

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

Инженерная школа энергетики

Отделение электроэнергетики и электротехники

Направление подготовки: 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Профиль: «Электроприводы и системы управления электроприводов»

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Разработка наблюдателя переменных состояния и момента сопротивления погружного электродвигателя установки электроцентробежного насоса для добычи нефти в осложненных условиях

УДК 622.276.53-83:519.876

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Ж	Слепнёв Иван Георгиевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения электроэнергетики и электротехники	Глазырин Александр Савельевич	д.т.н., доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения социально-гуманитарных наук	Фигурко Аркадий Альбертович	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения контроля и диагностики	Амелькович Юлия Александровна	к.т.н., доцент		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель Отделения электроэнергетики и электротехники	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Дементьев Юрий Николаевич	PhD, к.т.н.		

Томск – 2018 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения
Профессиональные компетенции	
P1	Применять соответствующие гуманитарные, социально-экономические, математические, естественно-научные и инженерные знания, компьютерные технологии для решения задач расчета и анализа электрических устройств, объектов и систем.
P2	Уметь формулировать задачи в области электроэнергетики и электротехники, анализировать и решать их с использованием всех требуемых и доступных ресурсов.
P3	Уметь проектировать электроэнергетические и электротехнические системы и их компоненты.
P4	Уметь планировать и проводить необходимые экспериментальные исследования, связанные с определением параметров, характеристик и состояния электрооборудования, объектов и систем электроэнергетики и электротехники, интерпретировать данные и делать выводы.
P5	Применять современные методы и инструменты практической инженерной деятельности при решении задач в области электроэнергетики и электротехники.
P6	Иметь практические знания принципов и технологий электроэнергетической и электротехнической отраслей, связанных с особенностью проблем, объектов и видов профессиональной деятельности профиля подготовки на предприятиях и в организациях – потенциальных работодателях.
Универсальные компетенции	
P7	Использовать знания в области менеджмента для управления комплексной инженерной деятельностью в области электроэнергетики и электротехники
P8	Использовать навыки устной, письменной речи, в том числе на иностранном языке, компьютерные технологии для коммуникации, презентации, составления отчетов и обмена технической информацией в областях электроэнергетики и электротехники.
P9	Эффективно работать индивидуально и в качестве члена или лидера команды, в том числе междисциплинарной, в области электроэнергетики и электротехники.
P10	Проявлять личную ответственность и приверженность нормам профессиональной этики и нормам ведения комплексной инженерной деятельности.
P11	Осуществлять комплексную инженерную деятельность в области электроэнергетики и электротехники с учетом правовых и культурных аспектов, вопросов охраны здоровья и безопасности жизнедеятельности.
P12	Быть заинтересованным в непрерывном обучении и совершенствовании своих знаний и качеств в области электроэнергетики и электротехники.

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

Инженерная школа энергетики

Отделение/НОЦ Отделение электроэнергетики и электротехники

Направление подготовки 13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника

Профиль Электроприводы и системы управления электроприводов

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

_____ Дементьев Ю.Н.

(Подпись) Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерская диссертация

Студенту:

Группа	ФИО
5АМБЖ	Слепнёв Иван Георгиевич

Тема работы:

Разработка наблюдателя переменных состояния и момента сопротивления погружного электродвигателя установки электроцентробежного насоса для добычи нефти в осложненных условиях	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	07.02.2018 №795/С

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе <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>	1. Схема и параметры элементов электропривода. 2. Програмное обеспечение «MATLAB Simulink».
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <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>	1. Аналитический обзор литературы с целью определения методов построения систем управления УЭЦН. 2. Описание УЭЦН. 3. Синтез наблюдателя переменных состояния кабельной линии. 4. Синтез наблюдателя переменных состояния и момента сопротивления погружного электродвигателя установки электроцентробежного насоса

	для добычи нефти в осложненных условиях
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Блок схема электромеханической системы с регулируемым асинхронным двигателем и косвенным методом измерения переменных состояния. 2. Структурная схема погружного асинхронного двигателя, питающегося от длинного кабеля. 3. Структурная схема наблюдателя полного порядка для погружного асинхронного двигателя, питающегося от длинного кабеля 4. Схема для моделирования 5. Результаты моделирования

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Доцент отделения социально-гуманитарных наук, к.э.н. Фигурко Аркадий Альбертович
Социальная ответственность	Доцент отделения контроля и диагностики , к.т.н. Амелькович Юлия Александровна
Раздел на иностранном языке	Старший преподаватель. Соколова Эльвира Яковлевна

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

Глава 1 – Установки электроцентробежных насосов

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения электроэнергетики и электротехники	Глазырин Александр Савельевич	д.т.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Ж	Слепнёв Иван Георгиевич		

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

Инженерная школа энергетики

Отделение/НОЦ Отделение электроэнергетики и электротехники

Направление подготовки 13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника

Профиль Электроприводы и системы управления электроприводов

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	__._.2018
--	-----------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
05.03.2018г	Раздел 1. Установки электроцентробежных насосов	
10.03.2018г.	Раздел 2. Построение наблюдателя переменных состояния и момента сопротивления погружного электродвигателя установки электроцентробежного насоса для добычи нефти в осложненных условиях	
20.03.2018г	Раздел 3. Математическое моделирование наблюдателя переменных состояния и момента сопротивления погружного электродвигателя установки электроцентробежного насоса для добычи нефти в осложненных условиях	
30.04.2018г.	Раздел 4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	
11.05.2018г.	Раздел 5. Социальная ответственность	

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения электроэнергетики и электротехники	Глазырин Александр Савельевич	д.т.н., доцент		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
	Дементьев Юрий Николаевич	к.т.н.		

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

Студенту:

Группа	ФИО
5АМ6Ж	Слепнёв Иван Георгиевич

Институт	ИШЭ	Подразделение	Отделение электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	Магистр	Направление	13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

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

1. <i>Стоимость ресурсов: материально-технических, энергетических, финансовых, и человеческих.</i>	Стоимость материальных ресурсов определялась по средней стоимости по г. Томску Оклады в соответствии с окладами сотрудников НИ ТПУ
2. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования.</i>	30 % премии 20 % надбавки 16% накладные расходы 30% районный коэффициент

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	Анализ конкурентных технических решений. Оценки перспективности проекта по технологии QuaD.
<i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	Формирование плана и графика разработки: -определение структуры работ; - определение трудоемкости работ
<i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	- разработка графика Ганта. Формирование бюджета затрат на научное исследование: - материальные затраты; -заработная плата (основная и дополнительная); - отчисления на социальные цели; - накладные расходы.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

<ol style="list-style-type: none"> 1. Оценка конкурентоспособности технических решений 2. Оценочная карта QuaD 3. Матрица SWOT 4. График Ганта 5. График проведения и бюджет НТИ 6. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ
--

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент кафедры менеджмента	Фигурко А. А.	к.э.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Ж	Слепнёв Иван Георгиевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5AM6Ж	Слепнёву Ивану Георгиевичу

Школа	Инженерная школа энергетики	Подразделение	Отделение электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	Магистратура	Направление	13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</p>	<p>Объектом исследования является математическая модель наблюдателя переменных состояния и момента сопротивления погружного электродвигателя установки электроцентробежного насоса для добычи нефти в осложненных условиях. Данный математический аппарат может использоваться в технологической деятельности нефтедобывающих компаний.</p>
---	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Производственная безопасность</p> <p>1.1 Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой; – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты; – (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства). <p>1.2 Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – механические опасности (источники, средства защиты); – термические опасности (источники, средства защиты); – электроопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения). 	<p>Воздействие на оператора физических факторов, таких как, повышенные уровни электромагнитного излучения; статического электричества и запыленности воздуха рабочей зоны; неравномерность распределения яркости в поле зрения; повышенная яркость светового изображения. Электроопасность.</p>
<p>2. Экологическая безопасность</p> <ul style="list-style-type: none"> – защита селитебной зоны – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); 	<p>Утилизация компьютерной техники и периферийных устройств</p>

<ul style="list-style-type: none"> – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); – разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды. 	
<p>3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</p> <ul style="list-style-type: none"> – перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; – выбор наиболее типичной ЧС; <p>разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;</p> <ul style="list-style-type: none"> – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий. 	<p>Возможны возгорания в следствии короткого замыкания из-за ошибки оператора и нарушения целостности электрических проводов. Наиболее типичным ЧС будет пожар. Превентивными мероприятиями являются установка заземлителей, наличие плана эвакуации на месте работы оператора.</p>
<p>4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<p>Были рассмотрены специальные правовые нормы трудового законодательства и организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</p>

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения контроля и диагностики	Амелькович Юлия Александровна	к.т.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Ж	Слепнёв Иван Георгиевич		

Обозначения и сокращения

ПЧ – Преобразователь частоты;

ПЭД – Погружной электродвигатель;

УЭЦН – Установка электроцентробежного насоса;

ЭЦН – Электроцентробежный насос;

НКТ – Насосно-компрессорные трубы;

АЭП – Асинхронный электропривод;

РТО – Ремонтно-техническое обслуживание;

ТМПН – Трехфазные масляные трансформаторы с первичным напряжением 0,38 кВ. предназначены для питания погружных электронасосов добычи нефти;

СУ – Система управления;

ТМС – Термомонометрическая система;

ШИМ – Широтно-импульсная модуляция;

САУ – Система автоматического управления;

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 144 страницы, 57 рисунков, 26 таблиц, 37 источников, 3 приложения.

Ключевые слова: установка электроцентробежного насоса; асинхронный электропривод; наблюдатель переменных состояния; оценка; преобразователь частоты; погружной электродвигатель.

Объектом исследования является наблюдатель переменных состояния и момента сопротивления погружного электродвигателя установки электроцентробежного насоса для добычи нефти в осложненных условиях

Цель работы – разработать математическую модель наблюдателя переменных состояния и момента сопротивления погружного электродвигателя УЭЦН с учетом влияния питающего кабеля

Для выполнения работы была использована программная среда «MATLAB Simulink». В процессе исследования проводились моделирование прямого и частотного пуска электропривода УЭЦН с наблюдателем переменных состояния и момента сопротивления погружного электродвигателя установки электроцентробежного насоса для добычи нефти в осложненных условиях

Полученные в данной работе результаты могут быть использованы для эффективного использования электропривода УЭЦН в соответствии с заданным циклом работы и идентификации резкопеременных нагрузок, вызванных заклиниванием рабочих органов УЭЦН.

Оглавление	
Введение.....	14
1. УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ	16
1.1. Назначение, устройство, принцип действия, технические и эксплуатационные характеристики.....	16
1.2. Анализ факторов, приводящих к выходу из строя УЭЦН	19
1.3. Блок схема электромеханической системы с регулируемым асинхронным двигателем и косвенным методом измерения переменных состояния.....	28
1.4. Критический анализ проблем построения электромеханической системы с регулируемым асинхронным двигателем и косвенным методом измерения переменных состояния.....	33
1.5. Проблема учета волновых эффектов в кабельной линии.....	36
1.6. Выводы по главе	42
2. ПОСТРОЕНИЕ НАБЛЮДАТЕЛЯ ПЕРЕМЕННЫХ СОСТОЯНИЯ И МОМЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОГРУЖНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА ДЛЯ ДОБЫЧИ НЕФТИ В ОСЛОЖНЕННЫХ УСЛОВИЯХ.....	43
2.1. Принятые допущения.....	43
2.2. Выводы по главе	53
3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАБЛЮДАТЕЛЯ ПЕРЕМЕННЫХ СОСТОЯНИЯ И МОМЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОГРУЖНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА ДЛЯ ДОБЫЧИ НЕФТИ В ОСЛОЖНЕННЫХ УСЛОВИЯХ.....	54
3.1. Математическое моделирование прямого пуска установки электроцентробежного насоса для добычи нефти с наблюдателем переменных состояния и момента сопротивления погружного электродвигателя.....	54
3.2. Моделирование частотно-регулируемого асинхронного электропривода установки электроцентробежного насоса для добычи нефти с наблюдателем переменных состояния и момента сопротивления погружного электродвигателя.....	61
3.2.1. Функциональная схема системы скалярного частотного управления	61

3.2.2. Моделирование частотно-регулируемого асинхронного электропривода установки электроцентробежного насоса для добычи нефти с наблюдателем переменных состояния и момента сопротивления погружного электродвигателя.....	64
3.3. Выводы по главе	68
4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	69
4.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	69
4.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования.....	69
4.1.2. Технология QuaD.....	70
4.2. Определение возможных альтернатив проведения научных исследований	72
4.2.1. Планирование научно-исследовательских работ	72
4.2.1.1. Структура работ в рамках научного исследования	72
4.2.1.2. Организация и планирование работ	74
4.3. Бюджет проекта	78
4.4. Оценка конкурентоспособности и ресурсоэффективности проекта	82
5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	85
5.1. Производственная безопасность	85
5.1.1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности.....	86
5.1.1.1. Производственные метеоусловия.....	86
5.1.1.2. Недостаточная освещенность рабочей зоны.	87
5.1.1.3. Повышенный уровень шума.....	89
5.1.1.4. Повышенный уровень электромагнитных излучений.....	90
5.2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды.....	91
5.2.1. Электроопасность	91
5.3. Экологическая безопасность	93
5.3.1. Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду.....	93

5.3.2. Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду.....	95
5.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	95
5.4.1. Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований и обоснование мероприятий по предотвращению ЧС.....	95
5.4.2. Профилактика пожароопасной ситуации (пожара)	97
5.4.3. Действия при возникновении пожароопасной ситуации (пожара).....	97
5.5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	98
5.5.1. Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства.	98
5.5.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.....	99
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	100
Список публикаций.....	101
Литература	103
Приложение А	108
Приложение Б.....	128
Приложение В	140

Введение

На текущий момент Российская Федерация является одним из крупнейших экспортеров нефти на мировом топливном рынке. Следовательно, увеличение объемов добычи нефти во многом определяет стратегию экономического развития страны. Поэтому к нефтедобывающей отрасли предъявляются оправданно высокие требования, начиная с анализа пластов залежей углеводородов и последующей добычи, и заканчивая передачей на перерабатывающие предприятия, то есть ставится задача по снижению затрат ресурсов на поддержание функционирования нефтедобывающего комплекса. Однако важнейшей целью является повышение эффективности и надежности оборудования для механизированной добычи нефти.

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. Следовательно, доля затрат на электроэнергию при нефтедобыче в условиях постоянного роста тарифов на электроэнергию будет только увеличиваться.

Увеличение издержек связано с изменением состояния сырьевой базы, качеством запасов на разрабатываемых и открываемых месторождениях, ухудшением условий нефтедобычи (обводненность, повышенная вязкость и запарафинивание добываемой продукции, высокий газовый фактор) [1]. Большинство месторождений с активными запасами находятся на последней стадии разработки, растет доля трудноизвлекаемых запасов, снижается уровень нефти в скважинах, увеличивается число скважин с динамическим уровнем больше одного километра. Освоение новых месторождений сопровождается ростом количества скважин и глубиной бурения.

Одновременно с ростом механизированного фонда скважин увеличиваются затраты на ремонт оборудования.

На отечественных месторождениях нефть добывается фонтанным, частично газлифтным и преобладающе механизированным способом (УЭЦН, УШГН).

По сравнению с другими установками УЭЦН обеспечивают большой диапазон подач (от 10 до 1000 м³/сут) и высокий КПД (более 40%) в области подач от 50 до 300 м³/сут; способны развивать напор до 3500 м; менее подвержены влиянию кривизны ствола и менее трудоемки [2].

При эксплуатации скважин УЭЦН наиболее эффективно происходит борьба с отложениями парафина с помощью автоматизированных проволочных скребков и путем нанесения покрытий на внутреннюю поверхность НКТ, что приводит к уменьшению асфальтосмолопарафиноотложений за счет снижения шероховатости поверхности.

Вышеизложенные факторы привели к тому, что наиболее распространенным оборудованием для механизированной добычи нефти являются УЭЦН. В РФ около 35% всех нефтяных скважин оснащены УЭЦН, ими обеспечивается основной объем добычи жидкости и нефти (более 65%) [3]. В этих условиях, представляется актуальным совершенствование методов управления УЭЦН, особенно оборудованными ПЧ, которые позволят повысить эффективность их использования с одновременным снижением энергопотребления и потерь в промышленной сети электроснабжения, что в целом ведет к экономии финансовых средств.

1. УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ

1.1. Назначение, устройство, принцип действия, технические и эксплуатационные характеристики

Добыча нефти в широком плане — это совокупность технических и технологических мероприятий, объединенных для извлечения из пласта нефти, газа, и попутных компонентов, которые в них содержатся, а также управление этими мероприятиями. УЭЦН с электроприводом на основе асинхронного привода типа ПЭД, в настоящее время являются преобладающим средством механизированной добычи нефти на месторождениях Западной Сибири.

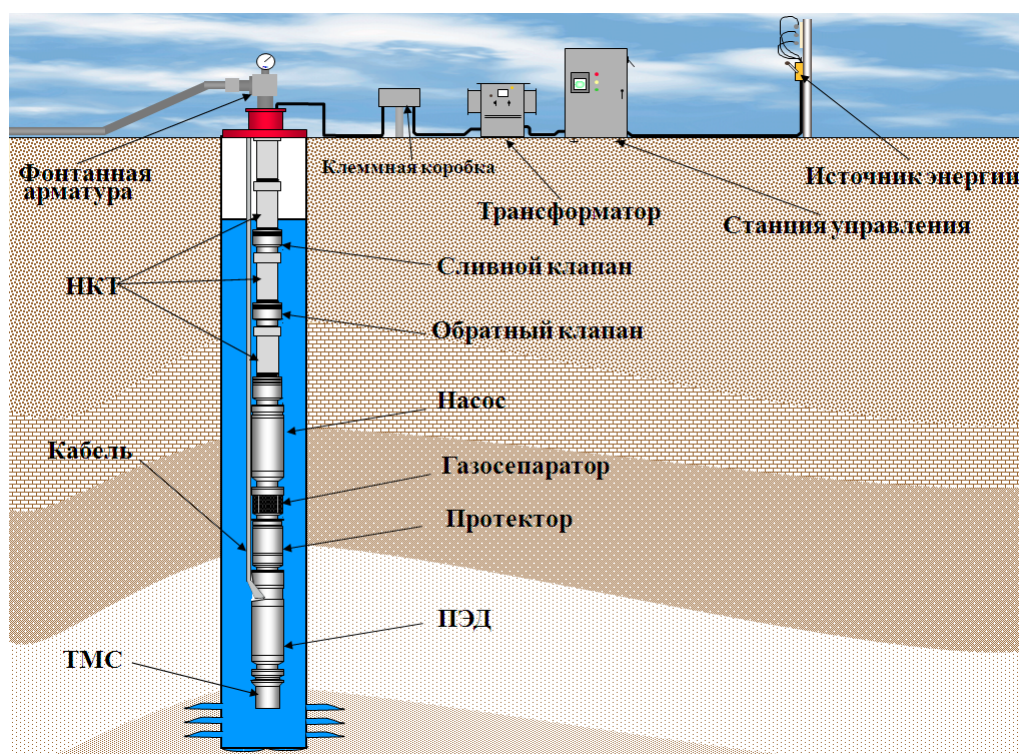


Рисунок 1.1. Состав и компоновка УЭЦН

УЭЦН являются электротехнологическими комплексами, содержащими наземное и погружное электрооборудование (рис. 1.1). Погружное электрооборудование УЭЦН состоит из многоступенчатого (от 80 до 500 и более ступеней) ЭЦН с газосепаратором на приеме и маслозаполненного ПЭД с гидрозащитой (протектором), предохраняющей ПЭД от проникновения в него окружающей пластовой жидкости. Корпуса

ПЭД, протектора и ЭЦН соединены между собой посредством фланцев. Валы имеют шлицевые соединения [3].

В собранном виде ПЭД расположен внизу погружного агрегата (рис. 1), над ним – протектор, а над протектором – ЭЦН. Агрегат опускают в скважину на колонне НКТ, соединяющихся с устьевым оборудованием, и подвешивают на подвесной шайбе без дополнительного крепления к скважине. Электропитание ПЭД осуществляется по специальному маслонфтегазостойкому круглому или плоскому трехжильному кабелю с гибкой ленточной броней, который укрепляется к НКТ металлическими поясами. На конечном участке (у первых НКТ) кабельная линия выполняется плоским кабельным удлинителем, что позволяет несколько увеличить диаметр ЭЦН и ПЭД, находящихся в колонне обсадных труб нефтяной скважины. Минимально допустимый зазор, гарантирующий безаварийный спуск и подъем погружного оборудования, найденный и обоснованный практикой эксплуатации УЭЦН, составляет 6 мм [4] и определяет собой поперечные габариты погружного агрегата. В колонне НКТ (рис. 1) выше ЭЦН установлен обратный клапан. Он предназначен для удерживания столба пластовой жидкости при остановке ЭЦН для исключения турбинного вращения ЭЦН и ротора ПЭД, а также для облегчения последующего пуска. Турбинное вращение возникает при отсутствии обратного клапана при остановках насосного агрегата под воздействием столба жидкости, остающейся в НКТ. Выше обратного клапана расположен сливной клапан, обеспечивающий слив пластовой жидкости в затрубное пространство при подъеме агрегата. При его отсутствии жидкость, разливаясь на поверхности, создает опасность для окружающей среды и для рабочих.

К наземному электрооборудованию электротехнического комплекса и системы (ЭТКС) УЭЦН относятся трансформатор и СУ, а к оборудованию устья скважины – манометр и фонтанная арматура. Промысловый трансформатор двухобмоточный, предназначен для повышения напряжения

от 0,4 кВ, поступающего с выхода СУ (рис. 1), до напряжения 1,5–3 кВ, необходимого для работы ПЭД. Вторичная обмотка трансформатора содержит от 5 до 36 отпаяк для ступенчатого регулирования выходного напряжения с помощью ручного привода в режиме ПБВ (переключение без возбуждения). Регулирование такого рода обеспечивает компенсацию потерь напряжения, возникающих в длинной (обычно многокилометровой) кабельной линии.

СУ УЭЦН обеспечивает электропитание погружной насосной установки, управление работой УЭЦН, защиту от аномальных режимов, а также передачу информации в систему телеметрии и хранение истории работы УЭЦН. Клеммная коробка разделяет наземную и подземную части кабельной линии для защиты высоковольтного трансформатора от попадания нефтяного газа, проникающего из полости кабельной линии в трансформатор. Широкое применение УЭЦН обусловлено многими факторами. Благодаря отсутствию длинной механической связи (штанги) между приводом и центробежным насосом УЭЦН имеют значительно большую мощность, чем штанговые насосные установки. Это дает возможность поддерживать большие отборы пластовой жидкости (до 200...400 м³/сут) и достигать глубин спуска агрегата до 3600 м. На поверхности скважины отсутствуют громоздкие станки-качалки и массивные фундаменты, необходимые для их установки. Устье скважины, оборудованной УЭЦН, легко поддается герметизации, что позволяет осуществлять сбор и отвод попутного газа. Для УЭЦН характерны также простота обслуживания, экономичность, достаточно высокий для установок подобного рода КПД (0,35...0,4), возможность автоматизации и телеуправления, относительно большой межремонтный период, превышающий в большинстве случаев 200 суток. В настоящее время УЭЦН добывают свыше 65 % нефти в России и более 90 % нефти в Западной Сибири и на Крайнем Севере. По существующим прогнозам, в среднесрочной перспективе за УЭЦН в механизированной добыче нефти сохранится преимущественная роль.

В структурной схеме электротехнологической системы УЭЦН (рис. 1.2) источником электрической энергии ИЭ является промышленная комплектная трансформаторная подстанция (ЭС) с выходным напряжением, равным 0,4 кВ.

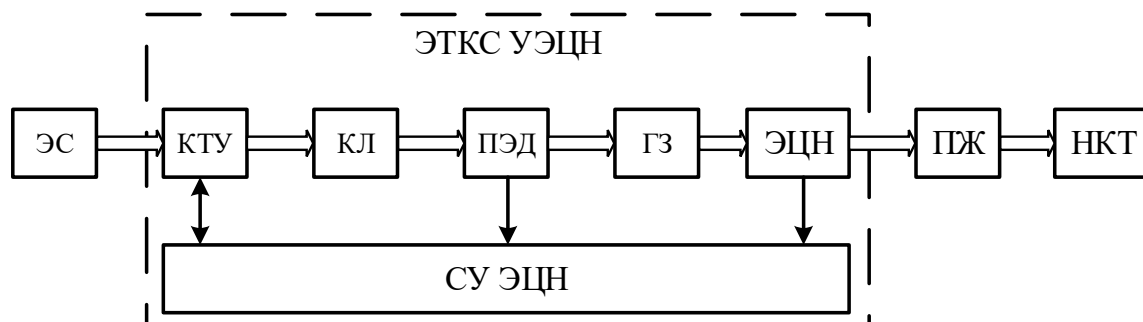


Рисунок 1.2. Структурная схема электротехнологической системы УЭЦН

Преобразователем электрической энергии является силовая часть станции управления (СУ) УЭЦН, комплектное трансформаторное устройство в виде двухобмоточного скважинного трансформатора и погружная кабельная линия (КЛ). Электротехнологическим устройством (ЭТУ) для преобразования электрической энергии в «технологическую» является погружной асинхронный электрический двигатель [4]. Преобразовательным устройством для превращения «технологической» энергии с одними параметрами в «технологическую» энергию с другими параметрами является гидрозащита (например, протектор), соединяющая валы ПЭД и ЭЦН без изменения передаточного отношения. Рабочим механизмом является электроцентробежный насос, технологическим объектом – пластовая жидкость. Устройством для транспорта пластовой жидкости на поверхность является колонна насосно-компрессорных труб. Устройством управления и регулирования является информационная часть станции управления (СУ УЭЦН) и блок погружной телеметрии (см. ТМС на рис. 1.1). Элементы электротехнического комплекса (ЭТК) выполняют определяющую роль в процессе энергопреобразования и совершения полезной работы по добыче нефти. Анализ факторов, приводящих к выходу из строя УЭЦН

В нефтедобывающей отрасли Российской Федерации вследствие неблагоприятной геолого-технологической структуры, доля традиционных (технологически освоенных) запасов нефти составляет лишь 35%, остальные запасы приходится 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 основной причиной увеличения себестоимости добычи нефти.

Условия работы УЭЦН весьма разнообразны и изменчивы во времени и от скважины к скважине, что определяет характер работы любой погружной установки, как сугубо индивидуальный. При этом, интенсивное перемешивание газо-водо-нефтяной смеси в скважине приводит к образованию эмульсии, что вызывает дополнительные осложнения при оценке потерь давления в скважине.

Цикл эксплуатации добывающей скважины разбит на интервалы с продолжительностью, определяемой необходимостью проведения капитального ремонта глубинного оборудования (периоды безремонтной эксплуатации). Усредненное значение этого интервала времени для группы

скважин определяет значение межремонтного периода (МРП) скважин данного нефтяного месторождения.

К факторам, приводящим к снижению МРП установки, можно отнести следующее:

- увеличение глубины спуска насосного оборудования;
- повышение температуры в зоне работы ЭЦН (возрастает с увеличением глубины скважин), что приводит к ухудшению теплоотвода от ПЭД;
- содержание в откачиваемой жидкости механических примесей и минеральных солей;
- увеличение количества остановок погружного оборудования, по причине снижения качества электроэнергии в промышленных сетях электроснабжения;
- повышенная обводненность добываемой жидкости и др.

Так, например, повышение вязкости нефти по сравнению с нормальной при оптимальном давлении на приеме насоса вызывает понижение фактической напорной характеристики насоса на 10 - 15% [4]. Увеличение давления жидкости в затрубном пространстве из-за повышенного газосодержания уменьшает сепарацию газа в трубе НКТ и увеличивает её на входе насоса, что вызывает повышение давления на выходе насоса при снижении плотности жидкости в трубах НКТ.

Все эти обстоятельства осложняют количественную оценку взаимосвязи параметров погружного насоса, скважины, труб НКТ и характеристик потока жидкости при выборе оборудования и его использованию.

При эксплуатации погружного оборудования имеют место следующие виды режимов работы:

- освоение скважины после буровых и ремонтных работ или после работ по гидроразрыву пласта;

- пуск скважины после отключения по отказу в электроснабжении, по действию защит или по технологическим причинам;
- переход с одного установившегося режима работы к другому, путем изменения, например, скорости вращения ПЭД или типоразмера установки;
- продолжительный установившийся режим работы, с практически постоянным или циклически изменяемыми характеристиками нагрузки;
- предаварийный режим работы, характеризующийся повышением момента сопротивления на валу ЭЦН, вследствие отложения солей, выноса механических примесей, снижением ресурса изоляции линии «ТМПН-кабель-ПЭД» и статорной изоляции ПЭД, снижением прочностных характеристик соединительных узлов ЭЦН, повышением уровня вибраций и т.д.

Использование кустового способа бурения привело к целому ряду осложнений при спуске и эксплуатации УЭЦН. Выявлено, что в интервалах набора кривизны, составляющих 2 градуса и более на 10 м ствола возрастает количество отказов оборудования, чаще происходит падение установок на забой скважины. Причина заключается в возникновение изгибающих и сминающих сил, воздействующих на силовой кабель и корпуса узлов УЭЦН. Также проблемой при эксплуатации наклонных скважин при помощи УЭЦН, является искривление ротора, что приводит к повышению вибрационного воздействия. Повышенные виброперемещения вызывают знакопеременные напряжения в области соединения узлов УЭЦН между собой и с НКТ, стимулируя их разрушение в месте соединения. Кроме искривления ротора причинами вибраций может стать изменение геометрических параметров рабочих колес, вследствие износа [5].

Усугубляет ситуацию тот факт, что, осложнения не встречаются по отдельности. Чаще всего эксплуатируемые скважины имеют целый набор осложнений, которые снижают эффективность работы УЭЦН. Один вид осложнения может привести к появлению новых проблем при эксплуатации.

Пусковые режимы погружной установки характеризуются глубоким снижением напряжения на двигателе из-за влияния длинного кабеля, а в режиме освоения скважины - увеличением продолжительности процесса пуска и колебаниями момента сопротивления на валу из-за попадания в нефтяную жидкость растворов глушения скважины [6].

Характер установившегося режима установки определяется характеристиками потока жидкости и состоянием пласта и оборудования, причем состояние насоса в значительной мере определяется уровнем гидроабразивного износа рабочих элементов и усталостными напряжениями в механических узлах.

Для месторождений Западной Сибири на последнем, предаварийном этапе работы УЭЦН, вследствие отложения солей и выноса механических примесей, характерно проявление подклинивания, заиливания, засорения и залипания рабочих колес.

В таблице 1.1 показан процент отказов глубинно-насосного оборудования на различных месторождениях Западной Сибири по причине заклинивания ЦН [7].

Таблица 1.1. – Доля отказов УЭЦН по причине заклинивания ЦН на нефтегазодобывающих предприятиях Западной Сибири

Предприятие \ Годы	Годы					
	2004	2005	2006	2007	2008	2009
ОАО «РН-Юганскнефтегаз»	-	12%	-	-	29%	-
ОАО «РН-Пурнефтегаз»	-	15,2%	-	-	39%	-
ОАО «Лукойл-Западная Сибирь»	9,8%	10,4%	14,6%	-	-	-
ОАО «Самотлорнефтегаз»	11%	15,6%	19,1%	20,3%	23,2%	22,9%
ОАО «Сургутнефтегаз»	-	3,53%	4,19%	5,14%	6,17%	-

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.

Увеличение момента сопротивления при подклинивании дополнительно статически нагружает и стенки насосно-компрессорных труб. Наличие газовых включений приводит к нарушению стационарности потока закачиваемой жидкости и вследствие этого появляются дополнительные напряжения знакопеременного характера в стенках насосно-компрессорных труб в широком спектре вибраций. В ряде случаев происходит усталостное разрушение насосно-компрессорных труб и «полёт» погружного оборудования в устье скважины [8].



Рисунок 1.3. Слом резьбовой части патрубка подвешивания приставки насоса



Рисунок 1.4. Полет ЭЦН из-за слома подвешного патрубка по телу



Рисунок 1.5. Обрыв кабеля на скважине

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.

Расклинивание относится аварийному режиму работы УЭЦН, так как при его выполнении происходит усиленный механический износ насосного оборудования, в частности, возможен как срыв шпонок рабочих колес и повышенная вибрация насоса при расклинивающих толчках, так и повышенный износ изоляции обмоток статора ПЭД и длинного кабеля при токах выше номинальных.

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).

В составе технологических регламентов нефтедобывающих компаний по запуску, выводу на режим и эксплуатации скважин, оборудованных УЭЦН, существуют методики расклинивания ЦН. Последовательное выполнение пунктов технологического регламента (или методических указаний) позволяет оператору произвести попытки разворота ЭЦН, которые во многом зависят от его опыта, интуиции и квалификации.

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» [9-11].

Для случаев, когда в составе УЭЦН отсутствует преобразователь частоты (ПЧ), регламентируемые действия персонала сводятся к выполнению

следующих операций: смена направления вращения ЭЦН, увеличение величины напряжения питания на повышающем трансформаторе, промывка ЦН горячей водой (нефтью), а также соляно-кислотная обработка (СКО).

Для установок, в состав которых входит ПЧ, процесс расклинивания ЦН также осуществляется не более трех раз, с выполнением технологических операций, которые предусмотрены и для установок без ПЧ.

Важно отметить, что вследствие простоя нефтедобывающих скважин предприятие несет значительные убытки, равно, как и при выделении лишних ремонтных ресурсов.

Для оценки экономического ущерба и эффективности организации РТО скважинных систем нефтепромысла используется показатель J , который учитывает расходы на ремонтные службы и закупку нового оборудования, а так же прибыль от добычи нефти, варьирующейся от 7 т/сут нефти, для низкодебитных нефтяных залежей, до 200 т/сут, для высокодебитных нефтяных залежей [12]:

$$J = c_1 \cdot N_{\text{раб}} - c_2 \cdot L - c_3 \cdot M - c_4 \cdot L_{\text{раб}} - c_5 \cdot (N - N_{\text{раб}}) \rightarrow \max,$$

где $N_{\text{раб}}$ – среднее число работающих скважин;

N – число скважин;

L – число ремонтно-восстановительных линий;

M – число запасных погружных установок;

$L_{\text{раб}}$ – среднее число занятых ремонтно-восстановительных линий;

c_1 – стоимость нефти;

c_2 – размер капитальных затрат на ввод ремонтной линии;

c_3 – стоимость новой УЭЦН;

c_4 – размер эксплуатационных затрат при ремонте УЭЦН на линии;

c_5 – размер "штрафа" за нарушение режима эксплуатации месторождения.

При этом в [12] учитывается отрицательное влияние простаивающих скважин на режим эксплуатации месторождения, отдельно выделены эксплуатационные и капитальные затраты на ремонтные службы.

Исходя из выше представленной зависимости, для нефтедобывающих компаний, наиболее привлекательным и перспективным направлением будет являться уменьшение размера эксплуатационных затрат при ремонте УЭЦН на линии.

Контроль момента сопротивления, совместно с другими мероприятиями по устранению аварийных отказов УЭЦН, позволил бы диагностировать вышеописанные неблагоприятные режимы работы и последствия, к которым они приводят на ранних стадиях. Поэтому, представляется своевременным разработка методов и средств мониторинга момента сопротивления нагрузки на валу погружного асинхронного двигателя в режиме реального времени.

Прямое измерение с помощью датчика момента или восстановления оценок момента по электрическим измерениям непосредственно на клеммах погружного асинхронного двигателя не представляется целесообразным по технико-экономическим соображениям. Наиболее перспективным является разработка наблюдателя полного порядка, учитывающего свойства погружного кабеля с помощью замеров токов и напряжений на выходе повышающего трансформатора – на входе кабельной линии. Настройка такого наблюдателя оригинальной структуры представляет научный и практический интерес.

1.3. Блок схема электромеханической системы с регулируемым асинхронным двигателем и косвенным методом измерения переменных состояния

АЭП в настоящее время имеет практически неограниченную возможности для автоматизации большинства производственных механизмов. Это обусловлено развитием полупроводниковой и микропроцессорной техники, используемой в составе систем управления АЭП [13], а также

простотой конструкции и надежностью асинхронных машин. Регулирование угловой скорости АД с помощью ПЧ можно обеспечить двух основных методов – скалярного и векторного (полеориентированного) управления. Современные микроконтроллеры позволяют обеспечить высокие показатели качества работы цифрового асинхронного электропривода в статике и динамике за счет организации двухканального векторного управления АД, когда производится одновременное регулирование продольной и поперечной составляющих вектора тока статора, отвечающих за формирование магнитного потока и момента машины [14].

Алгоритм векторного управления позволяет получить высокий пусковой момент и сохранить его до номинальной скорости асинхронного электродвигателя. Алгоритм обеспечивает высокое качество регулирования по скорости, даже при скачкообразном изменении момента сопротивления на валу. Организация специального вида траектории крутящего момента ПЭД, в процессе расклинивания, наиболее эффективно может быть реализована при использовании векторного управления. Важно и то, что векторное управление позволяет наилучшим образом обеспечить энергосбережение, т.к. преобразователь частоты (инвертор) передает в двигатель ровно столько мощности, сколько необходимо для преодоления нагрузки с заданной скоростью [15].

Для обширной группы промышленных механизмов продолжительного режима работы, таких как насосы, вентиляторы, нагнетатели, воздуходувки, компрессоры и т.п., не требующих широкого диапазона регулирования скорости, не превышающего 1:100 [16], высокой точности, и не предъявляющих требований к быстродействию, а также в случаях, когда работа электропривода осуществляется в агрессивной окружающей среде (атомные и химические производства), нестандартных климатических условиях (повышенная или пониженная температура, высокая влажность), при ударных и вибрационных механических воздействиях, применение датчиков,

расположенных вне шкафа управления АЭП, нецелесообразно. Для исключения датчиков выходных координат двигателя в систему управления АЭП вводятся наблюдатели состояния – специальные математические алгоритмы, реализованные в виде подпрограмм управляющего микроконтроллера. Эти алгоритмы позволяют рассчитать вектор переменных состояния двигателя, недоступных для прямого измерения, с помощью информации лишь о сигналах токов и напряжений статора. Процесс косвенного определения переменных принято называть оцениванием, а выходные сигналы наблюдателя – оценками. К переменным состояния АД относят его токи, потокосцепления, угловую скорость вращения. Внутренними параметрами принято считать активные сопротивления и индуктивности обмоток, момент инерции, приведенный к валу двигателя.

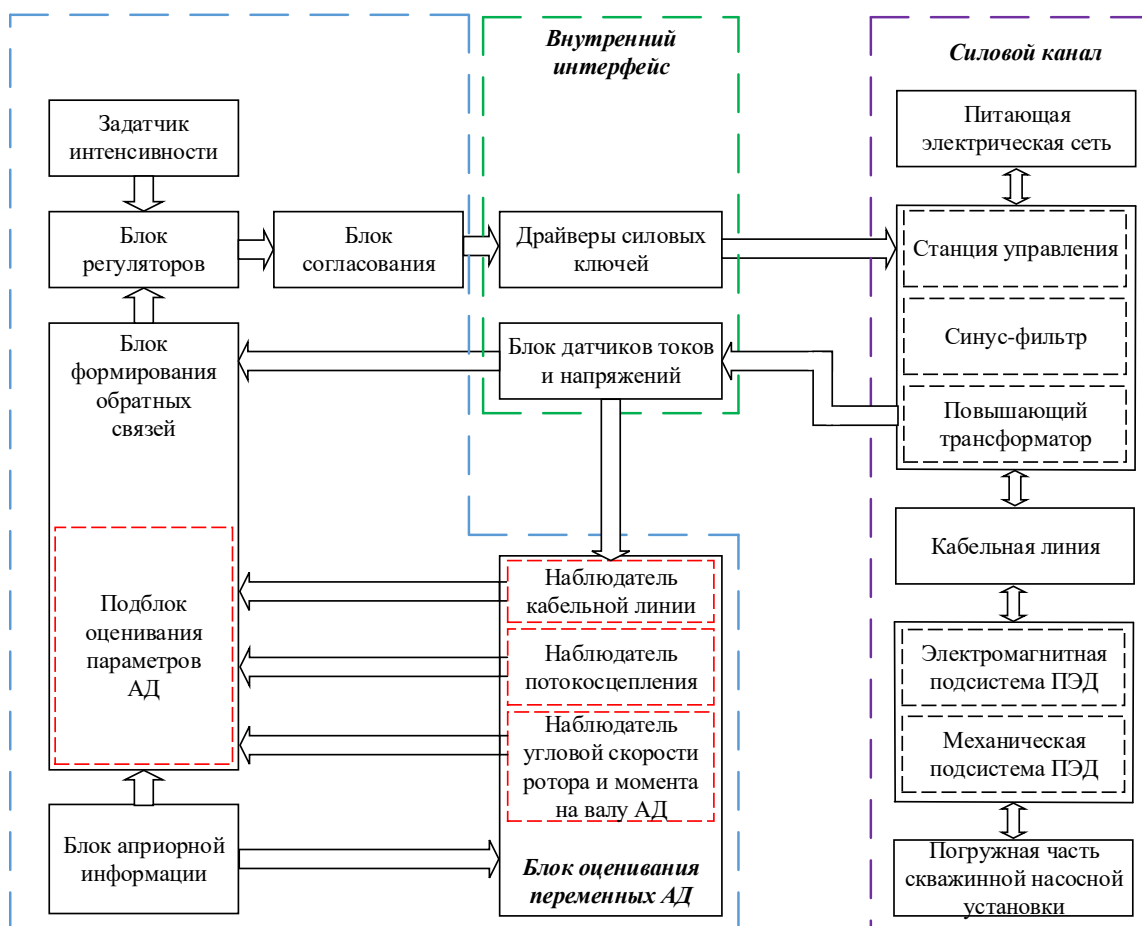


Рисунок 1.6. Электромеханическая система с регулируемым асинхронным двигателем и косвенным методом измерения переменных состояния

Силовой канал электромеханической системы с регулируемым асинхронным двигателем и косвенным методом измерения переменных состояния (рис.1.6) 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 о состоянии 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. 1.6) 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 кабельной линии, потокосцепления, угловой скорости ротора и момента на валу АД.

Микроконтроллерная система управления (рис. 1.6) 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 T-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.

1.4. Критический анализ проблем построения электромеханической системы с регулируемым асинхронным двигателем и косвенным методом измерения переменных состояния

Проведем сравнительный анализ двух компоновок электропривода УЭЦН: первая компоновка содержит наблюдатель состояния, а вторая – магнитоупругий датчик момента и датчик скорости [17]. Достоинства и недостатки рассматриваемых компоновок приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2 – Сравнительный анализ применения электропривода УЭЦН с наблюдателем состояния и с магнитоупругим датчиком момента и датчиком скорости

Компоновка системы с магнитоупругим датчиком момента и датчиком скорости		Компоновка системы с наблюдателем момента и скорости	
Достоинства	Недостатки	Достоинства	Недостатки
Позволяет оценивать момент на валу двигателя в реальном времени	Дополнительная корректировка конструкции погружных агрегатов УЭЦН	Косвенное измерение момента и скорости двигателя с минимальным количеством датчиков, которые расположены в шкафу станции управления	Необходимость в точном определении параметров двигателя
Не требует определения параметров двигателя и не зависит от них	Нелинейность характеристики датчика момента	Оценивание происходит в режиме реального времени	Необходимость автоматической настройки параметров наблюдателя

Система позволяет достаточно точно оценивать скорость	Наведение шума в систему, через провода от датчиков к управляющей системе	Упрощение конструкции ЭП, благодаря отсутствию дополнительных датчиков	Зависимость оценённых переменных, от изменения параметров двигателя
Влияние кабельной линии на рассогласование измеряемой и реальной скорости может быть скомпенсировано при помощи фильтров	Сложность конструкции датчиков, встроенных в погружное оборудование УЭЦН и их уязвимость к вибрации, солеотложению и коррозии		Необходимость учета потерь на погружном кабеле

На основании приведенных выше данных выделим основные проблемы, связанные с построением бездатчикового электропривода, которые заключаются в следующем:

1. Наблюдатель состояния АД, построенный на основе решения полной системы уравнений электрического равновесия для статора и ротора по доступной информации о напряжениях и токах статора, способен обеспечить приемлемую точность вычисления потокосцепления и скорости только в ограниченном диапазоне частот. Это связано с проблемой введения начальных условий при частотах, близких к нулевой. Большинство способов решения данной проблемы основаны на введении определенного отклонения математического описания наблюдателя состояния относительно реального объекта при работе в области малых частот. Эти отклонения проявляются в виде ошибки в вычислениях потокосцепления, скорости, активной и реактивной составляющих тока;

2. Проблемой является чувствительность электропривода к изменению его параметров в процессе работы. Прежде всего это относится к температурным изменениям активных сопротивлений статора и ротора, а также к изменению взаимной индуктивности в зависимости от тока цепи

намагничивания. Возможным способом решения данной проблемы в построении наблюдателя состояния АД является применение регуляторов, нечувствительных в отношении параметрических возмущений, в частности релейных регуляторов, работающих в скользящих режимах [18], либо синергетических регуляторов, синтезированных по методу аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) [19]. Другим способом является параметрическая адаптация, осуществляемая в реальном времени при работе привода;

3. Третьей проблемой является получение необходимой точности оценки эквивалентных (усредненных на интервале расчета процессов в наблюдателе состояния) значений токов и напряжений статора. На точность оценки эквивалентных напряжений в области малых частот основной гармоники и высоких частот модуляции существенно влияет «мертвое время» и задержки переключения ключей инвертора. Необходимо отметить, что точность измерения напряжения на малых частотах в гораздо меньшей степени проявляется в векторных электроприводах с датчиком скорости/положения, так как быстродействующий контур скорости, замкнутый по реально измеряемому сигналу способен в значительной степени компенсировать ошибки, связанные с динамическими «неидеальностями» ключей инвертора [16].

4. Четвертой проблемой является необходимость учета эффектов (потери, резонанс высших гармоник), связанных с применением погружного кабеля, из-за невозможности прямого измерения подводимого к двигателю напряжения. Более подробно эта проблема и способы ее решения рассмотрены в параграфе 1.5.

1.5. Проблема учета волновых эффектов в кабельной линии

Кабельная линия предназначена для передачи электрической энергии от скважинного трансформатора к погружному асинхронному электродвигателю и прикрепляется к НКТ с помощью металлических поясов. Кабельная линия состоит из трехжильного основного питающего кабеля круглого или плоского сечения с резиновой или полиэтиленовой изоляцией и плоского кабеля-удлинителя с разъединительной муфтой кабельного ввода в двигатель, выполняемого на конечном участке погружного агрегата от первой НКТ

К кабельным линиям (КЛ) УЭЦН предъявляются достаточно жесткие требования – размещаемость в скважине, малые электрические потери и высокая нагрузочная способность, высокие пробивные напряжения, термостойкость, маслонефтегазостойкость, механическая прочность и гибкость, устойчивость к химическому воздействию окружающей скважинной среды и к гидростатическому давлению глубинной пластовой жидкости.

В погружной КЛ при рабочих режимах УЭЦН необходимо учитывать активно-индуктивное продольное сопротивление линии и активно-емкостное поперечное сопротивление. Как правило, потери напряжения в КЛ существенны, особенно в пусковых режимах, при которых ПЭД потребляет большие пусковые токи и в результате появляются провалы подземного напряжения на входе ПЭД. Провалы напряжения влияют как на устойчивую работу ПЭД, так и на устойчивую работу УЭЦН в целом.

Первой проблемой при построении модели кабельной линии являются паразитные высшие гармоники. Поскольку ШИМ-инвертор преобразователя частоты генерирует широкий спектр высших гармоник (150кГц-30 МГц), что может привести к сбою систем КИПиА, к ускорению процесса старения изоляции мотора, негативно влияет на состояние кабельной линии, и может приводить к дополнительной эрозии механических элементов погружного

двигателя [20]. Форма напряжения на выходе инвертора и его гармонический состав приведены на рисунках 1.7-1.8.

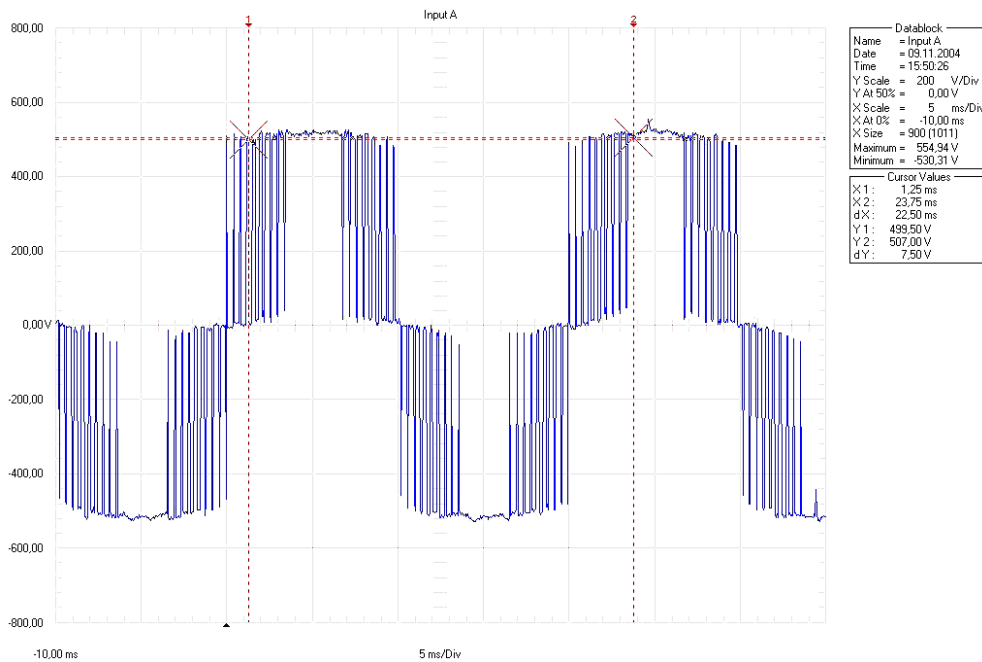


Рисунок 1.7. Форма напряжения на выходе инвертора [20]

Из рис. 1.7 видно, что напряжение на выходе инвертора не имеет синусоидальную форму.

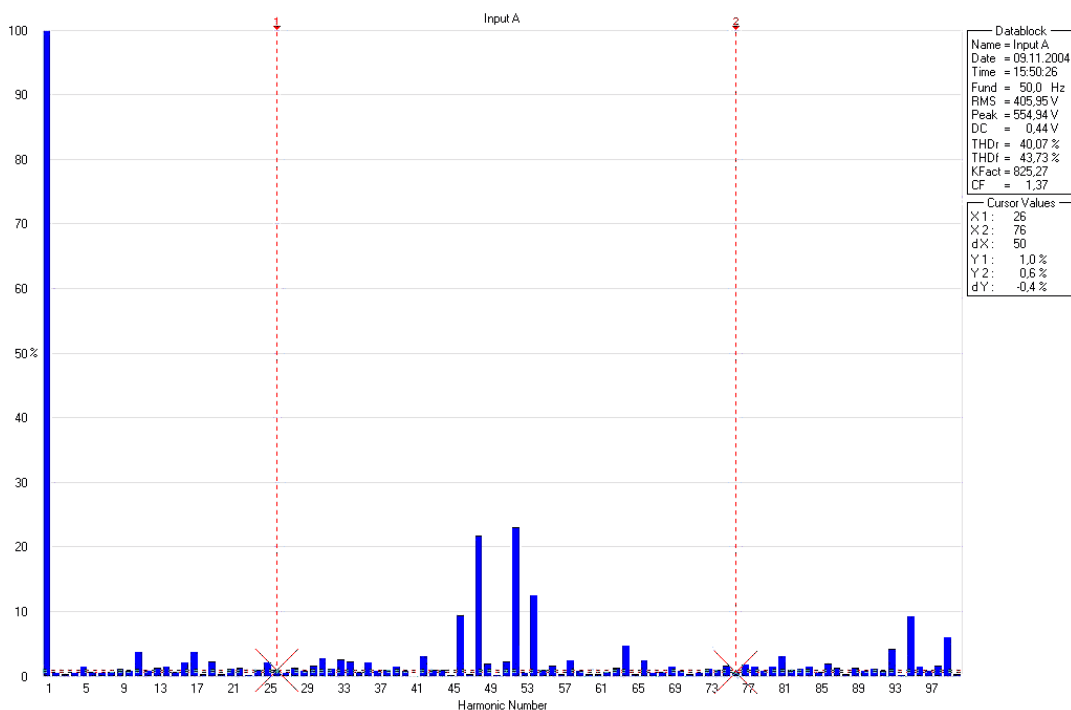


Рисунок 1.8. Гармонический состав напряжения на выходе инвертора [20]

Для решения этой проблемы, регламент нефтедобывающих компаний обязывает дополнительно комплектовать синус-фильтрами станции управления, с преобразователями частоты.

Синус-фильтры меняют импульсное напряжение инвертора ШИМ на синусоидальное, эффективно ограничивают негативное влияние преобразователя частоты на ПЭД и кабель питания. Ток и напряжение на статоре ПЭД вследствие применения синус-фильтра являются синусоидальными, а систему в целом отличает электромагнитная совместимость.

Форма напряжения на выходе синус-фильтра и его гармонический состав приведены на рисунках 1.9-1.10.

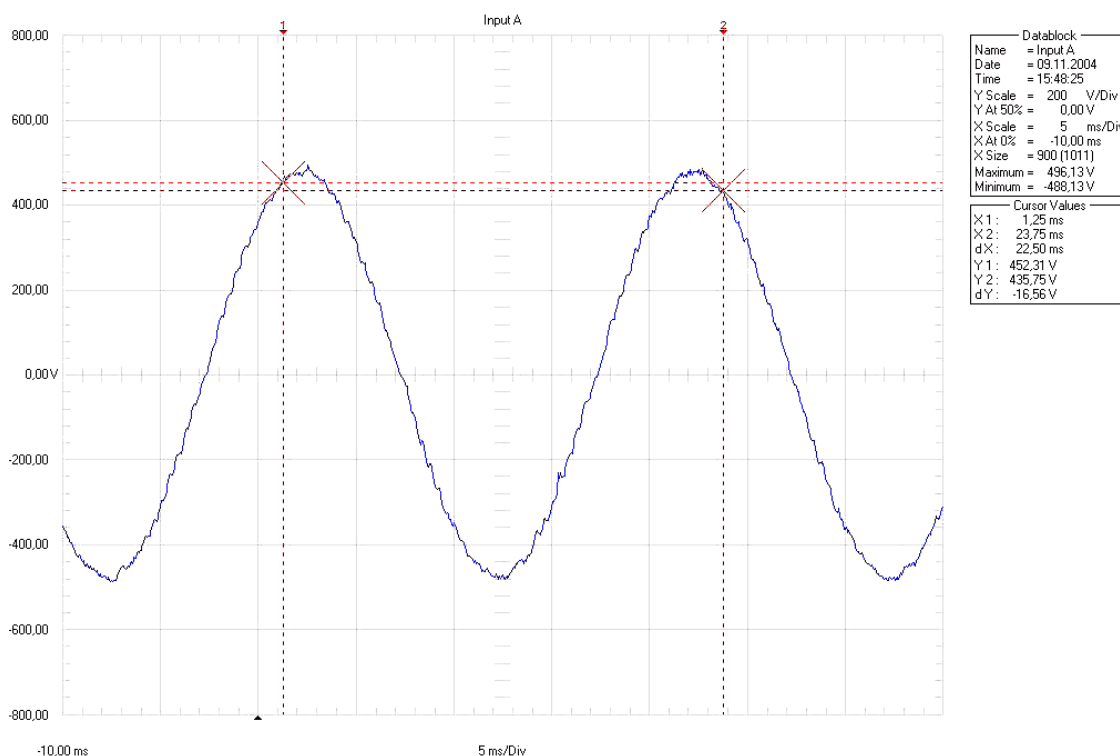


Рисунок 1.9. Форма напряжения на выходе синус фильтра [20]

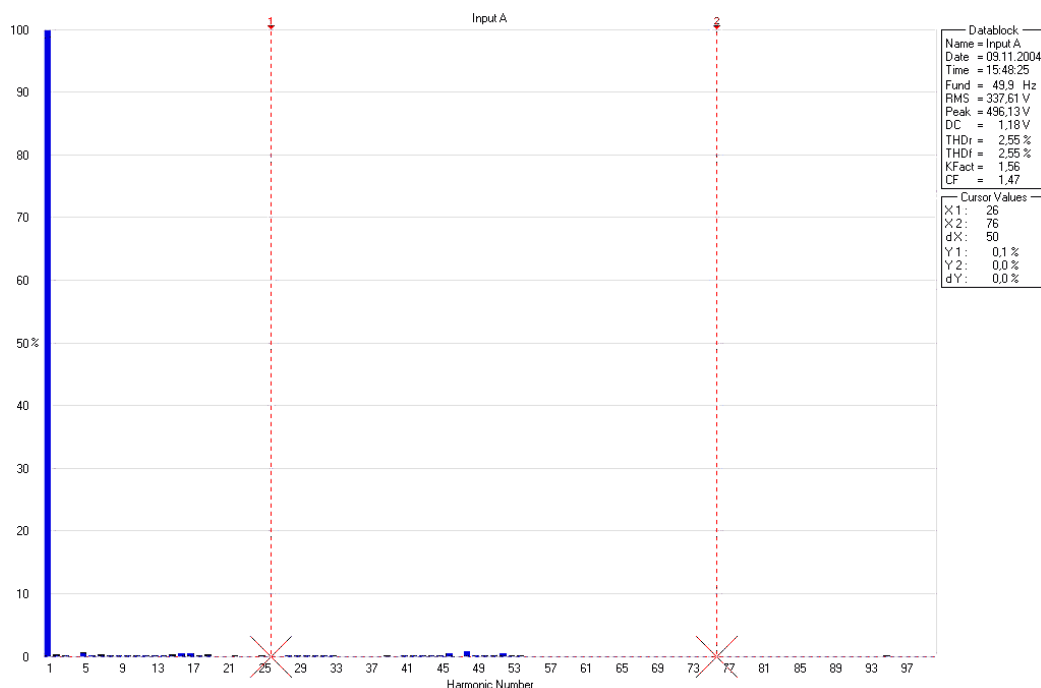


Рисунок 1.10. Гармонический состав напряжения на выходе синус фильтра [20]

Таким образом исходя из графиков (рис. 1.9-1.10) представляется обоснованным допущение, что напряжение, подводимое к двигателю, имеет идеализированную синусоидальную форму с частотой основной гармоники 50 Гц.

Второй проблемой для построения математической модели кабельной линии является выбор из двух вариантов представления линии: либо с сосредоточенными или же с распределёнными параметрами.

Для обоснованного заключения о том, к какому типу отнести линию – с сосредоточенными или распределёнными параметрами – следует сравнить длину линии l с длиной электромагнитной волны λ [21].

Согласно [21], если $l > 0,05...0,1 \cdot \lambda$, то линию следует рассматривать как цепь с распределёнными параметрами. Например, для питающего напряжения с частотой $f = 50$ Гц, т.е. при $T = 0,02$ с, и скорости распространения электромагнитной волны $V = 3 \cdot 10^8$ м/с, длина волны будет равняться:

$$\lambda = VT = 3 \cdot 10^8 \cdot 0,02 = 6 \cdot 10^6 \text{ м.}$$

То есть, линию длина, которой не превышает $l > 300...600$ км, можно рассматривать как линию со сосредоточенными параметрами [21].

Таким образом для дальнейшего расчета трехфазная погружная КЛ представляется в составе УЭЦН однофазной схемой замещения (режимы фаз полагают симметричными). Для напряжения промышленной частоты 50 Гц погружная КЛ не является длинной и может быть сведена к сосредоточенной Г-образной схеме замещения, приведенной на рис. 1.11. В схеме выделяют продольную и поперечную ветви. Продольной называется ветвь, по которой протекает ток нагрузки.

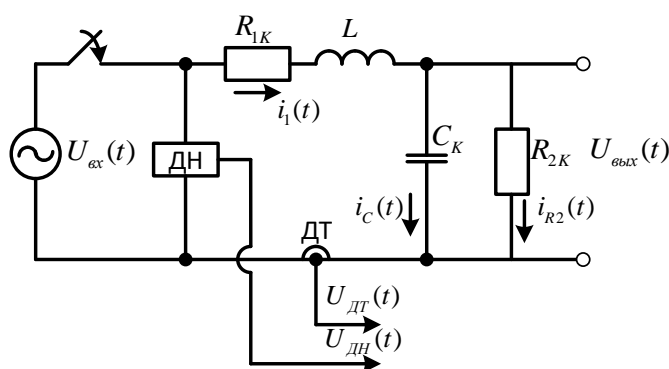


Рисунок 1.11. Схема замещения погружной кабельной линии в составе УЭЦН для промышленной частоты 50 Гц

Где ДН, ДТ датчик напряжения и датчик тока.

Система дифференциальных уравнений, описывающих работу Г-образной схемы замещения погружной КЛ представлена ниже:

$$\begin{cases} U_{\text{вх}}(t) = i_1(t) \cdot R_{1К} + L_{К} \cdot \frac{di_1(t)}{dt} + U_{\text{вых}}(t) \\ C_{К} \cdot \frac{dU_{\text{вых}}(t)}{dt} = i_1(t) - \frac{U_{\text{вых}}(t)}{R_{2К}} \end{cases}$$

где:

$i_1(t)$ – вектор тока в кабельной линии;

$U_{\text{вых}}(t)$ – вектор напряжения на выходе кабельной линии;

$R_{1К}$ – активное сопротивление кабельной линии;

$L_{К}$ – индуктивное сопротивление кабельной линии;

C_K – емкостное сопротивление кабельной линии;

R_{2K} – сопротивление изоляции.

Применим прямое преобразование Лапласа для представленной системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} U_{ex}(p) = I_1(p) \cdot R_{1K} + L_K \cdot p \cdot I_1(p) + U_{вых}(p) \\ C_K \cdot p \cdot U_{вых}(p) = I_1(p) - \frac{U_{вых}(p)}{R_{2K}} \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_1(p) = \frac{1}{L \cdot p} \cdot [U_{ex}(p) - I_1(p) \cdot R_{1K} - U_{вых}(p)] \\ U_{вых}(p) = \frac{1}{C_K \cdot p} \cdot \left[I_1(p) - \frac{U_{вых}(p)}{R_{2K}} \right] \end{cases}$$

На основании выше представленной системы уравнений строим структурную схему погружной КЛ в составе УЭЦН.

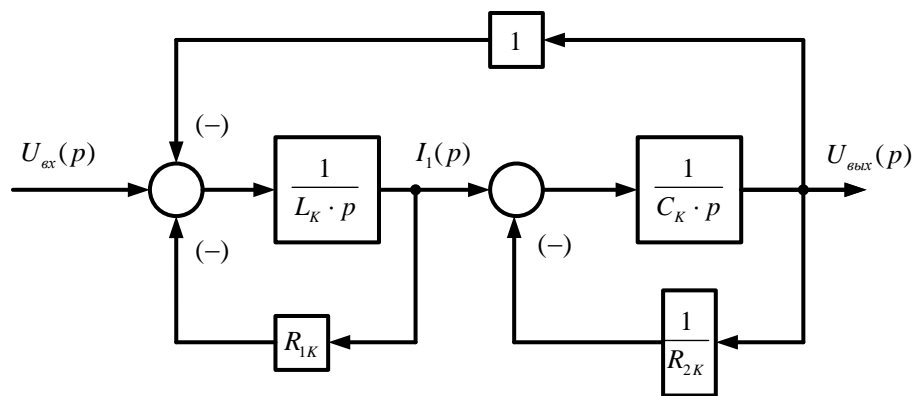


Рисунок 1.12. Структурная схема замещения погружной кабельной линии в составе УЭЦН

Таким образом была получена структурная схема замещения погружной КЛ в составе УЭЦН и система дифференциальных уравнений, описывающая работу КЛ.

Полученная схема замещения будет использована в последующих расчетах.

1.6. Выводы по главе

1. В первой главе показано, что превалирующим способом механизированной добычи нефти в осложненных условиях, а также на месторождениях последней стадии разработки, является способ с применением УЭЦН. Рассмотрены основные узлы УЭЦН, их назначение и принцип действия.

2. Произведен анализ факторов, приводящих к выходу из строя УЭЦН. Анализ показал, что опасные заклинивания и подклинивания рабочих колес УЭЦН вызваны заиливанием, отложением солей и выбросом песка на поверхности движущихся элементов ЭЦН. Эти факторы приводят не только к механическим изломам, но и дополнительно нагружают двигатель, что ведет к ускоренному старению изоляции, тем самым сокращая межремонтный период.

3. Показано, что контроль момента сопротивления, позволил бы диагностировать неблагоприятные режимы работы и последствия, к которым они приводят на ранних стадиях. Наиболее привлекательным является разработка наблюдателя полного порядка с возможностью оценки момента сопротивления.

4. Представлена блок-схема электромеханической системы с регулируемым асинхронным двигателем и косвенным методом измерения переменных состояния.

5. Произведен анализ проблем построения электромеханической системы с регулируемым асинхронным двигателем и косвенным методом измерения переменных состояния. Выявлено, что одной из отличительных проблем является учет волновых эффектов, вызванных применением погружной кабельной линии.

6. Получена схема замещения кабельной линии на основе модели с сосредоточенными параметрами и показаны условия, в которых эта схема замещения может считаться адекватной.

2. ПОСТРОЕНИЕ НАБЛЮДАТЕЛЯ ПЕРЕМЕННЫХ СОСТОЯНИЯ И МОМЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОГРУЖНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА ДЛЯ ДОБЫЧИ НЕФТИ В ОСЛОЖНЕННЫХ УСЛОВИЯХ

2.1. Принятые допущения

При дальнейшем синтезе и последующем математическом моделировании АД и наблюдателя был принят ряд допущений, общепринятых в теории электрических машин переменного тока [23, 24]:

1. Параметры обмоток всех фаз имеют одинаковые значения, т.е. имеет место симметричный режим работы;

2. Магнитное поле электрической машины имеет синусоидальное распределение вдоль воздушного зазора;

3. Учитывается только первая гармоника питающего напряжения на выходе преобразователя частоты;

4. Не учитываются потери в стали двигателя, вызываемые протеканием вихревых токов в магнитопроводе АД и его перемагничением;

5. Не учитывается насыщение магнитной цепи АД благодаря наложению ограничений на статорные токи;

6. Эффект вытеснения токов в проводниках ротора пренебрежимо мал из-за ограничения частоты токов ротора рабочим участком механической характеристики;

7. Не учитывается неоднородность магнитной проводимости в зазоре, обусловленная наличием пазов и зубцов.

2.2. Выводы по главе

1. На основе обоснованной ранее модели погружного кабеля с сосредоточенными параметрами разработана математическая модель наблюдателя кабельной линии с усилением невязки по П-принципу.

2. Математическая модель наблюдателя кабельной линии в виде подсистемы интегрирована в математическую модель наблюдателя переменных состояния и момента сопротивления погружного электродвигателя установки электроцентробежного насоса для добычи нефти в осложненных условиях.

3. Для обеспечения работоспособности предложенной структуры наблюдателя датчики электромагнитных переменных (тока и напряжения), должны быть подключены на входе кабельной линии – на выходе повышающего трансформатора.

3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАБЛЮДАТЕЛЯ ПЕРЕМЕННЫХ СОСТОЯНИЯ И МОМЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОГРУЖНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА ДЛЯ ДОБЫЧИ НЕФТИ В ОСЛОЖНЕННЫХ УСЛОВИЯХ

3.1. Математическое моделирование прямого пуска установки электроцентробежного насоса для добычи нефти с наблюдателем переменных состояния и момента сопротивления погружного электродвигателя

В соответствии с разработанной математической моделью асинхронного электропривода УЭЦН с наблюдателем переменных состояния и момента сопротивления, представленной в главе 2, составлена имитационная модель электропривода УЭЦН в среде Simulink системы MatLab. В качестве погружного двигателя был выбран электродвигатель ПЭДН – 40 – 117, Методика расчета параметров АД и параметры погружной кабельной линии представлены в ПРИЛОЖЕНИИ Б. Общий вид разработанной имитационной модели представлен в ПРИЛОЖЕНИИ В. Расчет производился при помощи численного метода Эйлера с шагом интегрирования $\tau = 100$ мкс.

В качестве допущения при моделировании примем постоянство параметров Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя и механической подсистемы. При технической реализации наблюдатель получает информацию о текущих оценках параметров $\hat{L}_{1\sigma}, \hat{L}'_{2\sigma}, \hat{L}_m, \hat{R}'_2, \hat{R}_1, \hat{J}_\sigma$ двигателя от программно реализованного устройства – идентификатора параметров. Разработка идентификатора параметров в этой работе не рассматривается, но может быть выполнена согласно рекомендациям, представленным в [26].

Расчет показателей качества работы спроектированного наблюдателя предлагается проводить на основе интегральной относительной ошибки оценивания угловой скорости вращения ротора АД:

$$\sigma\omega_{\%} = \frac{1}{t_{\text{конеч}} - t_{\text{нач}}} \cdot \frac{\int_{t_{\text{нач}}}^{t_{\text{конеч}}} |\omega(t) - \hat{\omega}(t)| \cdot dt}{\int_{t_{\text{нач}}}^{t_{\text{конеч}}} |\omega(t)| \cdot dt} \cdot 100\%$$

Где $t_{\text{нач}}$, $t_{\text{конеч}}$ – начальный и конечный моменты времени рассматриваемого динамического режима.

Результаты моделирования прямого пуска ПЭД с параллельно включенным наблюдателем при учете влияния погружной кабельной линии и насосной нагрузки представлены на рисунках 3.1-3.5.

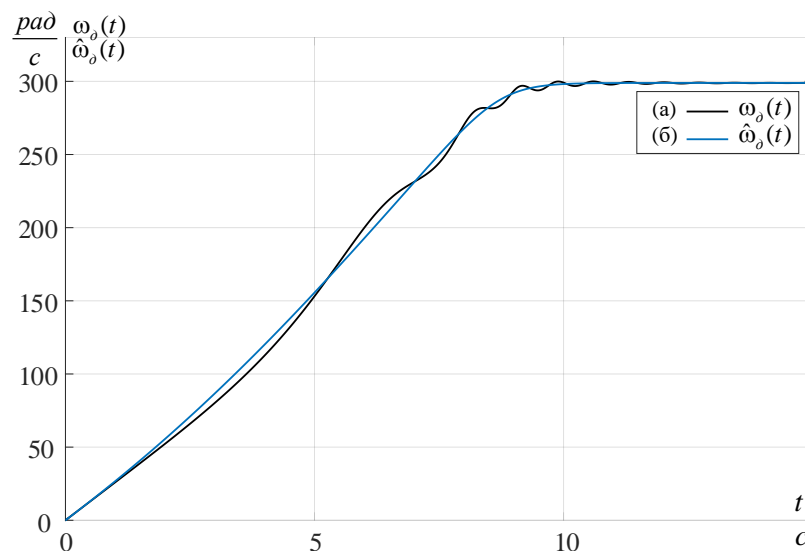


Рисунок 3.1. Отработка наблюдателем процесса пуска АД а) $\omega_{\delta}(t)$; б) $\hat{\omega}_{\delta}(t)$ – оценка угловой скорости вращения ротора АД, $\sigma\omega_{\%} = 0,57\%$

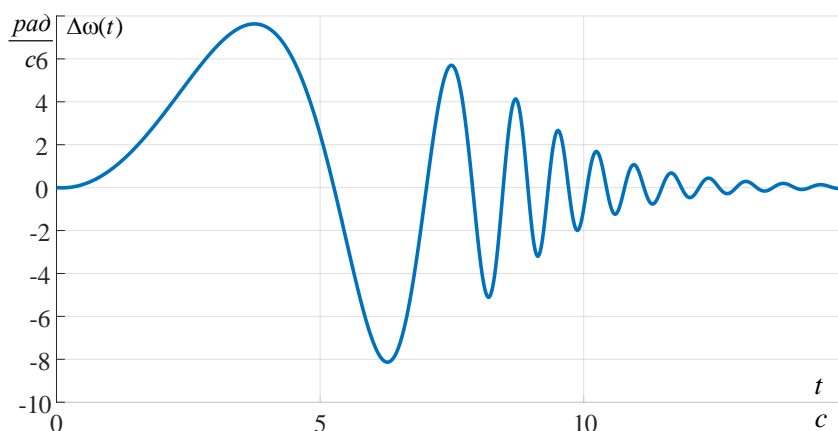


Рисунок 3.2. Рассогласование $\Delta\omega(t)$ траекторий угловой частоты вращения модели двигателя $\omega_{\delta}(t)$ и ее оценки $\hat{\omega}_{\delta}(t)$, $\sigma\omega_{\%} = 0,57\%$

Из рис. 3.1 видно, что опорные траектории $\omega_o(t)$ и $\hat{\omega}_o(t)$ практически полностью совпадают, отсутствуют импульсные выбросы, статическая ошибка оценивания составляет 0,05%, то есть практически отсутствует. Траектория невязки $\Delta\omega(t)$ носит асимптотически затухающий характер с асимптотой, совпадающей с осью абсцисс $\Delta\omega(\infty) = 0$. При этом интегральная ошибка оценивания так же не велика $\sigma\omega_{\%} = 0,57\%$.

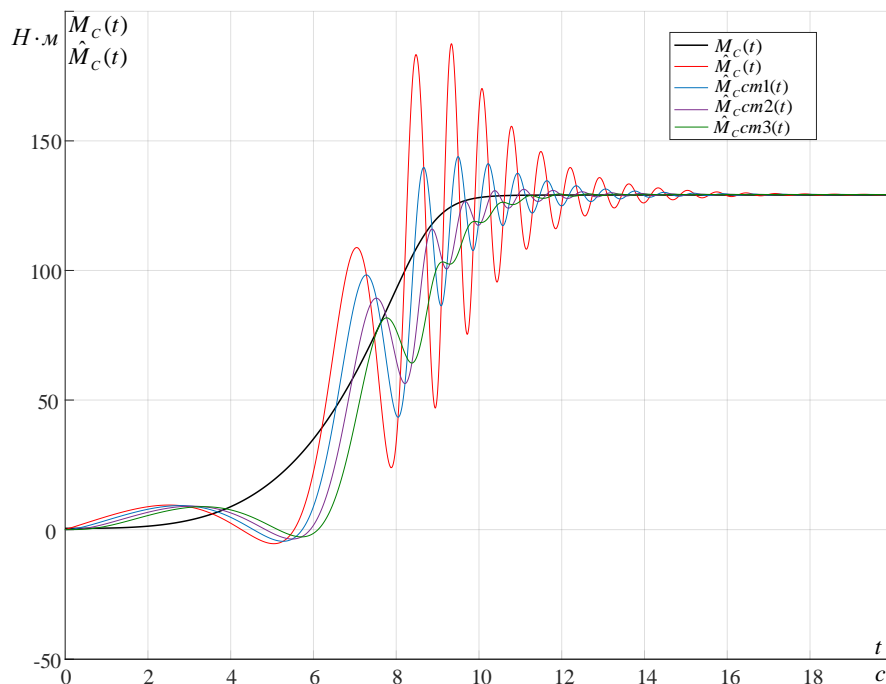


Рисунок 3.3. Переходные процессы момента сопротивления $M_c(t)$ и его оценки $\hat{M}_c(t)$ на разных степенях постфильтратора

Оценка момента сопротивления $\hat{M}_c(t)$ для прямого визуального анализа не является пригодной, поскольку не имеет явно выраженного тренда (рис. 3.3). Было предложено полученную оценку $\hat{M}_c(t)$ подать на многоступенчатый фильтр-постфильтратор, для выделения тренда. В качестве постфильтратора следует выбирать фильтр низких частот (ФНЧ) с гладкой амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ). Представляется возможным применение фильтра Чебышева 2-го рода или фильтра Баттерворта [27]. Основываясь на простоте реализации был выбран трех ступенчатый фильтр-постфильтратор по схеме Баттерворта с одинаковыми степенями,

представленными в виде апериодических звеньев первого порядка с единичным коэффициентом усиления и постоянной времени равной $T_{\phi} = 0,3\text{с}$.

Как видно из рис. 3.3, благодаря постфильтрации оценки момента сопротивления $\hat{M}_c(t)$, был получен явно выраженный тренд выходной переменной наблюдателя $\hat{M}_c(t)$.

Одной из перспективных сфер применения разработанного наблюдателя является бездатчиковый асинхронный электропривод с векторным управлением УЭЦН [6]. Для организации векторного управления требуются оценки проекций вектора потокосцепления ротора и тока статора в системе α, β .

Проведем сопоставительный анализ измеренных и оцененных траекторий модулей векторов тока статора и потокосцепления ротора рис. 3.4-3.5.

Интегральная ошибка оценивания модуля вектора тока статора будет определяться по следующей формуле:

$$\sigma I_{\%} = \frac{1}{t_{\text{конеч}} - t_{\text{нач}}} \cdot \frac{\int_{t_{\text{нач}}}^{t_{\text{конеч}}} \left| \sqrt{I_{1\alpha}^2(t) + I_{1\beta}^2(t)} - \sqrt{\hat{I}_{1\alpha}^2(t) + \hat{I}_{1\beta}^2(t)} \right| \cdot dt}{\int_{t_{\text{нач}}}^{t_{\text{конеч}}} \left| \sqrt{I_{1\alpha}^2(t) + I_{1\beta}^2(t)} \right| \cdot dt} \cdot 100\%$$

где $t_{\text{нач}}$, $t_{\text{конеч}}$ – начальный и конечный моменты времени рассматриваемого динамического режима.

Интегральная ошибка оценивания модуля вектора потокосцепления ротора будет определяться по следующей формуле:

$$\sigma \Psi_{\%} = \frac{1}{t_{\text{конеч}} - t_{\text{нач}}} \cdot \frac{\int_{t_{\text{нач}}}^{t_{\text{конеч}}} \left| \sqrt{\Psi_{1\alpha}^2(t) + \Psi_{1\beta}^2(t)} - \sqrt{\hat{\Psi}_{1\alpha}^2(t) + \hat{\Psi}_{1\beta}^2(t)} \right| \cdot dt}{\int_{t_{\text{нач}}}^{t_{\text{конеч}}} \left| \sqrt{\Psi_{1\alpha}^2(t) + \Psi_{1\beta}^2(t)} \right| \cdot dt} \cdot 100\%$$

где $t_{\text{нач}}$, $t_{\text{конеч}}$ – начальный и конечный моменты времени рассматриваемого динамического режима.

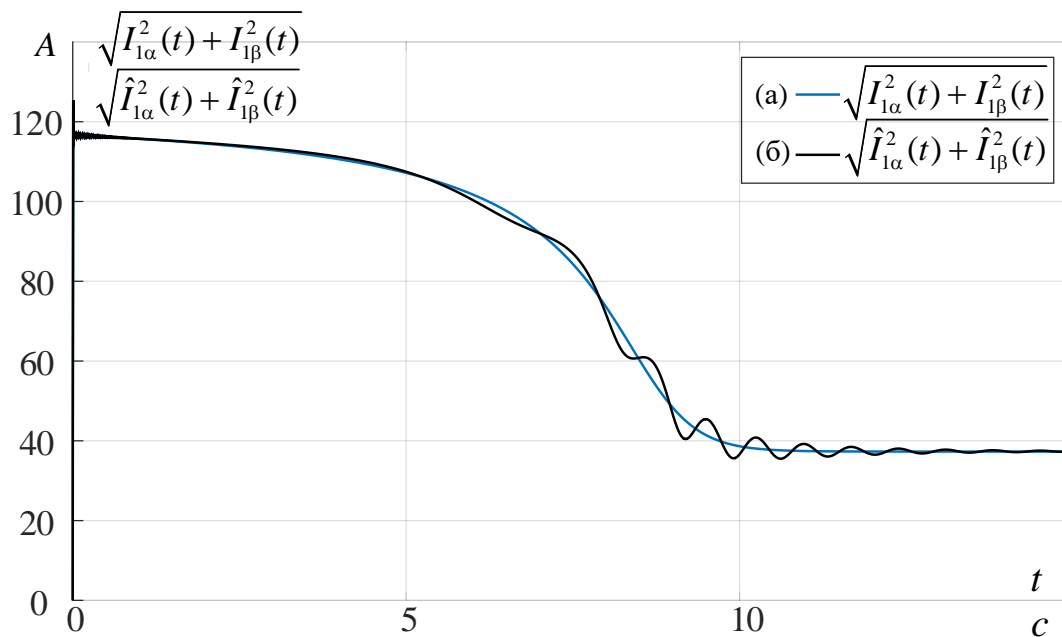


Рисунок 3.4. Отработка наблюдателем процесса пуска АД: (а) $\sqrt{I_{1\alpha}^2(t) + I_{1\beta}^2(t)}$; (б) $\sqrt{\hat{I}_{1\alpha}^2(t) + \hat{I}_{1\beta}^2(t)}$ – оценка модуля вектора тока статора АД, $\sigma I_{\%} = 1,07\%$

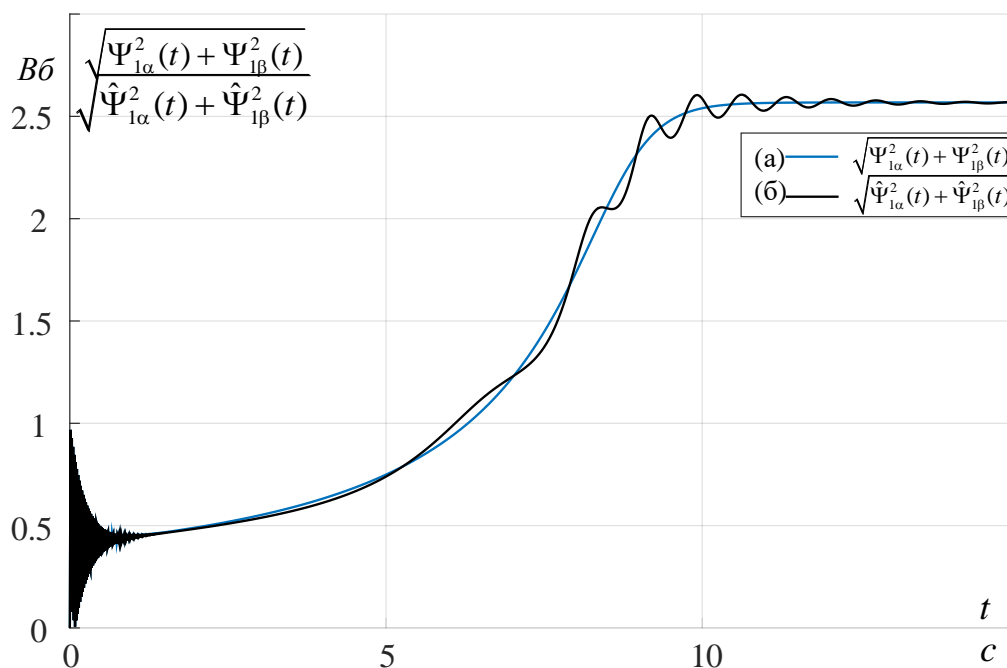


Рисунок 3.5. Отработка наблюдателем процесса пуска АД: (а) $\sqrt{\Psi_{1\alpha}^2(t) + \Psi_{1\beta}^2(t)}$; (б) $\sqrt{\hat{\Psi}_{1\alpha}^2(t) + \hat{\Psi}_{1\beta}^2(t)}$ – оценка модуля вектора потокосцепления ротора АД, $\sigma \Psi_{\%} = 0,99\%$

В результате моделирования видно, что опорные траектории $\sqrt{I_{1\alpha}^2(t) + I_{1\beta}^2(t)}$ и $\sqrt{\hat{I}_{1\alpha}^2(t) + \hat{I}_{1\beta}^2(t)}$, а так же $\sqrt{\Psi_{1\alpha}^2(t) + \Psi_{1\beta}^2(t)}$ и $\sqrt{\hat{\Psi}_{1\alpha}^2(t) + \hat{\Psi}_{1\beta}^2(t)}$ практически полностью совпадают, отсутствуют импульсные выбросы. При этом интегральная ошибка оценивания модуля вектора тока статора равна $\sigma I_{\%} = 1,07\%$, а интегральная ошибка оценивания модуля вектора потокосцепления ротора $\sigma \Psi_{\%} = 0,99\%$. Таким образом можно сделать вывод, что разработанный наблюдатель можно использовать для построения бездатчиковой векторной системы управления АД.

Для проверки устойчивости разработанной модели наблюдателя состояния, проведем моделирование при рассогласовании начальных условий $\omega_o(0_+) = 0 \text{ рад/с}$, $\hat{\omega}_o(0_+) = 298 \text{ рад/с}$.

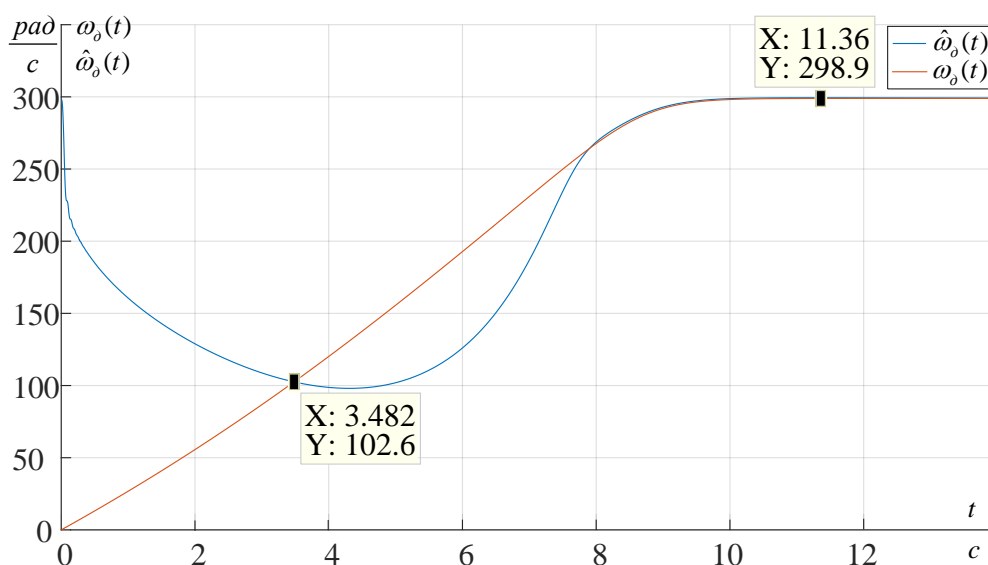


Рисунок 3.6. Отработка наблюдателем процесса пуска АД при рассогласовании начальных условий: $\omega_o(t)$ – скорость АД, $\hat{\omega}_o(t)$ – оценка скорости АД

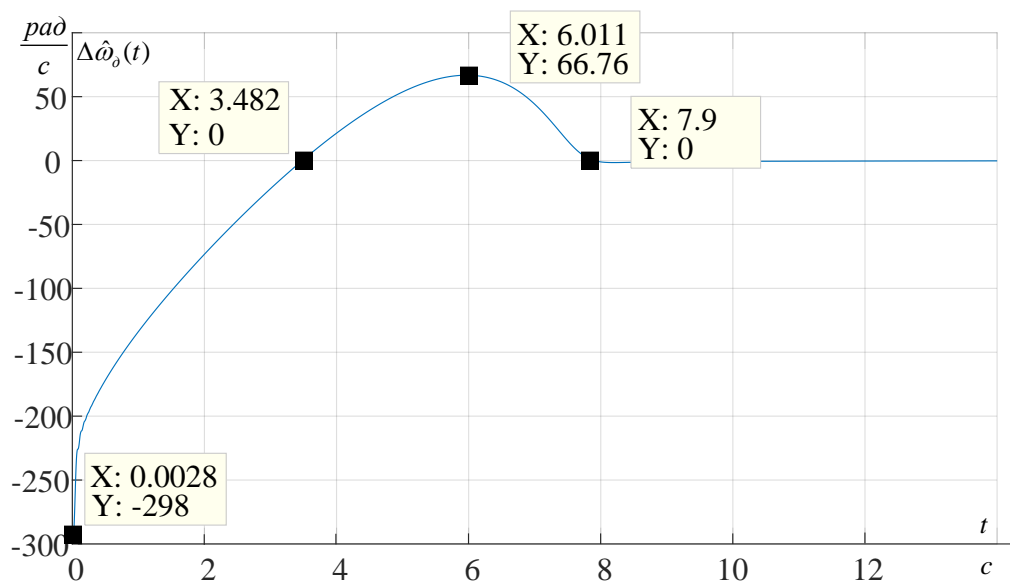


Рисунок 3.7. Рассогласование траекторий угловой частоты вращения $\omega_\phi(t)$ и ее оценки $\hat{\omega}_\phi(t)$ в режиме пуска АД при рассогласовании начальных условий

Исходя из рис.3.6-3.7, можно судить о устойчивой работе наблюдателя в условиях рассогласования начальных условий. Время первой реакции наблюдателя составляет $t_{реак} = 3,48с$, что составляет 59% от общего времени переходного процесса электродвигателя, следовательно правомерно говорить о достаточно высоком быстродействии наблюдателя.

3.2. Моделирование частотно-регулируемого асинхронного электропривода установки электроцентробежного насоса для добычи нефти с наблюдателем переменных состояния и момента сопротивления погружного электродвигателя

3.2.1. Функциональная схема системы скалярного частотного управления

В электрических приводах с длительным режимом работы с определенной скоростью вращения, диапазон регулирования скорости не превышает значения 1:10 и так же не предъявляются особые требования к динамике электрического привода целесообразно применять простейшие структуры и законы частотного управления [22].

В простейшем случае частотно-регулируемый асинхронный электропривод со скалярным управлением реализуется по разомкнутой структуре [26].

Функциональная схема частотно-регулируемого асинхронного электропривода со скалярным управлением, выполненная по разомкнутой структуре, приведена на рисунке 3.8, для двухфазных АД в неподвижной системе координат α, β [22]. На функциональной схеме символом * обозначены сигналы задания и управления и приняты следующие обозначения:

- ω – фактическое значение угловой скорости вращения двигателя;
- ЗИС – задатчик интенсивности скорости с линейной характеристикой;
- ФНУ 1 – формирователь напряжений управления двухфазным АД, который формирует два напряжения переменного тока U_{α}^* и U_{β}^* при применении структурной схемы АД в неподвижной системе координат статора α, β
- ФНУ 2 – преобразователь напряжений управления из неподвижной системы координат статора α, β в напряжения в естественной системе координат a, b, c.

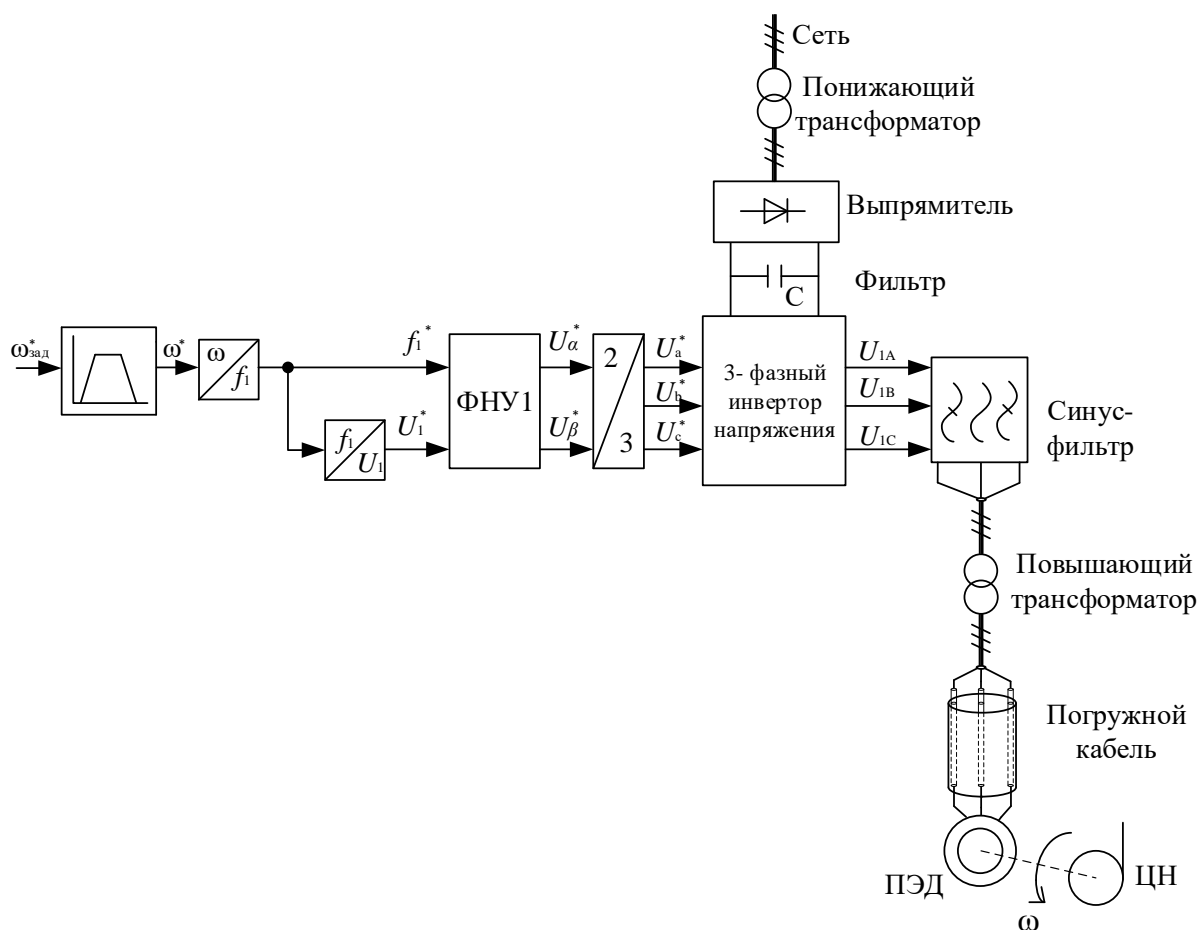


Рисунок 3.8. Функциональная схема частотно-регулируемого асинхронного электропривода УЭЦН со скалярным управлением

В разомкнутой системе электрического привода с вольт-частотным регулированием при уменьшении частоты максимальный момент двигателя так же уменьшается.

Основная причина уменьшения максимального момента – это увеличение влияния активного сопротивления обмотки статора при уменьшении частоты питающего напряжения. При скалярном законе управления $U_1/f_1^2 = \text{const}$, как было сказано выше, для того чтобы обеспечить пусковой момент электрического двигателя на малых скоростях в преобразователе должна быть предусмотрена такая функция как корректировка (повышение начального значения напряжения) вольт-частотной характеристики в области малых частот выходного напряжения инвертора.

Функциональная схема системы скалярного частотного управления приведена на рис. 3.9.

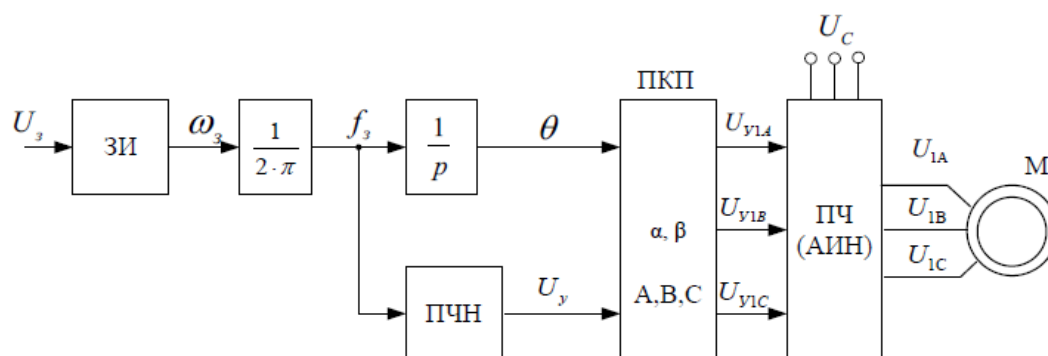


Рисунок 3.9. Функциональная схема системы скалярного частотного управления

Для ограничения момента двигателя в пуско-тормозных режимах электропривода механизмов, у которых по технологии невозможны механические перегрузки (к таким механизмам можно отнести привод насосов), достаточно применения задатчика интенсивности с линейной характеристикой, который устанавливается на входе электропривода в канале задания скорости.

Задатчик интенсивности формирует кривую и темп разгона двигателя. Сигналом задания скорости является задающее напряжение U_z . Ему соответствует задающая частота f_z .

Блок “преобразователь частота-напряжение” ПЧН формирует требуемую зависимость скалярного регулирования между частотой и напряжением преобразователя, чем и устанавливается принятый закон частотного регулирования $U_1/f_1^2 = \text{const}$. Блок ПКП – блок прямого координатного преобразователя формирует трехфазную систему управляющих напряжений для управления автономным инвертором напряжения (АИН) преобразователя частоты. Затем система силовых трехфазных напряжений U_{1A} , U_{1B} , U_{1C} с выхода ПЧ подается на первичные обмотки повышающего трансформатора, а с вторичных обмоток через погружной питающий кабель прикладывается к статору ПЭД.

В соответствии с функциональной схемой, представленной на рис. 3.9, составлена имитационная модель электропривода УЭЦН в среде Simulink системы MatLab. Общий вид разработанной имитационной модели представлен в Приложении В.

3.2.2. Моделирование частотно-регулируемого асинхронного электропривода установки электроцентробежного насоса для добычи нефти с наблюдателем переменных состояния и момента сопротивления погружного электродвигателя

Моделирование проводилось в соответствии принципами плавного частотного пуска ПЭД в составе УЭЦН. Интенсивность разгона/торможения, определяемая задатчиком интенсивности во всех опытах оставалась неизменной и составляла 10 Гц/с. Минимальной стартовой частотой для пуска (рис. 3.10) была выбрана частота $f=20$ Гц, что не противоречит рекомендациям, изложенным в [29]. Далее происходил вывод на промежуточную рабочую частоту $f=30$ Гц, а затем доразгон до основной рабочей частоты $f=50$ Гц. Процесс торможения проводился со снижением рабочей частоты до промежуточного значения $f=30$ Гц, затем до $f=20$ Гц и последующим отключением двигателя.

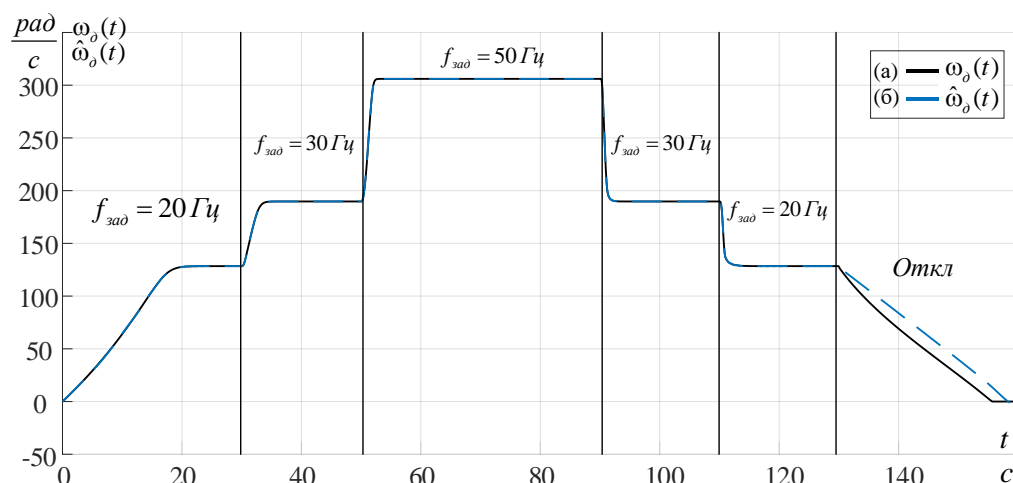


Рисунок 3.10. Отработка наблюдателем заданного цикла работы электропривода а) $\omega_o(t)$; б) $\hat{\omega}_o(t)$ – оценка угловой скорости вращения ротора АД

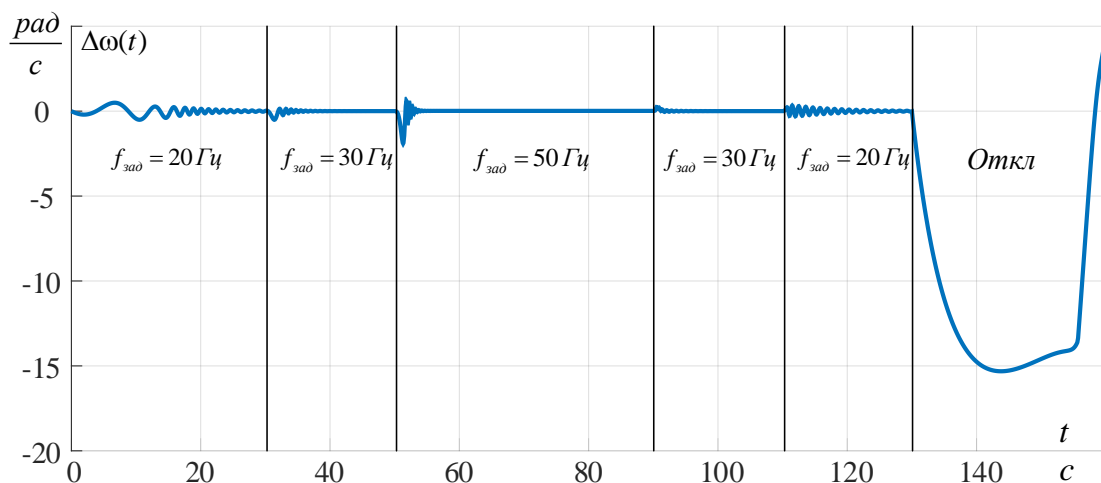


Рисунок 3.11. Рассогласование траекторий угловой частоты вращения модели двигателя $\omega_o(t)$ и ее оценки $\hat{\omega}_o(t)$

Из рис. 3.10 видно, что опорные траектории $\omega_o(t)$ и $\hat{\omega}_o(t)$ практически полностью совпадают, отсутствуют импульсные выбросы, статическая ошибка оценивания составляет 0,05%, то есть практически отсутствует. Траектория невязки $\Delta\omega(t)$ носит асимптотически затухающий характер с асимптотой, совпадающей с осью абсцисс $\Delta\omega(\infty) = 0$. При этом интегральная ошибка оценивания так же не велика $\sigma_{\omega\%} = 0,05\%$.

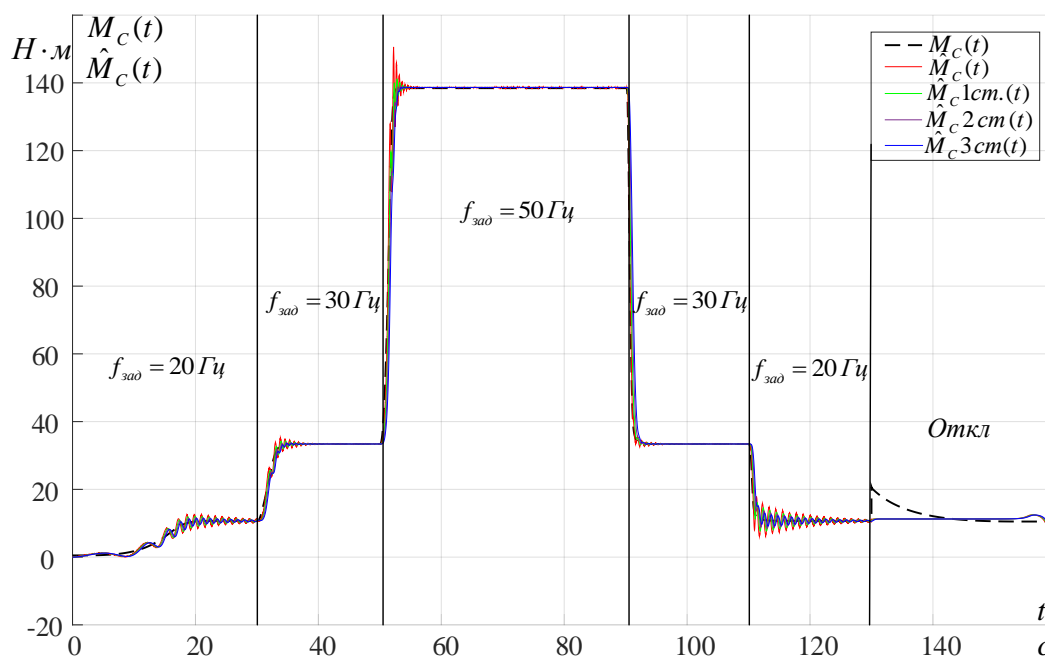


Рисунок 3.12. Зависимость момента сопротивления $M_c(t)$ и его оценки во время заданного цикла работы электропривода

Как видно из рис. 3.12, благодаря постфильтрации оценки момента сопротивления $\hat{M}_c(t)$, был получен явно выраженный тренд выходной переменной наблюдателя $\hat{M}_c(t)$ на протяжении всего цикла работы электропривода.

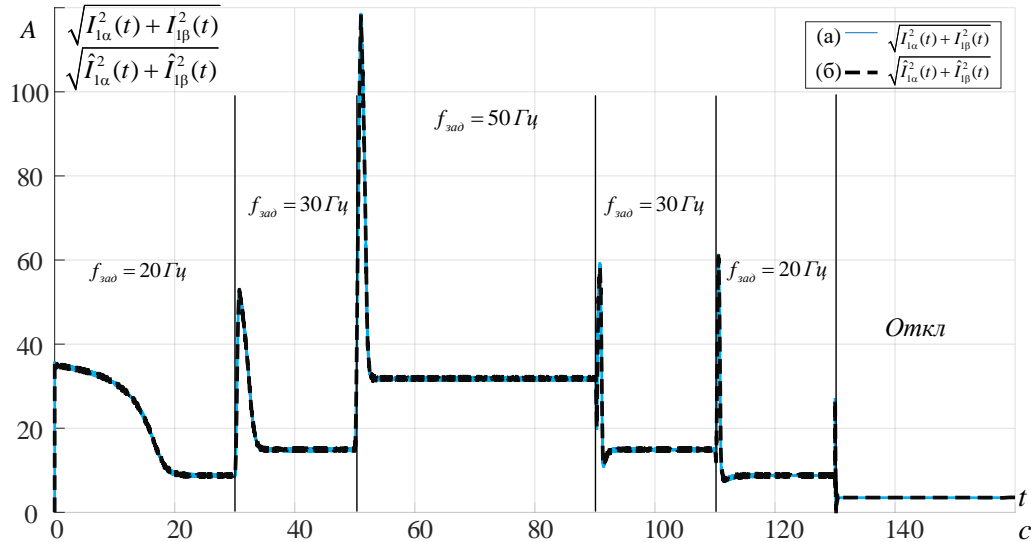


Рисунок 3.13. Обработка наблюдателем заданного цикла работы электропривода: (а) $\sqrt{I_{1\alpha}^2(k) + I_{1\beta}^2(k)}$; (б) $\sqrt{\hat{I}_{1\alpha}^2(k) + \hat{I}_{1\beta}^2(k)}$ – оценка модуля вектора тока статора АД

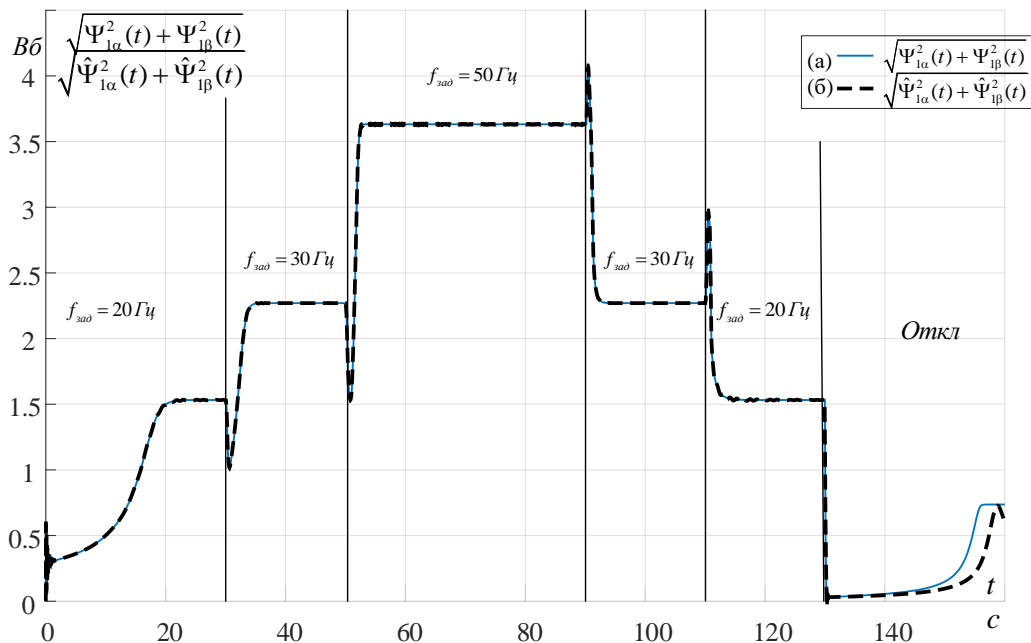


Рисунок 3.14. Обработка наблюдателем заданного цикла работы электропривода: (а) $\sqrt{\Psi_{1\alpha}^2(k) + \Psi_{1\beta}^2(k)}$; (б) $\sqrt{\hat{\Psi}_{1\alpha}^2(k) + \hat{\Psi}_{1\beta}^2(k)}$ – оценка модуля вектора потокосцепления ротора АД

В результате моделирования видно, что опорные траектории $\sqrt{I_{1\alpha}^2(t) + I_{1\beta}^2(t)}$ и $\sqrt{\hat{I}_{1\alpha}^2(t) + \hat{I}_{1\beta}^2(t)}$, а так же $\sqrt{\Psi_{1\alpha}^2(t) + \Psi_{1\beta}^2(t)}$ и $\sqrt{\hat{\Psi}_{1\alpha}^2(t) + \hat{\Psi}_{1\beta}^2(t)}$ практически полностью совпадают, отсутствуют импульсные выбросы. При этом интегральная ошибка оценивания модуля вектора тока статора равна $\sigma I_{\%} = 0,21\%$, а интегральная ошибка оценивания модуля вектора потокосцепления ротора $\sigma \Psi_{\%} = 0,08\%$. Таким образом можно сделать вывод, что разработанный наблюдатель можно использовать для построения бездатчиковой векторной системы управления АД.

3.3. Выводы по главе

1. В результате моделирования прямого пуска ПЭД в составе УЭЦН с параллельно включённым наблюдателем выявлено, что во всех опытах при представленных в ПРИЛОЖЕНИИ В настройках наблюдателя, наблюдатель оказался способен асимптотически устойчиво оценивать все заявленные во второй главе переменные состояния.

2. Для проверки быстродействия реагирования был смоделирован процесс отработки наблюдателем рассогласования начальных условий по угловой частоте, что может наблюдаться при кратковременной пропаже питающего напряжения с последующим его восстановлением. Выявлено что время первой реакции наблюдателя по оценке угловой скорости ротора составляет 57% процентов от общего времени пуска, а, следовательно, при принятых настройках это является вполне приемлемым показателем для УЭЦН, которые не относятся к классам быстродействующих механизмов.

3. В соответствии с типом механизма и режимом работы была выбрана разомкнутая система вольт-частотного управления с законом $U_1/f_1^2 = \text{const}$ и задатчиком интенсивности, обеспечивающим темп разгона 10 Гц/с. При моделировании такой системы во всех режимах работы все оцениваемые переменные состояния носят асимптотически устойчивый характер. Высокая точность оценивания подтверждается низкими величинами интегральных погрешностей, а именно $\sigma\omega_{\%} = 0,05\%$, $\sigma I_{\%} = 0,21\%$, $\sigma\Psi_{\%} = 0,08\%$.

4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

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. |

В данном случае сегментирования целесообразно провести по критерию точности, т.к. как для разных типов режимов работы, требуется разная величина подачи угля в установки соответствующей мощности.


А также следует выделить сегменты рынка:


- по разработке, проектированию и производству;
- по установке и пуско-наладке;
- по дальнейшему обслуживанию и ремонту.

Исходя из сегмента рынка, будет произведено сегментирование коммерческих организаций по отраслям. Сегментирование приведено в табл.4.1.

Таблица 4.1. Карта сегментирования рынка разработок для ЭП

	Электроприводы ЭЦН с вентильными погружными двигателями	Электроприводы ЭЦН с асинхронными погружными двигателями	Электроприводы ЭЦН с асинхронными погружными двигателями и наблюдателем переменных состояния
Проектирование и производство	/ / / / /	x x x x x	
Установка и пуско-наладка	/ / / / /	x x x x x	
Обслуживание и ремонт	/ / / / /	x x x x x	x x x x x

Фирма А


Фирма В


Результаты сегментирования:

Основными сегментами рынка являются все виды деятельности для электроприводов ЭЦН с вентильными и асинхронными погружными двигателями без датчиков скорости и момента;

- Наиболее сильно предприятие должно быть ориентировано на сегменты рынка связанные с проектированием и производством, установкой и пуско-наладкой электроприводов ЭЦН с асинхронными погружными двигателями и наблюдателем переменных состояния;

- Наиболее привлекательными сегментами рынка являются отрасли, связанные с проектированием и производством, установкой и пуско-наладкой электроприводов ЭЦН с асинхронными погружными двигателями и наблюдателем переменных состояния.

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. 4.2).

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

Таблица 4.2. 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. Помехоустойчивостью	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
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;

V_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.

4.2. 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.

4.2.1. Планирование научно-исследовательских работ

4.2.1.1. Структура работ в рамках научного исследования

Иерархическая структура работ (ИСР) – это ориентированный на результаты способ группировки элементов проекта, который упорядочивает и определяет общее содержание проекта. Работы, не включенные в ИСР, находятся за пределами содержания проекта.

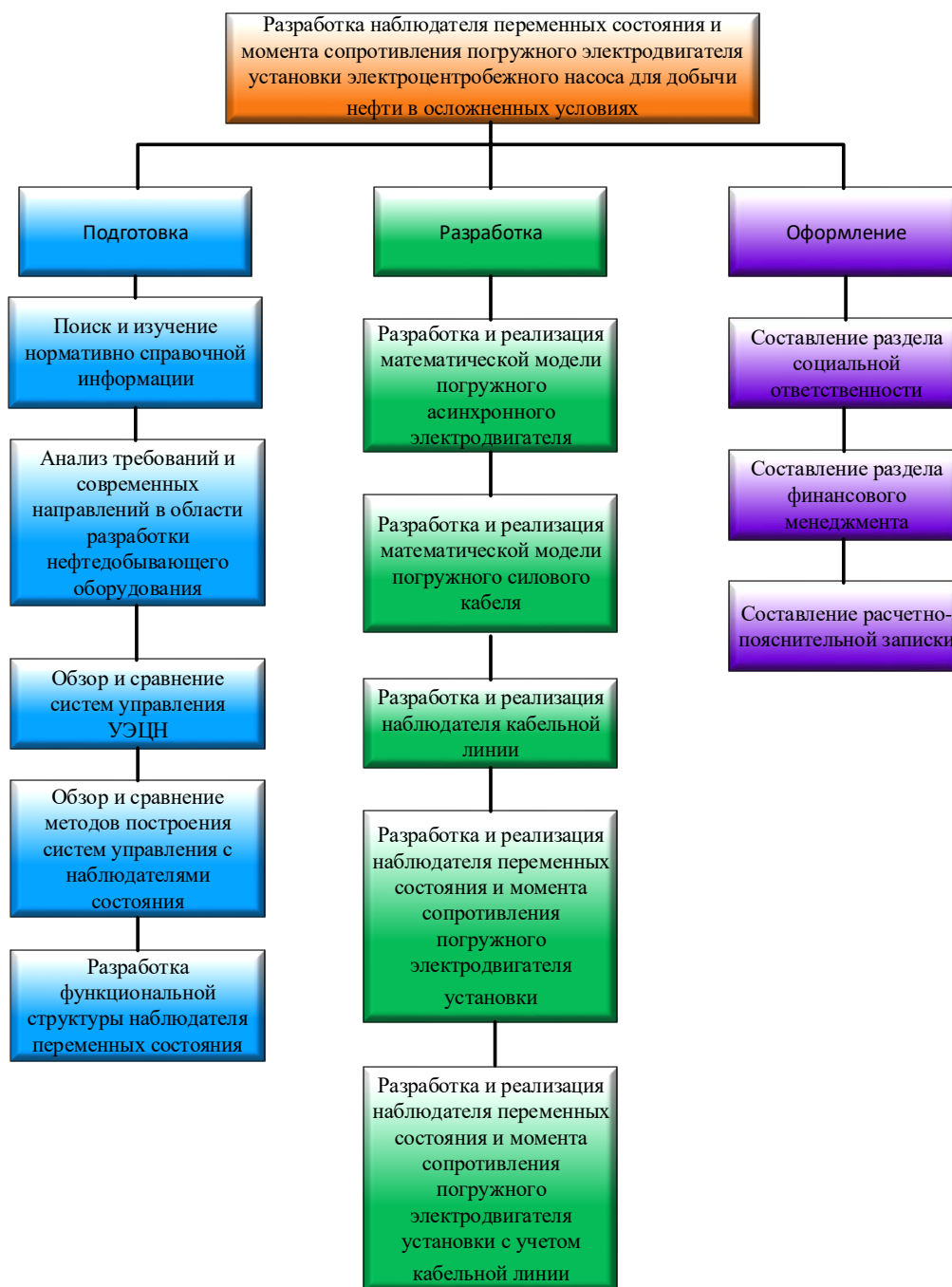


Рисунок 4.1. Иерархическая структура работ

4.2.1.2. Организация и планирование работ

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты, численность групп может варьироваться. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей.

Составляем перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования, проводим распределение исполнителей по видам работ. Линейный график составлен с учетом календарного плана ОПП и производственного календаря. Результат представлен в таблице 4.9:

Таблица 4.9. Линейный план проекта

Основные этапы	Длительность, раб. дни (дни)	Дата начала работ	Дата окончания работ	Должность исполнителя
Разработка наблюдателя переменных состояния УЭЦН	452 (632)	03.10.16	01.06.18	
Планирование работ	98 (144)	03.10.16	24.02.17	
Выбор актуального направления исследования	85 (127)	03.10.16	06.02.17	Руководитель
Разработка технического задания	5 (5)	06.02.17	10.02.17	Руководитель
Получение и обсуждения задания	1(1)	13.02.17	13.02.17	Руководитель, Студент
Составления плана работ	7(11)	14.02.17	24.02.17	Руководитель, Студент
Подготовка к разработке	80 (110)	25.02.17	15.09.17	

Поиск и изучение нормативно справочной информации	10(15)	25.02.17	14.03.17	Руководитель, Студент
Анализ требований и современных направлений в области разработки нефтедобывающего оборудования	13(17)	15.03.17	31.03.17	Студент
Обзор и сравнение систем управления УЭЦН	20 (29)	03.04.17	01.05.17	Студент
Обзор и сравнение методов построения систем управления с наблюдателями состояния	17(25)	02.05.17	26.05.17	Студент
Разработка функциональной структуры наблюдателя переменных состояния	10 (12)	29.05.17	9.06.17	Руководитель, Студент
Разработка	139 (185)	4.09.17	08.06.18	
Разработка и реализация математической модели погружного асинхронного электродвигателя	25 (31)	4.09.17	06.10.17	Студент
Разработка и реализация математической модели погружного силового кабеля	29 (38)	9.10.17	17.11.17	Студент
Разработка и реализация наблюдателя кабельной линии	20 (26)	20.11.17	29.12.17	Студент
Разработка и реализация наблюдателя переменных состояния и момента сопротивления погружного электродвигателя установки	30 (38)	05.03.18	06.04.18	Студент
Разработка и реализация наблюдателя переменных состояния и момента сопротивления погружного электродвигателя установки с учетом кабельной линии	42 (57)	09.04.18	08.06.18	Студент
Составление раздела социальной ответственности и	9 (11)	19.04.18	30.04.18	

финансового менеджмента				
Составление раздела социальной ответственности	4 (6)	19.04.18	25.04.18	Студент
Составление раздела финансового менеджмента	4 (5)	25.04.18	30.04.18	Студент
Составление расчетно-пояснительной записки	126 (182)	03.10.17	08.06.18	Студент

При выполнении дипломных работ студенты в основном становятся участниками сравнительно небольших по объему научных тем. Поэтому наиболее удобным и наглядным является построение ленточного графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

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

Согласно построенному календарному плану графику (рисунок 4.2.) видно, что выпускная работа будет выполнена за две недели до защиты, что является хорошим результатом.

ИД	Название задачи	Начало	Конец	2016			2017												2018					
				окт	ноя	дек	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	январь	февраль	март	апрель	май	июнь
1	Разработка наблюдателя переменных состояния УЭЦН	03.10.2016	08.06.2018	█			█			█						█								
2	Планирование работ	03.10.2016	24.02.2017	█			█																	
3	Выбор актуального направления исследования	03.10.2016	06.02.2017	█			█																	
4	Разработка технического задания	06.02.2017	10.02.2017				█																	
5	Получение и обсуждения задания	13.02.2017	13.02.2017				█																	
6	Составление плана работ	14.02.2017	24.02.2017				█																	
7	Подготовка к разработке	27.02.2017	09.06.2017				█			█														
8	Поиск и изучение нормативно-справочной информации	27.02.2017	14.03.2017				█																	
9	Анализ требований и современных направлений в области разработки нефтедобывающего оборудования	15.03.2017	31.03.2017				█																	
10	Обзор и сравнение систем управления УЭЦН	03.04.2017	01.05.2017				█																	
11	Обзор и сравнение методов построения систем управления с наблюдателями состояния	02.05.2017	26.05.2017				█																	
12	Разработка функциональной структуры наблюдателя переменных состояния	29.05.2017	09.06.2017				█																	
13	Разработка ПО	04.09.2017	08.06.2018										█											
14	Разработка и реализация математической модели погружного асинхронного электродвигателя	04.09.2017	22.09.2017							█														
15	Разработка и реализация математической модели погружного силового кабеля	09.10.2017	17.11.2017							█														
16	Разработка и реализация наблюдателя кабельной линии	20.11.2017	29.12.2017							█														
17	Разработка и реализация наблюдателя переменных состояния и момента сопротивления погружного электродвигателя установки	05.03.2018	06.04.2018													█								
18	Разработка и реализация наблюдателя переменных состояния и момента сопротивления погружного электродвигателя установки с учетом кабельной линии	09.04.2018	08.06.2018													█								
19	Составление раздела социальной ответственности и финансового менеджмента	19.04.2018	30.04.2018													█								
20	Составление раздела социальной ответственности	19.04.2018	25.04.2018													█								
21	Составление раздела финансового менеджмента	25.04.2018	30.04.2018													█								
22	Составление расчетно-пояснительной записки	03.10.2017	08.06.2018							█						█								

Рисунок 4.2. Календарный план-график выполнения выпускной работы

4.3. Бюджет проекта

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

- накладные расходы;
- вознаграждение исполнителю проекта;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).

4.3.1. 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 12.

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

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}$$

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

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

Основная заработная плата ($Z_{осн}$) инженера от предприятия рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{одн} \cdot T_p,$$

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

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (табл. 4.10);

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$\text{Студента: } Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_д} = \frac{17940 \cdot 11,2}{247} = 831,47$$

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;

$F_д$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (табл.4.11).

Таблица 4.11. Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
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	247	247

Месячный должностной оклад студента

$$Z_m = Z_{ТС} \cdot (1 + k_{пр} + k_д) \cdot k_p = (400 \cdot 23) \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 17940$$

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

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

$k_д$ – 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 $Z_{ТС}$);

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

Основная заработная плата руководителя рассчитывается из часового оклада и количества выделенных на работу со студентом часов:

$$Z_{осн} = Z_{час} \cdot T_{час} = 300 \cdot 24 = 7200$$

Расчёт основной заработной платы приведён в табл.4.12.

Таблица 4.12. Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$Z_{б},$ руб./мес.	k_p	$Z_{м},$ руб./мес.	$Z_{дн},$ руб./день	$T_p,$ раб. дн.	$Z_{осн.},$ руб.
Исполнитель	9200	1,3	17940	831,47	347	288520
Руководитель						7200
Итого:						295720

4.3.2. Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала

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:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,12 \cdot 288520 = 34622,4 \text{ руб}$$

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

4.3.3. 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:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}) = 0,271 \cdot (288520 + 34622,4) = 87571,59 \text{ руб}$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.). Данный коэффициент составляет 27,1% от затрат на компенсацию трудозатрат в целях хоздоговора.

Отчисления во внебюджетные фонды рекомендуется представляем в табличной форме (таблица 4.13).

Таблица 4.13. Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.
Исполнитель проекта	288520	34622,4
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,271	
Итого		
Исполнитель	87571,59	

4.3.4. 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:

$$\begin{aligned} Z_{накл} &= (\text{сумма статей } 1 \div 7) \cdot k_{нр} = (Z_{осн} + Z_{доп} + Z_{внеб}) \cdot 0,16 = \\ &= (288520 + 34622,4 + 87571,59) \cdot 0,16 = 65714,23 \end{aligned}$$

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

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

4.3.5. 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 таблице 4.14.

Таблица 4.14. Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб	%
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	295720	
Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	34622,4	
Отчисления во внебюджетные фонды	87571,59	
Накладные расходы	65714,23	16 % от суммы ст.
Бюджет затрат НИИ	483628,22	100

4.4. Оценка конкурентоспособности и ресурсоэффективности проекта

С этой целью может быть использована вся имеющаяся информация о конкурентных разработках:

- технические характеристики проекта;
- конкурентоспособность проекта;
- уровень завершенности научного исследования (наличие макета, прототипа, модели и т.п.);
- бюджет разработки и т.д.

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научного проекта и определить направления для его будущего повышения и реализации.

Для оценки ресурсоэффективности проекта были подобраны критерии эффективности такие как: экономичность, безопасность, обеспечение надлежащего качества и надежности прибора, сфера применения и удобство использования.

1. Экономичность - оптимизация затрат на электрическую часть предприятия на стадии проектирования приводит к их уменьшению на доли процентов, в абсолютном же измерении речь идет об экономии значительных средств.

2. Под обеспечением надлежащего качества и надежности прибора понимается поставка потребителю нового, неизношенного прибора с допустимыми показателями его качества и исключения ситуаций, опасных для людей и окружающей среды.

3. Безопасность - это свойство прибора сохранять с некоторой вероятностью безопасное состояние при выполнении заданных функций в условиях, установленных нормативно-технической документацией.

Критерии ресурсоэффективности и их количественные характеристики приведены в таблице 4.14.

Таблица 4.14. Сравнительная оценка характеристик проекта

Критерии	Весовой коэффициент	Балльная оценка разработки	Конкурентоспособность
1. Качество и надежность исполнение	0,2	4	1,25
2. Сфера применения и удобство использования	0,3	5	1,25
3. Безопасность	0,25	5	1,5
4. Экономичность	0,25	4	1
Итого:	1,00		5

Позиция оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Значения показателей, определяемые экспертным путем, в сумме составляют 1.

Анализ конкурентоспособности проекта определяется согласно выражению:

$$K = \sum B_i \cdot B_i,$$

где K – конкурентоспособность научной разработки; B_i – вес показателя (в долях единицы); B_i – балл i -го показателя.

Тогда

$$K_{k\Sigma} = 0,25 \cdot 4 + 0,3 \cdot 5 + 0,25 \cdot 5 + 0,25 \cdot 4 = 4,75$$

Показатель ресурсоэффективности проекта имеет достаточно высокое значение (по 5-балльной шкале), что говорит об эффективности использования технического проекта. Высокие баллы качества, надежности и безопасности позволяют судить о надежности системы.

Из всего вышперечисленного можно сделать вывод о том, что реализация данного технического проекта позволяет увеличить эффективность прибора.

5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

В данной магистерской диссертации разрабатывается математическая модель наблюдателя переменных состояния и момента сопротивления погружного электродвигателя установки электроцентробежного насоса для добычи нефти в осложненных условиях. Основным инструментом выполнения является персональный компьютер (ПК).

В процессе работы предполагается сбор информации об объекте исследования, её обработка, проведение математических расчетов. Итогом работы будет представление моделей объектов исследования, составление рекомендаций касательно их работы, а также дополнительные комментарии к результатам исследования.

Выполняется в закрытом помещении (кабинет, аудитория) на персональном компьютере, с помощью которого обрабатывается вся информация.

Следует отметить, что меры по охране труда при работе с персональным компьютером должны носить комплексный характер и включать в себя полный спектр работ, направленных на ликвидацию источников вреда.

В данном разделе дипломного проекта рассматриваются следующие вопросы:

- организация рабочего места пользователя ПК;
- определение оптимальных условий труда пользователя ПК.

5.1. Производственная безопасность

Согласно ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» [30] в помещении лаборатории на разработчика могут негативно действовать следующие опасные и вредные производственные факторы (ОВПФ):

Опасные производственные факторы (ОПФ):

- опасность поражения электрическим током;
- Вредные производственные факторы (ВПФ):
- повышенная и пониженная температура воздуха рабочей зоны;
- повышенная или пониженная подвижность воздуха;
- повышенная интенсивность теплового излучения рабочей зоны;
- повышенная и пониженная влажность воздуха;
- недостаточная освещенность рабочей зоны;
- повышенный уровень статического электричества;
- повышенная яркость света;
- повышенный уровень электромагнитных излучений;
- повышенный уровень шума.

Далее более подробно рассмотрены опасные и вредные факторы, воздействующие на разработчика, возникшие в связи с разработкой данной системы.

5.1.1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности

5.1.1.1. Производственные метеоусловия

Согласно нормативно-технической документации при нормировании параметров микроклимата выделяют холодный период года, характеризуемый среднесуточной температурой наружного воздуха, равной $+10^{\circ}\text{C}$ и ниже и теплый период года, характеризуемый среднесуточной температурой наружного воздуха выше $+10^{\circ}\text{C}$. Разграничение работ по категориям, осуществляется на основе интенсивности общих энергозатрат организма в ккал/ч (Вт) [31].

Микроклимат производственных помещений – это климат внутренней среды этих помещений, который определяется действующими на организм человека сочетаниями температуры, влажности и скорости движения воздуха

Лаборатория является помещением I а категории (с интенсивностью энергозатрат до 120 ккал/ч, производимые сидя и сопровождающиеся

незначительным физическим напряжением), поэтому должны соблюдаться следующие требования, приведенные в таблице 5.1:

Таблица 5.1. Оптимальные параметры микроклимата во всех типах учебных помещений с использованием ПЭВМ [32]

Температура, °С	Относ. влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
19	62	< 0,1
20	58	< 0,1
21	55	< 0,1

В помещениях, оборудованных ПЭВМ, проводится ежедневная влажная уборка и систематическое проветривание после каждого часа работы на ЭВМ [32].

Для создания и автоматического поддержания в лаборатории независимо от наружных условий оптимальных значений температуры, влажности, чистоты и скорости движения воздуха, в холодное время года используется водяное отопление, в теплое время года применяется кондиционирование воздуха. Кондиционер представляет собой вентиляционную установку, которая с помощью приборов автоматического регулирования поддерживает в помещении заданные параметры воздушной среды.

5.1.1.2. Недостаточная освещенность рабочей зоны.

Естественное и искусственное освещение должно соответствовать требованиям действующей нормативной документации. Окна в помещениях, где эксплуатируется вычислительная техника, преимущественно должны быть ориентированы на север и северо-восток. Оконные проемы должны быть оборудованы регулируемыми устройствами типа: жалюзи, занавесей, внешних козырьков и др.

Характеристика зрительной работы на в лаборатории относится к работе высокой точности. Взаимосвязь нормируемых параметров естественного и искусственного освещения с характеристиками зрительных работ представлены в таблице 5.2 [31]:

Таблица 5.2. Взаимосвязь нормируемых параметров естественного и искусственного освещения

Характеристика зрительной работы	Наименьший размер объекта различения, мм	Разряд зрительной работы	Подразряд зрительной работы	Относительная продолжительность зрительной работы, %	Освещенность на рабочей поверхности от системы общего искусственного освещения, лк	Средний КЕО при верхнем или верхнем и боковом освещении, %	Минимальный КЕО при боковом освещении, %
1	2	3	4	5	6	7	8
Различение объектов при фиксированной линии зрения							
Высокой точности	0,3-0,5	Б	1	≥70	300	3,0	1,2
			2	<70	200	2,5	1,0
Обзор окружающего пространства							
Средняя насыщенность	-	Д	-	-	200	2,5	0,7
Общая ориентировка в пространстве интерьера							
Малое скопление людей	-	Ж	2		50	-	-
Общая ориентировка в зонах передвижения							
Малое скопление людей	-	3	2		20	-	-

Помимо этого, нормируются светотехнические параметры дисплея, размеры монитора и символов, цветовые параметры, яркость дисплея, частота обновления кадров, которые влияют на состояние зрения. Низкая освещенность дисплея ухудшает восприятие информации, а слишком высокая приводит к уменьшению контраста изображения знаков, что вызывает усталость глаз. Основными осложнениями при длительной работе на компьютере являются утомление глаз и возникновение головной боли. Существенным фактором, влияющим на утомление глаз, является частота перевода взгляда с дисплея на клавиатуру.

Таблица 5.3. Допустимые визуальные параметры устройств отображения информации

N	Параметры	Допустимые значения
1	Яркость белого поля	Не менее 35 кд/кв.м
2	Неравномерность яркости рабочего поля	Не более +-20%
3	Контрастность (для монохромного режима)	Не менее 3:1
4	Временная нестабильность изображения (непреднамеренное изменение во времени яркости изображения на экране дисплея)	Не должна фиксироваться
5	Пространственная нестабильность изображения (непреднамеренные изменения положения фрагментов изображения на экране)	Не более $2 \times 10(-4L)$, где L - проектное расстояние наблюдения, мм

5.1.1.3. Повышенный уровень шума.

В помещениях с низким уровнем общего шума, каким является лаборатория, где работает разработчика, источниками шумовых помех могут стать вентиляционные установки, кондиционеры или периферийное оборудование для ЭВМ (плоттеры, принтеры и др). Длительное воздействие этих шумов отрицательно сказываются на эмоциональном состоянии персонала.

Согласно ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. «Шум. Общие требования безопасности» [33] эквивалентный уровень звука не должен превышать 50 дБА. Для того, чтобы добиться этого уровня шума рекомендуется применять звукопоглощающее покрытие стен.

В качестве мер по снижению шума можно предложить следующее:

- облицовка потолка и стен звукопоглощающим материалом (снижает шум на 6-8 дБ);
- экранирование рабочего места (постановкой перегородок, диафрагм);
- установка в компьютерных помещениях оборудования, производящего минимальный шум;

- рациональная планировка помещения.

Допускаемые уровни звукового давления в октавных полосах частот, уровни звука и эквивалентные уровни звука на рабочих местах следует принимать [34]:

Таблица 5.4. Допускаемые уровни звукового давления на рабочих местах

Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквивалентные уровни звука, дБА
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

5.1.1.4. Повышенный уровень электромагнитных излучений

Электромагнитные поля, характеризующиеся напряженностями электрических и магнитных полей, наиболее вредны для организма человек. Основным источником этих проблем, связанных с охраной здоровья людей, использующих в своей работе автоматизированные информационные системы на основе персональных компьютеров, являются дисплеи (мониторы). Они представляют собой источники наиболее вредных излучений, неблагоприятно влияющих на здоровье разработчика.

ПЭВМ являются источниками таких излучений как:

- мягкого рентгеновского;
- ультрафиолетового 200-400 нм;
- видимого 400-700 нм,
- ближнего инфракрасного 700-1050 нм;
- радиочастотного 3 кГц-30 МГц;
- электростатических полей;

Ультрафиолетовое излучение полезно в небольших количествах, но в больших дозах приводит к дерматиту кожи, головной боли, рези в глазах. Инфракрасное излучение приводит к перегреву тканей человека (особенно хрусталика глаза), повышению температуры тела. Уровни напряженности

электростатических полей должны составлять не более 20 кВ/м. Поверхностный электростатический потенциал не должен превышать 500В. При повышенном уровне напряженности полей следует сократить время работы за компьютером, делать пятнадцатиминутные перерывы в течении полутора часов работы и, конечно же, применять защитные экраны. Защитный экран, изготавливаемый из мелкой сетки или стекла, собирает на себе электростатический заряд. Для снятия заряда экран монитора заземляют.

В таблице 5.5. представлены временные допустимые уровни ЭМП, создаваемых ПЭВМ [34]:

Таблица 5.5. Предельные допустимые уровни ЭМП, создаваемых ПЭВМ

Наименование параметров		ВДУ ЭМП
Напряженность электрического поля	В диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц	25 В/м
	В диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	В диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц	250 нТл
	В диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц	25 нТл
Электростатический потенциал экрана видеомонитора		500

5.2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды

5.2.1. Электроопасность

Помещение лаборатории по опасности поражения электрическим током можно отнести к помещениям без повышенной опасности (сухое, беспыльное, с нормальной температурой воздуха и изолированными полами) [34].

Опасное и вредное воздействие на людей электрического тока, электрической дуги и электромагнитных полей проявляется в виде электротравм и профессиональных заболеваний.

Степень опасного и вредного воздействия на человека электрического тока, электрической дуги и электромагнитных полей зависит от:

- Рода и величины напряжения и тока
- Частоты электрического тока

- Пути тока через тело человека
- Продолжительности воздействия на организм человека

Электробезопасность в помещении лаборатории обеспечивается техническими способами и средствами защиты, а также организационными и техническими мероприятиями.

Рассмотрим основные причины поражения человека электрическим током на рабочем месте:

- Прикосновение к металлическим нетоковедущим частям (корпусу, периферии компьютера), которые могут оказаться под напряжением в результате повреждения изоляции.
- Нерегламентированное использование электрических приборов.
- Отсутствие инструктажа сотрудников по правилам электробезопасности.

В течении работы на корпусе компьютера накапливается статическое электричество. На расстоянии 5-10 см от экрана напряженность электростатического поля составляет 60-280 кВ/м, то есть в 10 раз превышает норму 20 кВ/м. Для уменьшения напряжённости применять применение увлажнители и нейтрализаторы, антистатическое покрытия пола.

Кроме того, при неисправности каких-либо блоков компьютера корпус может оказаться под током, что может привести к электрическим травмам или электрическим ударам. Для устранения этого я предлагаю обеспечить подсоединение металлических корпусов оборудования к заземляющей жиле.

Электробезопасность в лаборатории обеспечивается техническими способами и средствами защиты, а также организационными и техническими мероприятиями.

Основным организационным мероприятием является инструктаж и обучение безопасным методам труда, а также проверка знаний правил безопасности и инструкций в соответствии с занимаемой должностью применительно к выполняемой работе.

Для обеспечения защиты от поражения электрическим током при прикосновении к металлическим нетоковедущим частям, которые могут оказаться под напряжением в результате повреждения изоляции, рекомендуется применять защитное заземление.

Заземление корпуса ЭВМ обеспечено подведением заземляющей жилы к питающим розеткам. Сопротивление заземления 4 Ом, согласно [34] для электроустановок с напряжением до 1000 В.

5.3. Экологическая безопасность

В данном подразделе рассматривается характер воздействия проектируемого решения на окружающую среду. Выявляются предполагаемые источники загрязнения окружающей среды, возникающие в результате реализации предлагаемых в ВКР решений.

5.3.1. Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду

Объектом исследования является программное обеспечение – программный реализуемый алгоритм, позволяющий производить определение характеристик электрической нагрузки промышленных потребителей и как таковой не может нанести отрицательного влияния на окружающую среду. Но в данном подразделе целесообразно рассмотреть влияние, оказываемое компьютерной техникой, которая используется потребителями данного ПО.

По данным исследований, обыкновенные персональные компьютеры загрязняют окружающую среду не хуже автомобилей. Работающий компьютер деионизирует окружающую среду и уменьшает влажность воздуха. Ученые подсчитали, что сейчас, когда человечество выбрасывает в атмосферу огромное количество углекислого газа, 2% всех выбросов приходится на электронику. Когда серверу приходится работать, в окружающую среду выделяется очень большое количество тепла и углекислого газа.

В первую очередь, необходимо повышать качество персональных компьютеров, за счёт установки на них нового программного обеспечения.

Таким образом, материнские платы, мощные блоки и сервера, затрачивая меньшее количество энергии, будут обеспечивать большую производительность, что должно привести к снижению темпов роста выбросов углекислоты. Также необходимо использовать более эффективные источники питания и использовать менее мощные компоненты системы.

Каждый персональный компьютер содержит не только ценные цветные металлы, но и целый набор опасных для окружающей среды веществ. Это производные газов, тяжелые металлы, среди которых кадмий, ртуть и свинец. Попадая на свалку, все эти вещества под воздействием внешней среды постепенно проникают в почву, отравляют воздух и воду [36].

Удельный вес веществ, содержащихся в персональном компьютере, представлен на рисунке 5.1:

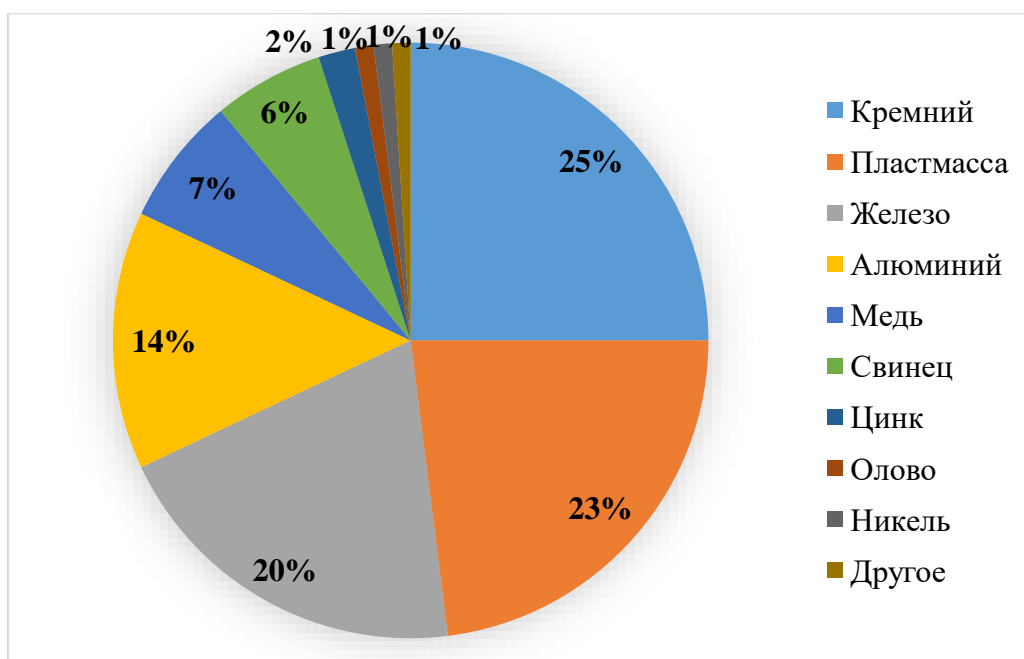


Рисунок 5.1. Удельное содержание веществ

Компьютеры не подпадают под общее положение, они должны быть утилизированы в определенном порядке и только на предприятиях, имеющих официальные разрешения на переработку опасных отходов и металлолома.

Особый порядок утилизации представлен ниже:

- Первый шаг – создание комиссии на предприятии, имеющем технику, подлежащую утилизации. Это внутренняя комиссия, которая создается

для коллективного принятия решения о том, какая именно техника может быть списана.

- Составление экспертного заключения о том, что техника действительно должна быть списана. В качестве эксперта может выступать как независимый специалист, так и сотрудник компании, имеющий диплом, подтверждающий его компетентность в работе с данной техникой.
- Составление акта технической экспертизы, подтверждающего, что техника уже вышла из строя и не подлежит ремонту либо же что ремонт её уже нецелесообразен.
- Составление акта списания компьютерной техники с обязательным отображением в бухгалтерском учете предприятия.
- Утилизация техники на соответствующем предприятии, имеющем право на переработку компьютеров.
- Получение официального подтверждения в виде документа, сообщающего о том, что техника была утилизирована в соответствующем порядке и опасные отходы не будут загрязнять окружающую среду.

5.3.2. Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду

Процесс исследования представляет из себя работу с информацией, такой как техническая литература, статьи, ГОСТы и нормативно-техническая документация, а также разработка математических моделей. Таким образом процесс исследования не имеет влияния негативных факторов на окружающую среду.

5.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

5.4.1. Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований и обоснование мероприятий по предотвращению ЧС

На территории расположения здания, где находится лаборатория, возможны развития следующих чрезвычайных ситуаций, таблица 5.6:

Таблица 5.6. Возможные ЧС

Биолого-социальные	Военные	Природные	Техногенные
Терроризм	Войны	Землетрясения	Радиационные
		Ураганы	Химические
			Пожары

Наиболее вероятная чрезвычайная ситуация, которая может возникнуть во время разработки программного обеспечения идентификации статических характеристик нагрузки – пожар.

Согласно Федеральному закону № 123-ФЗ от 22.07.2008 года «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [37] степень огнестойкости зданий принимается в зависимости от их назначения, категории по взрывопожарной и пожарной опасности, этажности, площади этажа в пределах пожарного отсека.

По конструктивным характеристикам здание, в котором находится лаборатория, можно отнести к зданиям с несущими и ограждающими конструкциями из естественных или искусственных каменных материалов, бетона или железобетона, где для перекрытий допускается использование деревянных конструкций, защищенных штукатуркой или трудногорючими листовыми, а также плитными материалами.

Следовательно, степень огнестойкости здания можно определить, как третью (III).

Помещение лаборатории по функциональной пожарной опасности относится к классу Ф 4.3 – здания органов управления учреждений, проектно-конструкторских организаций, информационных и редакционно-издательских организаций, научных организаций, банков, контор, офисов.

Пожар в лаборатории, может привести к очень неблагоприятным последствиям (потеря ценной информации, порча имущества, гибель людей и т.д.), поэтому необходимо: выявить и устранить все причины возникновения пожара; разработать план мер по ликвидации пожара в здании; план эвакуации людей из здания.

Причинами возникновения пожара могут быть:

- неисправности электропроводки, розеток и выключателей, которые могут привести к короткому замыканию или пробоем изоляции;
- использование поврежденных (неисправных) электроприборов;
- использование в помещении электронагревательных приборов с открытыми нагревательными элементами;
- возникновение пожара вследствие попадания молнии в здание;
- возгорание здания вследствие внешних воздействий;
- неаккуратное обращение с огнем и несоблюдение мер пожарной безопасности.

5.4.2. Профилактика пожароопасной ситуации (пожара)

Пожарная профилактика представляет собой комплекс организационных и технических мероприятий, направленных на обеспечение безопасности людей, на предотвращении пожара, ограничение его распространения, а также создание условий для успешного тушения пожара. Для профилактики пожара чрезвычайно важна правильная оценка пожароопасности здания, определение опасных факторов и обоснование способов и средств пожаропредупреждения и защиты.

Одно из условий обеспечения пожаробезопасности – ликвидация возможных источников воспламенения.

5.4.3. Действия при возникновении пожароопасной ситуации (пожара)

При возникновении пожароопасной ситуации или пожара, персонал должен немедленно сообщить об этом по телефону 01 и спокойно объяснить: что горит, чему угрожает; адрес объекта; есть ли опасность для людей; назвать свою фамилию; немедленно обесточить всю электротехнику в помещении; обеспечить эвакуацию людей.

Помещения с электрооборудованием должны быть оснащены огнетушителями типа ОУ-2, ОУ-5 или ОП-5 (предназначены для тушения

любых материалов, предметов и веществ, а также электроустановок, находящихся под напряжением до 1000 В, применяется для тушения ПК и оргтехники). При пожаре поднести огнетушитель как можно ближе к огню, направить раструб в очаг пожара, сорвать пломбу (выдернуть чеку), открыть вентиль, нажать на пусковой рычаг, направить струю выходящего газа на огонь. Во время работы раструб нельзя держать рукой, т. к. он имеет очень низкую температуру.

5.5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

5.5.1. Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства.

Согласно Трудовому кодексу Российской Федерации и договору № 959 от 01 сентября 2016 года заключённому между АО «Системный оператор Единой энергетической системы» и Национальным исследовательским Томским политехническим университетом каждый сотрудник имеет право на:

- рабочее место, соответствующее требованиям охраны труда;
- обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний в соответствии с федеральным законом;
- отказ от выполнения работ в случае возникновения опасности для его жизни и здоровья вследствие нарушения требований охраны труда, за исключением случаев, предусмотренных федеральными законами, до устранения такой опасности;
- обеспечение средствами индивидуальной и коллективной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя;
- медицинский осмотр в соответствии с медицинскими рекомендациями с сохранением за ним места работы (должности) и среднего заработка во время прохождения указанного медицинского осмотра;

5.5.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны

Производственная деятельность разработчика, заставляет его продолжительное время находиться в сидячем положении, которое является вынужденной позой, поэтому организм постоянно испытывает недостаток в подвижности и активной физической деятельности. При выполнении работы сидя большую роль играет плечевой пояс. Перемещение рук в пространстве влияет не только на работу мышц плечевого пояса и спины, но и на положение позвоночника, таза и даже ног.

По условиям работы рабочее место разработчика относится к индивидуальному рабочему месту для работы сидя.

Рабочее место разработчика должно занимать площадь не менее 6 м², высота помещения должна быть не менее 4 м, а объем - не менее 20 м³ на одного человека. Высота над уровнем пола рабочей поверхности, за которой работает оператор, должна составлять 720 мм. Желательно, чтобы рабочий стол оператора при необходимости можно было регулировать по высоте в пределах 680 - 780 мм. Оптимальные размеры поверхности стола 1600 x 1000 кв. мм. Под столом должно иметься пространство для ног с размерами по глубине 650 мм. Рабочий стол оператора должен также иметь подставку для ног, расположенную под углом 15 градусов к поверхности стола. Длина подставки 400 мм, ширина - 350 мм. Удаленность клавиатуры от края стола должна быть не более 300 мм, что обеспечит оператору удобную опору для предплечий. Расстояние между глазами оператора и экраном видеодисплея должно составлять 40 - 80 см.

Рабочий стул разработчика должен быть снабжен подъемно-поворотным механизмом. Высота сиденья должна регулироваться в пределах 400 - 500 мм. Глубина сиденья должна составлять не менее 380 мм, а ширина - не менее 400 мм. Высота опорной поверхности спинки не менее 300 мм, ширина - не менее 380 мм. Угол наклона спинки стула к плоскости сиденья должен изменяться в пределах 90 - 110 градусов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В ходе выполнения магистерской диссертации рассмотрены основные причины выхода из строя механических узлов УЭЦН. Показано что применение методов, позволяющих производить оперативную оценку момента сопротивления на валу ПЭД, позволило бы повысить межремонтный период работы УЭЦН.

2. Была рассмотрена проблема учета эффектов, связанных с применением погружной кабельной линии. В результате разработана математическая модель наблюдателя кабельной линии с усилением невязки по П-принципу на основе модели погружного кабеля с сосредоточенными параметрами.

3. Разработанная математическая модель наблюдателя кабельной линии в виде подсистемы интегрирована в математическую модель наблюдателя переменных состояния и момента сопротивления погружного электродвигателя установки электроцентробежного насоса для добычи нефти в осложненных условиях.

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

5. В разделе социальная ответственность были рассмотрены условия работы проектного отдела, произведен анализ вредных и опасных факторов при работе отдела.

Список публикаций

1. Глазырин А. С., Негодин К. Н., Слепнёв И. Г. Исследование граничных условий задачи оптимизации при настройке наблюдателя полного порядка для линеаризованного электромеханического объекта [Электронный ресурс] // Энергетика и энергосбережение: теория и практика: сборник материалов II Всероссийской научно - практической конференции, Кемерово, 2-4 Декабря 2015. - Кемерово: КузГТУ, 2015 - С. 1-7. - Режим доступа:[http://science.kuzstu.ru/wp-](http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/energ/2015/energ/pages/Articles/3/Glazyrin_2.pdf)

[content/Events/Conference/energ/2015/energ/pages/Articles/3/Glazyrin_2.pdf](http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/energ/2015/energ/pages/Articles/3/Glazyrin_2.pdf)

2. Глазырин А. С., Афанасьев К. С., Негодин К. Н., Слепнёв И. Г. Сравнительный анализ динамики двух вариантов наблюдателей полного порядка для регулируемого асинхронного электродвигателя [Электронный ресурс] // Энергетика и энергосбережение: теория и практика: сборник материалов II Всероссийской научно - практической конференции, Кемерово, 2-4 Декабря 2015. - Кемерово: КузГТУ, 2015 - С. 1-7. - Режим доступа: [http://science.kuzstu.ru/wp-](http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/energ/2015/energ/pages/Articles/3/Glazyrin_1.pdf)

[content/Events/Conference/energ/2015/energ/pages/Articles/3/Glazyrin_1.pdf](http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/energ/2015/energ/pages/Articles/3/Glazyrin_1.pdf)

3. Слепнёв И. Г., Глазырин А. С. Компенсация рассогласования начальных условий в наблюдателе полного порядка электромеханического объекта [Электронный ресурс] // Энергостарт: сборник материалов Всероссийской молодежной научно-практической школы, Кемерово, 11-25 Июля 2016. - Кемерово: КузГТУ, 2016 - С. 1-5. – Режим доступа: [http://science.kuzstu.ru/wp-](http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/Other/2016/es/energstart/pages/Articles/3/Slepnyov_Glazyrin.pdf)

[content/Events/Conference/Other/2016/es/energstart/pages/Articles/3/Slepnyov_Glazyrin.pdf](http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/Other/2016/es/energstart/pages/Articles/3/Slepnyov_Glazyrin.pdf)

4. Слепнёв И. Г., Тимошкин В. В. Система бесперебойного питания для узлов связи // Интеллектуальные энергосистемы: материалы IV Международного молодёжного форума. В 3т., Томск, 10-14 Октября 2016. - Томск: ТПУ, 2016 - Т. 2 - С. 74-78

5. Слепнёв И. Г., Глазырин А. С. Сравнительный анализ применения электропривода УЭЦН с наблюдателем состояния и с магнитоупругим датчиком момента и датчиком скорости // Интеллектуальные энергосистемы: материалы IV Международного молодёжного форума. В 3т., Томск, 10-14 Октября 2016. - Томск: ТПУ, 2016 - Т. 2 - С. 7-9

6. Глазырин А. С., Слепнёв И. Г. Подход к построению микропроцессорных асинхронных электроприводов с наблюдателями состояния для УЭЦН // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве: материалы докладов II Поволжской научно-практической конференции, Казань, 8-9 Декабря 2016. - Казань: КГЭУ, 2016 - Т. 1 - С. 106-114

7. Slepnyov I. G., Chernyshev I. A., Chernyshev A. Y. Energy saving in electric drive of boiler blow fan // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON - 2017): proceedings, Астана, June 29-30, 2017. - New York: IEEE, 2017 - p. 1-5

8. Glazyrin A. S. , Kladiev S. N. , Afanasjev K. S. , Timoshkin V. V. , Slepnyov I. G. , Polishchuk V. I. , Hala' sz S. -. Разработка наблюдателя полного порядка с оперативным мониторингом момента сопротивления для погружных асинхронных электродвигателей=Design of full order observer with real time monitoring of load torque for submersible induction motors // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. - 2018 - Т. 329 - №. 2. - С. 118-126

Литература

1. 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.

2. Меньшов Б.Г. Электрооборудование нефтяной промышленности / Б.Г. Меньшов, И.И. Суд, А.Д. Яризов. – М.: Недра, 1990. – 364 с.

3. Е. М. Кузнецов, О. А. Лысенко, Д. В. Рысев Электрооборудование насосных установок для нефтедобычи и перекачки жидкостей: учеб. пособие / Минобрнауки России, ОмГТУ. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2016

4. Ивановский, В.Н. Установки погружных центробежных насосов для добычи нефти / В. Н. Ивановский, С. С. Пекин, А. А. Сабиров. – М. : «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2002. – 256 с.

5. Зейгман Ю. В., Колонских А.В. Оптимизация работы УЭЦН для предотвращения образования осложнений. Уфимский государственный нефтяной технический университет // Нефтегазовое дело. – 2005. – №2. – 9 с.

6. А.Ю.Ковалев, Е.М.Кузнецов, В. В. Аникин Электротехнологические установки для нефтедобычи: монография пособие / Минобрнауки России, ОмГТУ, Нижневартровский академический институт прикладной энергетики – Омск: – 160 с.: ил.

7. Лопатин Р.Р. Модели и алгоритмы частотно-регулируемого процесса расклинивания электроцентробежного насоса при добыче нефти в осложненных условиях: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: спец. 05.09.03 / В. А. Сипайлов; Томский государственный университет (ТПУ); науч. рук. д.т.н. Сергеев Виктор Леонидович. — Томск, 2011. — 136 с.: ил

8. Разработка наблюдателя полного порядка с оперативным мониторингом момента сопротивления для погружных асинхронных

электродвигателей [Электронный ресурс] / А. С. Глазырин [и др.] // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. Инжиниринг георесурсов / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — 2018. — Т. 329, № 2. — [С. 118-126]. — Заглавие с титульного листа. — Свободный доступ из сети Интернет.. — ISSN 2413-1830
Режим доступа: http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/46402/1/bulletin_tpu-2018-v329-i2-11.pdf

9. Технологический регламент по применению частотных преобразователей для скважин, оборудованных установками ЭЦН, на месторождениях ОАО «Сургутнефтегаз». Сургут: Изд-во «СНГ», 2007. – 13с.

10. Станция управления ЭЛЕКТОН-05. Руководство по эксплуатации ЦТКД-065-РЭ. Изд. Радужный: «ЭЛЕКТОН», 2005. 64 с.

11. 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.

12. Портнягин А.Л. Совершенствование методов анализа процессов ремонтно-технического обслуживания скважинных систем нефтепромысла: автореф. дис. ...канд. техн. наук. – Тюмень, 2005. – 22 с.

13. Bose B. K. Modern power electronics and AC drives. – Prentice-Hall Inc., 2002. – 711 p.

14. Панкратов В.В., Маслов М.О. Задачи синтеза алгоритмов идентификации для бездатчиковых асинхронных электроприводов с векторным управлением и вариант их решения Опубликовано: Силовая интеллектуальная электроника. – 2007. – №1(6).

15. Моделирование привода погружного насоса интеллектуальной скважины: монография / [А.В. Федотов и др.]– Омск: Изд-во ОмГТУ, 2012. – 175 с.

16. Виноградов А., Сибирцев А., Колодин И. Адаптивно-векторная система управления бездатчикового асинхронного электропривода серии ЭПВ //Силовая электроника. – 2006. – № 3. – С. 46–51.
17. Слепнёв И. Г., Глазырин А. С. Сравнительный анализ применения электропривода УЭЦН с наблюдателем состояния и с магнитоупругим датчиком момента и датчиком скорости // Интеллектуальные энергосистемы: материалы IV Международного молодёжного форума. В 3т., Томск, 10-14 Октября 2016. - Томск: ТПУ, 2016 - Т. 2 - С. 7-9.
18. Уткин В.И. скользящие режимы в задачах оптимизации и управления.–Москва: Наука, 1981 . – 367 с. : ил.
19. Глазырин А.С. Бездатчиковое управление асинхронным электроприводом с синергетическим регулятором [Электронный ресурс] // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ] / Томский политехнический университет (ТПУ). — 2012. — Т. 321, № 4: Энергетика. — [С. 107-111]. — Заглавие с титульного листа. — Электронная версия печатной публикации. Режим доступа: http://www.lib.tpu.ru/fulltext/v/Bulletin_TPU/2012 Свободный доступ из сети Интернет
20. Сайт ЭЛЕКТОН. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.elekton.ru/lc_filter.shtml свободный. – Загл. с экрана.
21. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – 9-е изд., перераб. и доп. – М.: «Высшая школа», 1996. – 638 с.
22. 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.

23. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
24. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: учебник. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2001. – 327 с.
25. Денисенко В.В. Компьютерное управления технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 608 с., ил.
26. Терёхин В.Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (Matlab 7.0.1): учебное пособие / Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 320 с.
27. Боловин Е.В., Глазырин А.С. Метод идентификации параметров погружных асинхронных электродвигателей установок электроприводных центробежных насосов для добычи нефти [Электронный ресурс] // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. Инжиниринг георесурсов / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). – 2017. – Т. 328, № 1. – С. 123-131.
28. Хоровиц, П. Искусство схемотехники / П. Хоровиц, У. Хилл: пер. с англ. – 6-е изд. – М.: Мир, 2003. – 704 с., ил.
29. Технологический регламент ОАО «ВАРЬЁГАННЕФТЬ» по подготовке, запуску, выводу на режим и эксплуатации скважин, оборудованных УЭЦН. 2018. URL: <http://filling-form.ru/dogovor/60668/index.html> (дата обращения 12.06.2018).
30. ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация». – Введен 01.03.2015 – Москва.
31. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий
32. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к

персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы. – Министерстве юстиции Российской Федерации от 10 июня 2003 года, регистрационный N 4673.

33. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. «Шум. Общие требования безопасности» – Введен 01.11.2015 – Москва.

34. Правила устройства электроустановок – Новосибирск: Норматика, 2014. – 464 с.

35. ГОСТ 12.4.124-83 ССБТ. Средства защиты от статического электричества. Общие технические требования – Введен 01.01.1984 – Москва

36. Утилизация компьютеров – необходимость, обусловленная уровнем развития человека [Электронный ресурс] URL: <http://greenologia.ru/utilizaciya-texniki/ofisnaya/kompyutery/utilizaciya-kompyuterov.html>. Дата обращения (03.04.2018)

37. Федеральный закон № 123-ФЗ от 22.07.2008 года «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» – Принят Государственной Думой 4 июля 2008 года – Москва.

Приложение А

Раздел 6

THE DEVELOPMENT OF AN OBSERVER FOR CONTROLLING STATE VARIABLES AND LOAD TORQUE OF A SUBMERSIBLE INDUCTION MOTOR FOR OIL PRODUCTION

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Ж	Слепнёв Иван Георгиевич		

Консультант отделения электроэнергетики и электротехники ИШЭ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Образцов К.В.			

Консультант – лингвист отделения ИЯ ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Соколова Э.Я.			

Introduction

At present, the Russian Federation is one of the largest oil exporters at the world fuel market. Consequently, the increase in oil production determines the economic development strategy in the country. Therefore, the oil production industry must satisfy high requirements, including the analysis of reservoirs of hydrocarbon accumulation, subsequent production, and its transmission to processing enterprises (reduction of resource spend for maintaining the functioning of the oil production complex). However, the most important task is to increase the efficiency and reliability of equipment used for lifting.

Oil production is characterized by high energy output. Costs that account for the share of electricity constitute 30-50% of the total costs. However, according to some Western experts, the cost of electricity makes up only 10% of the costs of raw materials. Consequently, the share of electricity cost spent on oil production under the conditions of a constant growth in electricity rates will only increase.

The increase in costs is due to a change in the state of a raw material base, the quality of reserves in the developed and discovered fields, the deterioration of oil production conditions (water cut, increased viscosity and dressing of extracted products, high gas factor) [1]. Most of the oil pools with active reserves are at the last stage of their development, the share of hard-to-recover reserves increases, the level of oil in wells decreases, the number of wells with a dynamic level of more than one kilometer also tends to increase. The development of new fields is accompanied by an increase in the number of wells and depth of drilling. Simultaneously with the growth of the mechanized well stock, the costs for equipment repair also boost.

Oil is extracted by a fountain technique in domestic oil fields, partly by gas lift and by a mechanical method (ESP, SRPU) predominantly.

In comparison with other units, ESPs provide a large range of feeds (from 10 to 1000 m³ / day) and high efficiency (more than 40%) in the field of feeds from 50 to 300 m³ / day. They are capable to develop head pressure up to 3,500 m and

less subject to the influence of the curvature of the trunk and less labour-intensive [2].

When operating the ESP wells, the paraffin control is carried out more efficiently by the automated wire scrapers and coating the internal surface of the tubing, which leads to a reduction in the asphalt-resin-paraffin deposition by reducing the surface roughness.

According to the above factors, ESPs are the most common equipment for mechanized oil production. In the Russian Federation, about 35% of all oil wells are equipped with ESPs, they provide the majority of the production of liquid and oil (more than 65%) [3]. Under these conditions, it seems relevant to improve the control of ESPs, especially equipped with frequency converter, which will allow to increase the efficiency of their use while reducing energy consumption and power grid losses, which generally leads to savings in financial resources.

1. ELECTRIC CENTRIFUGAL PUMP UNITS

1.1. Purpose, configuration, principle of operation, technical and operational characteristics

Oil production in a broad sense is a combination of technical and technological measures combined to extract oil, gas, and associated components that are contained in them, as well as to control the production process. As mentioned earlier, ESPs with an electric drive based on an induction motor of the SEM type are currently the prevailing means of mechanized oil production in the fields of Western Siberia.

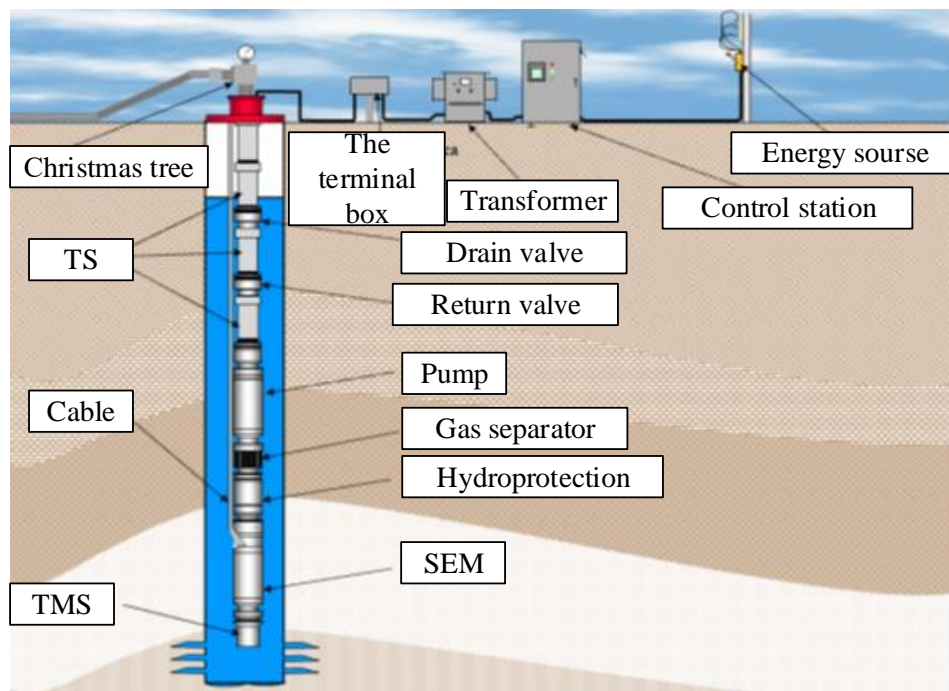


Figure 1. ESP structure

ESPs are electro technological complexes that contain ground and submerged electrical equipment (Fig. 1). Submerged electrical equipment of ESP consists of a multi-stage (from 80 to 500 and more stages) electrical submersible pump (ESP) with a gas separator at the suction and oil-filled induction submersible electric motor (SEM) with a hydroprotection (protector) that protects SEM from penetration of the surrounding formation fluid.

In the assembled form, the SEM is located at the bottom of the submersible unit (Fig. 1), the protector is above it, and ESP is over the protector. The unit is descended into the well on a flow column (tubing) connected to the wellhead equipment and suspended on a hanging washer without additional attachment to the well. SEM power supply is carried out on a special oil and gas-resistant circular or flat three-core cable with a flexible tape armor, which is fastened to the tubing with metal belts. In the final section (at the first tubing) the cable line represented by a flat motor lead extension that allows to increase the diameter of ESP and SEM in the casing string of the oil well. The minimum permissible clearance, found and justified by the practice of ESP operation is 6 mm [4]. It guarantees a trouble-free descent and lifting of submersible equipment and determines the transverse dimensions of

the submersible unit. In the tubing string (Fig. 1), above ESP, a return valve is installed. When ESP stops, it holds a column of formation fluid to exclude a turbine rotation of ESP and the rotor of SEM and also to facilitate subsequent start-up. Turbine rotation occurs in the absence of a return valve when the pump unit stops due to the liquid column remaining in the tubing. Above the return valve is a drain valve that allows the fluid formation to drain into the annular space when the unit is lifted. Without this valve, the liquid, spilled on the surface, creates a threat to the environment and workers.

The transformer and control station (CS) belong to the ground electrical equipment of the electrical complex and the system (ECS) of ESP, and the pressure transducer and christmas tree refer to the wellhead equipment. The commercial two-winding transformer is designed to step up the voltage 0.4 kV, coming from the output of the CS (Fig. 1) to a voltage of 1.5-3 kV, which is necessary for the operation of the SEM. The secondary winding of the transformer contains from 5 to 36 tap-offs for step-by-step regulation of the output voltage by means of a manual drive in the SWE mode (switching without excitation). Regulation of this kind provides compensation of voltage losses that occur in a long (usually many kilometers) cable line.

CS of the ESP unit supplies power to the submersible pumping unit, controls the operation of ESP, protects against abnormal conditions, transfers the information to the telemetry system and stores the history of the ESP operation. The terminal box separates the ground and underground parts of the cable line to protect the high-voltage transformer from the ingress of oil gas penetrating from the cavity of the cable line to the transformer. Wide application of ESPs is caused by many factors. Due to the lack of a long mechanical connection (rod) between the actuator and the centrifugal pump, ESPs have a much higher power than the sucker-rod pumps. This enables to maintain large drainage of formation fluid (up to 200 ... 400 m³ / day) and reach the descent depths of the unit up to 3600 m. On the surface of the well, there are no bulky jack pumps and massive foundations necessary for their

installation. The wellhead, equipped with an ESP, can be easily sealed that allows the collection and removal of associated gas. ESPs are also characterized by ease of maintenance, high efficiency for the installations of this kind (0.35 ... 0.4), by the possibility of automation and telecontrol, by a relatively large overhaul period, exceeding in most cases 200 days. Currently, ESPs produce more than 65% of oil in Russia and more than 90% of oil in Western Siberia and the Far North. According to the current forecast ESP will continue to play a predominant role in mechanized oil production.

In the block diagram of the electro-technological ESP system (Fig. 2), the source of electrical energy (ES) is a packaged transformer substation with an output voltage equal to 0.4 kV.

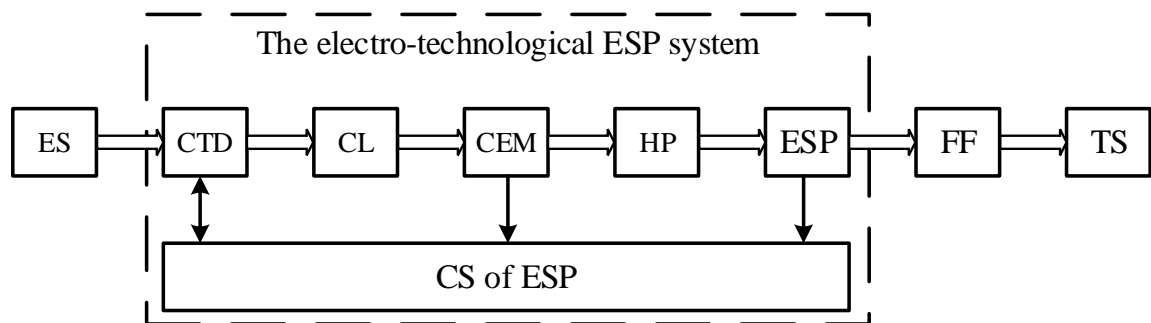


Figure 2. Block diagram of the electro-technological ESP system

The power converter is the power part of the ESP control station (CS), It is a complete transformer device (CTD) constituting a two-winded borehole transformer and a submersible cable line (CL). The electrotechnical device (ETD) for converting electrical energy into "technological" is a submersible induction motor (SEM) [4]. A transformer for converting "technological" energy with some certain parameters to "technological" energy with other parameters is hydro protection (HP) (for example, a protector) connected to the SEM and ESP shafts without changing the gear ratio. The working mechanism is an electric centrifugal pump; the technological object is formation fluid (FF). The device for transporting formation fluid to the surface is a tubing string (TS). The control and regulation device is the information part of the control station (CS of ESP) and the submersible telemetry unit (see TMS in Figure 1). Elements of the electrotechnical complex

(ETC) perform a key role in the process of energy transformation and the accomplishment of useful work in oil production.

1.2. Analysis of factors leading to the ESP failure

The share of traditional (technologically developed) oil reserves is only 35% in the Russian Federation oil-extracting industry because of unfavorable geological and technological structure. The remaining reserves fall to the share of hard-to-recover oil reserves (residual stocks, low-permeability layers, deep-seated horizons, high-viscosity oil, sub-gas zones) [4].

The priority direction in the development of hard-to-recover oil reserves is the development of resources of residual oil and low-permeability reservoirs. The involvement in the development of several billion tons of industrial oil reserves will become a consequence of increasing the efficiency of these resources development.

It is to be noted, that the main areas of oil production are moving deep into the northeast, in particular, to the Arctic shelf zone that is equated with the regions of the Far North and the area equated with them. Unfavorable geological-technical and natural-geographic conditions of the discovered deposits cause complications in the wells and labor intensity of various types of underground and wellbore work, which results in the increase in the oil production cost.

The ESP operating conditions are very diverse and variable in time and from well to well. This determines the nature of operation of any submersible installation, as a purely individual one. At the same time, intensive mixing of the gas-water-oil mixture in the well leads to the formation of emulsion, which causes additional complications in estimating pressure losses in the well.

The operation cycle of the production well is divided into intervals with a duration determined by the need for major overhaul of the deep equipment (periods of unattended operation). The averaged value of this time interval for a group of wells determines the value of the between-repair period (BRP) of the wells of a given oil field.

Factors that can lead to a decrease in the BRP of an installation are as follows:

- increasing the running depth of pumping equipment;
- temperature rise in the area of operation of the ESP electric drive (it increases with the hole depth deepening);
- content of mechanical impurities and mineral salts in the pumped liquid;
- increase of the stops of submersible equipment, due to power quality degradation in power supply grids;
- increased water cut of the produced liquid.

The increasing of oil viscosity compared to normal one at an optimum pressure at the pump intake causes a decrease in the actual pump pressure characteristic by 10-15% [4]. Increasing the fluid pressure in the annular space due to increased gas content reduces the gas separation in the tubing and increases it at the inlet of the pump that causes an increase in pressure at the pump outlet when the fluid density in the tubing pipes decreases.

All these circumstances make it difficult to score the relationship between the parameters of the submersible pump, borehole, tubing and fluid flow characteristics when selecting equipment and using it.

During operation of the submersible equipment the following modes of operation take place:

- development of the well after drilling and repair work or after work on hydraulic fracturing of the formation;
- start-up of the well after shutting down in power supply, protection action or for technological reasons;
- transition from one steady-state operating mode to another, by changing, for example, the speed of SEM rotation or the size of the installation;
- continuous steady-state operation mode, with practically constant or cyclically variable load characteristics;

- pre-emergency operation mode, characterized by an increase in the resistance torque on the ESP shaft due to the deposition of salts, removal of mechanical impurities, a decrease in the insulation life of the TMPN-cable-SEM line and stator insulation of SEM, a decrease in the strength characteristics of the ESP joints, an increase in vibration levels etc.

The use of the cluster field drilling method led to a number of complications in the descent and operation of ESP. It was found that in the intervals of the drift angle buildups, which are 2 degrees or more for 10 m of the trunk, the number of equipment failures increases, the installations fall to the bottom hall more often. The reason is the occurrence of bending and crushing forces acting on the power cable and the body of the ESP nodes. Moreover, the problem with the operation of inclined wells with the help of ESP is the curvature of the rotor, which leads to the increase in the vibrational effect. Increased vibro-displacement causes alternating stresses in the area of the ESP nodes connection to each other and to the tubing, stimulating their destruction at the junction site. In addition to the rotor curvature, the reasons for the vibrations may be a change in the geometric parameters of the impellers due to wear [5].

The fact that complications do not occur separately aggravates the situation. Most often operated wells have a number of complications that reduce the efficiency of ESP. One type of complication can lead to new problems in operation.

The starting modes of the submersible installation are characterized by a deep decrease in voltage of the motor due to the influence of a long cable, and in the well development mode by an increase in duration of the start-up process and variations in the torque of resistance on the shaft due to penetration of the well-control solution into oil fluid [6].

The nature of the steady-state installation is determined by the characteristics of the fluid flow and the state of the formation and equipment, and the condition of the pump is largely determined by the level of hydro abrasive wear of the working elements and fatigue stresses in the mechanical units.

The appearance of wedging, siltation, clogging and sticking of impellers is typical for the deposits of Western Siberia at the last, pre-emergency stage of the ESP operation, because of deposition of salts and removal of mechanical impurities.

Table 1 shows the percentage of failures of deep-pumping equipment at various fields in Western Siberia because of the jamming of CP [7].

Table 1. - Percentage of ESP failures because of the jamming of CP in oil and gas producing enterprises in Western Siberia

Enterprise	Years					
	2004	2005	2006	2007	2008	2009
JSC "RN-Yuganskneftegaz"	-	12%	-	-	29%	-
JSC "RN-Purneftegaz"	-	15,2%	-	-	39%	-
JSC "Lukoil-Zapadnaya Sibir"	9,8%	10,4%	14,6%	-	-	-
JSC "Samotlorneftegaz"	11%	15,6%	19,1%	20,3%	23,2%	22,9%
JSC "Surgutneftegaz"	-	3,53%	4,19%	5,14%	6,17%	-

Depending on the nature of the pump unit jamming, it can be divided into two types: soft and hard. Hard jamming is caused by deposits in the working parts of the pump. The elimination of this type of jamming is quite difficult, because the deposits are mostly dense, that means, that they have a strong grip with the surface of the working parts of the submersible pump. In particular, strength and density at the first stages of SP are greater than in subsequent stages. Advantageously, the attempt to wedge SP is the cause of the deformation of the shaft, the cut of the wedge keys or even the output of ESP.

The increase of the torque of resistance during the wedging additionally statically loads the walls of the tubing. The presence of gas inclusions leads to a disturbance in the stationarity of the injected liquid flow, and as a consequence, additional stresses of alternating character appear in the walls of the tubing in a wide range of vibrations. In a number of cases fatigue destruction of tubing and "flight" of submersible equipment at the wellhead occurs [8].



Figure 3. Fracture of the threaded part of the branch pipe of the pump attachment



Figure 4. The fall downhole of the ESP due to the breakage of the suspension branch pipe over the body



Figure 5. Cable break at a well

Soft jamming is caused by clogging, siltation, sticking or ejection of sand into the working parts of the pump. In such cases, the return of SP to its operating characteristic occurs after a single breakdown of the embedded working elements, and silt, fine rubbish and sand are washed out by the flow of the ascending liquid. Usually, the chance of successful wedging in this situation is much greater than with hard jamming.

Wedging refers to the emergency operation mode of ESP, since during its execution an increased mechanical wear of the pumping equipment occurs, in particular, a stalling of the impeller wedge keys and increased vibration of the pump under wedging jerks are possible, as well as an increased wear of the stator winding insulation of SEM and long cable at currents higher than nominal.

Factors hampering the process of SP wedging are as follows:

- ECP location (deep below the ground, far from the control station);
- requirement to take into account the resistance of a long cable line;
- operation in modes not satisfying the conditions of SEM heating during the wedging process (absence of cooling circulation of emulsions).

In the technological regulations of oil producing companies for the launch, commissioning and operation of wells equipped with ESP, there are methods for wedging SP. Consistent execution of technological regulations (or guidelines) points allows the operator to attempt to turn ESP, which largely depends on his experience, intuition and skills.

In control stations, equipped with a FC, the wedging of the SP is limited by manual specifying of the acceleration parameters of the SEM motor. Special modes of SP wedging are realized in modern CS with FC with the help of which the ESP units are turned. Among such modes, two launch modes are most common: "jogging" and "with swinging" [9-11].

For cases where ESP does not have a frequency converter (FC), the regulated actions of the staff are reduced to performing the following operations: changing the direction of the ESP rotation, increasing the supply voltage on the step-up transformer, flushing SP with hot water (oil), and also hydrochloric treatment.

For the installations equipped with FC, the process of SP wedging is also carried out no more than three times, with the execution of technological operations that are also provided for the installations without FC.

It is obvious that due to the downtime of oil producing wells, the enterprise incurs significant losses, as well as with the allocation of unnecessary repair resources.

To assess the economic damage and the effectiveness of the organization of the SSA (Service and Supply Activities) of oilfield systems, index J is used that takes into account the cost of repair services and the purchase of new equipment, as well as profit from oil production ranging from 7 tons per day for low-yield oil deposits, up to 200 tons per day, for high-yield oil deposits. [12]:

$$J = c_1 \cdot N_{pa\bar{o}} - c_2 \cdot L - c_3 \cdot M - c_4 \cdot L_{pa\bar{o}} - c_5 \cdot (N - N_{pa\bar{o}}) \rightarrow \max,$$

where $N_{pa\bar{o}}$ is an average number of working wells

N – number of wells;

L – number of repair and recovery lines;

M – number of spare immersion units;

$L_{pa\delta}$ – average number of occupied repair and recovery lines;

c_1 – oil cost;

c_2 – amount of investment costs for the repair line commissioning;

c_3 – new ESP cost;

c_4 – amount of operating costs for the ESP repair on the line;

c_5 – the size of the "penalty" for violation of the operating mode of the deposit.

This takes into account the negative effect of idle wells on the operating mode of the field, the operating and capital costs for repair services are identified separately.

Based on the above dependence, for oil producing companies, the most attractive and promising direction will be a reduction for costs when repairing ESP on the line.

The monitoring of the torque of resistance with other measures to eliminate the ESP failures would make it possible to diagnose the above unfavorable operating modes and the consequences to which they lead in the early stages. Therefore, it seems timely to develop methods and tools for monitoring the torque of load resistance on the shaft of a submersible induction motor in real time.

For technical and economic reasons, direct measurement using a torque sensor or restoring torque estimates from electrical measurements directly on the terminals of a submersible induction motor is not advisable. The most promising is the development of an observer of complete procedure, taking into account the properties of the submersible cable by measuring the currents and voltages at the output of the step-up transformer - at the input of the cable line. Setting up such an observer of the original structure is of scientific and practical interest.

1.3. Block diagram of an electromechanical system with speed-variable induction motor and an indirect method for measuring the state variables

At present, IMD has almost unlimited possibilities for automation of most production mechanisms. This is due to the development of semiconductor and microprocessor technology used in IMD control systems [13], as well as the simplicity of construction and the reliability of induction machines. At the same time, modern microcontrollers make it possible to ensure high performance indexes of a digital induction motor drive in statics and dynamics due to the organization of two-channel vector control of IM, when the longitudinal and transverse components of the stator current vector responsible for the formation of the magnetic flux and the torque of the machine are simultaneously controlled [14].

The vector control algorithm allows obtaining a high starting torque and maintaining it to the nominal speed of the induction motor. The algorithm provides a high quality of speed control, even with a sudden change in the torque of resistance on the shaft. It is also important that vector control allows to ensure energy saving in the best possible way, as the frequency converter (inverter) transmits to the motor exactly as much power as necessary to overcome the load at a given speed [15].

For a large group of industrial mechanisms of continuous operation, such as pumps, fans, injectors, blowers, compressors, etc., which do not require a wide range of speed control, not exceeding 1: 100 [16], high accuracy, and not demanding speed, and in cases where the work of the electric drive is carried out in an aggressive environment (nuclear and chemical industries), unusual climatic conditions (high or low temperature, high humidity), with shock and vibration mechanical effects, the use of sensors located outside the IMD control cabinet is impractical. To omit the sensors of the motor output coordinates, state observers are introduced into the IMD control system - special mathematical algorithms implemented as subroutines of the microcontroller. These algorithms make it possible to calculate the vector of motor state variables that are not available for direct measurement, using information only about the current and stator voltage. The process of indirect determination of

variables is usually referred to as estimation, and the output signals of the observer are called estimates. The state variables of IM are its currents, flux linkages, angular speed. The internal parameters include the active resistance and inductance of the windings, the moment of inertia, reduced to the motor shaft.

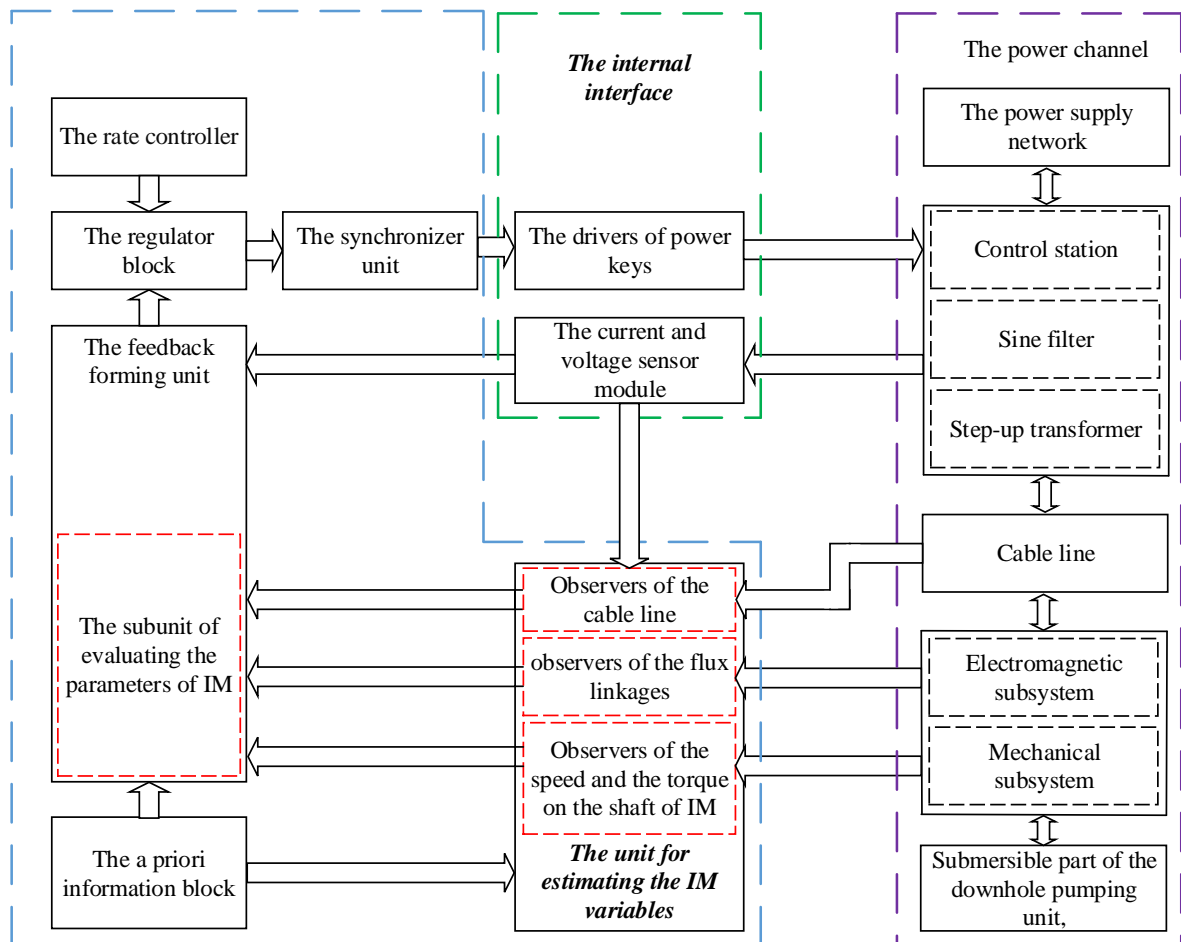


Figure 6. Electromechanical system with speed-variable induction motor and indirect method of measurement of state variables

The power channel of an electromechanical system with a speed-variable induction motor and an indirect method of measuring the state variables (Fig. 6) includes:

1. Switching elements for connection to the power supply grid.
2. The ground equipment of ESP, which includes such power elements as: a control station intended directly for controlling the drive of a submersible electric centrifugal pump, to provide protection of technological equipment and electric motor in emergency modes, to display and transmit current information of the state of an electric centrifugal pump by means of telecommunications, to control and

measure the parameters of automatic control; a sine filter that performs the maximum approximation of the shape of the output voltage of FC to the sine wave, thereby minimizing the value of the total harmonic component of the phase-to-phase voltage and the similar coefficient for the current; and a step-up transformer.

3. The cable line of installations, intended for supplying the electric motor of the submersible unit with the electric power.

4. The speed-variable electric motor, represented by two subsystems:

4.1. The electromagnetic subsystem includes the stator and rotor state variables, typically the stator current vector projections and the rotor vector flux vector projections.

4.2. The mechanical subsystem of the electric motor is an integral part of the single-mass or multi-mass mechanical subsystem of the electric drive, with the speed and the torque on the motor shaft being generally measured.

5. Submersible part of the downhole pumping unit, intended directly for oil production.

The internal interface of the electromechanical system (Fig. 6) represented by the following blocks.

1. The drivers of power switches are special microcircuits intended for switching power electronic switches, as a rule, powerful thyristors, MOSFET or IGBT transistors.

2. The current and voltage sensor module is built-in in the electromechanical system housing and is designed for measuring the instantaneous values of stator currents and voltages.

The unit for estimating the IM variables, which includes the observers of the cable line, flux linkages, speed and the torque on the shaft of IM.

The microcontroller control system (Fig. 6) includes the following main units:

1. The rate controller is designed to control the intensity of transient processes of the electromechanical system.

2. The controller block provides quality indicators and stability of the electromechanical system.

3. The synchronizer unit allows matching the output signals of the controller and the input signals of the power switch drivers, and, as a rule, in the case of field-oriented control, PWM modulation is used.

4. The feedback forming unit processes the instantaneous values of the signals coming from the sensors and, taking into account the information obtained, generates feedback channel signals. Adequate work of this block is guaranteed by the subunit of evaluating the parameters of IM, which makes it possible to evaluate the parameters of the T-shaped equivalent circuit of controlled IM and the parameters of the mechanical system of the electric drive during operation.

5. The prior information unit contains additional information about the elements of the electromechanical system, for example, the catalog data of IM.

The structure of a system with a full set of feedback sensors and the structure of a system with parameter estimation devices and observers have their advantages and disadvantage. These advantages and disadvantages depend on the type of systems with speed-variable induction motors.

1.4. Critical analysis of the problems of constructing an electromechanical system with an speed-variable induction motor and an indirect method for measuring the state variables

It is necessary to carry out the comparative analysis using an electric drive of ESP with a state observer and with a magneto-elastic torque sensor and a speed sensor [17] as an example. Advantages and disadvantages of these systems are given in the Table 2.

Table 2 - Comparative analysis of the application of the electric drive of the ESP with a state observer and with a magneto-elastic torque sensor and a speed sensor

System structure with magnetoelastic torque sensor and speed sensor		System structure with the torque and speed observer	
Advantages	Disadvantages	Advantages	Disadvantages
Allows to estimate the torque on the motor shaft in real time	Additional adjustment of the construction of submersible units ESP	Indirect measurement of torque and speed of the motor with a minimum number of sensors, which are located in the control station cabinet	Need for precise definition of the motor parameters
Does not require the definition of the motor parameters and does not depend on them	Nonlinearity of the torque sensor	Evaluation takes place in real time	The need for automatic adjustment of parameters of the observer
The system allows to estimate the speed accurately	Noise induction in the system, through the wires from the sensors to the control system	Simplification of the ED design, due to the absence of additional sensors	Dependence of the estimated variables on the change in the motor parameters
The effect of the cable line on the misalignment of the measured and real speed can be compensated with filters	The complexity of the design of sensors, integrated in the ESP submersible equipment and their vulnerability to vibration, scaling and corrosion		The need to take into account losses on the submersible cable

Based on the above data, we can single out the main problems associated with the construction of the sensorless vector electric drive, which are as follows:

1. The observer of IM state, constructed on the basis of the solution of the complete system of equations of electric equilibrium for a stator and a rotor, from available information on the stator voltages and currents, is able to provide an acceptable accuracy of calculation of flux linkage and speed only in a limited frequency range. This is due to the problem of introducing initial conditions at

frequency close to zero. Most methods for solving this problem are based on the introduction of a certain deviation of the mathematical description of the observer state relative to a real object when working in the low-frequency region. These deviations show up in the form of an error in calculations of flux linkage, speed, active and reactive current components;

2. The problem is the sensitivity of the electric drive to its parameters variations during operation. First of all, this refers to the temperature variations of the active resistances of the stator and the rotor, as well as to the change in mutual inductance as a function of the current of the magnetizing circuit. A possible way to solve this problem in the construction of a vector controlled of the state observer of IM is the use of controllers insensitive to parametric disturbances, in particular, relay regulators operating in sliding modes [18], or synergistic controllers synthesized by the method of analytical design of aggregated controllers (ADAR) [19]. Another way is parametric adaptation, carried out in real time during drive operation.

3. The third problem is obtaining required accuracy of estimating the equivalent (averaged over the calculation interval of processes in the observer of the state) values of currents and stator voltages. The accuracy of estimating equivalent voltages in the low-frequency range of the fundamental harmonic and high modulation frequencies is significantly affected by the "dead time" and the switching delays of the inverter's switches. It should be noted that the accuracy of measuring the voltage at low frequency is much less visualized in vector drives with a speed / position sensor. It happens because the quick speed loop closed over a really measurable signal is able to largely compensate errors due to dynamic "imperfections" of the inverter switches [16].

4. The fourth problem is the need to take into account the effects (losses, resonance of higher harmonics) associated with the use of a submersible cable, because of the inability to directly measure the voltage applied to the motor. This problem and methods for solving it are discussed in more detail in paragraph 1.5.

Приложение Б

Б.1. Определение параметров Т образной схемы замещения погружного электродвигателя ПЭДН – 40 – 117

Технические данные погружного электродвигателя ПЭДН – 40 – 117 необходимые для определения параметров Т образной схемы замещения, приведены в таблице Б.1.

Таблица Б.1. Справочные данные асинхронного электродвигателя типа ПЭДН – 40 – 117:

P_n , кВт	$U_{1\phi}$, В	n_0 , об/мин	n_n , об/мин	η_n , о.е	$k_n = \frac{M_n}{M_n}$
40	735	3000	2883	0,85	1

$\cos \varphi_n$	$k_i = \frac{I_n}{I_n}$, о.е	$k_{\max} = \frac{M_{\max}}{M_n}$, о.е	$k_{\min} = \frac{M_{\min}}{M_n}$, о.е	$J_{\text{дв}}$, кг·м ²
0,83	7	1.9	0.9	2,63

Наиболее простой и удобной для инженерных расчетов асинхронного двигателя является Т-образная схема замещения, представленная на Рис. Б.1.

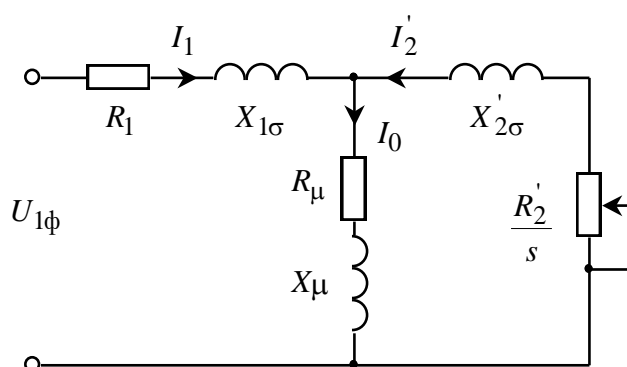


Рисунок Б.1. Схема замещения асинхронного двигателя

На рисунке схемы замещения имеются следующие параметры:

$U_{1\phi}$ – фазное напряжение, подводимое к обмотке статора двигателя;

I_1 – ток обмотки статора;

R_1 – активное сопротивление обмотки статора;

$X_{1\sigma}$ – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора;

I'_2 – приведенный ток обмотки ротора к обмотке статора;

R'_2 – приведенное активное сопротивление цепи обмотки ротора к цепи обмотке статора;

$X'_{2\sigma}$ – приведенное индуктивное сопротивление рассеяния цепи обмотки ротора к цепи обмотке статора;

I_0 – ток холостого хода (намагничивания);

I_m – индуктивное сопротивление контура намагничивания.

Основные уравнения асинхронного двигателя, соответствующие данной схеме:

$$\bar{U}_{1\phi} - \bar{E}_m - j \cdot X_1 \cdot \bar{I}_1 - R_1 \cdot \bar{I}_1 = 0$$

$$\bar{E}_m + j \cdot X'_2 \cdot \bar{I}'_2 + R'_2 \cdot \bar{I}'_2 / s = 0$$

$$\bar{I}_1 + \bar{I}'_2 - \bar{I}_0 = 0$$

Векторная диаграмма токов, ЭДС и напряжений изображена на рисунке Б.2.

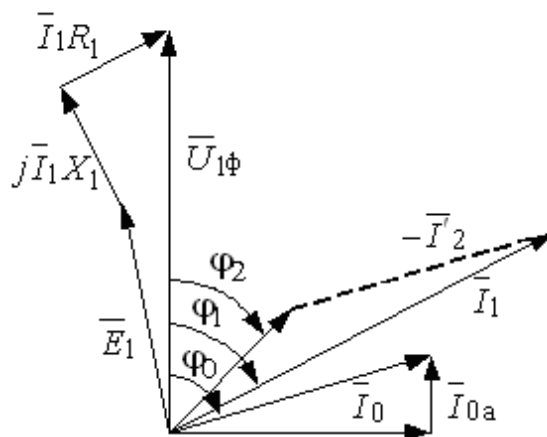


Рисунок Б.2. Векторная диаграмма асинхронной машины

Определим дополнительные параметры асинхронного двигателя по каталожным данным.

Синхронная угловая частота вращения двигателя, рад/с:

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot n_0}{60} = \frac{2\pi \cdot 3000}{60} = 314,159$$

Номинальная частота вращения двигателя, об/мин:

$$n_n = (1 - s_n) \cdot n_0 = (1 - 0,039) \cdot 3000 = 2883$$

Номинальная частота вращения двигателя, рад/с:

$$\omega_n = (1 - s_n) \cdot \omega_0 = (1 - 0,039) \cdot 314,159 = 301,907$$

Номинальный ток двигателя, А

$$I_{1H} = \frac{P_H}{3 \cdot U_{1\phi} \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta_H} = \frac{40000}{3 \cdot 735 \cdot 0,83 \cdot 0,85} = 25,713$$

Номинальный момент двигателя, Нм:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{40000}{301,907} = 132,491$$

$p_* = P/P_H = 0,75$ – коэффициент загрузки двигателя;

$\eta_z = \eta_n = 0,85$ – КПД при частичной загрузке;

Коэффициент мощности при частичной загрузке, принимаем

$$\cos \varphi_z = 0,83 + \Delta \cos \varphi_z = 0,759$$

Ток статора двигателя при частичной загрузке, А

$$I_{11} = \frac{p_* \cdot P_H}{3 \cdot U_{1\phi} \cdot \cos \varphi_{p_*} \cdot \eta_{p_*}} = \frac{0,75 \cdot 40000}{3 \cdot 735 \cdot 0,759 \cdot 0,85} = 20,134$$

Определяем предварительное значение тока холостого хода асинхронного двигателя по выражению

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - (p_* \cdot I_{1H} \cdot (1 - s_H) / (1 - p_* \cdot s_H))^2}{1 - (p_* \cdot (1 - s_H) / (1 - p_* \cdot s_H))^2}} = 9,54$$

β – коэффициент, характеризующий соотношение активных сопротивлений статор и ротора, значение которого находится в диапазоне 0,6-2,5.

Для двигателей с малым номинальным значением скольжения следует выбирать $\beta \geq 1$, а для двигателей с повышенным скольжением $\beta \leq 1$

Принимаем $\beta = 2,5$.

Далее определяем ряд промежуточных коэффициентов:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1H}} = 1,027;$$

$$A_1 = \frac{m \cdot U_{1\phi}^2 \cdot (1 - s_H)}{2 \cdot C_1 \cdot k_{\max} \cdot P_H} = \frac{3 \cdot 735^2 \cdot (1 - 0,039)}{2 \cdot 1,027 \cdot 1,9 \cdot 40000} = 9,997$$

Критическое скольжение:

$$s_K = s_H \cdot \frac{k_{\max} + \sqrt{k_{\max}^2 - (1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1))}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1)} = 0,171$$

Приведенное к обмотке статора активное сопротивление обмотки ротора в номинальном режиме, Ом:

$$R'_2 = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{s_K}\right) \cdot C_1} = 1,167$$

Активное сопротивление обмотки статора, Ом

$$R_1 = C_1 \cdot R'_2 \cdot \beta = 2,995$$

Коэффициент, характеризующий соотношение индуктивного сопротивления короткого замыкания и приведенного активного сопротивления ротора:

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{s_K^2} - \beta^2} = 5,269$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания в номинальном режиме, Ом:

$$X_{KH} = \gamma \cdot C_1 \cdot R'_2 = 6,312$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора в номинальном режиме, Ом:

$$X_{IH} = 0,42 \cdot X_{KH} = 2,651$$

Индуктивность обмотки статора, обусловленная потоком рассеяния в номинальном режиме, Гн:

$$L_{\sigma 1} = \frac{X_{KH}}{2\pi \cdot f_1} = 0,084$$

Приведенное к обмотке статора индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора в номинальном режиме, Ом:

$$X'_{2H} = \frac{0,58 \cdot X_{KH}}{C_1} = 3,566$$

Приведенная индуктивность обмотки ротора, обусловленная потоком рассеяния, в номинальном режиме, Гн:

$$L'_{\sigma 2} = \frac{X'_{2H}}{2\pi \cdot f_1} = 0,011$$

ЭДС цепи намагничивания, наведенная потоком воздушного зазора (главным полем), в номинальном режиме, В:

$$E_m = \sqrt{(U_{1\phi} \cdot \cos \varphi_H - R_1 \cdot I_{1H})^2 + (U_{1\phi} \cdot \sin \varphi_H - X_{1H} \cdot I_{1H})^2} = 633,203$$

Индуктивное сопротивление контура намагничивания, Ом:

$$X_{\mu H} = \frac{E_m}{I_0} = 66,325$$

Результирующая индуктивность, обусловленная магнитным потоком в воздушном зазоре, Гн:

$$L_\mu = \frac{X_{\mu H}}{2 \cdot \pi \cdot f_1} = 0,211$$

Полученные расчётные параметры Т-образной схемы замещения электродвигателя сведены в таблице Б.2.

Таблица Б.2. Параметры схемы замещения электродвигателя ПЭДН – 40 -117

$R_1, \text{Ом}$	$X_{1\sigma}, \text{Ом}$	$L'_{\sigma 2}, \text{Гн}$	$X_{\mu H}, \text{Ом}$
2,995	2,651	0,084	66,325

$L_\mu, \text{Гн}$	$R'_2, \text{Ом}$	$X'_{2\sigma}, \text{Ом}$	$L'_{\sigma 2}, \text{Гн}$	$X_{KH}, \text{Ом}$
0,211	1,167	3,566	0,011	6,312

Б.2. Проверка адекватности расчетных параметров двигателя

При найденных параметрах рассчитываются значения номинального электромагнитного момента двигателя:

$$M_{\text{эм1}} = \frac{3 \cdot U_{1\phi}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot s_H \cdot \left[X_{KH}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s_H} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'}{s_H \cdot X_{\mu H}} \right)^2 \right]}$$

$$M_{\text{эм1}} = M_{\text{эм}}$$

$$\Psi_{2H} = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot L_\mu = 2,85$$

$$M_{\text{эм2}} = \frac{3 \cdot \sqrt{2} \cdot z_p \cdot L_\mu \cdot \Psi_{2H} \cdot \sqrt{I_{1H}^2 - I_0^2}}{2}$$

Проверяемые условия

$$M_{\text{двн}} < M_{\text{эм1}} \leq 1,1 \cdot M_{\text{двн}}$$

$$M_{\text{эм1}} \approx M_{\text{эм2}}$$

$$M_{\text{двн}} = 132,492; M_{\text{эм1}} = 137,171; 1,1 \cdot M_{\text{двн}} = 145,174; M_{\text{эм2}} = 136,998;$$

$$\Delta M = (M_{\text{эм1}} - M_{\text{эм2}}) = 0,174$$

По результатам расчета эти условия выполняются, что говорит об адекватности расчетных параметров двигателя.

Б.3. Расчет естественных характеристик электродвигателя

Расчет естественных характеристик проводится с целью оценки степени совпадения параметров основных характерных точек расчетных естественных характеристик электродвигателя с параметрами двигателя определенными по справочным техническим данным выбранного электродвигателя.

Б.3.1. Расчет естественной механической характеристики

Естественная механическая характеристика $\omega(M)$ асинхронного электродвигателя рассчитывается для частоты $f_{\text{н}} = f_{1\text{н}} = 50$ Гц по выражению

$$M(s) = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[(X_{\text{кн}})^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]}$$

Задаемся скольжением в пределах $s = 0,01, 0,02, \dots, 0,5$ и рассчитываем по программе *Mathcad* естественную механическую характеристику $\omega(M)$ (рис. Б.3.),

$$\text{где } \omega = \omega_0 \cdot (1 - s)$$

Также рассчитываем номинальное значение электромагнитного момента двигателя $M_{\text{эм.н}}$:

$$M_{\text{эм.н}}(s_H) = \frac{3 \cdot U_{1\phi\text{н}}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s_H \cdot \left[(X_{\text{кн}})^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s_H} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s_H \cdot X_\mu} \right)^2 \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 735^2 \cdot 1,167}{314,16 \cdot 0,039 \cdot \left[6,312^2 + \left(2,995 + \frac{1,167}{0,039} \right)^2 + \left(\frac{2,995 \cdot 1,167}{0,039 \cdot 66,325} \right)^2 \right]} = 137,171 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

Критического скольжение:

$$s_K = R_2' \cdot \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{R_1}{X_\mu} \right)^2}{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2}} = 1,167 \cdot \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{2,995}{66,325} \right)^2}{2,995^2 + 6,312^2}} = 0,167$$

Критический момент:

$$M_{\text{эм.н}}(s_k) = M_{\text{эм.к}} = \frac{3 \cdot U_{1\phi\text{н}}^2}{\omega_0 \cdot 2 \cdot \left[R_1 + \sqrt{(R_1^2 + X_{\text{кн}}^2) \cdot \left(1 + \frac{R_1}{X_\mu} \right)^2} \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 735^2}{314,16 \cdot 2 \cdot \left[2,995 + \sqrt{(2,995^2 + 6,312^2) \cdot \left(1 + \frac{2,995}{66,325} \right)^2} \right]} = 250,498 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

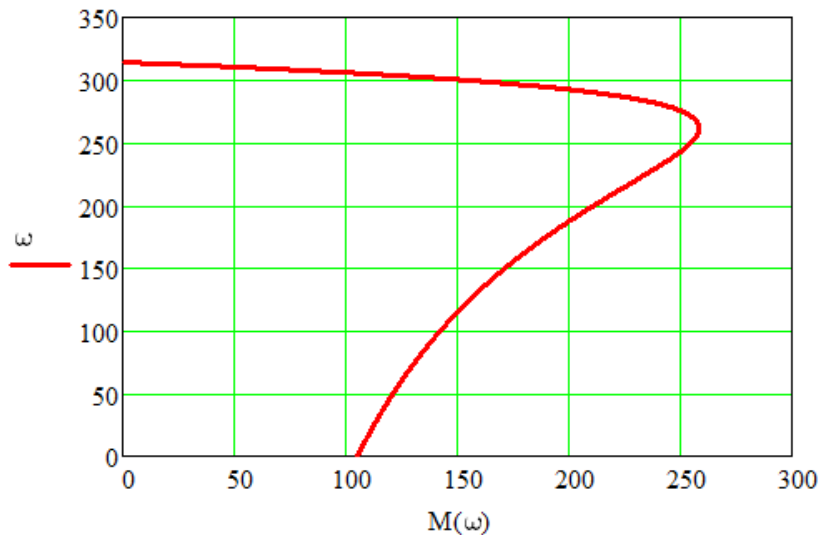


Рисунок Б.3. Естественная механическая характеристика асинхронного электродвигателя

Б.3.2. Расчет естественной электромеханической характеристики

Естественная электромеханическая характеристика $I_1(\omega)$ электродвигателя рассчитывается для значения частоты $f_{и} = f_{1н} = 50$ Гц по выражению

$$I_1(\omega) = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2(\omega) + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(\omega)}$$

Значение приведенного тока ротора от скольжения:

$$I_2'(s) = \frac{U_{1фн}}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{\omega_0 - \omega}\right)^2 + (X_{1н} + X_{2н}')^2}};$$

По результатам расчета строим естественные электромеханические характеристики тока статора $I_1 = f(\omega)$ приведенные на рисунке 2.8.

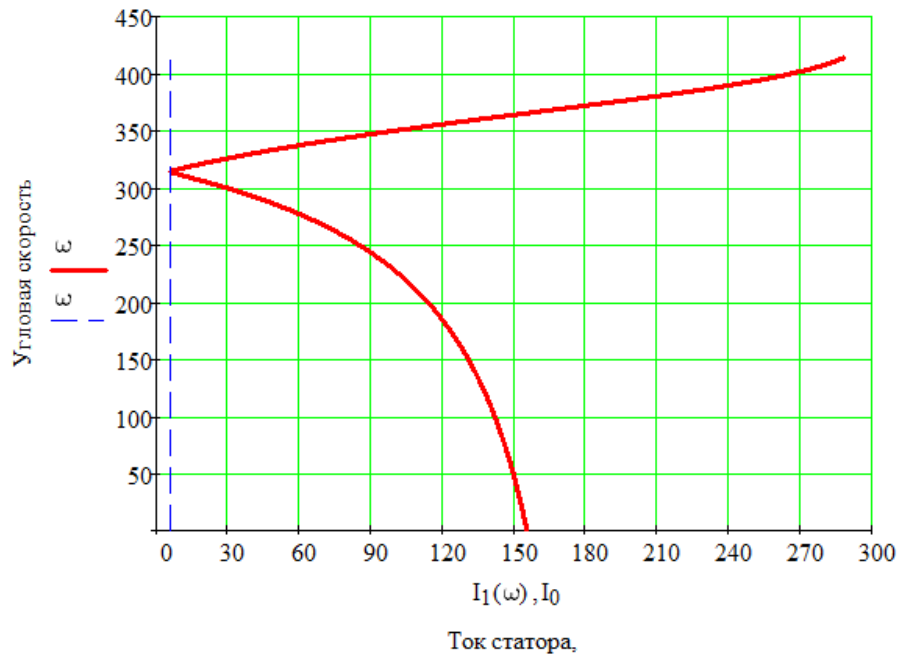


Рисунок Б.4. Естественные электромеханические характеристики асинхронного электродвигателя

Б.3.3. Механическая характеристика насоса

Поскольку механическая характеристика двигателя рассчитаны для электромагнитного момента, то полная нагрузка на валу электродвигателя должна учитывать собственный момент трения двигателя. Момент от сил трения на валу электродвигателя можно принять постоянным и равным

$$\Delta M_{с\text{ дв}} = M_{эм\text{ н}} - M_{дв\text{ н}} = 137,171 - 134 = 3,171 \text{ Нм}$$

Для механизма с вентиляторным типом нагрузки, что характерно для насоса, статический момент сопротивления на валу двигателя $M_c(\omega)$ изменяется в зависимости от скорости вращения двигателя в соответствии с выражением:

$$M_c(\omega) = \Delta M_{с.дв} + (M_{с.макс} - \Delta M_{с.дв}) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{дв.н}} \right)^2 =$$

$$= 3,171 + (137,171 - 3,171) \cdot \left(\frac{\omega}{301,907} \right)^2,$$

где $M_{с.макс} = M_{эм.н} = 137,171 \text{ Нм}$ - момент нагрузки при скорости вращения $\omega_{дв.н} = 301,907 \text{ рад/с}$, равный номинальному электромагнитному моменту двигателя.

Механические характеристик полного момента сопротивления на валу двигателя, соответствующих механическим характеристикам насоса, приведены на рис. Б.5.

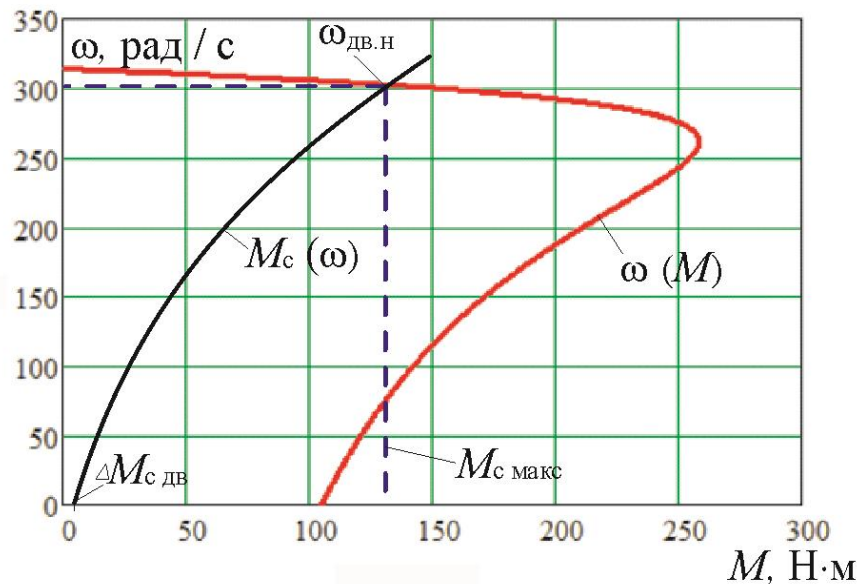


Рисунок Б.5. Естественная механическая характеристика двигателя $\omega(M)$ и характеристики полного момента сопротивления на валу двигателя $M_c(\omega)$

Из анализа приведённых на рис. 2.9 характеристик следует, что электродвигатель ПЭДН – 40 - 117 обеспечивает требуемое значение максимальной скорости насоса $\omega_{дв.н} = 301,907 \text{ рад/с}$, длительную работу при максимальном моменте нагрузки и более чем двукратную перегрузку по моменту.

Приложение В

В пакете Simulink системы Matlab разработана имитационная модель силового канала системы преобразователь - асинхронный электродвигатель в неподвижной системе координат.

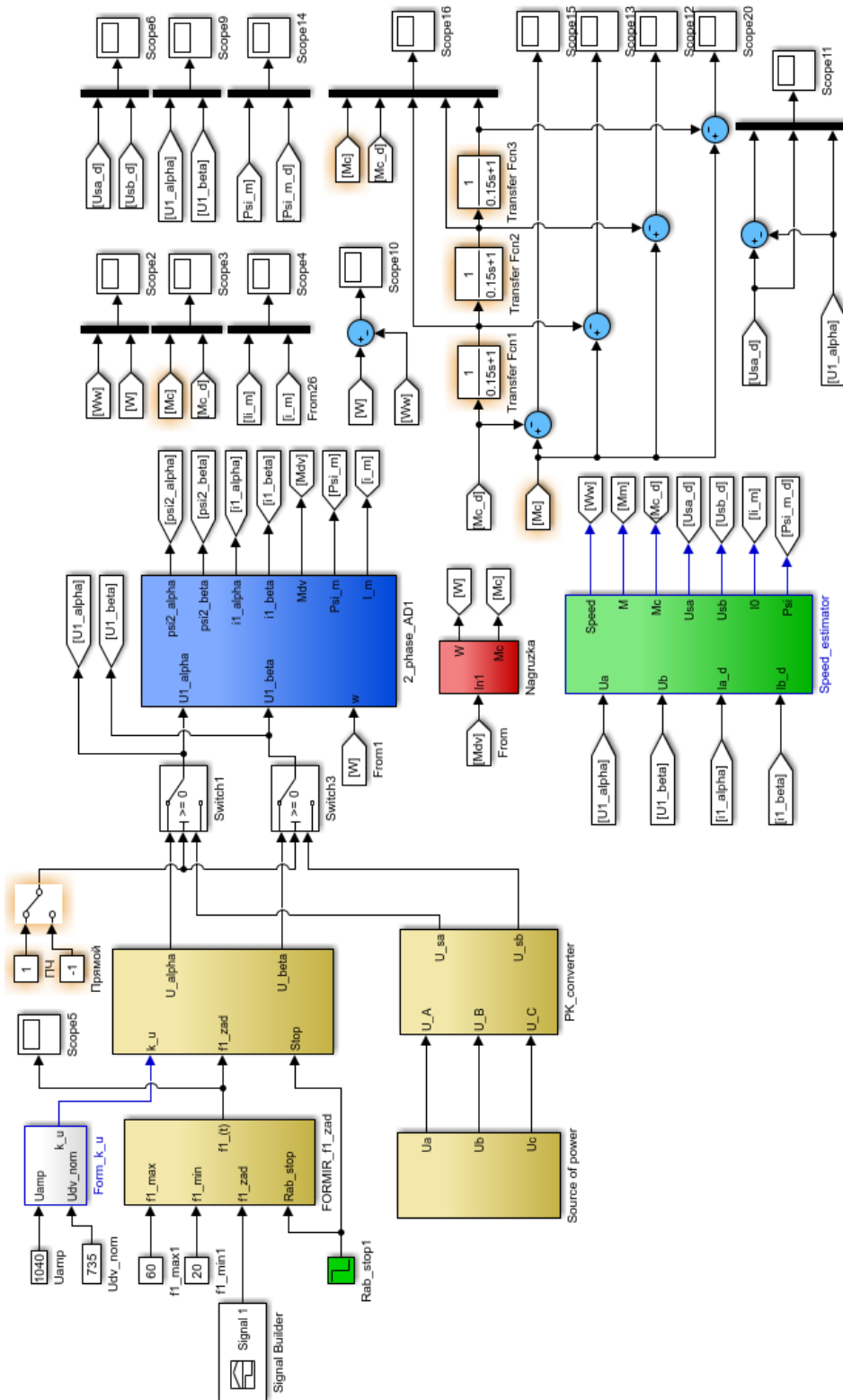


Рисунок В1. Имитационная модель системы ПЧ-АД

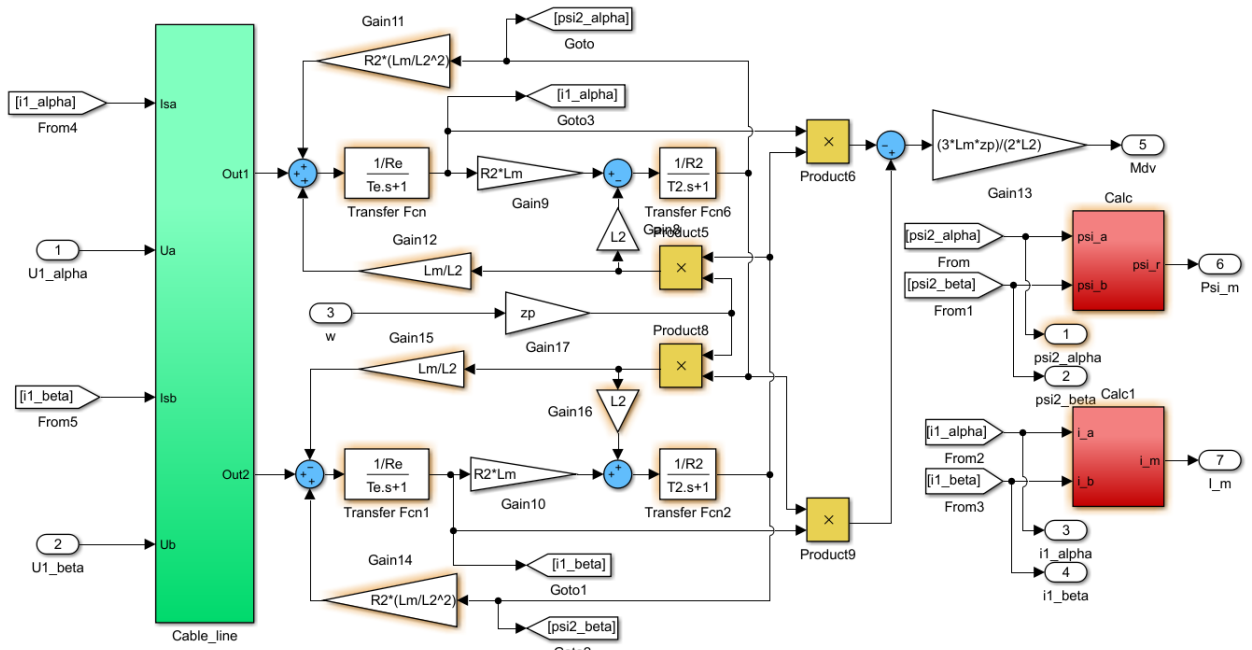


Рисунок В2. Имитационная модель АД (подсистема «2_phase_AD»)

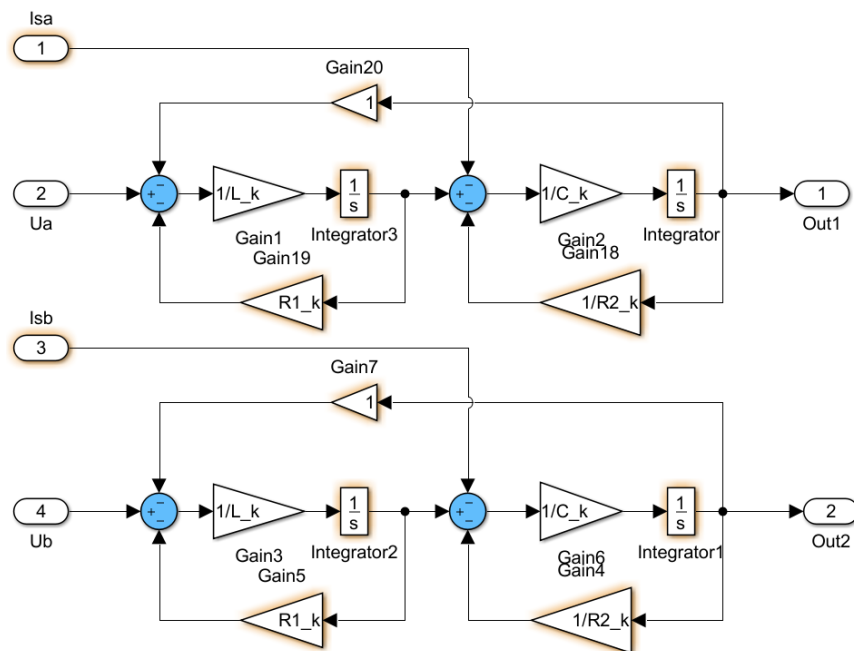


Рисунок В3. Имитационная модель кабельной линии (подсистема «Cable line»)

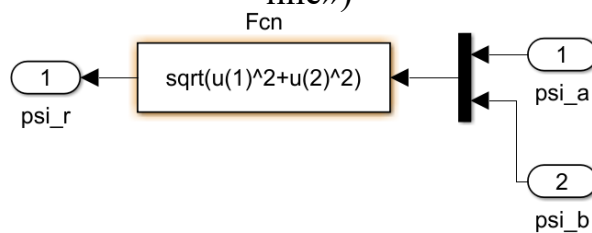


Рисунок В4. Имитационная модель вычислителя модуля потокосцепления (подсистема «Calc»)

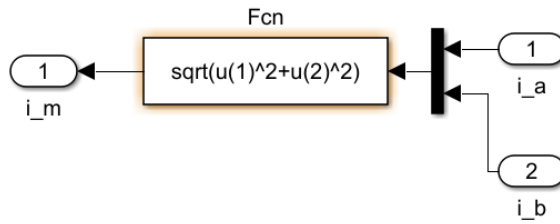


Рисунок В5. Имитационная модель вычислителя модуля тока статора (подсистема «Calc 1»)

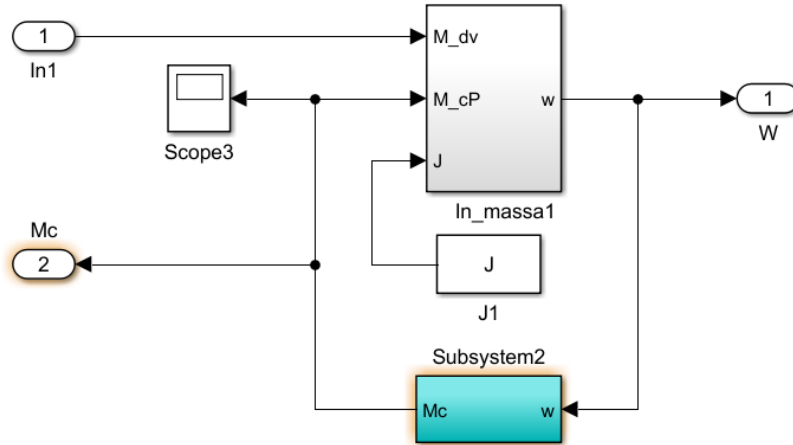


Рисунок В6. Имитационная модель нагрузки (подсистема «Nagruzka»)

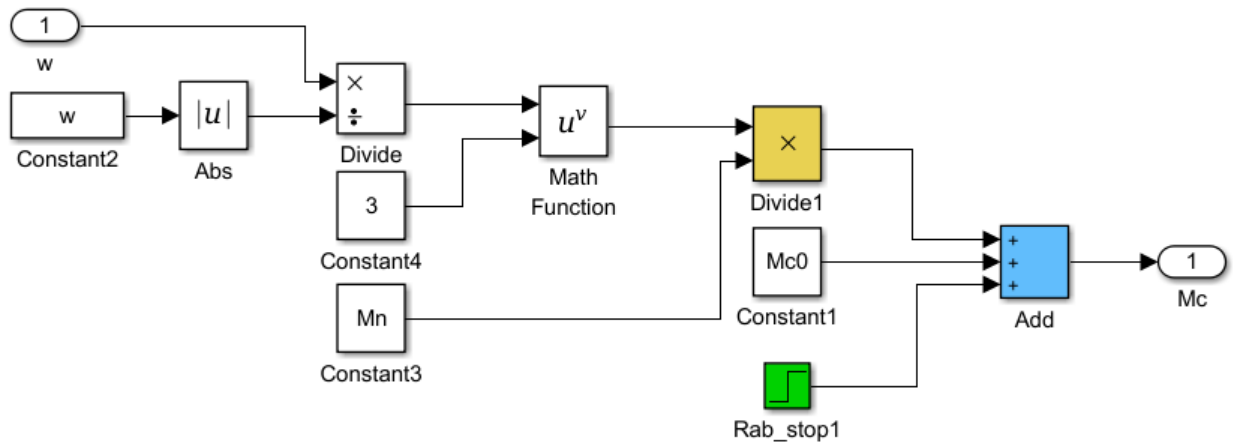


Рисунок В7. Имитационная модель насосной нагрузки (подсистема «Subsystem2»)

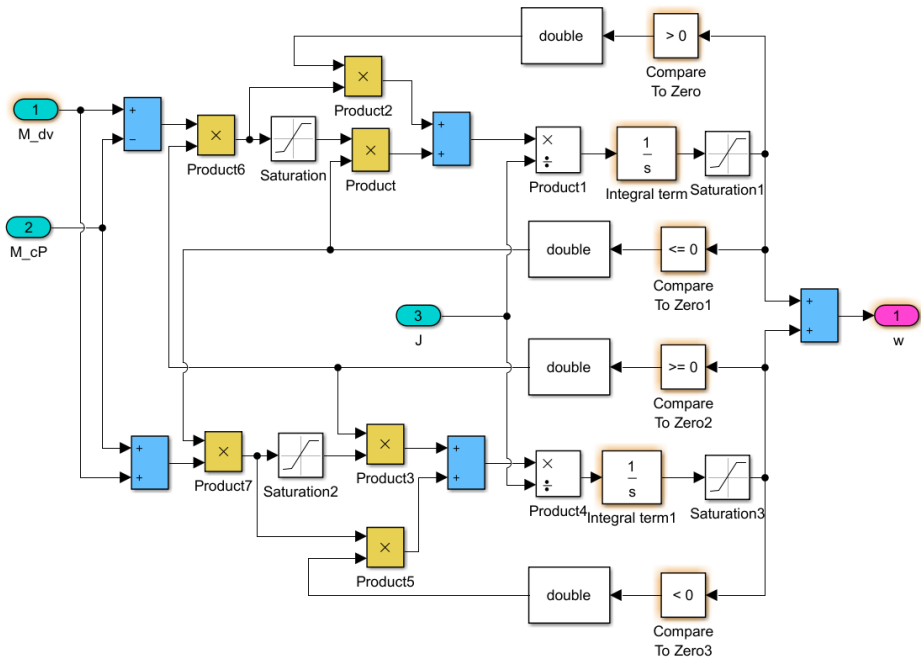


Рисунок В8. Имитационная модель реактивной нагрузки (подсистема «In massa1»)

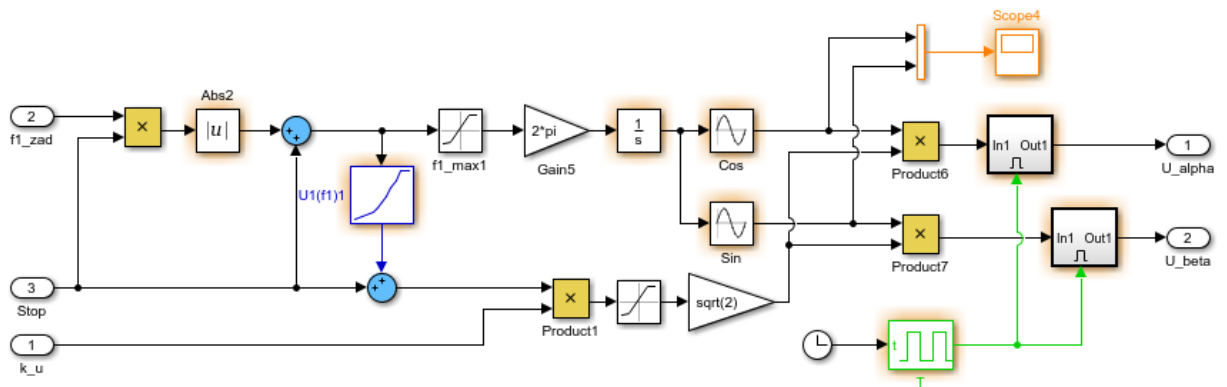


Рисунок В9. Имитационная модель формирователя фазных напряжений

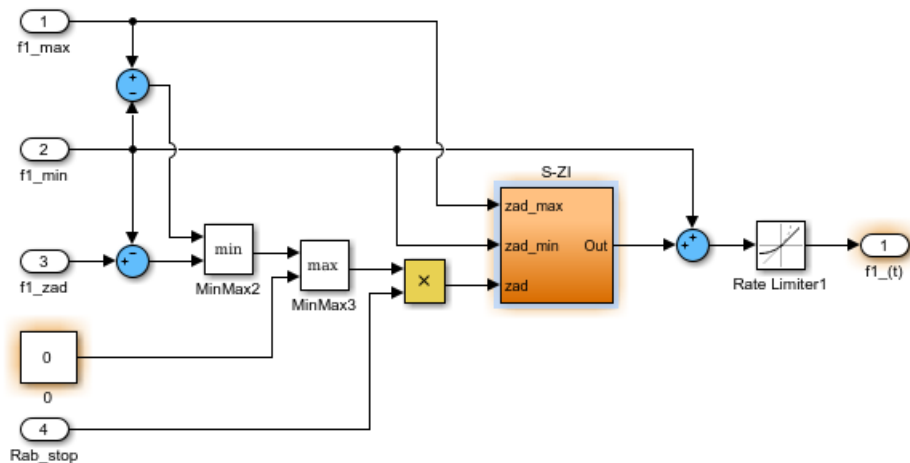


Рисунок В10. Имитационная модель формирователя частоты фазных напряжений (подсистема «FORMIR_f1_zad»)

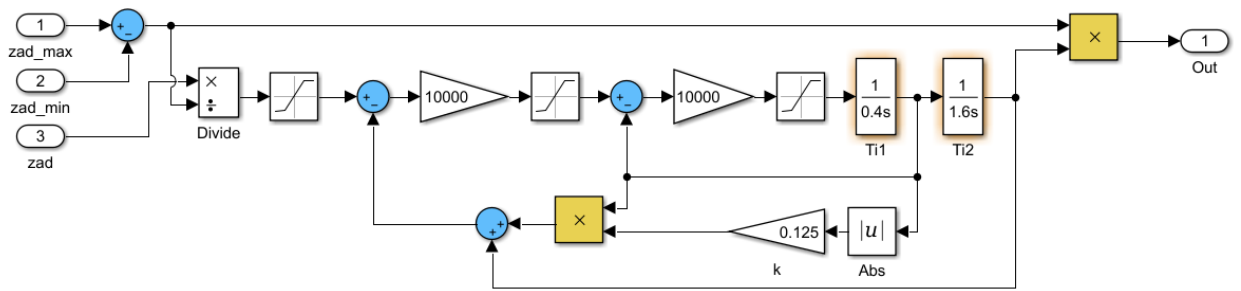


Рисунок В11. Имитационная модель задатчика интенсивности (подсистема «S –ZI»)

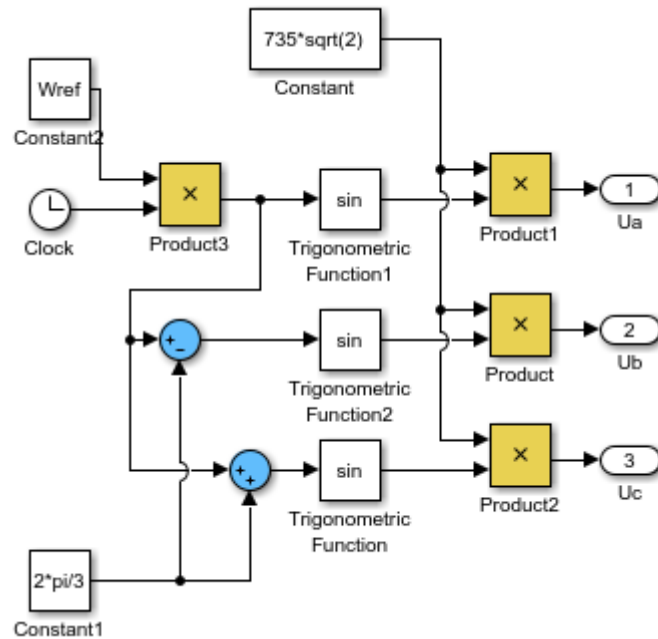


Рисунок В12. Имитационная модель трехфазного источника напряжений (подсистема «Source of Power»)

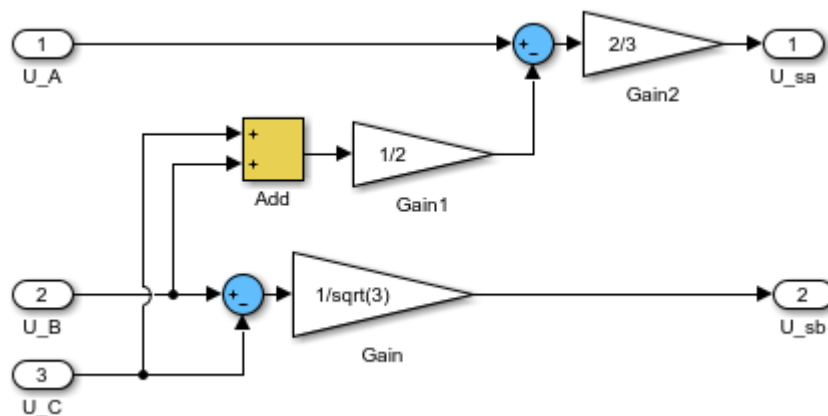


Рисунок В13. Имитационная модель преобразования Парка (подсистема «PK converter»)

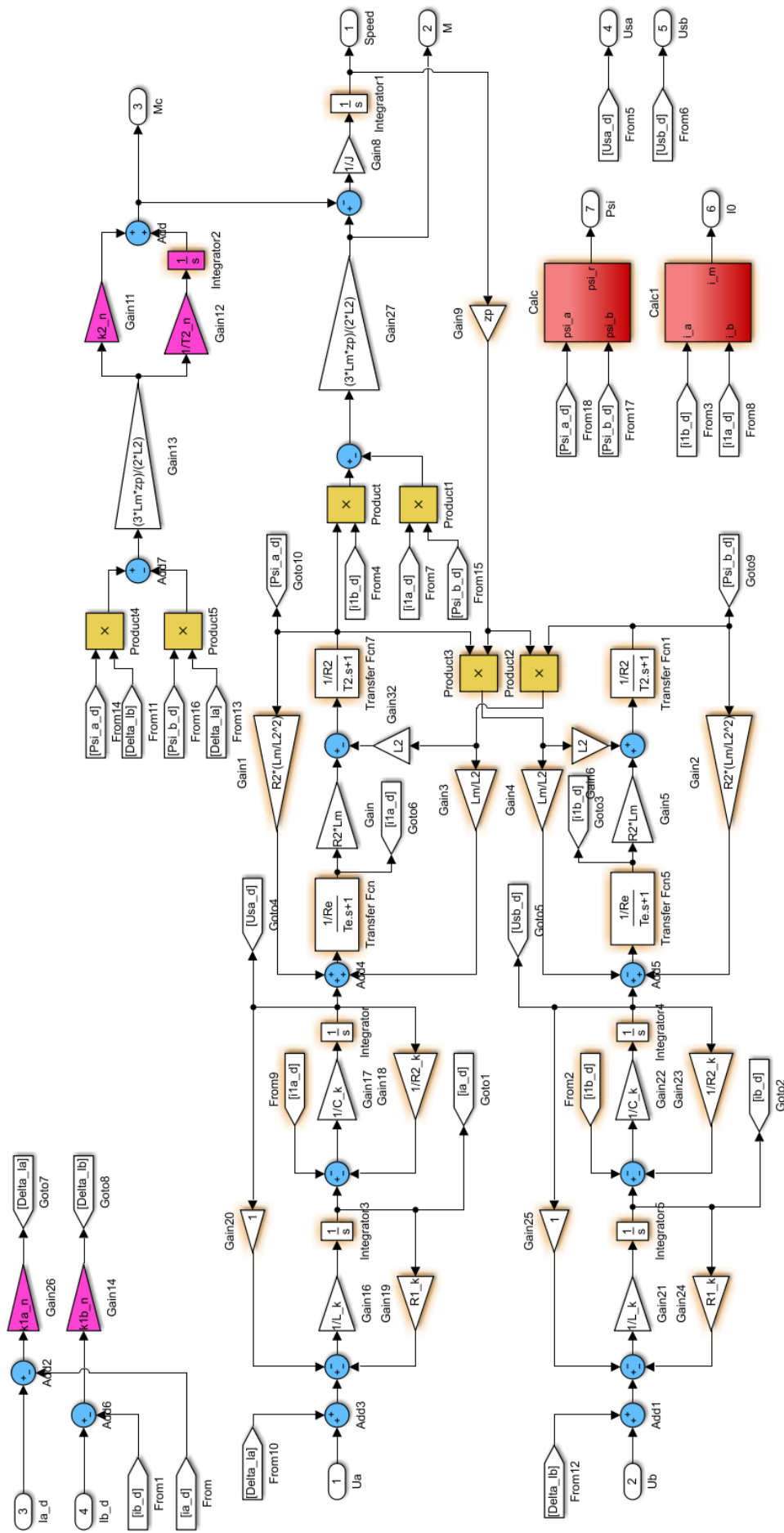


Рисунок В14. Имитационная модель наблюдателя (подсистема «Speed Estimator»)

M-file сценарий разработанной модели MatLab Simulink

```
f = 50;           % частота питающей линии
Wref = 2*pi*f;
%Расчет параметров кабельной линии

Ln = 2000;       % длина линии
R1_k = (1.1/1000)*2000; % активное сопротивление
L_k = (6.162*10^(-7))*2000; % индуктивность кабельной линии
C_k = (5.971*10^(-10))*2000; % емкость кабельной линии
R2_k = 6*100^6; % сопротивление утечки

%Параметры двигателя
n=2883;
P=40*1000;
J = 2.63;
R1 = 2.995;      % активное сопротивление статора
R2 = 1.167;      % активное сопротивление ротора
Lm = 0.211;     % индуктивность цепи намагничивания
L1_ = 8.493/1000;
L1 = L1_ + Lm;  % индуктивность статора
L2_ = 0.011;
L2 = L2_ + Lm;  % индуктивность ротора
zp = 1;         % число пар полюсов
Re = R1+R2*((Lm*Lm)/(L2*L2));
c = 1- (Lm*Lm)/(L1*L2);
Te = c*L1/Re;
T2 = L2/R2;
%Параметры нагрузки

w=(n*pi)/30;
Mn=P/w;
Mc0 = 0.5;

%Параметры наблюдателя
k2_n = 5;
T2_n = 5*T2;

k1a_n = 1*R1;
k1b_n = 1*R1;
```