобразователь частоты, электродвигатель, соединительная муфта, исполнительный механизм (нагрузка)
Сложность структуры	Сложная	Сложная
Стоимость	Малая	Стоимость выше, чем у варианта I, в связи с программированием регулятора частоты на разрабатываемый метод

Видно, что система управления с применением разработанного метода динамической идентификации параметров погружных асинхронных двигателей является наиболее громоздкой и дорогостоящей. Однако необходимо учитывать экономию при применении таких систем.

Адаптивные системы управления с внедренным методом динамической идентификации параметров погружных асинхронных двигателей является улучшенным видом частотного регулирования электроприводами, так как система управления автоматически подстраивает управляющие воздействия к изменениям нагрузок и внутренних параметров двигателей. Это приводит к повышению эффективности работы электропривода. На основании [23] можно утверждать, что в среднем эффективность электроприводов с адаптивными системами управления выше чем у частотно-регулируемого электропривода на 15 – 20% только за счет быстрого реагирования системы на изменяющиеся

нагрузку и возмущающие воздействия. Соответственно экономическая эффективность выше, чем при использовании частотно-регулируемого электропривода, при этом дополнительные затраты будут только на программирование регулятора частоты на разрабатываемый метод.

4.1.2. Технология QuaD

Технология QuaD (QUality ADvisor) представляет собой гибкий инструмент измерения характеристик, описывающих качество новой разработки и ее перспективность на рынке и позволяющие принимать решение целесообразности вложения денежных средств в научно-исследовательский проект. Для упрощения процедуры проведения QuaD оценка проводится в табличной форме (табл. 4.1.2).

В соответствии с технологией QuaD каждый показатель оценивается экспертным путем по стобальной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 100 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Таблица 4.1.2. Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение (3/4)	Средневзвешенное значение (5x2)x100
1	2	3	4	5	
Показатели оценки качества разработки					
1. Энергоэффективность	0,07	95	100	0,95	6,65
2. Помехоустойчивость	0,1	87	100	0,87	8,7
3. Надежность	0,03	90	100	0,9	2,7
4. Унифицированность	0,09	90	100	0,9	8,1
5. Уровень материалоемкости разработки	0,06	97	100	0,97	5,82
6. Уровень шума	0,03	80	100	0,8	2,4

Продолжение таблицы 4.1.2

7. Безопасность	0,01	80	100	0,8	2,4
8. Потребность в ресурсах памяти	0,02	75	100	0,75	1,5
9. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,04	85	100	0,85	3,4
10. Простота эксплуатации	0,04	98	100	0,98	3,92
11. Качество интеллектуального интерфейса	0,05	96	100	0,96	4,8
12. Ремонтопригодность	0,06	100	100	1	6
Показатели оценки коммерческого потенциала разработки					
13. Конкурентоспособность продукта	0,04	90	100	0,9	3,6
14. Уровень проникновения на рынок	0,04	70	100	0,7	2,8
15. Перспективность рынка	0,07	95	100	0,95	6,65
16. Цена	0,1	65	100	0,65	6,5
17. Послепродажное обслуживание	0,03	90	100	0,9	2,7
18. Финансовая эффективность научной разработки	0,05	78	100	0,78	3,9
19. Срок выхода на рынок	0,03	71	100	0,71	2,13
20. Наличие сертификации разработки	0,04	80	100	0,8	3,2
Итого	1				87,87

Оценка качества и перспективности по технологии QuaD определяется по формуле:

$$P_{cp} = \sum B_i \cdot B_i = 0,07 \cdot 95 + 0,1 \cdot 87 + \dots + 0,04 \cdot 80 = 87,87,$$

где P_{cp} – средневзвешенное значение показателя качества и перспективности научной разработки;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – средневзвешенное значение i -го показателя.

Значение P_{cp} получилось равным 87,87, что говорит о том, что данная разработка является перспективной.

4.1.3. SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта. Результаты первого этапа SWOT-анализа представлены в таблице 4.1.3.1.

Таблица 4.1.3.1. Матрица SWOT

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии. С2. Экологичность технологии. С3. Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями. С4. Повышение производительности труда. С5. Квалифицированный персонал. С6. Высокий срок эксплуатации. С7. Надежность данной системы по сравнению с другими. С8. Высокое качество продукции. С9. Универсальность схемы управления.</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой Сл2. Большой срок выхода на рынок Сл3. Отсутствие необходимого оборудования для проведения испытания опытного образца</p>
<p>Возможности: В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ В2. Появление дополнительного спроса на новый продукт В3. Снижение стоимости на электроэнергию и материалы, используемые при научных исследованиях В4. Повышение стоимости конкурентных разработок В5. Развитие технологий в данной отрасли</p>		

Продолжение таблицы 4.1.3.1

<p>Угрозы: У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства. У2. Введения дополнительных государственных требований к сертификации продукции У3. Экономическая ситуация в стране, влияющая на спрос.</p>		
--	--	--

Результаты второго этапа SWOT-анализа представлены в таблице 4.1.3.2.

Таблица 4.1.3.2. Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта										
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	B1	0	+	0	0	+	0	+	+	+
	B2	+	+	+	+	-	+	+	+	+
	B3	+	-	+	+	-	+	+	0	+
	B4	+	-	-	0	+	+	+	+	+
	B5	+	0	+	+	+	+	+	+	+

Результаты анализа таблицы:

B2B3B4C1C6C7C9;

B1C2C5C7C8C9;

B4C1C5C6C7C8C9;

B5C1C3C4C5C6C7C8C9.

Продолжение таблицы 4.1.3.2.

Слабые стороны проекта				
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3
	B1	-	-	-
	B2	-	-	-
	B3	-	-	-
	B4	-	-	0
	B5	+	0	+

Результаты анализа таблицы:

B5Сл1Сл3.

Продолжение таблицы 4.1.3.2.

Сильные стороны проекта										
Угрозы		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	У1	-	-	-	-	+	-	-	-	-
	У2	0	0	-	-	-	-	-	-	+
	У3	-	-	-	0	-	-	-	-	-

Результаты анализа таблицы:

У1С5;

У2С9.

Окончание таблицы 4.1.3.2.

Слабые стороны проекта				
Угрозы		Сл1	Сл2	Сл3
	У1	+	0	0
	У2	-	0	+
	У3	+	-	+

Результаты анализа таблицы:

У1Сл1;

У2Сл3;

У3Сл1Сл3.

В рамках третьего этапа составляем итоговую матрицу SWOT-анализа (табл. 4.1.3.3).

Таблица 4.1.3.3. Итоговая матрица SWOT-анализа

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>С1. Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии.</p> <p>С2. Экологичность технологии.</p> <p>С3. Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями.</p> <p>С4. Повышение производительности труда.</p> <p>С5. Квалифицированный персонал.</p> <p>С6. Высокий срок эксплуатации.</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>Сл1. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой</p> <p>Сл2. Большой срок выхода на рынок</p> <p>Сл3. Отсутствие необходимого оборудования для проведения испытания опытного образца</p>
--	---	--

Продолжение таблицы 4.1.3.3

	С7.Надежность данной системы по сравнению с другими. С8. Высокое качество продукции. С9. Универсальность схемы управления.	
Возможности: В1.Использование инновационной инфраструктуры ТПУ В2.Появление дополнительного спроса на новый продукт В3. Снижение стоимости на электроэнергию и материалы, используемые при научных исследованиях В4. Повышение стоимости конкурентных разработок В5. Развитие технологий в данной отрасли	В2В3В4С1С6С7С9 В1С2С5С7С8С9 В4С1С5С6С7С8С9 В5С1С3С4С5С6С7С8С9	В5Сл1Сл3
Угрозы: У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства. У2. Введения дополнительных государственных требований к сертификации продукции У3. Экономическая ситуация в стране, влияющая на спрос.	У1С5 У2С9	У1Сл1 У2Сл3 У3Сл1Сл3

Результаты SWOT-анализа учитываются при разработке структуры работ, выполняемых в рамках научно-исследовательского проекта.

4.2. Определение возможных альтернатив проведения научных исследований

В предыдущем разделе были описаны методы, которые позволяют выявить и предложить возможные альтернативы проведения исследования и доработки результатов. К их числу относятся технология QuaD, оценка конкурентных инженерных решений, SWOT-анализ. К ним можно добавить ФСА-анализ, метод Кано. Однако, в большей степени все приведенные методы ориентированы на совершенствование результатов научного исследования, находящегося на стадии создания макета, модели системы, прототипа, конечного продукта. Если разработка находится на перечисленных стадиях жизненного

цикла нового продукта, можно предложить не менее трех основных вариантов совершенствования разработки или основных направлений научного исследования.

Разработка относится к вышеописанным стадиям, поэтому нет необходимости использовать морфологический подход.

4.3. Планирование научно-исследовательских работ

4.3.1. Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;

Составляем перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования, проводим распределение исполнителей по видам работ. Результат представлен в таблице 4.3.1.

Таблица 4.3.1. Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель темы
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
	3	Описание объекта автоматизации (модернизации)	Инженер
	4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Разработка метода идентификации параметров погружных асинхронных двигателей	Инженер
	6	Решение проблемы цифрового дифференцирования	Инженер
	7	Решение задачи фильтрации полученных оценок	Инженер
	8	Проверка метода динамической идентификации параметров погружного асинхронного двигателя с помощью математической модели	Инженер

Продолжение таблицы 4.3.1

	9	Экспериментальная проверка метода идентификация параметров асинхронного двигателя на лабораторном стенде	Инженер
Обобщение и оценка результатов	10	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель
<i>Проведение ОКР</i>			
Разработка технической документации и проектирование	11	Технико-экономические расчеты	Инженер
	12	Вопросы безопасности и экологичности проекта	Инженер
	13	Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	Инженер

Указав этапы работ и назначив исполнителей работ приступаем к определению трудоемкости выполнения работ.

4.3.2. Определение трудоемкости выполнения работ

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$ используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5}, \quad (4.3.2.1)$$

где $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

t_{mini} – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

t_{maxi} – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i}, \quad (4.3.2.2)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожi}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

4.3.3. Разработка графика проведения научного исследования

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{кал}, \quad (4.3.3.1)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{кал}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}}, \quad (4.3.3.2)$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году.

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе T_{ki} необходимо округлить до целого числа. Все рассчитанные значения сводим в таблицу (табл. 4.3.3.1).

Таблица 4.3.3.1. Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях T_{pi}		Длительность работ в календарных днях T_{ki}	
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{ож}$, чел-дни		Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер
	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер				
Составление и утверждение технического задания	1		2		2		2		4	
Подбор и изучение материалов по теме		5		8		7		7		11
Описание объекта автоматизации (модернизации)		3		4		4		4		7
Календарное планирование работ по теме	3		5		4		4		7	
Разработка метода идентификации параметров погружных асинхронных двигателей		14		30		20		20		26
Решение проблемы цифрового дифференцирования		4		6		5		5		8
Решение задачи фильтрации полученных оценок		2		4		8		8		12
Проверка метода динамической идентификации параметров погружного асинхронного двигателя с помощью математической модели		2		4		3		3		5

Продолжение таблицы 4.3.3.1

Экспериментальная проверка метода идентификации параметров асинхронного двигателя на лабораторном стенде	3		6		5		5		8	
Оценка эффективности полученных результатов	2		3		3		3		5	
Технико-экономические расчеты		3		7		5		5		8
Вопросы безопасности и экологичности проекта		3		7		5		5		8
Составление отчета		1		3		2		2		4

На основе таблицы 4.3.3.1 строим календарный план-график. График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования. При этом работы на графике выделяем различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

Таблица 4.3.3.2. Календарный план-график проведения НИОКР по теме

№ работ	Вид работ	Исполнители	T _{кi} , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ												
				фев.		март			апрель			май			июнь	
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	4	█												
2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	11	█												
3	Описание объекта автоматизации (модернизации)	Инженер	7	█												
4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель	7	█												
5	Разработка метода идентификации параметров погружных асинхронных двигателей	Инженер	20	█												

4.4. Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

Все необходимое оборудование и материалы имеются в лаборатории, поэтому расчет материальных затрат проводить не будем.

4.4.1. Основная заработная плата исполнителей темы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20–30 % от тарифа или оклада. Расчет основной заработной платы сводится в таблицу 4.4.1.1.

Таблица 4.4.1.1. Расчет основной заработной платы

№ п/п	Наименование этапов	Исполнители по категориям	Трудо-емкость, чел.-дн.	Зароботная плата, приходящаяся на один чел.-дн., тыс. руб.	Всего заработная плата по тарифу (окладам), тыс. руб.
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	4	2351	9404
2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	11	1523	16753
3	Описание объекта автоматизации (модернизации)	Инженер	7	1523	10661
4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель	7	2351	16457
5	Разработка метода идентификации параметров погружных асинхронных двигателей	Инженер	20	1523	30460
6	Решение проблемы цифрового дифференцирования	Инженер	8	1523	12184
7	Решение задачи фильтрации полученных оценок	Инженер	12	1523	18276
8	Проверка метода динамической идентификации параметров погружного асинхронного двигателя с помощью математической модели	Инженер	5	1523	7615
9	Экспериментальная проверка метода идентификация параметров асинхронного двигателя на лабораторном стенде	Инженер	3	1523	4569
10	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель	2	2351	4702

Продолжение таблицы 4.4.1.1

11	Технико-экономические расчеты	Инженер	8	1523	12184
12	Вопросы безопасности и экологичности проекта	Инженер	8	1523	12184
13	Составление пояснительной записки	Инженер	4	1523	6092
Итого:					161541

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИТ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}, \quad (4.4.1.1)$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата;

$Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата (12-20 % от $Z_{\text{осн}}$).

Основная заработная плата ($Z_{\text{осн}}$) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p, \quad (4.4.1.2)$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата одного работника;

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (табл. 4.3.3.2);

$Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} = \frac{53594 \cdot 10,4}{237} = 2351 \text{ руб},$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя;

при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (табл. 4.4.1.2).

Таблица 4.4.1.2. Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	52	52
- праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
- отпуск	48	48
- невыходы по болезни	14	14
Действительный годовой фонд рабочего времени	237	237

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{TC} \cdot (1 + k_{np} + k_d) \cdot k_p = 27484 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 53594 \text{ руб}$$

где Z_{TC} – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

k_{np} – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от Z_{TC});

k_d – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5 (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: 15-20 % от Z_{TC});

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Тарифная заработная плата Z_{TC} находится из произведения тарифной ставки работника 1-го разряда $T_{ci} = 600$ руб. на тарифный коэффициент k_T и учитывается по единой для бюджетной организации тарифной сетке. Для предприятий, не относящихся к бюджетной сфере, тарифная заработная плата (оклад) рассчитывается по тарифной сетке, принятой на данном предприятии. Расчёт основной заработной платы приведён в табл. 4.4.1.3.

Таблица 4.4.1.3. Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Z_{TC} , руб.	k_{np}	k_d	k_p	Z_m , руб.	$Z_{дн}$, руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	27484	0,3	0,2	1,3	53594	2351	13	30563
Инженер	17808	0,3	0,2	1,3	34725	1523	86	130978
Итого $Z_{осн}$								161541

4.4.2. Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

- для руководителя $Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,12 \cdot 30563 = 3668$ руб,
- для инженера $Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,12 \cdot 130978 = 15717$ руб,

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

4.4.3. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников. Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

- для руководителя
 $Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}) = 0,271 \cdot (30563 + 3668) = 9277$ руб
- для инженера
 $Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}) = 0,271 \cdot (130978 + 15717) = 39754$ руб

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.). На 2014 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ

установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году водится пониженная ставка – 27,1%.

Отчисления во внебюджетные фонды рекомендуется представляем в табличной форме (табл. 4.4.3).

Таблица 4.4.3. Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.
Руководитель проекта	30563	3668
Студент-дипломник	130978	15717
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,271	
Итого		
Руководитель	9277	
Инженер	39754	

4.4.4. Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

- для руководителя

$$Z_{накл} = (\text{сумма статей } 1 \div 7) \cdot k_{нр} = (Z_{осн} + Z_{доп} + Z_{внеб}) \cdot 0,16 = \\ = (30563 + 3668 + 9277) \cdot 0,16 = 6961 \text{ руб,}$$

- для инженера

$$Z_{накл} = (\text{сумма статей } 1 \div 7) \cdot k_{нр} = (Z_{осн} + Z_{доп} + Z_{внеб}) \cdot 0,16 = \\ = (130978 + 15717 + 39754) \cdot 0,16 = 29832 \text{ руб,}$$

где $k_{нр}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

4.4.5. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в табл. 4.4.5.

Таблица 4.4.5. Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.	%
1. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	161541	Пункт 5.4.1
2. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	19385	Пункт 5.4.2
3. Отчисления во внебюджетные фонды	49031	Пункт 5.4.3
4. Накладные расходы	36793	16 % от суммы ст. 1-3
5. Бюджет затрат НИИ	266750	Сумма ст. 1-4

4.5. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Финансовую эффективность проекта можно оценить при помощи интегрального финансового показателя:

$$I_{фин}^{исп.i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}}$$

где $I_{фин}^{исп.i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

Расчёт интегрального финансового показателя проводим в виде табличной формы.

Таблица 4.5.1. Расчёт интегрального финансового показателя конкурентных технических решений

Вариант исполнения	Φ_{\max} , руб.	Φ_{pi} , руб.	$I_{фин}^{исп.i}$, о.е.
1	44115,6	44115,6	1
2		30400	0,69

Величина интегрального финансового показателя разработки варианта исполнения 2 (системы управления электроприводами с внедренной разработкой) отражает соответствующее численное удешевление стоимости электропривода при одинаковой мощности. Вариант исполнения 2 имеет наименьший интегральный показатель и, следовательно, вариант исполнения является наиболее финансово эффективным, что является определяющим критерием.

Определение ресурсоэффективности варианта исполнения 2 можно оценить с помощью интегрального критерия ресурсоэффективности:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности;

a_i – весовой коэффициент разработки;

b_i – балльная оценка разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания.

Расчёт интегрального показателя ресурсоэффективности схем проводим в виде табличной формы.

Таблица 4.5.2. Сравнительная оценка характеристик проекта

Критерии	Весовой коэффициент	Частотно-регулируемый электропривод	Системы управления электроприводами с внедренной разработкой
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,25	5	5
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,1	5	5
3. Помехоустойчивость	0,1	4	4
4. Энергосбережение	0,15	4	5
5. Надёжность	0,25	4	4
6. Материалоёмкость	0,15	4	5
Итого:	1,00	4,35	4,65

Рассчитываем показатель ресурсоэффективности:

$$I_p = 0,25 \cdot 5 + 0,1 \cdot 5 + 0,1 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 + 0,25 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 = 4,65.$$

Показатель ресурсоэффективности проекта имеет достаточно высокое значение, что говорит об эффективности использования технического проекта.

Таким образом, применение частотно-регулируемых электроприводов и сейчас остается эффективным. Переход к системам управления электроприводами с внедренной разработкой целесообразен так как, проект обладает высокой ресурсоэффективностью.

Кроме того, в ходе выполнения данной части выпускной работы была доказана конкурентоспособность данного технического решения в сравнении с другими перспективами, был произведен SWOT-анализ, планирование, которое ограничило выполнение работы в 99 дня. Также был посчитан бюджет НИИ равный 266750 руб, основная часть которого приходится на зарплаты сотрудников.

5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

В данном разделе рассматриваются безопасность и экологичность рабочей зоны применения метода динамической идентификации параметров погружных асинхронных двигателей для скважинной нефтедобычи. Здесь будет рассматриваться обеспечение необходимых условий труда (санитарно-гигиенические условия, защита от негативных производственных факторов, обеспечение пожарной безопасности) в соответствии с действующими нормативными документами, а также вопросы экологической безопасности.

Безопасность включает в себя влияние опасных и вредных факторов, их анализ и меры их профилактики.

5.1. Производственная безопасность

5.1.1. Анализ вредных и опасных производственных факторов

Одна из главных особенностей условий труда операторов по добыче нефти – это работа, в основном, на открытом воздухе (на кустах скважин), а также работа, связанная с перемещениями на территории объекта и частыми подъемами на специальные площадки, находящиеся на высоте. Поэтому в условиях сурового климата Западной Сибири и Крайнего Севера с низкими температурами (зимой до -50°C) и высокой влажностью (летом до 100%) большую роль играют метеорологические факторы. При низкой (сверхдопустимых норм) температуре окружающей среды тепловой баланс нарушается, что вызывает переохлаждение организма, ведущее к заболеванию. В случае низкой температуры воздушной среды уменьшается подвижность конечностей вследствие интенсивной теплоотдачи организма, что сковывает движения. Это может послужить причиной несчастных случаев и аварий [36].

При длительном пребывании работающего в условиях низкой температуры и, следовательно, переохлаждении организма возможно возникновение различных острых и хронических заболеваний: воспаление верхних дыхательных путей, ревматизм и другие. Результатами многократного

воздействия низких температур являются пояснично-крестцовый радикулит и хроническое повреждение холодом (ознобление).

При высокой температуре окружающей среды снижаются внимание и скорость реакции работающего, что также может послужить причиной несчастного случая и аварии. При работе в летнее время при высокой температуре (до $+50^{\circ}\text{C}$) возможны перегревания организма, солнечные и тепловые удары.

Кусты, как правило, засыпаются песком, поэтому при сильных ветрах случается поднятие частиц песка и пыли, которые могут попасть в глаза и верхние дыхательные пути. Нормирование метеорологических параметров устанавливает ГОСТ 12.1.005-88 [37].

В ходе производственных операций рабочие могут подвергаться воздействию вредных газов и паров нефти, источником которых являются нарушения герметичности фланцевых соединений, механической прочности фонтанной арматуры (свищи, щели по шву) вследствие внутренней коррозии или износа, превышения максимально допустимого давления, отказы или выходы из строя регулирующих и предохранительных клапанов. Пары нефти и газа при определенном содержании их в воздухе могут вызвать отравления и заболевания. При постоянном вдыхании нефтяного газа и паров нефти поражается центральная нервная система, снижается артериальное давление, становятся реже пульс и дыхание, понижается температура тела. Особенно опасен сероводород – сильный яд, действующий на нервную систему. Он нарушает доставку тканям кислорода, раздражающе действует на слизистую оболочку глаз и дыхательных путей, вызывает острые и хронические заболевания, ПДК H_2S – $0,1\text{ мг/м}^3$ (ГОСТ 12.1.005-88) [37].

Специфическая особенность условий эксплуатации нефтяных скважин – высокое давление на устье, которое доходит до 30 МПа. В связи с этим любое ошибочное действие оператора при выполнении работ на устье скважины может привести к опасной аварии.

Высокое давление и загазованность указывают на повышенную пожаро- и взрывоопасность объекта.

Эксплуатация скважин с УЭЦН характеризуется наличием высокого напряжения в силовом кабеле. Причем станция управления и скважина оборудования ЭЦН обычно не находятся в непосредственной близости друг от друга, и часть кабеля проходит по поверхности, что увеличивает зону поражения электротоком, а, следовательно, и вероятность несчастного случая.

Причиной несчастного случая может быть также неудовлетворительное состояние объекта с позиции санитарии, его чрезмерная захламленность и замазученность.

Таким образом, мы рассмотрели основные факторы производственной среды, влияющие на здоровье и работоспособность операторов в процессе труда. Результаты приведены в таблице 5.1.1.

Таблица 5.1.1. Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	Факторы (ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
1	2	3	4
Повышенное содержание паров нефти и газа в воздухе	токсический (химический)		ГОСТ 12.1.005-88
Работы на высоте		расположение рабочего места на значительной высоте относительно поверхности земли (пола) (физический)	ПРИКАЗ от 28 марта 2014 года N 155н «Об утверждении Правил по охране труда при работе на высоте»
Работы на открытом воздухе в ночное время суток	отсутствие или недостаток естественного света(физический)		СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03
Работы в условиях низкой температуры	повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны (физический)		ГОСТ 12.1.005–88
Работы в условиях высокой влажности	повышенная или пониженная влажность воздуха (физический)		ГОСТ 12.1.005–88

Продолжение таблицы 5.1.1

Работы с высоким напряжением		повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека (физический)	ПУЭ ГОСТ Р 12.1.019-2009
Работы при повышенном уровне шума	повышенный уровень шума на рабочем месте (физический)		ГОСТ 12.1.003–83
Незащищенные части подвижных элементов производственного оборудования		подвижные части производственного оборудования	ГОСТ 12.4.011-89

Таким образом, все опасные и вредные производственные факторы подразделяются на физические, химические, биологические и психофизиологические в соответствии с ГОСТ 12.0.003-74 [50].

5.1.2. Обоснование мероприятий по защите персонала предприятия от действия опасных и вредных факторов

Для обеспечения безопасности для выявленных опасных факторов существуют средства защиты, представленные в ГОСТ 12.4.011-89 [38].

Данный стандарт распространяется на средства, применяемые для предотвращения или уменьшения воздействия на работающих опасных и вредных производственных факторов, и устанавливает классификацию и общие требования к средствам защиты работающих.

Общие требования к средствам защиты:

- Средства защиты работающих должны обеспечивать предотвращение или уменьшение действия опасных и вредных производственных факторов. Средства защиты не должны быть источником опасных и вредных производственных факторов.

- Средства защиты должны отвечать требованиям технической эстетики и эргономики.

- Выбор конкретного типа средства защиты работающих должен осуществляться с учетом требований безопасности для данного процесса или вида работ.

– Средства индивидуальной защиты следует применять в тех случаях, когда безопасность работ не может быть обеспечена конструкцией оборудования, организацией производственных процессов, архитектурно-планировочными решениями и средствами коллективной защиты.

– Средства индивидуальной защиты не должны изменять своих свойств при их стирке, химчистке и обеззараживании.

– Средства индивидуальной защиты должны подвергаться оценке по защитным, физиолого-гигиеническим и эксплуатационным показателям.

– Требования к маркировке средств индивидуальной защиты должны соответствовать ГОСТ 12.4.115-82 и стандартам на маркировку на конкретные виды средств индивидуальной защиты [39].

– Средства индивидуальной защиты должны иметь инструкцию с указанием назначения и срока службы изделия, правил его эксплуатации и хранения.

– Средства коллективной защиты работающих конструктивно должны быть соединены с производственным оборудованием или его элементами управления таким образом, чтобы, в случае необходимости, возникло принудительное действие средства защиты.

– Допускается использовать средства коллективной защиты в качестве элементов управления для включения и выключения производственного оборудования.

– Средства коллективной защиты работающих должны быть расположены на производственном оборудовании или на рабочем месте таким образом, чтобы постоянно обеспечивалась возможность контроля его работы, а также безопасного ухода и ремонта.

К средствам защиты от падения с высоты относятся [40]:

- ограждения;
- защитные сетки;
- знаки безопасности.

К средствам защиты от поражения электрическим током относятся [41,42]:

- оградительные устройства;
- устройства автоматического контроля и сигнализации;
- изолирующие устройства и покрытия;
- устройства защитного заземления и зануления;
- устройства автоматического отключения;
- устройства выравнивания потенциалов и понижения напряжения;
- устройства дистанционного управления;
- предохранительные устройства;
- молниеотводы и разрядники;
- знаки безопасности.

К средствам защиты от воздействия механических факторов относятся устройства [38]:

- оградительные;
- автоматического контроля и сигнализации;
- предохранительные;
- дистанционного управления;
- тормозные;
- знаки безопасности.

При работах на нефтяном месторождении возникают следующие вредные производственные факторы:

- токсический (химический).

Согласно источнику [37] содержание вредных веществ в воздухе рабочей зоны не должно превышать предельно допустимых концентраций (ПДК), используемых при проектировании производственных зданий, технологических процессов, оборудования, вентиляции, для контроля за качеством производственной среды и профилактики неблагоприятного воздействия на здоровье работающих.

Содержание вредных веществ в воздухе рабочей зоны подлежит систематическому контролю для предупреждения возможности превышения предельно допустимых концентраций - максимально разовых рабочей зоны (ПДКМР.РЗ) и среднесменных рабочей зоны (ПДКСС.РЗ).

- повышенный уровень шума на рабочем месте

Согласно источнику [43] выполнение всех видов работ на постоянных рабочих местах в производственных помещениях и на территории предприятий уровни звука и эквивалентные уровни звука, не должны превышать 80 дБА. Защита от шума осуществляется применением средств и методов коллективной защиты и применением средств индивидуальной защиты.

- отсутствие или недостаток естественного света.

Оценка освещенности рабочей зоны необходима для обеспечения нормативных условий работы в помещениях и проводится в соответствии с СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 [44]. Нормируемый показатель искусственного и естественного освещения по п.191 составляет 30 лк. Для уменьшения влияния этого вредного фактора применяют средства и методы коллективной защиты и средства индивидуальной защиты.

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура воздуха в помещении, относительная влажность воздуха, скорость движения воздуха, интенсивности теплового облучения работающих на рабочих местах от производственных источников. Эти параметры в комплексе и по отдельности влияют на организм человека. Допустимые величины интенсивности теплового облучения поверхности тела работающих от производственных источников: 21°C - при категории работ IIб. Время пребывания людей при данных параметрах микроклимата может составлять 8 часов [45].

Для обеспечения безопасности для выявленных вредных факторов существуют средства защиты, представленные в ГОСТ 12.4.011-89 [38].

Средства защиты работающих в зависимости от характера их применения подразделяют на две категории:

- средства коллективной защиты;
- средства индивидуальной защиты.

Рассмотрим средства коллективной защиты. К средствам защиты от воздействия химических факторов относятся устройства [38]:

- оградительные;
- автоматического контроля и сигнализации;
- герметизирующие;
- для вентиляции и очистки воздуха;
- для удаления токсичных веществ;
- дистанционного управления;
- знаки безопасности.

К средствам защиты от повышенного уровня шума относятся устройства [46]:

- оградительные;
- звукоизолирующие, звукопоглощающие;
- глушители шума;
- автоматического контроля и сигнализации;
- дистанционного управления.

Рассмотрим средства индивидуальной защиты [38]:

– Средства защиты органов дыхания: противогазы, респираторы, самоспасатели, пневмошлемы, пневмомаски, пневмокуртки.

– Одежда специальная защитная: тулупы, пальто, полупальто, полушубки, накидки, плащи, полуплащи, халаты, костюмы, куртки, рубашки, брюки, шорты, комбинезоны, полукомбинезоны, жилеты, платья, сарафаны, блузы, юбки, фартуки, наплечники.

– Средства защиты ног: сапоги, сапоги с удлиненным голенищем, сапоги с укороченным голенищем, полусапоги, ботинки, полуботинки, туфли, бахилы, галоши, боты, тапочки (сандалии), унты, чукьяки, щитки, ботфорты, наколенники, портянки.

– Средства защиты рук: рукавицы, перчатки, полуперчатки, напальчники, наладонники, напульсники, нарукавники, налокотники.

– Средства защиты головы: каски защитные, шлемы, подшлемники, шапки, береты, шляпы, колпаки, косынки, накомарники.

– Средства защиты глаз: очки защитные.

– Средства защиты лица: щитки защитные лицевые.

– Средства защиты органа слуха: противошумные шлемы, противошумные вкладыши, противошумные наушники.

К средствам защиты от повышенных или пониженных температур воздуха и температурных перепадов относятся устройства [47]:

– оградительные;

– автоматического контроля и сигнализации;

– термоизолирующие;

– дистанционного управления;

– для радиационного обогрева и охлаждения.

К средствам нормализации воздушной среды производственных помещений и рабочих мест относятся устройства для [37]:

– вентиляции и очистки воздуха;

– кондиционирования воздуха;

– локализации вредных факторов;

– отопления;

– автоматического контроля и сигнализации;

– дезодорации воздуха.

5.2. Экологическая безопасность

При непреднамеренном воздействии на окружающую среду при добыче нефти происходит загрязнение атмосферы, поверхностных водотоков, подземных вод, недр. Среди загрязнителей водных объектов, почвогрунтовых недр одно из первых мест занимает нефтегазодобывающая промышленность.

Многие химические реагенты, используемые в нефтедобыче, при попадании в природные воды оказывают отрицательное влияние на их физико-химический состав, самоочищающую способность, а также могут оказывать токсическое воздействие на живой организм, в том числе и на человека.

Попадание нефти в почву, поверхностные грунты приводит к разрушению их структур, снижению водопроницаемости, ухудшает корневое питание растений, снижает количество микроорганизмов в почве, способствует образованию в ней углекислого газа.

Охрана воздушной среды в нефтяной промышленности проводится, главным образом, в направлении борьбы с потерями нефти за счет уменьшения испарения ее при сборе, транспортировке, подготовке и хранении. Что касается эксплуатации УЭЦН, для уменьшения испарения при перекачке нефти насосом, проектируются герметизированные системы сбора нефти и антикоррозионные наружные и внутренние покрытия насоса (УЭЦН) и емкостей, устанавливаются непримерзающие клапаны, расширяется применение резервуаров с понтонами или плавающими крышами и другие технические решения.

5.3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Помещения и наружные установки в зависимости от способности к образованию взрывоопасных смесей или возгоранию находящихся в них материалов и веществ делятся на взрывоопасные и пожароопасные [48].

Установку электроцентробежного насоса отнесем к категории «Б» по следующему критерию: в аварийной ситуации на работающем оборудовании могут выделяться взрывопожароопасные пары нефти и газа.

5.3.1. Анализ вероятных ЧС

К основным причинам пожара и загорания в нефтяной промышленности относятся следующие:

- нарушение технологического процесса и неисправность оборудования;

- неосторожное обращение с огнем и бытовыми электроприборами;
- короткое замыкание электрических проводов и перегрев электрооборудования;
- нарушение правил пожарной безопасности при производстве электрогазосварочных и других огневых работ.

Нарушение технологического процесса – использование при вскрытии и разбурировании продуктивного пласта бурового раствора, параметры которого (вязкость и плотность) не соответствуют геолого-техническому наряду, подъем бурового инструмента без долива скважины, увеличение давления в газопроводе, нарушение технологического процесса при подготовке нефти к транспорту, т.е. неполное отделение нефти и газа, может привести к скоплению горючего газа на территории резервуарного парка и создать опасную ситуацию.

Неисправность оборудования – следствие несвоевременного планово-предупредительного ремонта, коррозии и других причин. Все это может привести к негерметичности оборудования, в зависимости от его назначения, к утечке нефти, ее паров или нефтяного газа, а это, в свою очередь, — к возникновению взрывоопасной концентрации газо-воздушной смеси и, как следствие, к взрыву или пожару. К таким последствиям приводят, например, негерметичность задвижки, перекрывающей ремонтируемый участок нефтепровода от нефтесборной емкости, негерметичность фонтанной или компрессорной арматуры, разрушение или выбивание набивок и прокладочных материалов соединений оборудования и запорной арматуры, крышек люков и другие неисправности.

Короткое замыкание электрических проводов и перегрев электрооборудования -при наличии газа и паро-воздушных горючих смесей, электрическое искрение, сопутствующее короткому замыканию, значительное повышение температуры при перегреве электрооборудования неизбежно вызывают воспламенение этих смесей, например: загорание разлитой нефти от искры при схлестывании электропроводов, загорание нефти в резервуаре от искры короткого замыкания при обрыве кабеля подогревателя, загорание

изоляционных материалов из-за короткого замыкания в результате пробоя или перекрытия изоляции. Частой причиной пожаров также является ослабление контакта в местах присоединения токоведущих частей.

Нарушение правил пожарной безопасности при электрогазосварочных и других огневых работах – отогрев оборудования, содержащего легковоспламеняющиеся жидкости, горючие газы, открытым огнем; оставленные под напряжением силовой и осветительной линии во время фонтанирования скважины и др. Условия возникновения пожара и загорания — наличие горючей среды, окислителя и источников зажигания. Такими источниками на предприятиях нефтяной промышленности могут быть механические и электрические искры, пирофорные отложения, нагретые поверхности, открытый огонь и др. Искрение, возникающее при появлении статического электричества, способно привести к пожару вследствие нарушения условий, обеспечивающих безопасность при сливе, наливе, перекачке и хранении легковоспламеняющейся жидкости и горючей жидкости.

5.3.2. Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС

Пожарная профилактика – это совокупность основных противопожарных мероприятий, направленных на исключение возникновения пожара.

Мероприятия по пожарной безопасности разделяются на четыре основные группы:

- предупреждение пожаров, т.е. исключение причин их возникновения;
- ограничение сферы распространения огня;
- обеспечение успешной эвакуации людей и материальных ценностей из сферы пожара;
- создание условий эффективности тушения пожара.

Ограничение сферы распространения огня, т.е. исключение причин возникновения пожара: осуществляют правильной планировкой предприятий,

соблюдением соответствующих противопожарных норм, применением огнепреграждающих устройств и т.д.

На рабочем месте оператора УЭЦН должны быть обеспечены первичными средствами пожаротушения:

- Переносные огнетушители.
- Асбестовая ткань (войлок, кошму).
- Ящики для песка.
- Бочки для хранения воды.

На месте эксплуатации УЭЦН учитывая климатические условия можно спрогнозировать виды ЧС: природного характера (сильные морозы (ниже – 40 С°), метели и снежные заносы); техногенного характера (пожары, отключение электроэнергии, взрывы, прорыв трубы, разливы нефти, взрыв емкости).

Специфической особенностью большинства объектов нефтегазовой промышленности является наличие значительного объема нефти и газа, что обуславливает возникновение аварий, пожаров, взрывов, затоплений, опасного поражения местности и атмосферы сильнодействующими ядовитыми веществами.

Повышение устойчивости предприятий к ЧС при эксплуатации УЭЦН осуществляется за счет выполнения ряда мероприятий:

а) обваловка емкостей с горючими и химически опасными веществами в расчете на удержание полного объема хранящихся в них жидкостей;

б) покрытия огнезащитной краской или обмазкой деревянных конструкций; оснащения средствами пожаротушения в соответствии с нормами;

в) обучение операторов УЭЦН действиям по безопасной остановке оборудования, своевременный и регулярный инструктаж по пожарной безопасности;

г) укомплектование инструментов и запасными частями.

Технологические процессы, идущие под высоким давлением, оборудование, находящиеся под большими нагрузками, в определенных условиях представляют опасность для работающих.

Основные мероприятия по предотвращению опасностей, обусловленные повышением давления и нагрузкам, сводятся к следующим:

- осмотр и испытание установки, оборудования, механизмов;
- использование ослабленных элементов и устройств для механизации опасности;
- применение средств блокировки, исключающих аварии при неправильных действиях работающих.
- автоматизация производственных процессов, позволяющая вывести из опасных зон, осуществление контроля за показаниями приборов и дистанционные управления.

Для предохранения рабочих от поражения электрическим током электрооборудование УЭЦН должно быть надежно заземлено. В соответствии с ГОСТ 12.1.030-81 выполнен расчет заземляющего устройства станции управления ЭЦН [49].

Заземление комплектной трансформаторной подстанции наружной осуществляется электродами из круглой стали $d=12$ мм, $L=5$ м, забиваемых в землю на глубину 5,7 м и соединенных стальной полосой 40х4 мм. Сопротивление заземляющего устройства должно быть не более 4 Ом в любое время года. Все соединения выполняются сваркой согласно ПУЭ. После устройства контура заземления необходимо замерить сопротивление и, если оно окажется больше допустимого, забить дополнительные электроды.

Расчет производится в соответствии «Типовых расчетов по электрооборудованию».

Сопротивление растеканию тока одиночных стержневых заземлителей определяется по формуле:

$$R_{oc} = \frac{\rho \cdot K_c}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \left(\frac{\ln 2 \cdot l}{d} + \frac{1}{2} \frac{\ln 4t + l}{4t - l} \right) = \frac{1 \cdot 10^4 \cdot 1,65}{2 \cdot 3,148 \cdot 500} \cdot \left(\frac{\ln 2 \cdot 500}{1,2} + \frac{1}{2} \frac{\ln 4 \cdot 570 + 500}{4 \cdot 570 - 500} \right) = 37,5 \text{ Ом},$$

где ρ – удельное сопротивление грунта, 1×10^4 Ом*см;

K_c - коэффициент сезонности, для I климатической зоны $K_c = 1,65$;

l – длина стержня, 500 см;

d - диаметр стержня, 1,2 см;

t – глубина залегания, 570 см.

Необходимое количество стержней:

$$n = \frac{R_{oc}}{\eta_c \cdot R_3} = \frac{37,5}{0,61 \cdot 4} = 15,37 \text{ Ом},$$

где η – коэффициент использования стержневых заземлителей, 0,61;

R_3 - сопротивление, оказываемое заземляющим устройством растеканию тока, 4 Ом.

Сопротивление всех стержней:

$$R_c = \frac{R_{oc}}{n \cdot \eta_c} = \frac{37,5}{15,37 \cdot 0,61} = 3,8 \text{ Ом}.$$

Сопротивление растекания горизонтального (протяжного) заземлителя определяется по формуле:

$$R_n = \frac{0,336 \cdot \rho_{расч} \cdot I_n^2}{I_n \cdot d \cdot t_1} = \frac{0,336 \cdot 5 \cdot 10^4 \cdot 100000^2}{100000 \cdot 1,2 \cdot 70} = 14,3 \text{ Ом},$$

где l_n – общая длина горизонтального заземлителя (полосы 40x4 мм), 100000 см;

$$\rho_{расч} = \rho \cdot K_c = 10^4 \cdot 5 \text{ Ом} \cdot \text{см};$$

$K_c = 5$ - для I климатической зоны;

t_1 – глубина залегания протяжного заземлителя, 70 см.

Действительное сопротивление растеканию протяжного заземлителя с учетом коэффициента использования $\eta_n = 0,32$:

$$R_n^Д = \frac{R_n}{\eta_n} = \frac{14,3}{0,32} = 44,7 \text{ Ом}.$$

Общее сопротивление заземляющего устройства:

$$R_3 = \frac{R_c \cdot R_n^Д}{R_c + R_n^Д} = \frac{3,8 \cdot 44,7}{3,8 + 44,7} = 3,5 \text{ Ом}.$$

Из расчета следует, что полученное значение сопротивления не превышает допустимого, а, следовательно, будет обеспечено полноценное заземление объекта, соответствующее ГОСТ 12.1.030-81.

Заключение

1. Выполнены следующие поставленные задачи: математическое описание и моделирование погружных асинхронных двигателей, описание и составление разностных уравнений, описание метода динамической идентификации параметров погружного асинхронного двигателя и проверка его работоспособности на моделях и реальной установке, решение задачи фильтрации полученных оценок. Также рассмотрена проблема цифрового дифференцирования, присутствующая при идентификации, приведено обоснование решения данной проблемы, наглядное подтверждение работоспособности предложенных методов.

2. Исследовательские разделы выполнены на основе виртуальных (модели погружных асинхронных двигателей) и реальных экспериментальных данных, в данных разделах приведено наглядное представление материала этой части проекта: рисунки, таблицы, графики. Исследования по идентификации и сбору информации проводились с использованием программ MathCad и LabView.

3. Созданы методы динамической идентификации параметров погружных асинхронных двигателей для скважинной нефтедобычи и доказана их необходимость в применении и работоспособность, которая подтверждается экспериментальными данными. Также разработана большая база для продолжения разработок методов идентификации параметров объектов регулирования.

5. Были решены проблемы, которые связаны с обработкой экспериментальных данных при помощи нелинейной прогнозирующей фильтрации результатов оценок.

6. В разделе финансовый менеджмент были определены слабые и сильные стороны проекта, а также дальнейшие пути его развития.

7. В разделе социальная ответственность были рассмотрены безопасность и экологичность рабочей зоны (кустов скважин).

Список использованных источников

1. Прогноз научно-технологического развития отраслей топливно-энергетического комплекса России на период до 2035 года. – М.: Минэнерго, 2016. — 106 с.
2. Белоусенко И.В., Шварц Г.Р., Великий С.Н., Ершов М.С., Яризов А.Д. Новые технологии и современное оборудование в электроэнергетике нефтегазовой промышленности. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2007. – 478 с.
3. Ведерников В.А. Модели и методы управления режимами работы и электропотреблением погружных центробежных установок: Автореф. дис. д-ра техн. наук. – Тюмень, 2006. – 32 с.
4. Ивановский В.Н., Дарищев В.И., Сабиров А.А., Каштанов В.С., Пекин С.С. Скважинные насосные установки для добычи нефти. – М.: ГУП Издательство «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2002. – 824 с.
5. Ивановский В.Н., Пекин С.С., Сабиров А.А. Установки погружных центробежных насосов для добычи нефти. – М.: ГУП Издательство «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2002. – 256 с.
6. Генералов И.В. Повышение эффективности эксплуатации скважин, оборудованных УЭЦН, в осложненных условиях Самотлорского месторождения: Автореф. дис. канд. техн. наук. — Уфа, 2005. – 20 с.
7. Дилигенская А.Н. Идентификация объектов управления. Учебное пособие. — Самара: Самар. гос. техн. ун-т., 2009. — 136 с.
8. Гроп Д. Методы идентификации систем. - М.: Мир, 1979. – 302 с.
9. Макаров В.Г. Асинхронный электропривод электромеханических систем с оптимальными режимами работы по критерию энергосбережения: Автореф.дис. ... канд. тех. наук. – Казань, 2011. – 162 стр.
10. Афанасьев К.С., Глазырин А.С. Идентификация параметров и переменных состояния асинхронного двигателя с применением фильтра Калмана.

- Электромеханические преобразователи энергии: Материалы IV Международной научно-технической конференции – Томск, 13-16 октября 2009. – Томск: ТПУ, 2009. – 415 с.
11. Афанасьев К.С., Глазырин А.С. Экспериментальное апробирование алгоритмов идентификации асинхронного электродвигателя на основе фильтра Калмана и наблюдателя Люенбергера. Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: труды Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Т 1. Радиоэлектроника, электротехника и электроэнергетика, Томск, 6-8 Октября 2011. – Томск: СПБ Графикс, 2011. – 326 с.
 12. Технологический регламент по применению частотных преобразователей для скважин, оборудованных установками ЭЦН, на месторождениях ОАО «Сургутнефтегаз». Сургут: Изд-во «СНГ», 2007. – 13с.
 13. Станция управления ЭЛЕКТОН-05. Руководство по эксплуатации ЦТКД-065-РЭ. Изд. Радужный: «ЭЛЕКТОН», 2005. 64 с.
 14. Методические указания по оптимизации работы скважин с помощью частотно-регулируемых приводов УЭЦН. Нефтеюганск: Изд-во «ЮНГ», 2003. Вер. 1.0. № 16-ЮН-СТП-С01-01. – 10 с.
 15. Ковалев, А.Ю. Электротехнологические установки для нефтедобычи: монография / А.Ю.Ковалев, Е.М.Кузнецов, В. В. Аникин; Минобрнауки России, ОмГТУ, Нижневартровский академический институт прикладной энергетики — Омск: – 160 с.
 16. Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2001 – 704 стр.
 17. Л.С. Удут, О.П. Мальцева, Н.В. Кояин. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 8. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод: учебное пособие – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2009. – 354 с.
 18. Алиев И. И. Электротехнический справочник. – М.: ИП Радио-Софт, 2000. – 384 с.

- 19.Л.С. Удут, О.П. Мальцева, Н.В. Кояин. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 7. Теория оптимизации непрерывных многоконтурных систем управления электроприводов: учебное пособие – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 164 с.
- 20.Мальцева О. П., Удут Л. С., Кояин Н. В. Системы управления электроприводов: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 152 с.
- 21.Кояин Н. В., Удут Л. С., Мальцева О. П. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Часть 5. - Применение программы DORA-FUZZY в расчетах электроприводов постоянного тока: учебное пособие. – Издание 2-е переработанное и дополненное. –Томск: Изд. ТПУ, 2007. – 180 с.
- 22.Зайцев А.П. Основы теории автоматического управления: Учебное пособие. Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2000. – 152 с.
- 23.Сенигов П.Н., Карпеш М.А. Электрический привод. Руководство по выполнению базовых экспериментов. ЭП.001 РБЭ (905). Челябинск: ООО «Учебная техника», 2005. – 141 с.
- 24.Качин С.И., Однокопылов И.Г., Семенов С.М. Электрический привод. Динамика. Лабораторный практикум: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 103 с.
- 25.Однокопылов И.Г., Семенов С.М. Электрический привод. Статика. Лабораторный практикум: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 136 с.
- 26.A.S. Megherbi, H. Megherbi, K. Benmahamed and other. Parameter identification of induction motors using variable-weight cost function of genetic algorithms // Journal of electrical engineering and technology. – 2010. – vol.5, No.4, – pp. 597–605.
- 27.Цей Р., Шумафов М.М. Число обусловленности матрицы как показатель устойчивости при решении прикладных задач // Труды ФОРА. – 2011. – №16. – С. 61–67.

28. Котельников, В. А. Проблемы помехоустойчивой радиосвязи: радиотехнический сборник. – Госэнергоиздат, 1947. – 547 стр.
29. Солонина А.И., Улахович Д.А. Арбузов С.М. и др. Основы цифровой обработки сигналов: Учебное пособие. – Санкт-Петербург: «БХВ-Петербург», 2005 – 387 стр.
30. Хемминг Р.В. Цифровые фильтры. – М.: Недра, 1984. – 221 с.
31. Александров, Е. Е. Сравнительный анализ цифровых дифференцирующих фильтров / Е. Е. Александров, Т. Е. Александрова, В. А. Кононенко // В кн.: Автоматика / Automatics, 2011. – С. 303–304.
32. Гамм А.З., Голуб И.И. Наблюдаемость электроэнергетических систем. – М. «Наука», 1990. – 199 с.
33. Сипайлов В. А. Оптимизация режимов работы установок электроцентробежных насосов механизированной добычи нефти: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: спец. 05.09.03 / В. А. Сипайлов; Томский политехнический университет (ТПУ); науч. рук. В. Г. Букреев. — Томск, 2009. — 19 с. : ил.
34. Боловин Е. В. Способы повышения обусловленности матриц при решении систем разностных уравнений в задачах идентификации параметров динамических объектов / Е. В. Боловин, А. С. Глазырин // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. — 2013. — Т. 322, № 2: Математика и механика. Физика. — [С. 51-55].
35. Руководство пользователя плат 6023E/6024E/6025E. Многофункциональные платы ввода/вывода для компьютеров с шинами PCI, PXI и CompactPCI. – Copyright 1999 National Instruments Corporation, Редакция от 01.1999. Перевод с английского, верстка: Галишников К.Ю., 2001. – 116 стр.
36. Бабаев С.Г. Надежность нефтепромыслового оборудования. М., Недра, 1987 г., 265 с.

- 37.ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (с Изменением N 1).
- 38.ГОСТ 12.4.011-89 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства защиты работающих. Общие требования и классификация.
- 39.ГОСТ 12.4.115-82 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства индивидуальной защиты работающих. Общие требования к маркировке (с Изменениями N 1, 2).
- 40.Приказ от 28 марта 2014 года N 155н «Об утверждении Правил по охране труда при работе на высоте».
- 41.ГОСТ Р 12.1.019-2009 Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты
- 42.ПУЭ «Правила устройства электроустановок Издание седьмое».
- 43.СП 51.13330.2011. Защита от шума.
- 44.СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий.
- 45.СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
- 46.Долин П.А. Справочник по технике безопасности. 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 824 с.
- 47.МР 2.2.7.2129—06 Режимы труда и отдыха работающих в холодное время на открытой территории или в неотапливаемых помещениях.
- 48.ППБ 01-93* «Правила пожарной безопасности в Российской Федерации».
- 49.ГОСТ 12.1.030-81 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление (с Изменением N 1).
- 50.ГОСТ 12.0.003-74 Система стандартов безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.