Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

На правах рукописи

ЮДИН Ростислав Юрьевич

КОСВЕННАЯ ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ УСТАНОВКОЙ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

Специальность 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель – д-р техн. наук, доцент Петроченков А. Б.

Пермь 2025

ВВЕДЕНИЕ 5

1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ УСТАНОВКОЙ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ КОСВЕННОЙ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ УСТАНОВКОЙ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА 12

1.1 Анализ существующих систем управления установкой электроцентробежного насоса 12

1.2 Обзор современных систем телеметрии установок электроцентробежного насоса 17

1.3 Методы косвенной оценки переменных состояния технологического процесса добычи нефти с использованием установок электроцентробежного насоса 20

1.4 Определение структуры системы косвенной оценки электротехнических и технологических параметров для управления установкой электроцентробежного насоса 28

Выводы по главе 1 30

2 КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА КАК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ 32

2.1 Исходные положения 32

2.2 Математические и имитационные модели электротехнического комплекса установки электроцентробежного насоса 33

2.2.1 Модель станции управления с частотным преобразователем 33

2.2.2 Модель трехфазного масляного трансформатора для погружных насосов 41

2.2.3 Модель погружной кабельной линии 43

2.2.4 Математические и имитационные модели погружного электродвигателя 46

2.2.4.1 Математическая модель погружного электродвигателя 46

2.2.4.2 Имитационная модель системы управления погружным электродвигателем 49

2.2.5 Объединенная схема замещения электротехнического комплекса установки электроцентробежного насоса 58

2.3 Математические и имитационные модели гидродинамической системы установки электроцентробежного насоса 60

2.3.1 Модель электроцентробежного насоса 60

2.3.2 Модель притока нефтяной жидкости к забою скважины 62

Выводы по главе 2 63

3 МЕТОД КОСВЕННОЙ ОЦЕНКИ И АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИМИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА 65

3.1 Синтез сигма-точечного фильтра Калмана 65

3.1.1 Синтез сигма-точечного фильтра Калмана применительно к погружному электродвигателю 66

3.1.2 Математический аппарат сигма-точечного преобразования 70

3.2 Система виртуального дебита 76

3.3 Алгоритм управления установкой электроцентробежного насоса с косвенной оценкой электротехнических и технологических параметров 81

Выводы по главе 3 85

4 РАЗРАБОТКА ИММИТАЦИОННЫХ И ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ КОСВЕННОЙ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ УСТАНОВКОЙ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА 86

4.1 Апробация метода и алгоритма косвенной оценки на имитационных моделях 86

4.1.1 Апробация цифровой комплексной модели установки электроцентробежного насоса 86

4.1.2 Апробация системы виртуального дебита 95

4.1.3 Апробация метода косвенной оценки электротехнических и технологических параметров для управления установкой электроцентробежного насоса 102

4.2 Апробация метода и алгоритма косвенной оценки на полунатурной модели 109

4.3 Технико-экономическое обоснование внедрения системы косвенной оценки электротехнических и технологических параметров для управления установкой электроцентробежного насоса 115

Выводы по главе 4 120

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 122

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ 123

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 124

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Объекты интеллектуальной собственности 138

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Акты внедрения результатов диссертационного исследования 141

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Нефтедобывающая отрасль является одной из основных отраслей экономики Российской Федерации. На сегодняшний день на большинстве месторождений, находящихся на территории нашей страны, использование фонтанных и газлифтных способов добычи нефти не всегда является экономически выгодным. В связи с этим, наиболее предпочтительным способом добычи нефти является использование установок механизированной добычи. Установки электроцентробежного насоса (УЭЦН) являются наиболее распространенными, так как этот тип насосных установок обладает рядом преимуществ по сравнению со штанговыми скважинными насосными установками при добыче больших объемов нефти на значительных глубинах. Кроме этого, УЭЦН показывают хорошие эксплуатационные характеристики при работе на месторождениях, содержащих большое количество попутного газа и различных органических примесей.

Современные системы нефтедобывающих скважин, эксплуатирующих УЭЦН, требуют высокоточного контроля как электротехнических, так и технологических параметров для обеспечения оптимальной производительности. При этом прямое измерение ключевых показателей зачастую затруднено из-за сложных условий эксплуатации – высокие давления, температуры, наличие механических примесей и газа. Поэтому системы автоматического управления УЭЦН эксплуатируются, как правило, с дорогостоящей измерительной техникой. В настоящее время, в качестве измерительной техники, применяются системы погружной телеметрии для определения технологических параметров УЭЦН. Практически все ремонтные работы, сопровождающиеся заменой подземных модулей системы погружной телеметрии, требуют подъема подземного оборудования на поверхность. Зачастую такие работы сопровождаются обрывом кабеля и, соответственно, его заменой, что является затратным. Замеры дебита, как основного показателя производительности скважины, производятся с помощью

автоматических групповых замерных установок, которые обладают высокой инерционностью и не всегда позволяют своевременно определить аварийное состояние скважины.

Очевидно, что высокая стоимость приобретения и обслуживания измерительного оборудования нефтедобывающих скважин влияет на себестоимость нефти. В «Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года» отмечается, что фактором риска в нефтяной отрасли является «увеличение себестоимости добычи вследствие преобладания трудноизвлекаемых запасов в составе запасов, вводимых в разработку, и высокой выработанности "зрелых" месторождений, что усложняет удержание достигнутых уровней добычи нефти и обусловливает необходимость применения дорогостоящих технологий добычи».

В связи с описанным выше, перспективным является использование методов и алгоритмов косвенной оценки и управления электротехническими и технологическими параметрами нефтедобывающих установок по их цифровым моделям. Таким образом, рассматриваемый подход будет способствовать снижению себестоимости нефти, за счет уменьшения эксплуатируемого измерительного оборудования, и, соответственно, повышению конкурентоспособности нефтедобывающих компаний на рынке энергоресурсов. Косвенная оценка электротехнических и технологических параметров представляет актуальную научную задачу для развития теории управления электротехническими комплексами и системами.

Целью работы является разработка метода и алгоритма косвенной оценки электротехнических и технологических параметров для управления УЭЦН.

Для достижения сформулированной цели были поставлены и решены следующие **научные задачи:**

1) на основе анализа методов управления УЭЦН предложить концептуальную структуру системы косвенной оценки электротехнических и технологических параметров и управления УЭЦН;

2) разработать комплексную модель УЭЦН как технологического объекта управления с использованием цифровых моделей трансформатора, кабельной линии, погружного электродвигателя (ПЭД), электроцентробежного насоса (ЭЦН), притока жидкости к забою скважины;

3) разработать метод и алгоритм косвенной оценки и управления электротехническими и технологическими параметрами УЭЦН;

4) провести комплекс экспериментальных исследований системы управления УЭЦН с косвенной оценкой переменных технологического процесса и верифицировать результаты работы системы косвенной оценки на лабораторной полунатурной установке.

Объектом исследования является технологический процесс добычи нефти с использованием УЭЦН.

Предметом исследования является система управления УЭЦН на основе косвенной оценки электротехнических и технологических параметров.

Идея работы заключается в управлении технологическим процессом добычи нефти с использованием УЭЦН за счет применения косвенной оценки электротехнических и технологических параметров на основе сигма-точечного фильтра Калмана.

Степень разработанности темы исследования.

Моделированию электротехнической и гидродинамической подсистем нефтедобывающих установок посвящены работы таких ученых, как Ш. К. Гиматудинов, В. Н. Ивановский, А. В. Ляхомский, И. Т. Мищенко, Ю. А. Сычев, М. И. Хакимьянов, *H. Mukherjee*, *A. B. Neely*, *G. Takacs*, и др.

Вопросами косвенной оценки электротехнических и технологических параметров комплексных нелинейных электромеханических объектов посвящены работы таких ученых, как А. С. Анучин, И. Я. Браславский, А. М. Зюзев, В. П. Казанцев, Ю. В. Шевырев, Р. Т. Шрейнер, *B. J. T. Binder*, *L. Ding*, *J. Kullick* и др.

Основные научные положения и результаты, выносимые на защиту, их новизна:

1) концептуальная структура системы управления УЭЦН с косвенной оценкой электротехнических и технологических параметров, *отличающаяся от существующих* возможностью автоматического формирования задания скорости ПЭД, что позволяет обеспечить работу ЭЦН в желаемой точке рабочей области;

2) метод косвенной оценки электротехнических и технологических параметров электротехнического комплекса (ЭТК) УЭЦН, *отличающийся от существующих* использованием сигма-точечного фильтра Калмана для достижения оптимальных показателей качества регулирования при управлении погружным электродвигателем;

3) система виртуального дебита скважины, *отличающаяся от существующих* использованием регрессионных моделей машинного обучения, основанных на методе *random forest*;

4) цифровая и физическая модели системы управления УЭЦН, *отличающиеся от существующих* использованием разработанных блоков машинного обучения и блока косвенной оценки электротехнических и технологических параметров ПЭД, кабельной линии и скважины.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в разработке математической и цифровой комплексной модели УЭЦН; в разработке метода косвенной оценки электротехнических и технологических параметров УЭЦН, учитывающей специфику используемого на нефтяном месторождении ЭТК; в разработке системы виртуального дебита, использующей регрессионные модели машинного обучения, позволяющей оценить фактический дебит.

Разработанный метод косвенной оценки электротехнических и технологических параметров УЭЦН и система виртуального дебита использовались при разработке интеллектуальных станций управления в НИОКТР по соглашению № 075-11-2021-052 от 24.06.2021 г. «Создание

высокотехнологичного производства автономных энергосберегающих цифровых систем распределенного управления добывающим фондом скважин на основе элементов машинного обучения и искусственного интеллекта» в рамках Постановления № 218 Правительства РФ от 09.04.2010 г. (2021-2024). Также результаты исследования использовались при выполнении НИР по грантам «УМНИК-19» (ЦЭ) № 357ГУЦЭС8-D3/56277 от 27.12.2019 г. и «Студенческий Стартап» (очередь III) № 1196ГССС15-L/88494 от 23.08.2023 г. «Разработка программно-аппаратного комплекса бездатчикового энергоэффективного управления процессом добычи нефти на основе цифровой модели насосной установки». Разработанные метод и алгоритм косвенной оценки электротехнических и технологических параметров УЭЦН используются в учебном процессе кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации» ФГАОУ ВО «ПНИПУ».

Методология и методы исследования.

Для решения поставленных задач в работе использовались отдельные элементы теории электротехники, теории автоматического управления, теории электропривода, математической статистики, математического анализа, а также методы имитационного моделирования с программным обеспечением *Matlab Simulink, MexBIOS Development Studio* и объектно-ориентированного программирования с использованием языков программирования *Python, C, C++*.

Соответствие диссертации специальности 2.4.2 «Электротехнические комплексы и системы».

Рассматриваемые в работе задачи соответствуют паспорту специальности 2.4.2 «Электротехнические комплексы и системы» – п. 1 «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электромеханические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода,

электроснабжения и электрооборудования»; п. 3 «Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления».

Достоверность результатов подтверждается корректным использованием апробированного математического аппарата теории электротехники, управления, электропривода, математической статистики, математического анализа; сопоставления результатов расчета с данными, приведенными в технической литературе и данными, полученными в результате инструментальных замеров на реальных технологических объектах и физической модели. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях различного уровня и опубликованы в печати, в том числе, в изданиях, рекомендованных ВАК и входящих в международные системы цитирования.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на XXX – XXXIII международных научных симпозиумах «НЕДЕЛЯ ГОРНЯКА» (НИТУ МИСИС, г. Москва, 2022 – 2025 гг.); 62-ой международной научной конференции по энергетике и электротехнике Рижского технического университета «*RTUCON*» (г. Рига, Латвия, 2021 г.); XII международной конференции «Инновационная энергетика» (ПНИПУ, г. Пермь, 2021 г.); научном семинаре аспирантов «Электротехнические комплексы и системы автоматизации в металлургии» (МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, 2023 г.); XXIII всероссийской конференции по автоматизированному электроприводу (ТГУ, г. Тула, 2022 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 9 печатных работ в изданиях, входящих в международные системы цитирования *SCOPUS* и *Web of Science*, получено 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора состоит в: анализе существующих систем управления УЭЦН; разработке концептуальной структуры косвенной оценки электротехнических и технологических параметров и управления УЭЦН;

разработке комплексной модели УЭЦН, включающей как ЭТК УЭЦН, так и гидродинамическую систему (ГМС) УЭЦН; разработке метода косвенной оценки электротехнических и технологических параметров УЭЦН на основе сигма-точечного фильтра Калмана; разработке алгоритмов управления УЭЦН при косвенной оценке параметров; разработке системы виртуального дебита; разработке цифровой модели УЭЦН. В работах в соавторстве личный вклад соискателя составляет не менее 75%.

1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ УСТАНОВКОЙ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ КОСВЕННОЙ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ УСТАНОВКОЙ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

1.1 Анализ существующих систем управления установкой электроцентробежного насоса

Технологический процесс добычи нефти с использованием УЭЦН предусматривает эксплуатацию следующего электротехнического и электромеханического оборудования: станции управления, повышающего трансформатора, погружной кабельной линии, ПЭД, ЭЦН и блока погружной телеметрии [1, 2]. Устройством управления технологическим процессом выступает станция управления УЭЦН, зачастую, оборудованная частотным преобразователем [3, 4]. Станция управления является низковольтным комплектным устройством распределения электроэнергии и управления электрооборудованием. Также данный элемент УЭЦН обеспечивает задание режимов работы ПЭД, являющегося основным объектом управления в технологическом процессе. Как правило, при эксплуатации нефтяной скважины применяется либо периодический, либо непрерывный режим откачки нефтяной продукции [5-7].

Периодический или циклический режим эксплуатации нефтяной скважины, оборудованной УЭЦН, менее распространен и характерен для низкодебетовых или обводненных скважин [8, 9]. Принцип работы заключается в периодическом изменении режима эксплуатации скважины: сначала происходит восстановление пластового давления и накопление достаточного объема нефтяной жидкости, затем осуществляется откачка накопленной нефтяной жидкости. Автоматизированная система управления УЭЦН, работающих в таком режиме, может быть реализована по схеме «тиристорный преобразователь напряжения (ТПН) – погружной асинхронный

электродвигатель (АД)» (рисунок 1.1) [10, 11, 12]. Основным управляющим элементом является микропроцессорная система управления (МПСУ), объединяющая в себе два функциональных модуля. Первый представляет собой специализированный контроллер, выполняющий функции регулирования электромеханических процессов электропривода системы управления электроприводом (СУЭП), второй – технологический регулятор (ТР), который обеспечивает согласованную работу комплекса насосной установки в соответствии с заданными параметрами добычи. Для систем такого исполнения существуют контроллеры, позволяющие реагировать на изменение рабочих условий, анализируя состояние оборудования УЭЦН и при возникновении аварийных ситуаций оперативно переводя его в безопасный режим функционирования. В системе также содержатся датчики фазного тока $I_ф$, напряжения сети $U_с$ и двигателя $U_д$ (ДТ, ДН1, ДН2). Блок ТР обеспечивает автоматическую работу электропривода в режиме с периодическим отключением в фазе накопления. Мониторинг уровня жидкости при этом производится с помощью данных с датчиков давления. ТР может генерировать сигнал останова ПЭД, как в случае аварии, так и в случае технологической остановки с целью проведения профилактических работ. СУЭП передает необходимое значение управляющего воздействия α на ТПН. ТПН предоставляет возможность плавного разгона ПЭД УЭЦН, но не предоставляет возможностей для регулирования скорости откачки. ПЭД выполняет функцию привода ЭЦН. ПЭД преобразует подающуюся к нему электрическую энергию и преобразует ее в механическую энергию вращения, которую с помощью вала передает ЭЦН. ЭЦН раскручивается и выкачивает нефтяную жидкость из скважины. После чего нефтяная жидкость поступает в автоматическую групповую замерную установку (АГЗУ), которая, в свою очередь, измеряет текущее значение дебита.

Такая система управления обладает рядом недостатков, обусловленных частыми пусками и остановами [13, 14]. Например, это приводит к ускоренному старению изоляции из-за термоциклических нагрузок на

обмотки ПЭД. Повторяющиеся механические напряжения повышают износ подшипников и вала насоса. ТПН также работает не в стационарном режиме, что снижает его ресурс. Однако, данная система управления позволяет эксплуатировать УЭЦН на малодебитных и обводненных скважинах, оптимизируя добычу и снижая затраты электрической энергии.

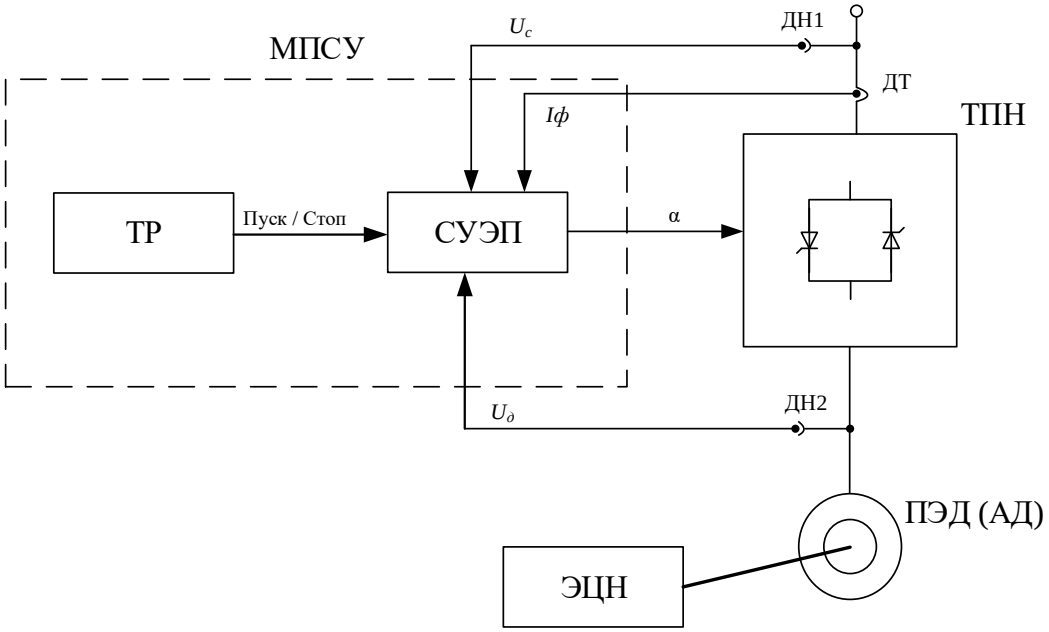

Рисунок 1.1 – Структурная схема автоматизированной системы управления УЭЦН ТПН-АД

Несмотря на то, что ЭЦН эксплуатируются в большом диапазоне подачи – от 10 м^3/сут до 6000 м^3/сут [15], более предпочтительным подходом, с точки зрения эффективности, является эксплуатация скважины в непрерывном режиме откачки нефтяной продукции [16, 17]. Это обуславливается характеристиками ЭЦН, которые обладают невысоким КПД. При отклонении рабочей подачи насоса от номинального значения наблюдается параболическая зависимость снижения КПД. Такая характеристика объясняется изменением гидравлических потерь в проточной части насоса при отклонении от расчетного режима работы. При снижении подачи возрастают потери на перетекание жидкости, а при увеличении – растут потери на трение и вихреобразование. На рисунке 1.2 приведены

паспортные характеристики насоса «Новомет ВНН5-15» из «Интерактивного каталога Новомет» [18]. На данном рисунке представлены технологические характеристики ЭЦН, работающего на одной ступени при частоте питающего напряжения 50 Гц и скорости вращения погружного асинхронного двигателя 2910 об/мин. Технологические характеристики данного насоса приведены в качестве примера. Для других ЭЦН технологические параметры будут изменяться, однако форма характеристики будет похожа, в частности, имеет место параболическая форма функции КПД от подачи насоса. Таким образом, для эффективной эксплуатации ЭЦН желательно поддерживать работу насоса в номинальной точке рабочей области, но это возможно только при эксплуатации УЭЦН в режиме непрерывной откачки нефтяной продукции [19].

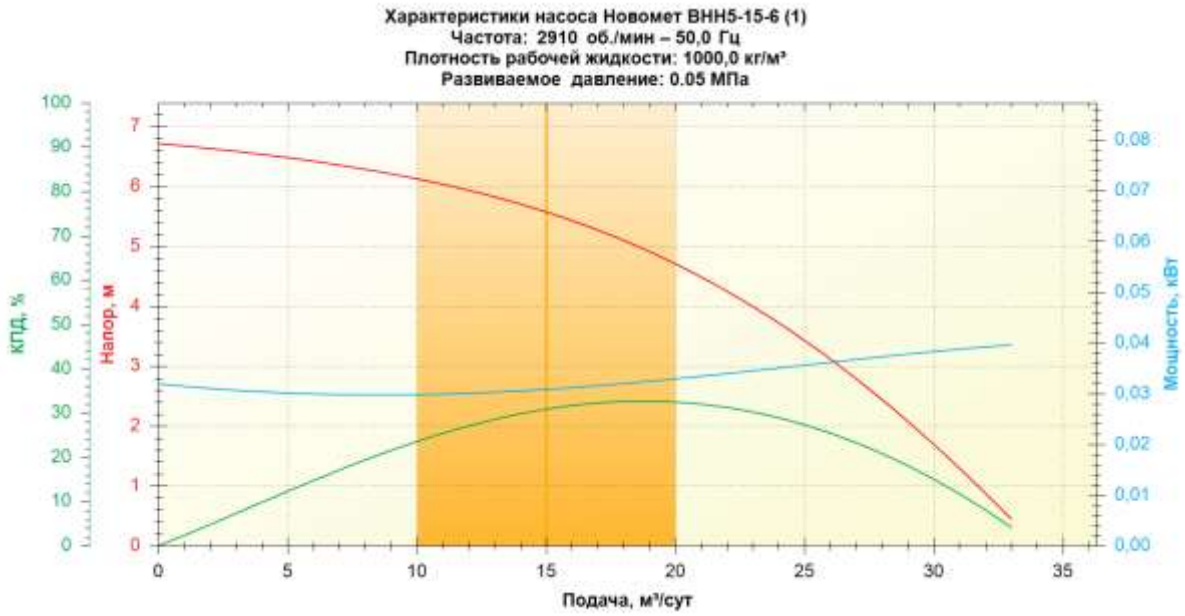

Рисунок 1.2 – Технологические характеристики ЭЦН «Новомет ВНН5-15» для одной ступени

Структурная схема автоматизированной системы управления УЭЦН, обеспечивающей работу установки в непрерывном режиме, по принципу «транзисторный преобразователь частоты – погружной электродвигатель (асинхронный двигатель)» [20-22] представлена на рисунке 1.3.

В представленной схеме управление погружным асинхронным электродвигателем осуществляется по принципам векторного управления с достаточно быстродействующим регулятором скорости (РС) и подчиненным ему регулятором тока (РТ). Замкнутый контур регулирования скорости обеспечивает поддержание подачи насоса в желаемой точке рабочей области. Для обеспечения поддержания скорости РС сравнивает заданную скорость со скоростью с ДС и при необходимости (т.е. несоответствия заданной $\omega_{зад}$ и фактической скорости электродвигателя ω) формирует задание по току $I_{зад}$ на РТ. РТ формирует вектор напряжения U_s и передает его на модуль широтно-импульсной модуляции (ШИМ), который формирует управляющий сигнал для автономного инвертора напряжения (АИН). АИН формирует напряжение на обмотках ПЭД. Все процессы, происходящие далее, совпадают с процессами, описанными ранее в объяснении работы системы ТПН-АД (рисунок 1.1).

В рассмотренной системе управления УЭЦН, работающей в непрерывном режиме откачки нефтяной продукции с поддержанием подачи насоса в желаемой точке рабочей области, необходимо наличие датчика скорости, систем наземной и погружной телеметрии.

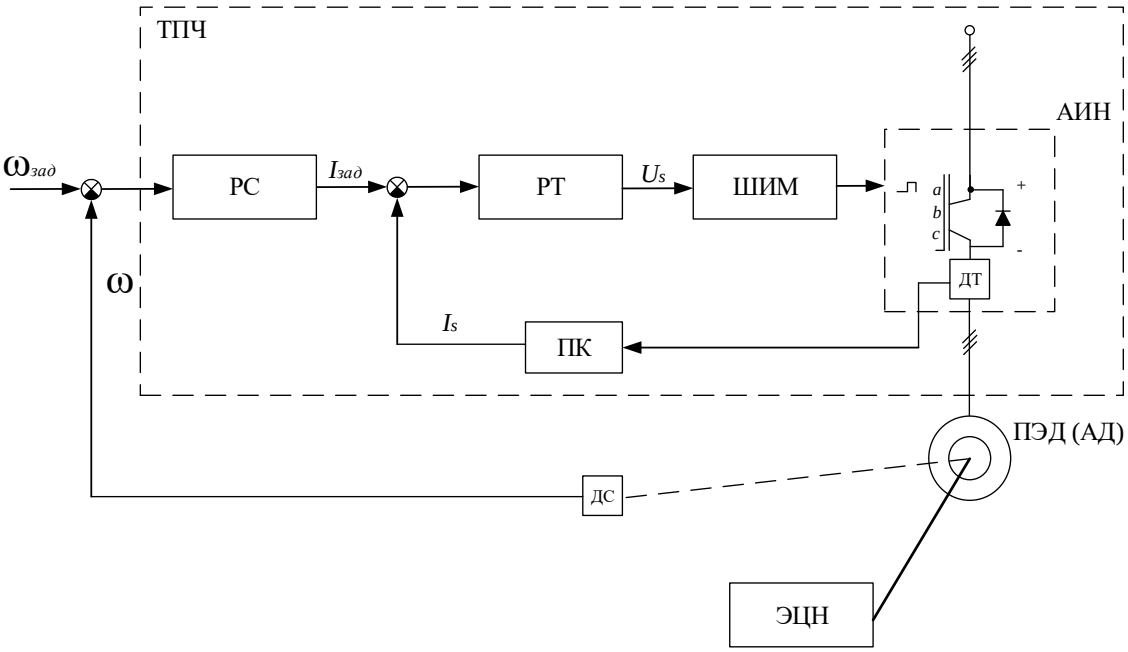

Рисунок 1.3 – Структурная схема автоматизированной системы управления УЭЦН ПЧ-АД

(ДС – датчик скорости; ДТ – датчик тока; ПК – блок преобразования координат; РС – регулятор скорости; РТ – регулятор тока; ШИМ – широтно-импульсный модулятор; АИН – автономный инвертор напряжения)

1.2 Обзор современных систем телеметрии установок электроцентробежного насоса

Системы телеметрии УЭЦН, состоящие как из наземной, так и из подземной частей, выполняют функцию мониторинга технологических параметров скважинного оборудования. В наземных частях телеметрических систем широкое распространение в автоматизации технологических процессов получили специализированные *3G*/*GSM*/*GPRS*- модемы, имеющие реализацию интерфейсов передачи данных *RS232*, *RS485*, *RS422*, а также с поддержкой *TCP*/*IP*-стека [23]. Данные телеметрические модули представляют собой многофункциональные программно-аппаратные решения для организации беспроводных каналов связи с удаленным объектом в режимах *3G*, *GPRS* и *CSD*.

С точки зрения получения информации от средств погружной телеметрии возможно выделить два подхода. Первый подход – это передача цифрового сигнала от подземного блока телеметрии на поверхность посредством специализированных протоколов, работающих на физическом уровне передачи данных, например, протокол *Transfer*. Такие протоколы отличаются тем, что в них применяются высоковольтные импульсы для кодирования информации – уровень логической единицы около 100 В, а уровень логического нуля порядка 80 В. Такой способ передачи демонстрирует высокую устойчивость к электромагнитным помехам. Техническая реализация данного подхода предполагает наличие в погружном блоке телеметрии специального модуля формирования сигналов, который преобразует цифровые данные в последовательность высоковольтных импульсов. На поверхности устанавливается приемное устройство, осуществляющее детектирование и декодирование этих сигналов.

Особенностью протокола *Transfer* и аналогичных решений является использование амплитудной модуляции с четко определенными уровнями напряжения, что обеспечивает надежное распознавание сигналов даже при существенном затухании в кабельной линии. Эксплуатационные характеристики таких систем включают ограниченную скорость передачи данных – около 100 бит/с. Это обусловлено необходимостью обеспечения достаточной длительности импульсов для их надежного распознавания. Для погружной телеметрии УЭЦН не требуется высокая частота обновления показаний. Преимуществом таких решений является простота реализации и высокая надежность. Следует отметить, что данный подход предусматривает преимущественно однонаправленную передачу данных от погружного оборудования к поверхности. Организация обратного канала требует существенного усложнения схемы и почти не используется на практике.

Второй подход – это использование *PLC*-модемов (*Power Line Communication*). С помощью применения *PLC*-модемов возможно реализовать двухсторонний обмен информацией, так как данные устройства работают, передавая и получая информацию по силовым линиям электропитания в полнодуплексном режиме [24]. Данная технология может использоваться не только для получения информации, но и для управления подземным оборудованием [25]. Особенность *PLC*-модемов заключается в их способности адаптироваться к изменяющимся параметрам кабельной линии. Современные реализации включают алгоритмы автоматической коррекции параметров сигнала, компенсирующие влияние таких факторов, как температурные изменения активного сопротивления и емкостные характеристики кабеля. Это достигается за счет динамического подбора рабочих частот и мощности передачи. С точки зрения архитектуры системы, данное решение предусматривает размещение модулей сопряжения как в наземной части, так и в составе погружного оборудования. Такая конфигурация позволяет организовать сквозной цифровой канал от датчиков

на забое до диспетчерских пунктов, обеспечивая контроль технологических параметров скважины.

Подземная часть систем телеметрии расположена в агрессивной среде, где в любой момент непредсказуемое событие может вывести из строя средства измерений [26-28]. Соответственно, такие условия влияют на срок службы приборов. Кроме того, в наиболее распространенных конструкциях телеметрических систем, где сигнал связи передается по трем фазам, недопустимо замыкание одной линии на землю, которое может повредить электронику скважинной телеметрии.

Отказ любого датчика в системе мониторинга создает серьезную проблему для оперативного управления – диспетчер лишается важных данных, что существенно затрудняет оценку текущего состояния технологического процесса и принятие обоснованных решений. Особенно критична ситуация с погружными измерительными устройствами, выход из строя которых требует сложных и дорогостоящих ремонтных операций. Процесс замены таких приборов сопряжен с целым рядом негативных последствий: необходимо останавливать добычу, что приводит к прямым финансовым потерям из-за недополученной продукции и привлекать специализированную технику для подъемно-спусковых операций, которые могут занимать значительное время. Все это делает обслуживание погружных датчиков крайне нежелательной процедурой, существенно увеличивающей эксплуатационные расходы [29, 30]. Кроме этого процесс подъема подземного оборудования скважины на поверхность зачастую сопровождается обрывом и необходимостью последующей замены погружной кабельной линии. В связи с этим особую актуальность приобретает концепция минимизации количества измерительных приборов в скважинных условиях за счет развития альтернативных методов определения параметров работы насосной установки. Такой подход позволяет значительно повысить общую надежность системы, снижая вероятность аварийных ситуаций, связанных с отказом датчиков, и исключая необходимость частых ремонтных

вмешательств [31, 32]. Современные технологии обработки данных и математического моделирования предоставляют возможность получать необходимую информацию о параметрах работы установки косвенными методами, анализируя доступные электротехнические и технологические показатели [33]. Поэтому при построении системы управления и наблюдения электротехнических и технологических параметров УЭЦН целесообразно реализовывать методы и алгоритмы косвенной оценки электротехнических и технологических параметров для управления УЭЦН.

1.3 Методы косвенной оценки переменных состояния технологического процесса добычи нефти с использованием установок электроцентробежного насоса

Косвенная оценка электротехнических и технологических параметров УЭЦН в первую очередь предполагает оценку переменных состояния ПЭД, как основного объекта управления в технологическом процессе добычи нефти с использованием УЭЦН. В УЭЦН ПЭД представлен асинхронным двигателем или вентильным двигателем. В обоих конфигурациях источниками информации для реализации косвенной оценки будут являться датчики тока и напряжения. Таким образом, косвенная оценка и управление ПЭД УЭЦН реализуется на знании фазных значений токов и напряжений обмоток ПЭД.

Реализация косвенной оценки и управления ПЭД осуществима благодаря использованию наблюдателей состояния. В теории автоматического управления термин «наблюдатель состояния» представляет собой модель, параллельно подключенную к объекту управления и непрерывно получающую информацию об изменениях регулирующего воздействия и регулирующей величины [34]. В областях науки, изучающих автоматизированный электропривод, под наблюдателем состояния понимается система, позволяющая по известным параметрам работающего электропривода получить информацию о неизвестных параметрах и оценить их.

Погружные электродвигатели переменного тока, как и их наземные аналоги, эксплуатируются как с датчиком скорости, так и без него. В первом варианте реализации двигателя, то есть с датчиком скорости, существует три известные величины – ток, напряжение и скорость. Управление и наблюдение параметров в таких электроприводах осуществляется проще, чем в двигателях без датчика скорости [35, 36]. Для электроприводов без датчика скорости существует только две известные величины – ток и напряжение. Более выгодным решением с точки зрения экономии и общей стоимости оборудования УЭЦН является эксплуатация ПЭД без датчика скорости. Кроме экономической выгоды, данный подход также повышает надежность системы в целом, так как уменьшается количество эксплуатируемого погружного измерительного оборудования. На рисунке 1.4 представлена классификация наблюдателей состояния, использующихся в системах управления электродвигателями.

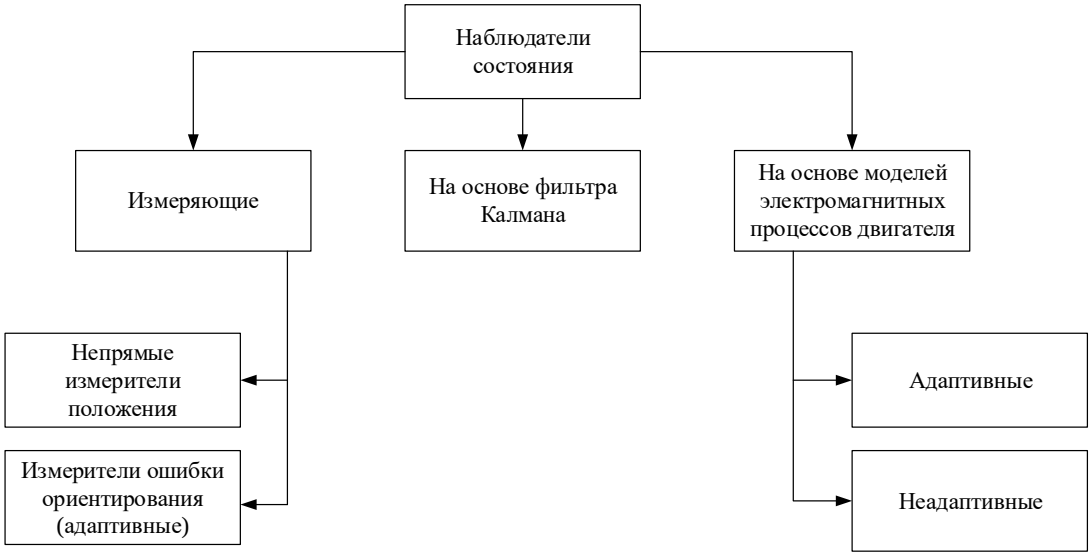

Рисунок 1.4 – Классификация наблюдателей состояния в электроприводе

Непрямые измерители положения используются в электроприводах без датчика скорости. Текущее положение ротора в таких двигателях вычисляется с помощью магнитной неоднородности свойств двигателя: неоднородность магнитной проницаемости или несимметричность обмоток. Также в таких системах возможно производить измерения с помощью силового инвертора

напряжения – инвертор генерирует высокочастотный тестирующий сигнал и определяет текущее положение ротора с помощью реакции на тестирующее воздействие. Для оценки скорости вращения ротора берется производная от текущего положения. Такой метод оценки положения называется методом высокочастотной инжекции [37-39]. Такие методы отличаются нестабильной точностью оценки параметров электропривода, которая зависит как от точности цифровой модели электропривода, так и от индивидуальных особенностей конкретного электродвигателя. Также практическая реализация непрямых измерителей положения характеризуется большой зашумленностью наблюдаемого параметра.

В современных электроприводах без датчика скорости применяются специальные алгоритмы оценки состояния, основанные на анализе ошибок ориентации системы координат [40]. Эти наблюдатели работают исключительно с внутренними сигналами системы управления, извлекаемыми непосредственно из работы самого привода, без использования внешних измерительных устройств. Принципиальная особенность заключается в том, что в данном случае используются только те параметры системы, которые непосредственно связаны с погрешностью определения положения вращающейся системы отсчета. Такой подход позволяет реконструировать недостающую информацию о скорости и положении ротора, опираясь исключительно на электрические величины, доступные в системе управления – токи и напряжения статора. Такие наблюдатели называются измерителями ошибки ориентирования. Из-за того, что в процессе ориентирования ошибка по положению сводится к нулю, данные наблюдатели можно отнести к адаптивным. Скорость вращения ротора, как и в непрямых измерителях положения, определяется как дифференциал положения. Данные наблюдатели, как и непрямые измерители положения не подходят для использования в ПЭД УЭЦН, из-за необходимости программного и аппаратного вмешательства в частотный преобразователь.

В системах управления электродвигателями, оснащенными датчиками скорости или положения, применяются неадаптивные наблюдатели, построенные на математическом описании электромагнитных процессов в электрической машине [41]. Эти наблюдатели работают по принципу косвенного вычисления параметров двигателя, используя для этого уравнения, описывающие взаимосвязь электрических и магнитных процессов в обмотках статора и ротора. В отличие от адаптивных систем, данные системы не подстраивают свои параметры в процессе работы, а полагаются на заранее известную модель двигателя, считая его характеристики неизменными. Данные наблюдателя работают следующим образом – на основе измеряемых электрических величин – токов и напряжений статора, и информации от датчиков о механическом положении вала электродвигателя, наблюдатель решает систему уравнений, описывающую электромагнитное состояние электрической машины. Это позволяет получить оценки тех параметров, которые не могут быть измерены непосредственно, но важны для управления. Например, определить потокосцепление ротора или внутренние электромагнитные моменты. Такой подход может быть использован при реализации алгоритмов векторного управления. Особенностью таких наблюдателей является их зависимость от точности математической модели двигателя. Любые расхождения между параметрами модели и реальными характеристиками машины приводят к ошибкам оценки. Поэтому их применение наиболее оправдано в системах с хорошо известными и стабильными параметрами электродвигателя, где дополнительная информация от датчиков положения помогает компенсировать недостатки неадаптивного подхода.

Адаптивные наблюдатели, основанные на математическом описании электродвигателя, используются в различных системах электропривода – как в тех, что используют датчики скорости и положения, так и в конфигурациях без этих датчиков [42]. Данный тип наблюдателей (как и неадаптивные) работает с уравнениями, описывающими электромагнитные процессы в

электрической машине, чтобы оценивать ненаблюдаемые параметры. Основное отличие такого типа наблюдателей заключается в их способности динамически корректировать свои внутренние параметры в процессе работы, постоянно подстраиваясь под изменяющиеся условия эксплуатации и возможные расхождения между моделью и реальными параметрами двигателя. Структура таких наблюдателей схожа со структурой следящих систем, так как кроме модели электродвигателя в них содержатся регуляторы для оцениваемых величин. Зачастую закон адаптации реализуется с использованием ПИ-регулятора [43, 44]. За счет регуляторов модель может отражать реальные процессы, происходящие в электроприводе. На сегодняшний день такой тип наблюдателей получил наибольшее распространение на практике, что объясняется относительной несложностью реализации. Однако, точность оценки данных наблюдателей напрямую зависит от точности инициализации параметров электродвигателя [45]. В модели ПЭД необходимо учитывать сопротивление кабельной линии, которое является неизвестным и динамически изменяющимся параметром. Кроме этого, использование регулятора повышает степень характеристического полинома системы, что приводит к запаздыванию при оценке наблюдаемой величины. Таким образом, использование адаптивных наблюдателей не является оптимальным решением.

Среди современных методов косвенной оценки состояния электроприводов наиболее интересны для исследования алгоритмы на базе фильтра Калмана, выделяющиеся как точностью восстановления параметров, так и значительной сложностью математического аппарата. Наблюдатели такого типа демонстрируют хорошие результаты при различных условиях эксплуатации и различных конфигурациях электроприводов. Принцип работы наблюдателей на основе фильтра Калмана заключается в использовании алгоритмов, работающих на законах математической статистики. Алгоритм работы фильтра Калмана сочетает непрерывную коррекцию модели на основе поступающих измерений с оптимальной фильтрацией помех. Текущее

значение неизвестной величины оценивается за счет уменьшения зашумления измеряемых параметров. Фильтр Калмана, в отличие от адаптивных наблюдателей, позволяет оценить величину сопротивления кабельной линии, включив ее в систему обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), описывающую ПЭД. Поэтому использование фильтра Калмана для оценки переменных состояния ПЭД является наиболее предпочтительным. Но и АД, и вентильный двигатель являются нелинейными системами (например, АД описывается пятью состояниями), соответственно, использовать линейный фильтр Калмана не представляется возможным. Классический и очень популярный подход к проектированию фильтра Калмана для АД заключается в линеаризации системы относительно точки оценки тока и представляет собой расширенный фильтр Калмана. Использование расширенного фильтра Калмана обеспечивает хорошие результаты оценки, что позволяет использовать его в традиционных подходах к управлению АД, таких как прямое управление моментом или скалярное управление. Другая реализация фильтра Калмана – сигма-точечный фильтр Калмана. По сравнению с расширенным фильтром Калмана, сигма-точечный фильтр Калмана не требует этапа линеаризации, что может привести к его нестабильной работе в системах с недорогими микропроцессорными блоками [46, 47]. Однако, сигма-точечный фильтр Калмана обладает лучшими свойствами по сходимости, восстановлению и обеспечивает более оптимальные результаты с точки зрения минимизации дисперсии оценок [48]. Для системы косвенной оценки электротехнических и технологических параметров УЭЦН сигма-точечный фильтр Калмана является наиболее предпочтительным наблюдателем состояния, так как работа ПЭД в составе УЭЦН характеризуется сильными нелинейностями в отношении угловой скорости и нагрузки на валу ПЭД, которые сигма-точечный фильтр Калмана обрабатывает более оптимальным способом, используя сигма-точечное преобразование, что приводит к более точной оценке состояния. Несмотря на вычислительную сложность сигма-точечного фильтра Калмана, которая заключается в шаге прогнозирования

(интегрирование ОДУ $2n + 1$ раз, где n – порядок системы), данный метод все же не такой вычислительно тяжелый, как другие используемые при оценке нелинейных систем методы, например, *moving horizon estimator* или метод на основе многочастичного фильтра.

В системе косвенной оценки электротехнических и технологических параметров для управления УЭЦН нельзя ограничиться наблюдением только лишь параметров электропривода. Также необходимо производить оценку и других величин элементов УЭЦН. В первую очередь необходимо оценивать дебит скважины, так как именно этот параметр является важнейшим и отражает текущую экономическую эффективность УЭЦН. Текущая производительность скважины, оснащенной УЭЦН, оценивается как [2]:

$$H = \frac{P_d - PIP}{0,433\gamma}, \tag{1.1}$$

где H – напор, P_d – нагнетающее давление насоса, PIP – давление на приеме насоса, γ – удельный вес жидкости. Зная напор, можно рассчитать дебит по следующей формуле:

$$q = \frac{P_{hydr}}{7,368 \cdot 10^{-6}\ H\gamma}, \tag{1.2}$$

где P_{hydr} – гидравлическая мощность насоса.

Несмотря на существенную теоретическую основу, данный метод расчета дебита редко применяется на практике. Во-первых, расчет требует точного определения большого количества различных параметров УЭЦН, при этом одни параметры являются динамическими, а у других трудно точно определить значение даже при наличии датчиков и другого специального измерительного оборудования. Во-вторых, результаты экспериментов с использованием цифровой модели скважины и УЭЦН, показывают, что даже при наличии «идеальных» датчиков ошибка расчета составляет 10-15 % [2]. Под «идеальным» датчиком понимается измерительное устройство неподверженное внешним воздействиям, в котором отсутствуют потери.

Поэтому дебит УЭЦН целесообразно оценивать с помощью косвенных методов.

Известна оценка дебита скважины на основе анализа рабочих характеристик ЭЦН. Этот подход ориентирован на сопоставление фактической механической мощности, передаваемой на вал погружного электродвигателя, с эталонными значениями из каталожных данных насоса [49]. Паспортные характеристики, представленные в виде полиномиальных зависимостей, позволяют установить четкую взаимосвязь между потребляемой мощностью и производительностью насосного агрегата. Принцип работы системы оценки построен на алгоритме с применением ПИД-регулятора, где за эталонное значение принимается расчетная тормозная мощность на валу двигателя. Каждому значению этой мощности соответствует определенная подача насоса, определяемая по аппроксимированным каталожным кривым. Полиномиальная функция, оцененная при этой подаче, соответствует эталонному значению. Интегратор обеспечивает нулевую установившуюся ошибку описываемого процесса наблюдения. На выходе наблюдатель дебита предоставляет две потенциальные рабочие точки. Дальнейшая идентификация фактического состояния ЭЦН требует использования цифрового манометра и осуществляется путем сопоставления измеренного и рассчитанного напора [50]. Таким образом, непрерывно вычисляя текущую механическую мощность и сопоставляя ее с эталонными характеристиками, система может с достаточной точностью определять фактический дебит скважины без использования прямых измерений дебита. Данный метод оценки дебита требует избыточных шагов для получения результата, а именно размещения цифрового манометра и изменения скорости в рабочем состоянии, что может усложняться от агрегата к агрегату.

Еще один метод косвенной оценки дебита *Moving Horizon Estimation* [51] реализуется с применением оптимизационного подхода, использующего скользящее окно измерений для оценки состояния системы. На основе

гидродинамических и электромеханических уравнений строится модель насосной системы. С помощью *Moving Horizon Estimation* выполняется минимизация ошибки между предсказанными и реальными данными в пределах скользящего временного окна. Особенность этого метода заключается в его способности последовательно анализировать данные в скользящем временном окне, постоянно корректируя оценки состояния системы с учетом не только текущих измерений, но и предыстории работы скважины. Алгоритм искусственно вводит в расчеты фактор неопределенности, учитывающий как погрешности измерений, так и естественные флуктуации параметров пласта. Это позволяет получать более устойчивые оценки даже в условиях значительного уровня шумов и нестационарности технологического процесса. Данный метод обеспечивает высокую точность оценки дебита, но требует большого количества датчиков в телеметрической системе и является крайне инертным, позволяя получать результат оценки дебита с периодом, примерно, 60 мин. Данный метод подходит для долгосрочного мониторинга и анализа тенденций изменения продуктивности скважины, но ограничен в применении для задач оперативного управления.

Оценку дебита УЭЦН также возможно производить с помощью статистических методов анализа данных. Некоторые динамические наблюдаемые величины и статические известные величины УЭЦН будут являться входными параметрами, а дебит – выходным параметром. Реализовать систему виртуального дебита по такой структуре возможно с применением алгоритмов машинного обучения, так как такая задача соответствует типовой задаче регрессии.

1.4 Определение структуры системы косвенной оценки электротехнических и технологических параметров для управления установкой электроцентробежного насоса

На основе представленного выше анализа систем управления УЭЦН и систем косвенной оценки переменных состояния УЭЦН разработана

концептуальная структура системы косвенной оценки электротехнических и технологических параметров и управления УЭЦН (рисунок 1.5). При анализе систем управления УЭЦН было определено, что наиболее предпочтительным вариантом для реализации системы управления ПЭД, как основного объекта управления УЭЦН, является векторная система управления. Это обуславливается тем, что данный подход к управлению двигателем обеспечит большую точность, адаптивность и робастность системы, как в статических, так и в переходных режимах работы, что, вследствие, обеспечит более стальную работу УЭЦН. Согласно проведенному анализу методов косвенной оценки электротехнических и технологических параметров УЭЦН для косвенной оценки переменных состояния УЭЦН был выбран сигма-точечный фильтр Калмана, в качестве основы для системы виртуального дебита была выбрана регрессионная модель машинного обучения. Для корректной работы разработанной системы управления предполагается эксплуатация УЭЦН в режиме непрерывной откачки нефтяной продукции.

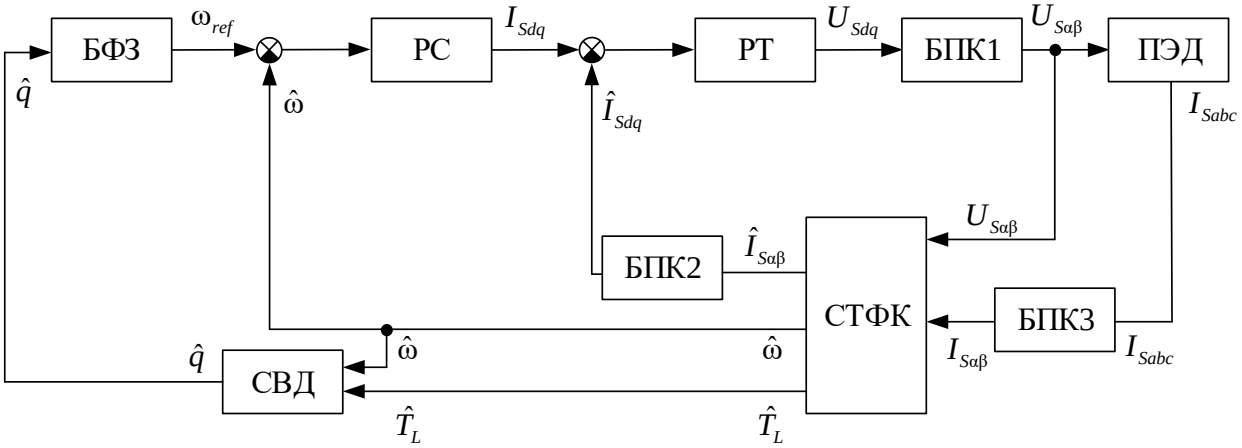

Рисунок 1.5 – Структура системы косвенной оценки электротехнических и технологических параметров и управления УЭЦН

(БФЗ – блок формирования задания; РС – регулятор скорости; РТ – регулятор тока; ПЭД – погружной электродвигатель; БПК1..3 – блоки преобразования координат; СТФК – сигма-точечный фильтр Калмана; СВД – система виртуального дебита УЭЦН; ω_{ref} , $\hat{\omega}$ – задание и наблюдаемая скорость ПЭД; $\hat{q}$ – наблюдаемый дебит УЭЦН; $\hat{T}_L$ – наблюдаемый нагрузочный момент

ПЭД; I_{Sdq}, $\hat{I}_{Sdq}$ – задание и наблюдаемый ток статора ПЭД в системе координат *dq0*; $I_{S\alpha\beta}$, $\hat{I}_{S\alpha\beta}$ – задание и наблюдаемый ток статора ПЭД в системе координат αβ0; I_{Sabc} – ток статора ПЭД в системе координат *abc*; U_{Sdq} – напряжение статора ПЭД в системе координат *dq0*; $U_{S\alpha\beta}$ – напряжение статора ПЭД в системе координат αβ0)

Управление УЭЦН осуществляется с помощью блока формирования задания, системы векторного управления асинхронным погружным электродвигателем с внутренними контурами регулирования скорости и тока, сигма-точечным фильтром Калмана и системы виртуального дебита УЭЦН. Поддержание работы электроцентробежного насоса в желаемой точке рабочей области, например, в точке с наивысшим КПД ЭЦН, происходит за счет блока формирования задания, который формирует задание для угловой скорости вращения ПЭД ω_{ref} на основе показаний системы виртуального дебита $\hat{q}$. Регулятор скорости формирует задание по току для регулятора тока I_{Sdq}. Регулятор тока формирует вектор напряжения статора U_{Sdq} и передает его на обмотки погружного асинхронного двигателя. Проекции напряжения статора U_S и тока статора I_S на оси αβ используются сигма-точечным фильтром Калмана для оценки электротехнических и технологических переменных, в том числе нагрузочного момента на валу ПЭД. Наблюдаемые сигма-точечным фильтром Калмана угловая скорость $\hat{\omega}$ и нагрузочный момент $\hat{T}_L$ являются входными параметрами системы виртуального дебита, которая оценивает текущее значение дебита УЭЦН $\hat{q}$.

Выводы по главе 1

1. Проведен анализ существующих систем управления УЭЦН. Определено, что в виду специфики технологических характеристик ЭЦН более предпочтительным является эксплуатация нефтедобывающей установки в режиме непрерывной откачки нефтяной жидкости. Выявлено, что такой

подход к реализации системы управления УЭЦН обеспечит возможность поддержания работы насоса в желаемой точке рабочей области.

2. Рассмотрены современные системы телеметрии УЭЦН, а также способы передачи информации как наземных, так и подземных блоков телеметрии. Выявлены основные недостатки существующих систем телеметрии.

3. Проведен анализ косвенных методов оценки электротехнических и технологических параметров УЭНЦ. Рассмотрены методы косвенной оценки переменных состояния электродвигателей переменного тока и методы косвенной оценки дебита нефтяной скважины. Определены недостатки некоторых из рассмотренных методов, не позволяющие интегрировать их в систему управления УЭЦН.

4. Результаты проведенного анализа существующих систем управления и методов косвенной оценки электротехнических и технологических параметров УЭЦН показали необходимость разработки нового подхода к управлению нефтедобывающей установкой на основе косвенной оценки переменных состояния. Соответственно, была представлена концептуальная структура системы косвенной оценки электротехнических и технологических параметров и управления УЭЦН.

2 КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА КАК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

2.1 Исходные положения

Технологический процесс добычи нефти с использованием УЭЦН включает в себя как электротехнические и электромеханические, так и гидродинамические компоненты. Для построения комплексной модели технологического процесса целесообразно декомпозировать УЭЦН на две составляющие – электротехнический комплекс (ЭТК) УЭЦН и гидродинамическую систему (ГМС) УЭЦН. Декомпозиция УЭЦН на составляющие позволяет более детально изучить взаимодействие различных физических процессов, лежащих в основе ее работы. Модели ЭТК УЭЦН описывают преобразование энергии и управление двигателем [52-54], тогда как модель ГМС УЭЦН фокусируется на движении жидкости и давлениях [55-58]. Такой подход упрощает моделирование, так как каждая из этих подсистем имеет свои специфические законы и описывающие их уравнения, которые, будучи рассмотренными отдельно, делают анализ более четким и управляемым. Взаимодействие между этими двумя составляющими происходит на уровне механической передачи энергии от двигателя к насосу, где электрические параметры преобразуются в гидродинамические характеристики. Это позволяет более точно прогнозировать поведение системы в различных режимах работы, учитывая, как электрические, так и жидкостные динамические эффекты, что особенно важно при реализации косвенной оценки электротехнических и технологических параметров ПЭД.

В состав ЭТК УЭЦН были включены модели следующих элементов УЭЦН: станция управления с частотным преобразователем, трехфазный масляный трансформатор для погружных насосов (ТМПН), кабельная линия, ПЭД с системой управления [59, 60].

В ГМС УЭЦН рассматривались следующие модели: ЭЦН и приток нефтяной жидкости к забою скважины.

2.2 Математические и имитационные модели электротехнического комплекса установки электроцентробежного насоса

Структурная схема ЭТК УЭЦН представлена на рисунке 2.1. Для разработки и построения адекватных технологическому процессу добычи нефти математических и имитационной моделей ЭТК УЭЦН необходимо учитывать все вышеперечисленные элементы и электрические процессы, происходящие в них.

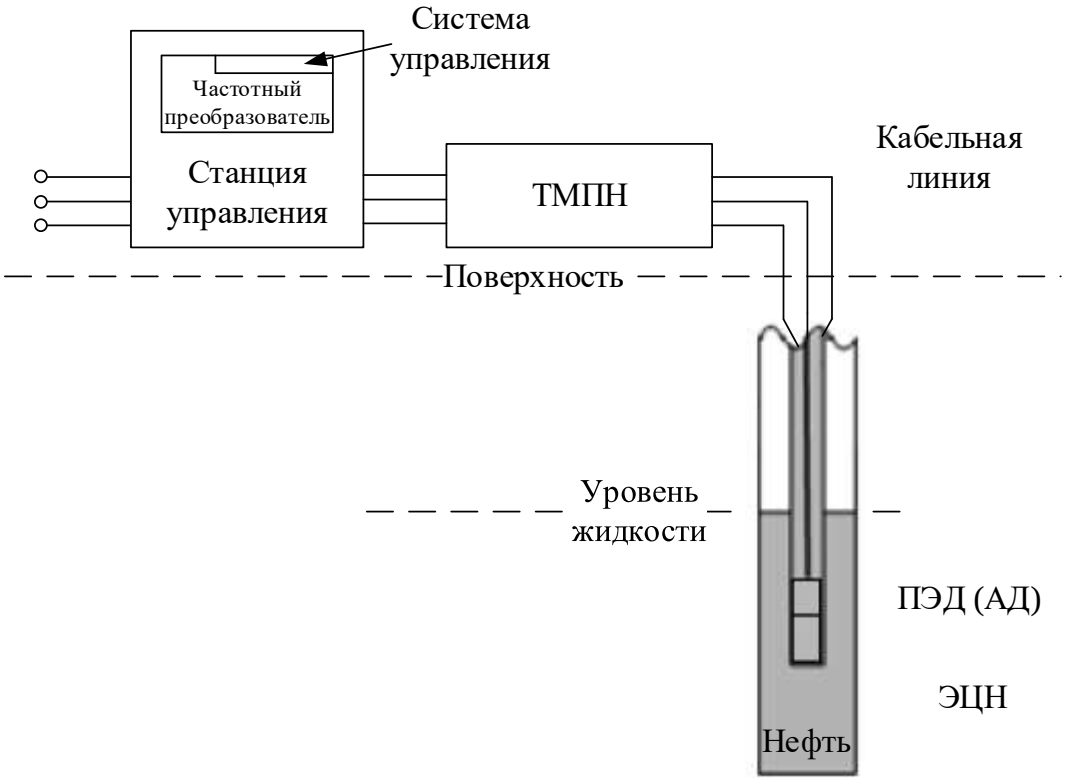

Рисунок 2.1 – Структурная схема ЭТК УЭЦН

2.2.1 Модель станции управления с частотным преобразователем

В разрабатываемой модели ЭТК УЭЦН частотный преобразователь рассматривается как элемент станции управления, содержащий в себе программно-аппаратный комплекс, представляющий собой совокупность программных и технических средств, обеспечивающих работу ПЭД по заданным алгоритмам. Модель частотного преобразователя представлена в виде модели автономного инвертора напряжения с силовыми ключами, что

позволяет формировать импульсы ШИМ и исследовать переходные процессы в ПЭД [61].

Разработка моделей векторной ШИМ для управления АИН строится на основе сбалансированного соотношения между точностью формирования импульсов и эффективностью вычислений. Традиционные подходы опираются на алгоритмы с фиксированной частотой пересчета моментов переключения, что требует множественных преобразований координат. Такие вычисления создают избыточную нагрузку на процессор микроконтроллера, особенно если в них задействованы ресурсоемкие тригонометрические операции. Для снижения вычислительных затраты необходимо минимизировать их использование, изменив математический аппарат алгоритмов. Также необходимо учитывать реальные временные задержки, возникающие между прерываниями микроконтроллера – ведь именно в этих промежутках происходят расчеты, от которых зависит корректность работы всей системы. Точность моделирования напрямую связана с учетом задержек, поскольку даже малые временные отклонения могут исказить формируемые управляющие сигналы. Таким образом, задача сводится к реализации алгоритма, который, с одной стороны, остается достаточно легким для выполнения в реальном времени, а с другой – сохраняет необходимую точность, учитывая все временные параметры работы микроконтроллера.

При разработке алгоритмов для их реального применения в системе векторной ШИМ были созданы модели, учитывающие частоту прерываний микроконтроллера, которая является основным параметром, влияющим на работу системы. От частоты прерываний зависит быстродействие и точность моментов переключения, и соответственно, эффективность управления. Гибкая настройка частоты прерываний микроконтроллера позволяет адаптировать вычислительные процессы к текущей динамике электромагнитных процессов в двигателе. Когда вектор потокосцепления ротора изменяется медленно, система автоматически снижает частоту обработки, высвобождая процессорное время для других задач. Особенно это

актуально для операций обмена данными по шине, требующих оперативного выполнения. При ускорении вращения поля частота прерываний пропорционально увеличивается, обеспечивая необходимую точность управления. Таким образом, выбор подходящей частоты прерываний становится компромиссом между точностью вычислений и быстродействием системы в целом, что особенно важно в условиях реального времени, когда задержки недопустимы.

Современные АИН строятся на основе полностью управляемых полупроводниковых ключей, среди которых наибольшее распространение получили *IGBT*-транзисторы, сочетающие в себе высокую скорость переключения и способность работать с большими мощностями [62, 63]. В основе управления силовыми ключами инвертора лежит принцип векторной ШИМ, который обеспечивает не только генерацию импульсов необходимой ширины, но и их оптимальное пространственное распределение в векторной плоскости. Такая организация управляющих сигналов позволяет существенно улучшить качество выходного напряжения, уменьшая гармонические искажения и повышая энергетическую эффективность преобразования. Кроме проработанного математического аппарата данный метод верифицировался испытаниями в реальных промышленных условиях, где продемонстрировал надежность и высокие динамические характеристики [64]. Практическая реализация подтвердила способность алгоритма обеспечивать точное формирование требуемого вектора напряжения при различных режимах работы, включая переходные процессы и изменяющиеся нагрузки. Особую ценность этому подходу придает универсальность, выражающаяся в одинаково эффективной работе как в стационарных режимах, так и при динамическом изменении параметров, сохраняя стабильность характеристик выходного сигнала. Преимущество метода также заключается в том, что учитываются не только временные параметры импульсов, но и их пространственное расположение, что особенно важно при работе с трехфазными системами, где ключевым является именно векторное

представление напряжения. При этом сама схема управления строится вокруг микропроцессорных систем, способных в реальном времени рассчитывать необходимые параметры импульсов, адаптируя их под текущий режим работы инвертора.

Векторный подход к формированию выходного напряжения АИН выгодно отличается от классической синусоидальной модуляции более эффективным использованием имеющихся ресурсов. При одинаковом входном напряжении данный подход позволяет получить на выходе более высокое действующее значение напряжения, подаваемого на нагрузку, что расширяет рабочий диапазон системы без необходимости увеличения питающих напряжений. Кроме того, такая методика обеспечивает более чистую форму выходного сигнала с заметно сниженным уровнем паразитных гармоник, что улучшает качество электроэнергии и уменьшает негативное влияние на подключенное оборудование. Эти особенности делают векторное управление ШИМ предпочтительным выбором для современных высокоэффективных преобразовательных систем, где важны как энергетическая эффективность, так и точность воспроизведения выходных параметров.

В основе всех существующих алгоритмов векторной ШИМ лежит единый принцип, который заключается в том, что любой требуемый вектор напряжения может быть синтезирован через комбинацию двух соседних базовых векторов, соответствующих определенным состояниям силовых ключей. Продолжительность активного состояния каждого из этих векторов рассчитывается, исходя из их взаимного расположения и требуемого направления результирующего напряжения. Такой подход позволяет гибко управлять формой выходного напряжения, варьируя временные интервалы применения базовых векторов, что в конечном итоге определяет точность формирования требуемого напряжения на нагрузке. При этом сам метод остается универсальным для различных модификаций алгоритмов векторной ШИМ, отличающихся лишь деталями реализации этого базового принципа.

Математически это выражается через соотношения, учитывающие угловое положение целевого вектора в пространстве и необходимую амплитуду выходного сигнала:

$$\begin{cases} T_1 = \dfrac{T_S \cdot V_{ref} \cdot \sin\left(\dfrac{\pi}{3} - \theta\right)}{\sin\left(\dfrac{\pi}{3}\right)} \\ T_2 = \dfrac{T_S \cdot V_{ref} \cdot \sin(\theta)}{\sin\left(\dfrac{\pi}{3}\right)} \\ T_0 = \dfrac{T_S - T_1 - T_2}{2} \end{cases}, \qquad (2.1)$$

где T_1, T_2, T_0 – отдельные интервалы времени внутри одного полного периода ШИМ сигнала, которые определяют длительность включения первого, второго и нулевого базовых векторов, соответственно, $T_S = \dfrac{1}{f_{ШИМ}}$ – период дискретизации, V_{ref} – амплитуда задающего вектора напряжения, θ – угол, на который результирующий вектор напряжения отклонен от ближайшего базового вектора в пространственно-временной плоскости.

Различные альтернативные методы расчета временных интервалов для векторной модуляции в своей основе также опираются на тригонометрические преобразования, поскольку необходимость точного определения положения и величины вектора напряжения требует использования синусоидальных функций. Подобные вычисления создают существенную нагрузку на вычислительные ресурсы микроконтроллера, особенно когда требуется оперативный пересчет параметров в реальном времени. Это связано с тем, что для корректного формирования управляющих импульсов необходимо постоянно анализировать как угловое положение вектора в пространстве, так и его текущую амплитуду, что предполагает проведение ресурсоемких тригонометрических операций на каждом шаге модуляции. Такой подход,

обеспечивая точность управления, одновременно ограничивает быстродействие системы и повышает требования к производительности управляющего процессора.

Разработанная модель АИН использует алгоритм векторной ШИМ, в основе которого лежит последовательное преобразование систем координат (рисунок 2.2) [65]. На начальном этапе трехфазные сигналы неподвижной системы *abc* трансформируются в двухфазное представление αβ0, что позволяет перейти от трех измерений к двум без потери информации. Блок вычислителя сектора анализирует полученные проекции и определяет текущее угловое положение вектора напряжения, идентифицируя соответствующий сектор в пространственном представлении. Однако для упрощения последующих вычислений применяется принцип приведения – независимо от фактического расположения вектора, все математические операции выполняются относительно базового первого сектора. Такой подход существенно сокращает объем вычислений за счет устранения необходимости разработки отдельных алгоритмов для каждого из шести секторов, сохраняя при этом физическую корректность преобразований. Это достигается за счет применения стандартных матриц поворота, которые адаптируют расчетные формулы к реальному положению вектора в пространстве. Подобная оптимизация вычислительного процесса особенно важна для систем реального времени, где велика значимость как точности управления, так и эффективного использования процессорных ресурсов [66]. Блок вычисления времени коммутации рассчитывает временные интервалы по формулам (2.2), в течение которых должны быть активны соседние векторы, а также паузу между ними, когда напряжение фактически отсутствует. В системе реализован специальный генератор – блок задания пилообразного сигнала, создающий линейно нарастающий импульсный сигнал в течение каждого цикла ШИМ. Этот пилообразный сигнал служит временной базой для формирования управляющих импульсов, частота его обновления напрямую соответствует рабочей частоте прерываний микропроцессорной системы. Увеличение

частоты обновления приводит к более точному определению моментов переключения силовых ключей, но одновременно повышает вычислительную нагрузку на управляющий процессор. Такая конструкция позволяет гибко балансировать между точностью управления и эффективным использованием вычислительных ресурсов, что особенно важно для систем реального времени. По сути, этот блок становится цифровым аналогом аналогового генератора пилообразного напряжения, но с возможностью программной настройки параметров работы в соответствии с требованиями конкретной системы управления. Оптимальный баланс между точностью и производительностью достигается, когда частота прерываний подбирается таким образом, чтобы искажения выходного сигнала не выходили за допустимые пределы при заданном диапазоне скоростей вращения вектора напряжения. Блок формирования импульсов формирует управляющие импульсы, которые строятся симметрично относительно центра периода ШИМ, что позволяет минимизировать гармонические искажения в выходном напряжении [67].

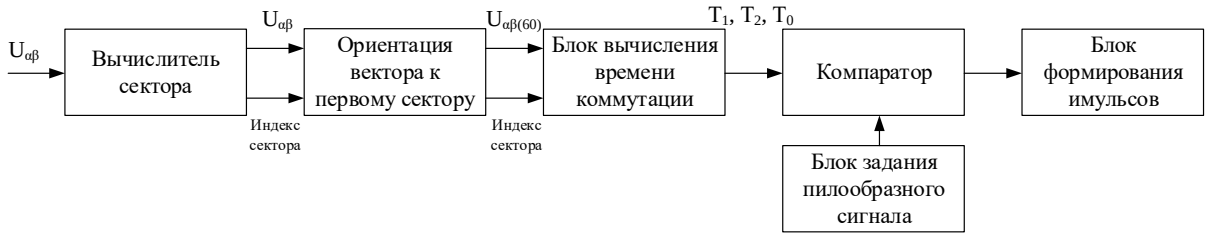

Рисунок 2.2 – Структурная схема векторной ШИМ

$$\begin{cases} T_1 = U_\alpha - \dfrac{U_{\beta 60}}{\sqrt{3}} \\ T_2 = \dfrac{U_{\beta 60} \cdot 2}{\sqrt{3}} \\ T_0 = \dfrac{1 - T_1 + T_2}{2} \end{cases}, \qquad (2.2)$$

В результате применения данного алгоритма процессор микроконтроллера тратит значительно меньше времени на расчеты временных интервалов коммутации, а также обеспечивается плавная работа АИН с

высоким качеством формируемого сигнала. Симметричное расположение импульсов внутри двух периодов модуляции дополнительно снижает уровень помех, повышая стабильность работы системы.

Реализовав блок АИН и рассмотренный алгоритм векторной ШИМ в программной среде *Matlab Simulink*, можно получить имитационную модель станции управления с частотным преобразователем (рисунки 2.3 и 2.4).

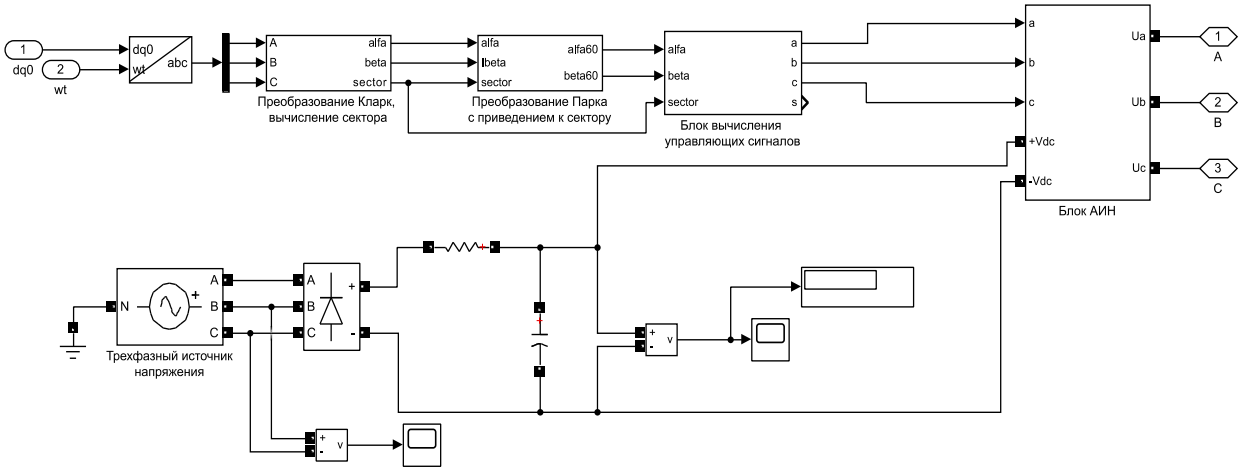

Рисунок 2.3 – Имитационная модель станции управления с частотным преобразователем

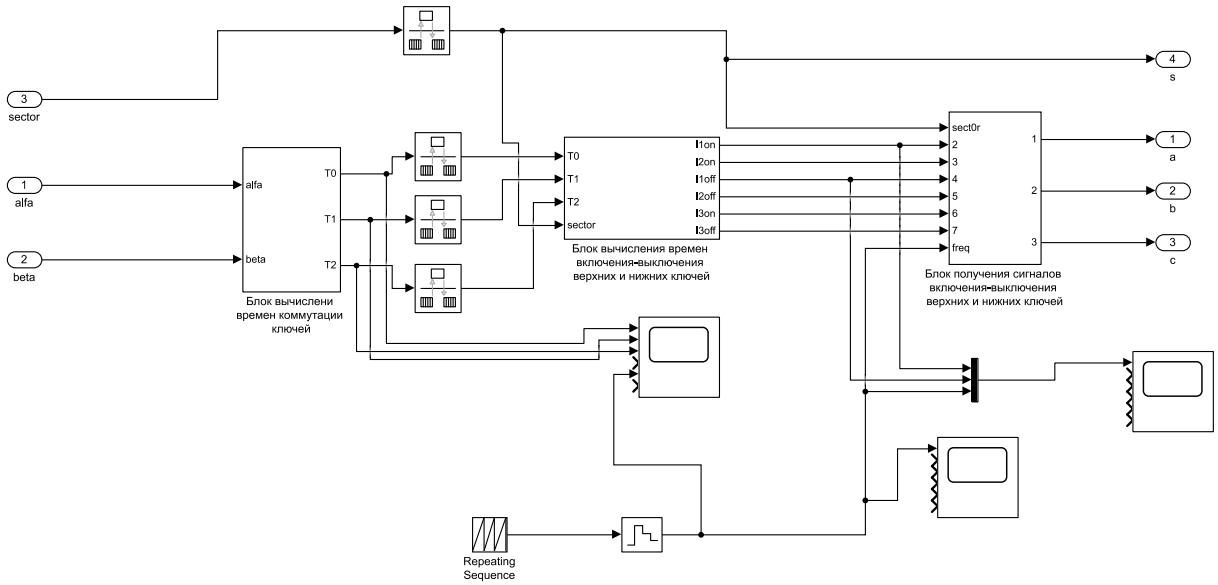

Рисунок 2.4 – Имитационная модель блока вычисления управляющих сигналов для реализации алгоритма векторной ШИМ

2.2.2 Модель трехфазного масляного трансформатора для погружных насосов

Следующий элемент ЭТК УЭЦН – это повышающий трансформатор, выполняющий функцию электроснабжения ПЭД. В УЭЦН, в качестве повышающего трансформатора, используется трехфазный масляный трансформатор для погружных насосов [68]. В условиях скважины, где длина погружного кабеля достигает значительных величин, трансформатор компенсирует потери напряжения, поддерживая необходимый уровень на входе ПЭД.

В разработанной имитационной модели трансформатор описывается Т-образной схемой замещения (рисунок 2.5). Данная схема замещения в достаточной степени точно описывает энергетические и электромагнитные процессы, протекающие в трансформаторе. Кроме того, Т-образная схема замещения позволяет проводить анализ статических и динамических (переходных процессов) режимов работы трансформатора [69].

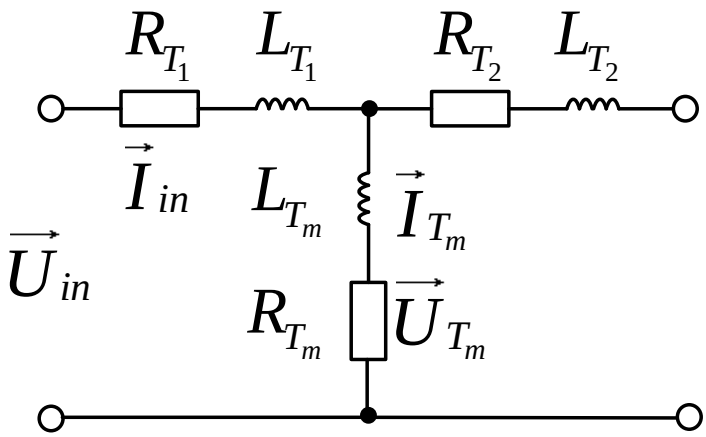

Рисунок 2.5 – Т-образная схема замещения трансформатора ($\vec{U}_{in}$ и $\vec{I}_{in}$ – векторы входного напряжения и тока, R_{T_1} и L_{T_1} – активное сопротивление и индуктивность первичной обмотки ТМПН, R_{T_2} и L_{T_2} – активное сопротивление и индуктивность вторичной обмотки ТМПН, $\vec{U}_{T_m}$ и $\vec{I}_{T_m}$ – векторы напряжения и тока цепи намагничивания ТМПН, R_{T_m} и L_{T_m} – активное сопротивление и индуктивность цепи намагничивания ТМПН)

Расчет параметров схемы замещения трансформатора производится по следующим формулам:

$$Z_{T_1} = \frac{U_{кз\%}}{100} \cdot \left(1 - K_{обм}\right),\ Z_{T_2} = \frac{U_{кз\%}}{100} \cdot K_{обм}, \tag{2.3}$$

где Z_{T_1} и Z_{T_2} – полные сопротивления обмоток, $U_{кз\%}$ – напряжение короткого замыкания, $K_{обм}$ – обмоточный коэффициент.

$$R_{T_1} = \frac{P_{кз}}{S_{ном}} \cdot \left(1 - K_{обм}\right),\ R_{T_2} = \frac{P_{кз}}{S_{ном}} \cdot K_{обм}, \tag{2.4}$$

где $P_{кз}$ – потери короткого замыкания, $S_{ном}$ – полная номинальная мощность трансформатора.

$$X_{T_1} = \sqrt{Z_{T_1}^2 - R_{T_1}^2},\ X_{T_2} = \sqrt{Z_{T_2}^2 - R_{T_2}^2}, \tag{2.5}$$

где X_{T_1} и X_{T_2} – индуктивные сопротивления обмоток.

$$R_{xx} = \frac{S_{ном}}{P_{кз}},\ \mathrm{Z}_{xx} = \frac{100}{I_{xx\%}}, \tag{2.6}$$

где R_{xx} и Z_{xx} – активное и полное сопротивления холостого хода, $I_{xx\%}$ – ток холостого хода.

$$R_{T_m} = R_{xx} - R_{T_2},\ X_{T_m} = \frac{R_{xx}}{\sqrt{\left(\frac{R_{xx}}{Z_{xx}}\right)^2 - 1}} - X_{T_2}, \tag{2.7}$$

где R_{T_m} и X_{T_m} – активное и индуктивное сопротивления ветви намагничивания.

В разрабатываемой системе управления ПЭД учитывается коэффициент трансформации ТМПН. Датчики тока и частотный преобразователь являются элементами станции управления, расположенной до повышающего трансформатора. Соответственно, управляющие сигналы напряжения умножаются на коэффициент трансформации k_T, а сигналы обратной связи с датчиков тока – делятся.

Параметры схемы замещения ТМПН были рассчитаны в относительных единицах и впоследствии использовались в имитационной модели ТМПН в программной среде *Matlab Simulink* (рисунок 2.6).

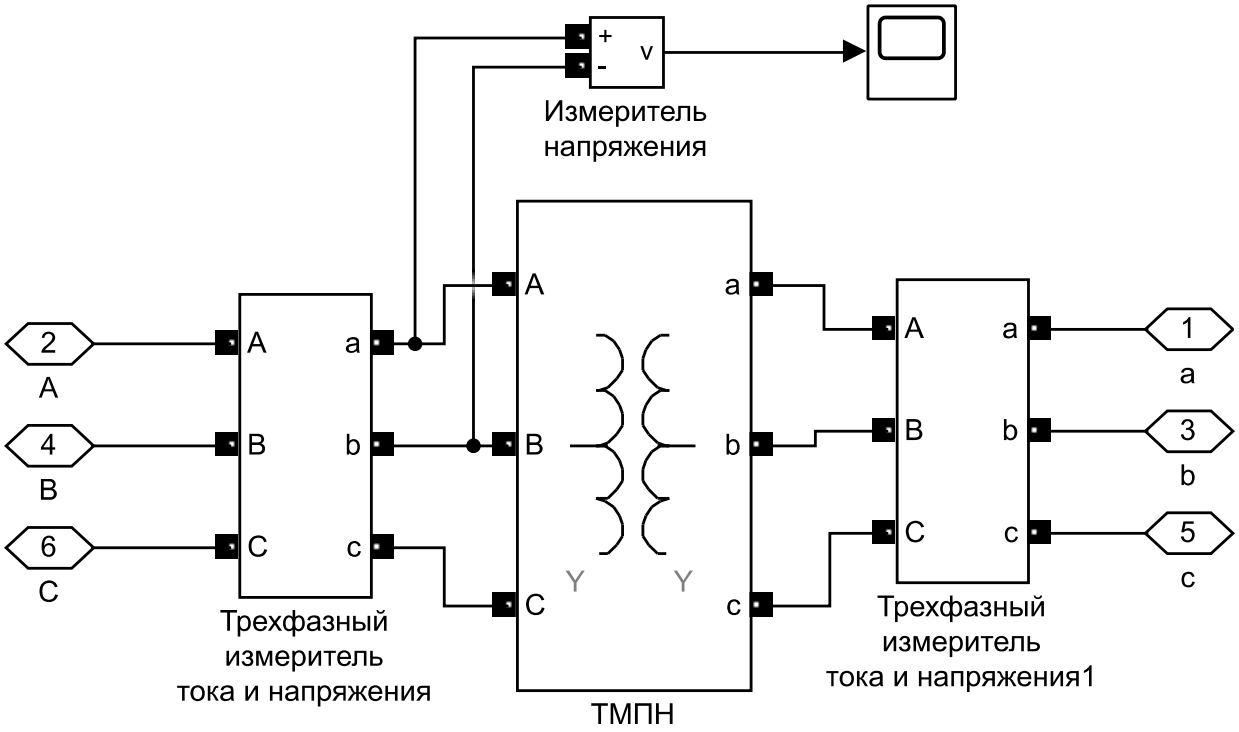

Рисунок 2.6 – Имитационная модель ТМПН

2.2.3 Модель погружной кабельной линии

Следующий рассматриваемый элемент ЭТК УЭЦН – погружная кабельная линия. Кабельная линия выполняет функцию передачи электрической энергии от трансформатора к ПЭД. Длина кабельных линий, используемых в УЭЦН, в подавляющем большинстве случаев находится в пределах от 0,4 до 3,5 км, что соответствует глубинам скважин. В качестве питающего кабеля зачастую используются погружные бронированные кабели марки КПБП, предназначенные для питания погружных электродвигателей.

В разработанной имитационной модели кабельная линия описывается как последовательное соединение активного сопротивления и индуктивности с подключенной в параллель емкостью, которая эквивалентна емкости жилы кабеля на броню (рисунок 2.7).

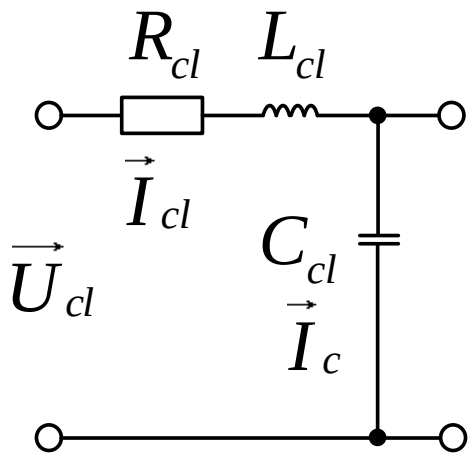

Рисунок 2.7 – Схема замещения кабельной линии

($\vec{U}_{cl}$ и $\vec{I}_{cl}$ – векторы напряжения и тока кабельной линии, $\vec{I}_{c}$ – вектор тока емкости, R_{cl}, L_{cl} и C_{cl} – активное сопротивление, индуктивность и емкость кабельной линии на броню)

В общем виде распределение емкостей в трехжильном кабеле подразумевает также наличие междуфазной емкости (рисунок 2.8). В разрабатываемой имитационной модели междуфазная емкость не учитывается, так как в рассматриваемой марке кабеля каждая из трех фаз кабельной линии оснащена собственным заземленным экраном (свинцовой оболочкой), который лишает фазы кабельной линии междуфазных емкостей. Кроме этого, используемый в системе электроснабжения УЭЦН погружной кабель является плоским. Соответственно, все три жилы кабеля расположены параллельно, в одной плоскости. Таким образом, из-за экранов любая фаза кабельной линии с точки зрения емкости ведет себя независимо от двух других фаз. В рассматриваемом случае емкость кабельной линии определяется только свойствами изоляции между жилой и броней и не зависит от того, какое напряжение приложено к соседним фазам, а также какой угловой сдвиг имеет данное напряжение [70].

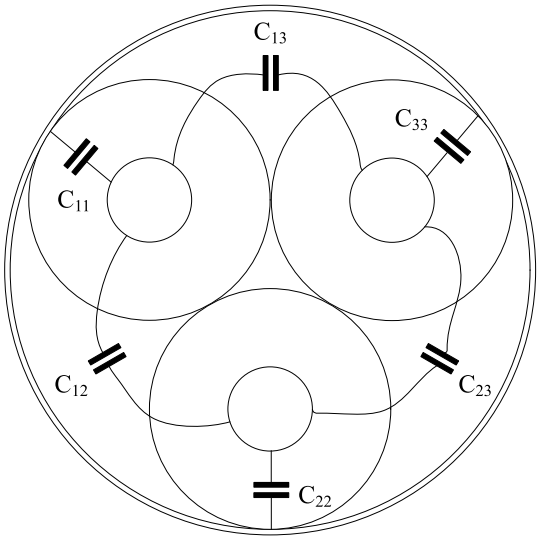

Рисунок 2.8 – Распределение емкостей в кабеле

(*C11*, *C22*, *C33* – емкости жил кабеля на броню, а *C12*, *C13*, *C23* – межфазные емкость жил кабеля)

Паспортные характеристики кабеля, приведенные к длине кабельной линии, использовались в имитационной модели кабельной линии в программной среде *Matlab Simulink* (рисунок 2.9)

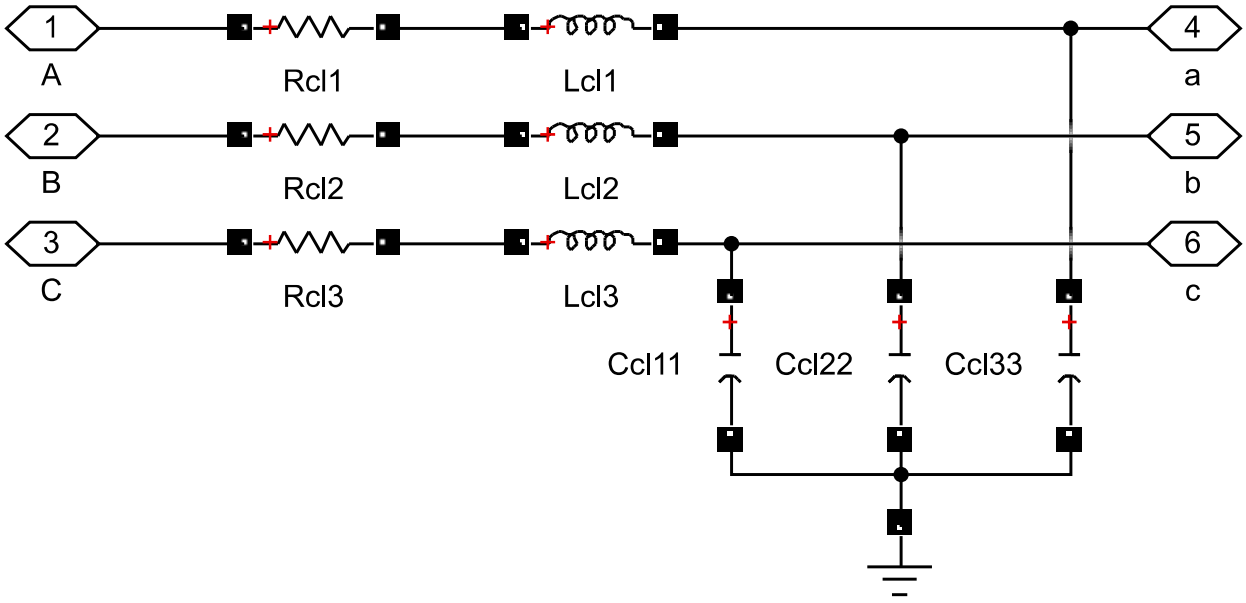

Рисунок 2.9 – Имитационная модель погружной кабельной линии

2.2.4 Математические и имитационные модели погружного электродвигателя

2.2.4.1 Математическая модель погружного электродвигателя

Рассмотрим ПЭД, который является основным элементом ЭТК УЭЦН. ПЭД является объектом управления и все заданные в микропроцессоре частотного преобразователя алгоритмы управления реализуются именно на нем.

В разрабатываемой комплексной модели в качестве ПЭД был выбран асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.

Моделирование АД требует комплексного подхода, учитывающего тесную взаимосвязь между электрическими и механическими процессами, происходящими в двигателе. Электрическая часть модели строится на основе уравнений, описывающих баланс электродвижущих сил в обмотках машины, что позволяет точно воспроизвести электромагнитные процессы при различных режимах работы. Механическая сторона модели отражает динамику вращения ротора под действием электромагнитного момента с учетом всех приложенных к валу нагрузок. В качестве схемы замещения для разрабатываемой модели АД была выбрана обратная Г-образная схема замещения (рисунок 2.10) [71].

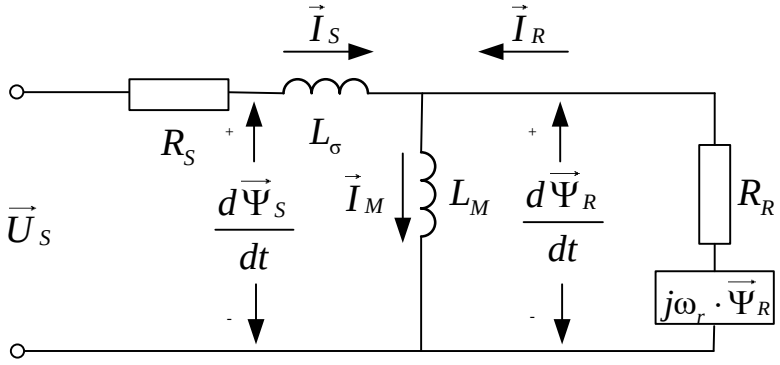

Рисунок 2.10 – Обратная Г-образная схема замещения АД

($\vec{U}_S$ и $\vec{I}_S$ – векторы напряжения и тока статора ПЭД, R_S – активное сопротивление статора ПЭД, L_σ – приведенная индуктивность рассеяния ПЭД, $\vec{\Psi}_S$ – вектор потокосцепление статора ПЭД, $\vec{I}_M$ – вектор тока цепи

намагничивания ПЭД, L_M – приведенная индуктивность намагничивания ПЭД, $\vec{I}_R$ – вектор тока ротора ПЭД, R_R – приведенное активное сопротивление ротора ПЭД, ω_r – угловая скорость ротора ПЭД, $\vec{\Psi}_R$ – вектор потокосцепление ротора ПЭД)

Особенность обратной Г-образная схемы замещения заключается в том, что индуктивность рассеяния “перемещена” из цепи ротора. Благодаря этому векторы токов ротора, тока намагничивания и потокосцепления ротора линеаризуются, а вектор тока статора и напряжения остается неизменным:

$$\vec{\Psi}_R = \frac{\vec{\Psi}_r}{k_R}, \tag{2.8}$$

$$\vec{I}_R = \vec{I}_r \cdot k_R, \tag{2.9}$$

$$\vec{I}_M = \vec{I}_S + \vec{I}_R, \tag{2.10}$$

где $k_R = \frac{L_m}{L_r}$ – коэффициент связи ротора.

Параметры обратной Г-образной схемы замещения рассчитываются по следующим формулам:

$$L_M = \frac{L_m^2}{L_r}, \tag{2.11}$$

$$L_\sigma = L_S - L_M, \tag{2.12}$$

$$R_R = k_R^2. \tag{2.13}$$

Динамическое равновесие для обратной Г-образной схемы замещения представлено уравнениями статора и ротора в векторной форме, приведенными к неподвижному статору:

$$\vec{U}_S = R_S \cdot \vec{I}_S + \frac{d\vec{\Psi}_S}{dt}, \tag{2.14}$$

$$\vec{U}_R = 0 = R_R \cdot \vec{I}_R + \frac{d\vec{\Psi}_R}{dt} - j\omega_r \cdot \vec{\Psi}_R, \tag{2.15}$$

где $\vec{U}_R$ – вектор напряжения ротора ПЭД.

Наилучшим способом записи уравнений (2.14, 2.15) для синтеза регуляторов векторной системы управления АД является их представление во вращающейся системе координат с ориентацией проекции статорного тока вдоль потокосцепления ротора:

$$L_\sigma \frac{d\vec{I}_S}{dt} = \vec{U}_S - \left(R_S + R_R + j\omega_1 \cdot L_\sigma\right) \cdot \vec{I}_S - \left(j\omega_r - \frac{R_R}{L_M}\right) \cdot \vec{\Psi}_R, \tag{2.16}$$

$$\frac{d\vec{\Psi}_R}{dt} = R_R \cdot \vec{I}_S - \left(\frac{R_R}{L_M} + j\left(\omega_r - \omega_1\right)\right) \cdot \vec{\Psi}_R, \tag{2.17}$$

где ω_1 – угловая скорость вращения координатной системы *dq0*.

Уравнение (2.16) является уравнением равновесия ЭДС для обратной Г-образной схемы замещения АД в векторной форме.

При переходе во вращающуюся систему координат *dq0*, которая синхронно вращается с вектором потокосцепления ротора, уравнения равновесия ЭДС (2.16) записываются в следующем виде:

$$\begin{cases} L_\sigma \dfrac{dI_{Sd}}{dt} = U_{Sd} - \left(R_S + R_R\right) \cdot I_{Sd} - \omega_1 \cdot L_\sigma \cdot I_{Sq} + \dfrac{R_R}{L_M} \cdot \Psi_R \\ L_\sigma \dfrac{dI_{Sq}}{dt} = U_{Sq} - \left(R_S + R_R\right) \cdot I_{Sq} + \omega_1 \cdot L_\sigma \cdot I_{Sd} + \omega_r \cdot \Psi_R \end{cases}. \tag{2.18}$$

В этой связанной с полем системе координат динамические уравнения упрощаются, поскольку исчезает относительное движение между системой отсчета и магнитным полем машины. Вращающаяся система *dq0* позволяет разделить переменные на продольную и поперечную составляющие, что делает анализ электромагнитных процессов более наглядным. При этом уравнения сохраняют свою физическую сущность, но записываются в форме, более удобной для реализации алгоритмов цифрового управления, где требуется четкое разделение каналов регулирования. Синхронное вращение системы координат с полем ротора устраняет переменные коэффициенты в

уравнениях, что существенно упрощает анализ динамики электропривода и синтез регуляторов.

Для описания механической части модели АД используются воздействующие на вал АД крутящие моменты:

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{C \cdot \omega}{J} + \frac{T_e - T_L}{J}, \tag{2.19}$$

где ω − механическая угловая скорость ротора, T_e − электромагнитный момент АД, T_L − момент сопротивления, C − коэффициент трения, J − момент инерции.

2.2.4.2 Имитационная модель системы управления погружным электродвигателем

Для обеспечения достаточной достоверности косвенной оценки параметров и точного управления УЭЦН необходимо решить задачу синтеза системы управления ПЭД. Для решения данной задачи необходима имитационная модель системы управления электроприводом как составной части комплексной модели УЭЦН.

Метод управления ПЭД УЭЦН существенно влияет на надежность и точность системы управления ПЭД с косвенной оценкой параметров. Как показывают исследования [72-74], векторное управление электродвигателем имеет лучшие характеристики по сравнению со скалярным управлением при использовании косвенных методов оценки при управлении АД. При косвенных измерениях особую важность приобретает способность системы компенсировать неизбежные ошибки оценки. В данном случае векторное управление оказывается более эффективным за счет использования большего количества информации о состоянии электродвигателя. Также такой подход более адаптивен к изменяющимся режимам эксплуатации электропривода [75]. Структурная схема системы управления ПЭД УЭЦН с косвенной оценкой электротехнических параметров представлена на рисунке 2.11.

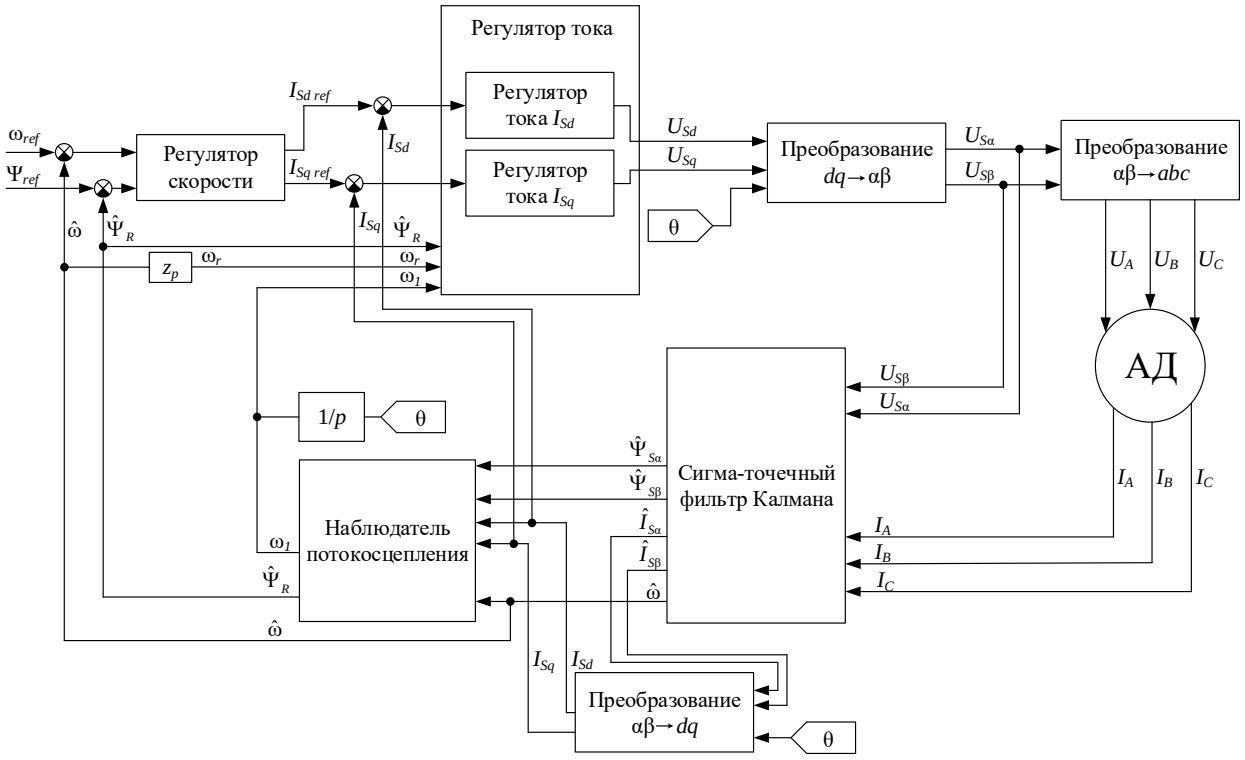

Рисунок 2.11 – Структурная схема системы управления ПЭД УЭЦН с косвенной оценкой электротехнических параметров (Ψ_{ref} – задание потокосцепления ротора, θ – электрический угол, p – оператор Лапласа, z_p – количество пар полюсов двигателя)

Паспортные данные электродвигателей зачастую не отражают реальных характеристик оборудования, работающего в специфических условиях скважины. Для АД особенно важно уточнение таких параметров, как активные и индуктивные сопротивления обмоток, которые могут существенно отличаться от номинальных значений из-за температурных эффектов. Поэтому в современных частотных преобразователях реализован механизм автоадаптации параметров электродвигателя. В основе механизма автоадаптации находится комплекс алгоритмов, анализирующих реакцию двигателя на тестовые сигналы, искусственно вводимые в систему управления при эксплуатации. Преобразователь частоты плавно варьирует параметры выходного напряжения и частоты, наблюдая за изменением токовых характеристик и скорости вращения, что позволяет выявить скрытые

зависимости между электрическими и механическими параметрами системы. Современные системы автоадаптации применяют комбинацию частотных и временных методов анализа, выделяя информативные признаки. Полученные данные обрабатываются с использованием адаптивных фильтров и рекуррентных алгоритмов оценки, которые постепенно уточняют параметры модели, уменьшая расхождение между прогнозируемым и фактическим поведением системы.

В разработанной системе реализован алгоритм автоадаптации параметров электрической машины, который представляет процесс непрерывного уточнения характеристик. Алгоритм строится вокруг блока АД, дополненного подсистемами введения тестовых сигналов и обработки откликов. Для генерации возмущающих воздействий используется модель векторной ШИМ, имитирующая преобразователь частоты, где поверх основного управляющего сигнала накладываются малые по амплитуде тестовые колебания различных частот. Анализ реакции системы на эти возмущения выполняется через банк цифровых фильтров, выделяющих информативные гармоники в токах статора. Полученные сигналы обрабатываются рекуррентным алгоритмом на основе метода наименьших квадратов с экспоненциальным забыванием, что позволяет отделить вклад отдельных параметров в общую динамику системы.

Рассмотрим процесс синтеза контура регулирования скорости и тока в реализуемой системе управления АД.

Основой для синтеза регулятора скорости АД служит уравнение (2.19), описывающее движение привода с учетом всех действующих моментов – электромагнитного, развиваемого двигателем, и момента нагрузки на валу. Это уравнение отражает связь между электрическими процессами в обмотках и механическим вращением ротора, показывая, как изменение электромагнитных параметров преобразуется в ускорение или замедление вала. При настройке контура регулирования скорости в качестве желаемой

передаточной функции было выбрано апериодическое звено первого порядка. В таком случае регулятор скорости будет являться ПИ-регулятором:

$$W_{\omega}(p) = K_{p\omega} + \frac{K_{i\omega}}{p}. \tag{2.20}$$

Выбор такой передаточной функции обусловлен стремлением получить плавное изменение скорости при сохранении необходимого быстродействия системы.

Расчет коэффициентов регулятора производится согласно следующим выражениям:

$$K_{p\omega} = a_{\omega} \cdot J, \tag{2.21}$$

$$K_{i\omega} = a_{\omega} \cdot (C + C_a), \tag{2.22}$$

$$C_a = a_{\omega} \cdot J - C, \tag{2.23}$$

где a_{ω} – частота среза контура скорости.

В программной среде *Matlab Simulink* был реализован регулятор скорости в качестве подсистемы имитационной модели системы управления АД (рисунок 2.12). На рисунке 2.13 представлен расчет коэффициентов регулятора.

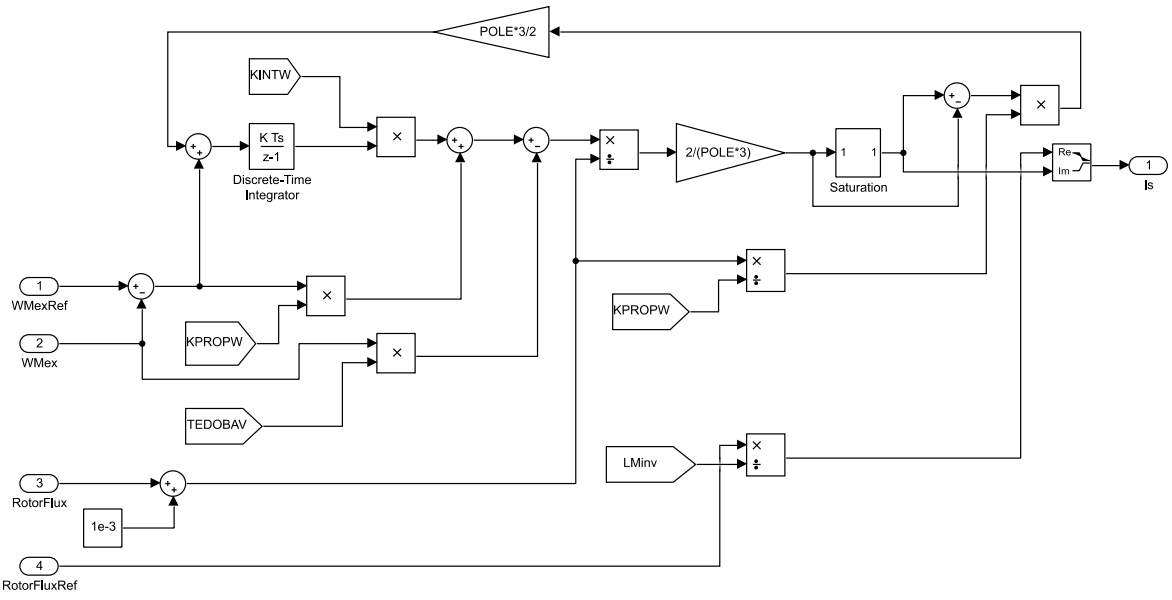

Рисунок 2.12 – Регулятор скорости в программной среде *Matlab Simulink*

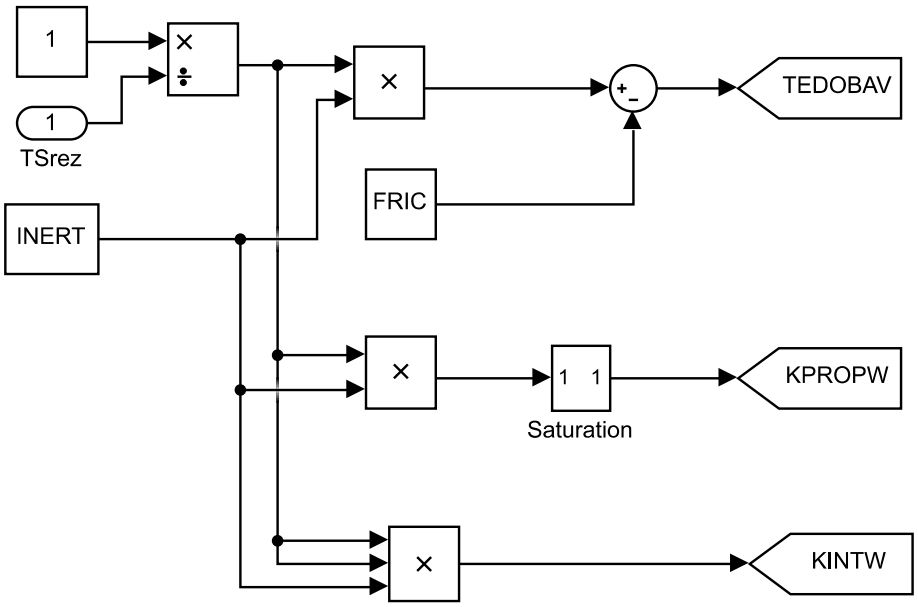

Рисунок 2.13 – Расчет коэффициентов регулятора скорости в программной среде *Matlab Simulink*

Рассмотрим процесс синтеза контура регулирования тока в системе управления АД. В отличие от традиционного подхода к синтезу регулятора тока в векторной системе управления, рассмотрим модель контура регулирования тока в комплексной плоскости [76-78].

Для устранения нелинейных искажений в математической модели системы требуется введение в регулятор специальных компенсирующих элементов. Эти дополнительные компоненты должны зеркально отражать нелинейные характеристики исходных уравнений, создавая эффект взаимного гашения. Когда компенсирующие элементы точно соответствуют исходным нелинейностям, система в целом приобретает свойства линейного объекта, что значительно упрощает процесс управления и повышает его точность. Это позволяет применять классические методы синтеза регуляторов к изначально нелинейным системам, сохраняя при этом высокое качество управления во всем рабочем диапазоне. Таким образом, уравнения (2.18) примут следующий вид:

$$\begin{cases} U_d^{'} = \omega_1 \cdot L_\sigma \cdot I_{Sq} - \dfrac{R_R}{L_M} \cdot \Psi_R \\ U_q^{'} = -\omega_1 \cdot L_\sigma \cdot I_{Sd} - \omega_r \cdot \Psi_R \end{cases}. \tag{2.24}$$

После процедуры линеаризации система уравнений изменится, и уравнения равновесия и динамики преобразуются. Это преобразование позволяет представить сложные нелинейные зависимости в виде линейных соотношений, сохраняя при этом основные физические взаимосвязи между параметрами системы. В результате математическая модель становится более удобной для анализа и синтеза систем управления, хотя и начинает описывать поведение системы лишь в окрестности выбранной рабочей точки:

$$\frac{d}{dt}\begin{pmatrix} I_{Sd} \\ I_{Sq} \\ \omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\dfrac{R_S + R_R}{L_\sigma} & 0 & 0 \\ 0 & -\dfrac{R_S + R_R}{L_\sigma} & 0 \\ 0 & \dfrac{3}{2 \cdot J} \cdot z_p \cdot \Psi_R & -\dfrac{C}{J} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_{Sd} \\ I_{Sq} \\ \omega \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \dfrac{1}{L_\sigma} & 0 & 0 \\ 0 & \dfrac{1}{L_\sigma} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_{Sd} \\ U_{Sq} \\ M_c \end{pmatrix}, \tag{2.25}$$

где M_c – момент нагрузки двигателя.

При настройке контура регулирования тока в качестве желаемой передаточной функции, как и для регулятора скорости, было выбрано апериодическое звено первого порядка. В таком случае регулятор тока примет вид ПИ-звена:

$$W_c(p) = K_{pc} + \frac{K_{ic}}{p}. \tag{2.26}$$

На рисунке 2.14 изображена структурная схема регулятора тока, интегрированного с математической моделью асинхронного двигателя. Все

параметры в этой системе выражены в векторной форме, что дает возможность оперировать ими как целостными комплексными величинами, отражающими как амплитудные, так и фазовые характеристики. Для перевода параметров в векторную форму применяется преобразование из вращающейся системы координат *dq0* в комплексное пространство, где действительная часть соответствует продольной компоненте, а мнимая – поперечной. Такой подход объединяет обе проекции векторов тока и напряжения в единые комплексные переменные, сохраняя при этом всю информацию об их амплитуде и фазовом положении. Это дает возможность работать с электромагнитными процессами двигателя в более естественной форме, соответствующей их физической природе, где ток и напряжение существуют как векторы в пространстве, а не как набор скалярных величин.

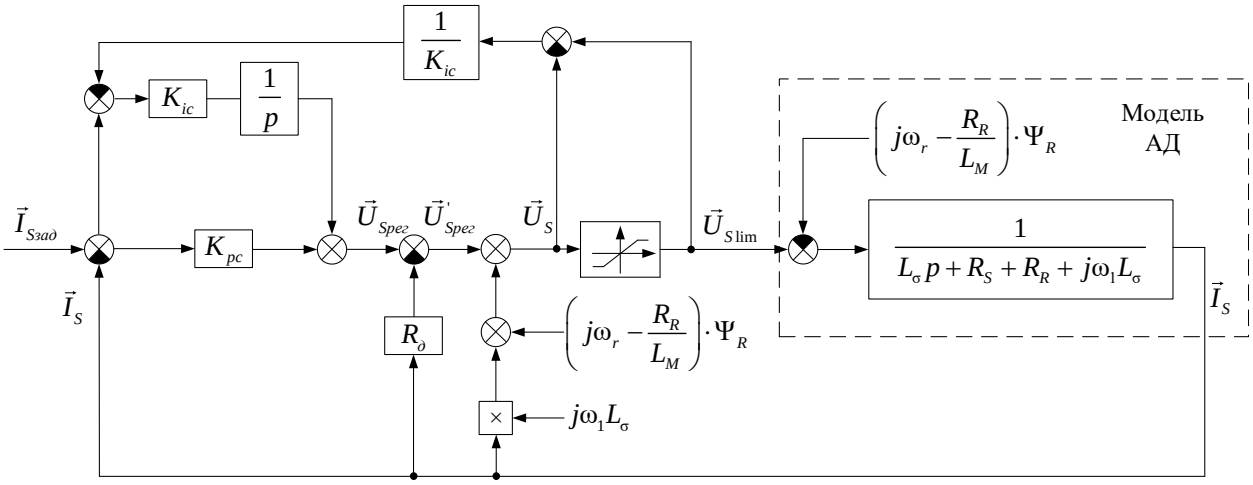

Рисунок 2.14 – Структура регулятора тока в векторной (комплексной) форме [64]

($R_д$ – добавочное сопротивление)

В регуляторе тока реализован механизм контроля величины тока, который работает по принципу ограничения длины вектора без изменения его направления. Это позволяет удерживать ток статора в заданных пределах даже при расхождении между расчетным и фактическим положением ротора. Для предотвращения накопления ошибки в интегральной части регулятора, которое возникает при достижении ограничения, применен интегратор

охвачен отрицательной обратной связью. Это устраняет проблему переполнения интегральной составляющей, когда регулятор продолжает накапливать ошибку после достижения предельных значений управляющего воздействия. В результате система приобретает устойчивость и предсказуемость поведения при выходе на ограничения, что особенно важно в переходных режимах работы электропривода.

Расчет коэффициентов регулятора тока производится согласно следующим выражениям:

$$K_{pc} = a_c \cdot L_\sigma, \tag{2.27}$$

$$R_\partial = a_c \cdot L_\sigma - R_S - R_R, \tag{2.28}$$

$$K_{ic} = a_c \cdot \left(R_S + R_R + R_\partial\right), \tag{2.29}$$

где a_c – частота среза контура тока.

В программной среде *Matlab Simulink* был реализован регулятор тока в качестве подсистемы имитационной модели системы управления АД (рисунок 2.15). На рисунке 2.16 представлен расчет коэффициентов регулятора.

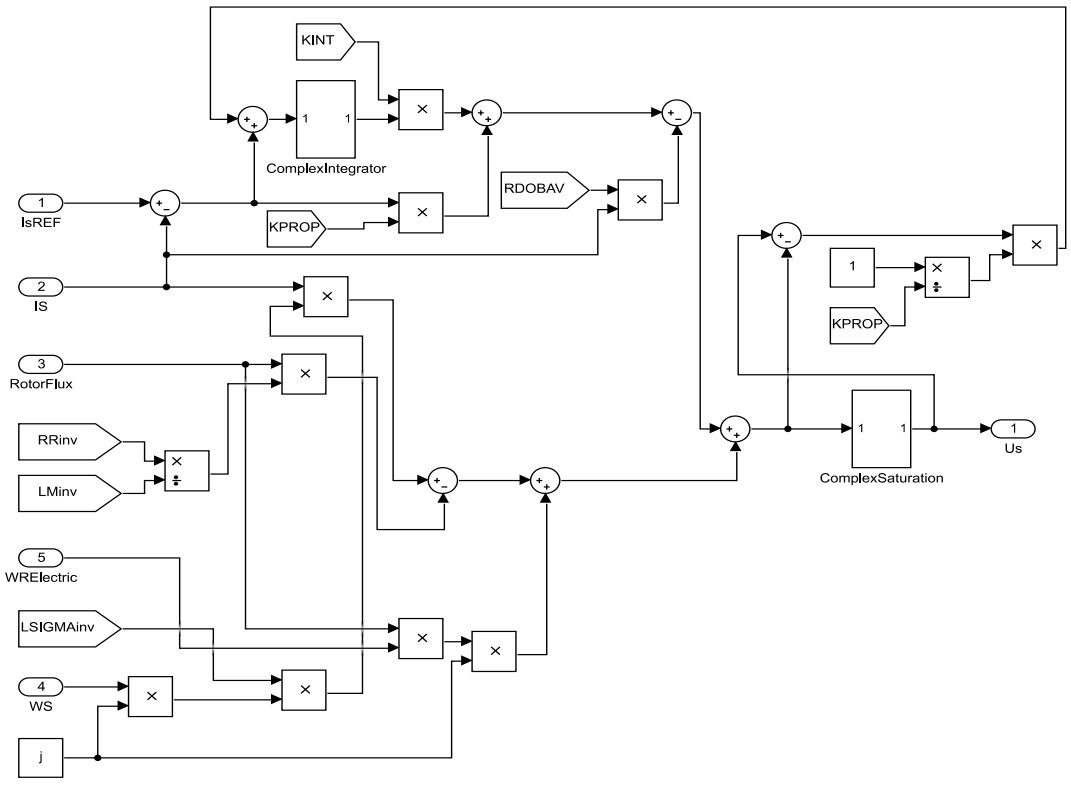

Рисунок 2.15 – Регулятор тока в программной среде *Matlab Simulink*

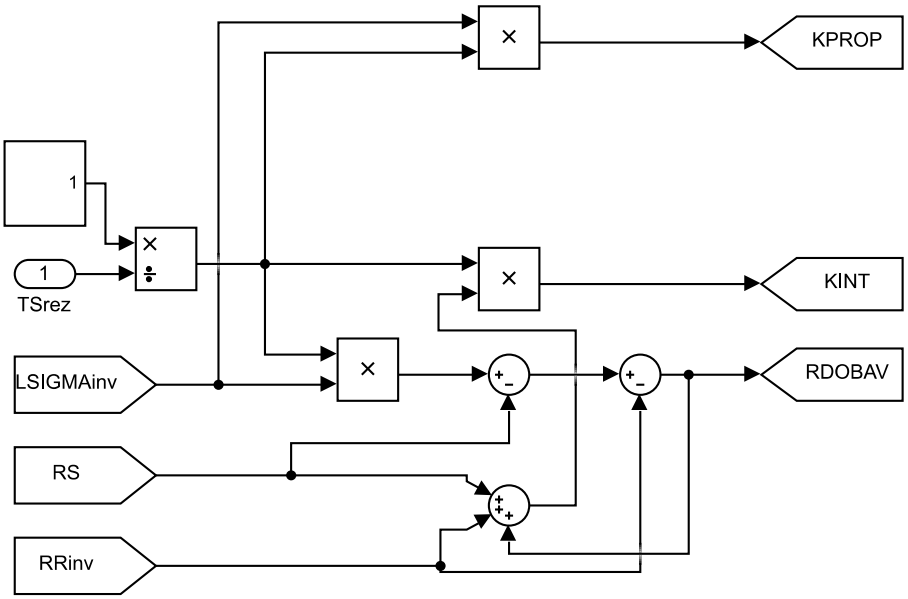

Рисунок 2.16 – Расчет коэффициентов регулятора тока в программной среде *Matlab Simulink*

Векторное управление требует точного знания положения вектора потокосцепления ротора для правильной ориентации системы координат и всех последующих преобразований (рисунок 2.11). В разрабатываемой системе управления с косвенной оценкой переменных состояния ПЭД угловое положение вектора потокосцепления ротора оценивается с помощью наблюдателя состояния. В адаптивных наблюдателях потокосцепления, реализуемых с эталонной моделью статора, при расчете потокосцеплений ротора накапливается постоянная составляющая [79], что приводит к смещению результата. Это называется проблемой прямого интегрирования [80]. Для решения данной проблемы интегратор заменяют апериодическим звеном первого порядка. Однако, это является причиной возникновения задержек при оценке. Используемый наблюдатель основан на формулах (2.15, 2.17). В нем используется проекция потокосцепления статора на оси αβ, рассчитанная в сигма-точечном фильтре Калмана:

$$\begin{cases} \Psi_{R\alpha} = \hat{\Psi}_{S\alpha} - L_{\sigma} \cdot I_{S\alpha} \\ \Psi_{R\beta} = \hat{\Psi}_{S\beta} - L_{\sigma} \cdot I_{S\beta} \end{cases} \quad (2.30)$$

Реализация наблюдателя потокосцепления ротора в имитационной модели системы управления в программной среде *Matlab Simulink* представлена на рисунке 2.17. В данном блоке также реализовано наблюдение угловой скорости вращения координатной системы *dq0* и электрического угла.

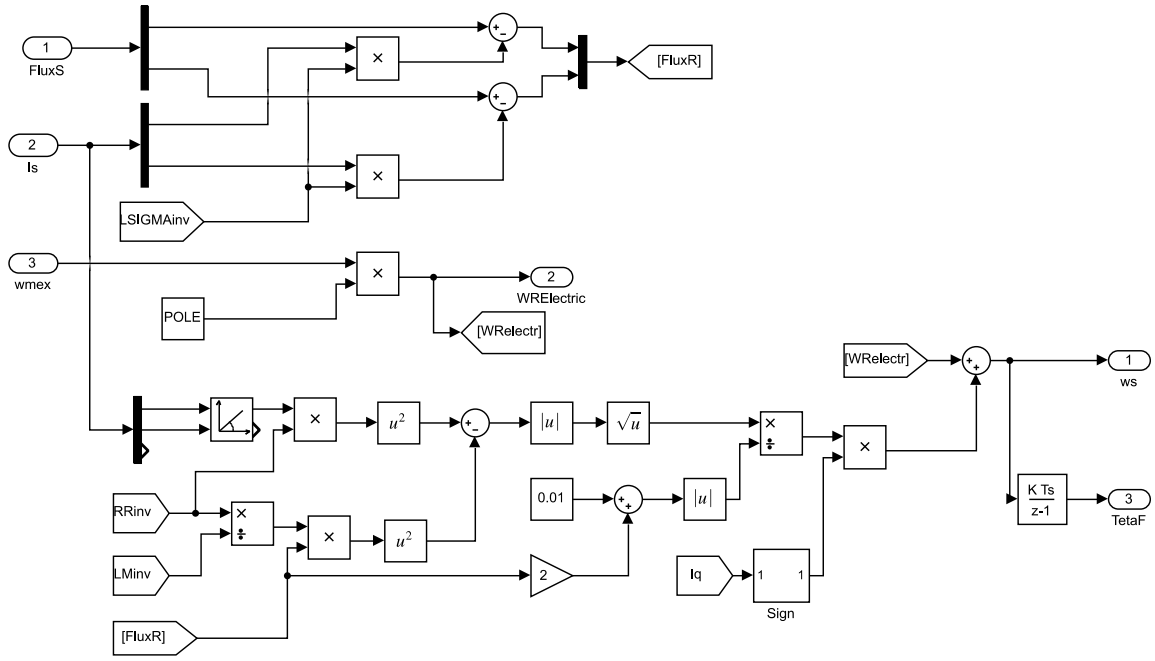

Рисунок 2.17 – Наблюдатель потокосцепления ротора в программной среде *Matlab Simulink*

2.2.5 Объединенная схема замещения электротехнического комплекса установки электроцентробежного насоса

Объединяя рассмотренные модели ЭТК УЭЦН, можно представить систему в виде обобщенной схемы замещения, отражающей основные компоненты электротехнических и электромеханических составляющих (рисунок 2.18). В этой схеме последовательно учитывается взаимодействие между ТМПН, погружной кабельной линией и ПЭД, образующими единую электрическую цепь. Такое представление позволяет анализировать систему как целостный объект, где каждый элемент вносит свой вклад в общие энергетические характеристики. Трансформатор обеспечивает необходимое напряжение, погружная кабельная линия выполняет функцию передачи электроэнергии на глубину, ПЭД преобразует электрическую энергию в

механическую, приводя в действие ЭЦН. Совместное рассмотрение элементов ЭТК УЭЦН в рамках единой схемы дает возможность оценить параметры работы системы в различных режимах эксплуатации.

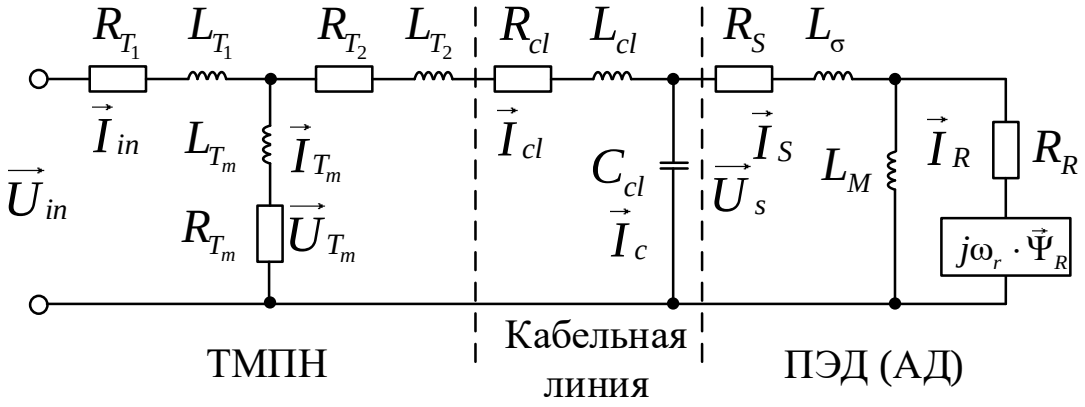

Рисунок 2.18 – Схема замещения ЭТК УЭЦН

Согласно данной схемы можно составить систему ОДУ, описывающую взаимосвязи в ЭТК УЭЦН, благодаря чему можно анализировать как установившиеся режимы работы, так и переходные процессы, возникающие при пуске, изменении нагрузки или колебаниях питающего напряжения:

$$\begin{cases} \vec{I}_{cl} = \vec{I}_{in} - \vec{I}_{T_m} \\ \vec{I}_S = \vec{I}_{cl} - \vec{I}_c \\ L_{T_1} \dfrac{d\vec{I}_{in}}{dt} = \vec{U}_{in} - \vec{U}_{T_m} - \vec{I}_{in} R_{T_1} \\ L_{T_m} \dfrac{d\vec{I}_{T_m}}{dt} = \vec{U}_{T_m} - \vec{I}_{T_m} R_{T_m} \\ L' \dfrac{d\vec{I}_{cl}}{dt} = \vec{U}_S - \vec{I}_{cl} R' \\ C \dfrac{d\vec{U}_S}{dt} = \vec{I}_c \\ \dfrac{d\vec{\Psi}_S}{dt} = \vec{U}_S - \vec{I}_S R_S \\ \dfrac{d\vec{\Psi}_R}{dt} = -R_R \vec{I}_R + j\omega_r \cdot \vec{\Psi}_R \end{cases}, \qquad (2.31)$$

где $L' = L_{T_2} + L_{cl}$, $R' = R_{T_2} + R_{cl}$.

2.3 Математические и имитационные модели гидродинамической системы установки электроцентробежного насоса

2.3.1 Модель электроцентробежного насоса

ЭЦН является основной часть УЭЦН что делает его цифровое представление неотъемлемой составляющей комплексной модели всей системы. Имитационная модель ЭЦН, как элемента ГМС УЭЦН, описывается системой из трех уравнений, в которую входят степенные полиномы мощности, напора и КПД [81]. Полиномиальные зависимости мощности, напора и КПД образуют взаимосвязанную систему, где изменение одного параметра влияет на другие. Это позволяет моделировать реальные процессы, происходящие в насосе при откачке нефтяной жидкости. В модели ЭЦН также учитывается количество ступеней, на которых работает насос [82]:

$$\begin{cases} P(q) = N \cdot \left(c_{P0} + c_{P1} q + c_{P2} q^2 + \ldots + c_{Pn} q^n \right) \\ H(q) = N \cdot \left(c_{H0} + c_{H1} q + c_{H2} q^2 + \ldots + c_{Hm} q^m \right), \\ \eta(q) = N \cdot \left(c_{\eta 0} + c_{\eta 1} q + c_{\eta 2} q^2 + \ldots + c_{\eta k} q^k \right) \end{cases} \quad (2.32)$$

где $P(q)$ – полином мощности, $H(q)$ – полином напора, $\eta(q)$ – полином КПД, N – количество ступеней насоса, q – производительность насоса, n, m, k – степени соответствующих полиномов.

Математическая модель ЭЦН была получена аппроксимацией степенными полиномами каталожных характеристик насоса. Моделирование центробежного насоса через аппроксимацию заводских характеристик представляет возможность сохранения физической точности и обеспечения практической применимости. Такой подход позволяет обойти ограничения, возникающие при попытке строгого математического описания сложных гидродинамических процессов внутри многоступенчатого насоса. Работа ЭЦН – это турбулентные течения, кавитационные явления и взаимовлияние ступеней, которые крайне сложно описать аналитически. Полиномиальная модель, построенная на основе каталожных данных, содержит информацию, которую производитель смог получить экспериментальным путем в ходе

испытаний оборудования. Модель не только механически повторяет заводские графики, но и воспроизводит физические закономерности работы ЭЦН. Степенные полиномы подобраны таким образом, чтобы сохранять корректные соотношения между параметрами во всем рабочем диапазоне. Данная методика позволяет учитывать изменение количества активных ступеней, так как ступенчатая конструкция является особенностью ЭЦН. Как уже отмечалось, функциональная форма зависимостей остается неизменной независимо от количества рабочих ступеней насоса, что делает наиболее практичным подходом использование характеристик одиночной ступени в качестве базового элемента. Такой метод обладает универсальностью – для получения полных характеристик многоступенчатого агрегата достаточно масштабировать восстановленные зависимости, умножив их на фактическое число ступеней в эксплуатации. Этот принцип основан на физической природе работы центробежного насоса, где каждая последующая ступень добавляет пропорциональный вклад в общие параметры, сохраняя при этом идентичную форму характеристик. Подобный подход существенно упрощает процесс моделирования, позволяя создать гибкую систему расчетов, адаптируемую под различные конфигурации оборудования. Достаточно один раз определить характеристики одной ступени, чтобы затем прогнозировать поведение насоса с любым количеством рабочих элементов.

Реализация модели ЭЦН позволяет воспроизводить реальную механическую нагрузку, действующую на вал ПЭД. Это важно для корректного моделирования работы всей системы, поскольку характер нагрузки существенно отличается от простого статического момента – момент динамически изменяется в зависимости от режима работы насоса, характеристик перекачиваемой жидкости и других факторов. Модель позволяет увидеть, как пусковые процессы, изменение частоты вращения или колебания подачи влияют на механические напряжения в приводе. При этом учитывается не просто усредненное значение момента сопротивления, а его динамические колебания, вызванные особенностями течения жидкости через

рабочие колеса и направляющие аппараты. Такой подход дает возможность исследовать переходные процессы в электроприводе с учетом реального поведения насосного агрегата. Точное моделирование нагрузки на вал важно для оптимизации алгоритмов косвенной оценки и управления УЭЦН.

2.3.2 Модель притока нефтяной жидкости к забою скважины

Для полноты разрабатываемой модели и обеспечения большей ее точности существует необходимость учета в модели процессов, происходящих внутри скважины.

Реальный технологический процесс добычи нефти требует фиксации таких параметров скважины как динамический уровень, затрубное и буферное давление [83]. Поэтому комплексная модель УЭЦН должна включать в себя не только цифровые модели ЭТК, системы управления ПЭД и ЭЦН, но и систему виртуального дебита и оценку других электротехнических и технологических параметров УЭЦН. Комплексная модель, в состав которой входит и модель подземной части УЭЦН, позволит повысить качество программной реализации и сократить сроки внедрения системы за счет обеспечения большей точности. Главная задача модели притока жидкости – это обеспечение правильности результатов моделирования нагрузочного момента на валу ПЭД.

При анализе заполнения затрубного пространства скважины в условиях, когда динамический уровень жидкости не совпадает со статическим, можно вывести параметр, показывающий разницу между уровнями [84, 85]. Зная эту величину, можно описать приток жидкости в скважину через зависимость, с учетом коэффициента, отражающего способность пласта компенсировать изменения уровня. Физический смысл этого коэффициента заключается в том, что данный коэффициент показывает, насколько интенсивно происходит наполнение скважины жидкостью при отклонении уровня от статического состояния.

Гидродинамическое равновесие в скважине формируется за счет взаимодействия двух противоположных потоков – поступающего из пласта и

откачиваемого насосом. Основным параметром, определяющим динамику этого процесса, становится площадь затрубного пространства, которая выступает гидравлическим буфером. Чем больше это сечение, тем медленнее изменяется уровень жидкости при одинаковой разнице между притоком и отбором. Данная геометрическая характеристика становится связующим звеном между объемными расходами и скоростью перемещения границы раздела фаз в стволе скважины. Кольцевое пространство выполняет функцию естественного аккумулятора, сглаживающего колебания дебита. Когда приток превышает отбор, избыточный объем распределяется по всему сечению, вызывая постепенный подъем уровня [86, 87]. При обратной ситуации – снижение уровня происходит тем медленнее, чем больше площадь, доступная для движения жидкости. Это соотношение вытекает из условий сохранения массы и учитывает геометрические особенности конкретной скважины. В результате можно вывести передаточную функцию, которая устанавливает связь между колебаниями уровня жидкости и объемом ее отбора, что необходимо для анализа динамических процессов в скважине. Математическая модель притока нефтяной жидкости к забою скважины представлена апериодическим звеном первого порядка:

$$\frac{H}{Q} = \frac{1}{F \cdot p + K\rho g}, \tag{2.33}$$

где H – уровень жидкости в затрубном пространстве, Q – величина оттока жидкости из скважины, F – площадь сечения кольцевого пространства между обсадной колонной и насосными трубами, K – коэффициент, характеризующий приток жидкости в скважину, ρ – плотность нефтяной жидкости, g – ускорение свободного падения.

Выводы по главе 2

1. Проведена декомпозиция УЭЦН на две составляющие – ЭТК УЭЦН и ГМС УЭЦН, что предоставляет возможность более детально проанализировать процессы, происходящие в нефтедобывающей установке при моделировании различных режимов работы УЭЦН.

2. Представлены математические и имитационные модели ЭТК УЭЦН: модель станции управления с частотным преобразователем, включающую модель АИН и алгоритм формирования векторной ШИМ; модель трехфазного масляного трансформатора для погружных насосов, представленную Т-образной схемой замещения трансформатора; модель погружной кабельной линии, представленную последовательным соединением активного сопротивления и индуктивности с подключенной в параллель емкостью; модель ПЭД, описанная обратной Г-образной схемой замещения, а также модель векторной системы управления ПЭД с контурами регулирования скорости и тока, наблюдателем потокосцепления ротора и учитывающей специфику косвенной оценки электротехнических и технологических параметров УЭЦН.

3. Представлены математические и имитационные модели ГМС УЭЦН: модель ЭЦН, математическое представление которой реализовано в виде системы из полиномов мощности, напора и КПД; модель притока нефтяной жидкости к забою скважины, представленную в виде апериодического звена первого порядка.

3 МЕТОД КОСВЕННОЙ ОЦЕНКИ И АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИМИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

3.1 Синтез сигма-точечного фильтра Калмана

По результатам анализа методов косвенной оценки переменных состояния технологического процесса добычи нефти с использованием УЭЦН было выявлено, что наиболее предпочтительным является использование наблюдателя состояния на основе фильтра Калмана. Среди рассмотренных фильтров Калмана – линейного, расширенного и сигма-точечного, для решаемой задачи оценки переменных состояния УЭЦН, оптимальным вариантом является сигма-точечный фильтр Калмана.

Особенность сигма-точечного фильтра Калмана заключается в его способности точно работать с существенно нелинейными динамическими системами [88, 89], каковой и является УЭЦН. В отличие от линейной версии, данный фильтр не требует аппроксимации исходных уравнений, а по сравнению с расширенным фильтром демонстрирует более высокую устойчивость к погрешностям и шумам измерений, что подходит для погружных насосных установок, где точность первичных датчиков часто ограничена, а сами измеряемые параметры подвержены значительным колебаниям [90].

Выбор именно этой модификации фильтра обусловлен его оптимальным сочетанием вычислительной эффективности и точности оценок. Алгоритм успешно справляется с характерными для УЭЦН нелинейностями, такими как изменение характеристик насоса при различных частотах вращения или нестационарность притока жидкости. При этом рассматриваемый алгоритм требует разумных вычислительных ресурсов, что позволяет реализовать его в системах управления с современными микропроцессорными устройствами, работающими в реальном времени [91, 92].

Применение сигма-точечного фильтра Калмана открывает новые возможности для создания интеллектуальных систем косвенной оценки и управления нефтедобывающими установками, позволяя на основе ограниченного набора измеряемых параметров получать достоверную информацию о текущем состоянии всего технологического процесса [93, 94]. Это особенно ценно для условий, когда прямое измерение ключевых параметров затруднено или экономически нецелесообразно.

3.1.1 Синтез сигма-точечного фильтра Калмана применительно к погружному электродвигателю

Сигма-точечный фильтр Калмана использует систему стохастических дифференциальных уравнений первого порядка и множество дискретных измерений, которые описываются следующими уравнениями:

$$\begin{cases} \dfrac{d}{dt}\mathbf{x}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t; \boldsymbol{\beta}) + \mathbf{w}_d(t) \\ \mathbf{z}_k = \mathbf{h}(\mathbf{x}(t_k)) + \mathbf{n}_k \end{cases}, \tag{3.1}$$

где $\mathbf{x}$ – вектор состояния системы, $\mathbf{u}$ – вектор управляющих воздействий, $\mathbf{z}_k$ – вектор измерений на k-й итерации, $\boldsymbol{\beta}$ – вектор параметров системы, $\mathbf{w}_d$ – вектор белых гауссовых шумов состояния с нулевым математическим ожиданием; $\mathbf{n}_k$ – вектор белых гауссовых шумов измерений k-й итерации с нулевым математическим ожиданием.

В разработанной системе косвенной оценки электротехнических и технологических параметров размерности векторов состояния системы, управляющих воздействий и измерений будут следующими:

$$\mathbf{x} \in \mathbb{R}^8;\ \mathbf{z}_k \in \mathbb{R}^3;\ \mathbf{u} \in \mathbb{R}^2. \tag{3.2}$$

Вектор состояния системы состоит из токов статора ПЭД в системе координат αβ0 I_{S_α} и I_{S_β}, потокосцеплений статора ПЭД в системе координат αβ0 Ψ_{S_α} и Ψ_{S_β}, угловой скорости вращения ПЭД ω, активного сопротивления кабельной линии R_{cl}, момента нагрузки ПЭД T_L и псевдоконстанты, описывающей динамику нагрузки c_p:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} I_{S\alpha} & I_{S\beta} & \Psi_{S\alpha} & \Psi_{S\beta} & \omega & R_{cl} & T_L & c_p \end{bmatrix}. \quad (3.3)$$

Вектор управляющих воздействий состоит из напряжений статора ПЭД в системе координат αβ0 U_{S_α} иU_{S_β} :

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} U_{S\alpha} & U_{S\beta} \end{bmatrix}. \quad (3.4)$$

Вектор измерений состоит из токов в системе координат *abc*, являющихся показаниями датчиков I_a, I_b и I_c:

$$\mathbf{z}_k = \begin{bmatrix} I_a & I_b & I_c \end{bmatrix}. \quad (3.5)$$

В разработанной комплексной модели УЭЦН, ПЭД, представленный асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором, описывается через обратную Г-образную схему замещения. В системе ОДУ модель асинхронного двигателя была представлена только с использованием переменных статора, что оказывает положительное влияние на производительность сигма-точечного фильтра Калмана и обеспечивает точность шага интегрирования, что важно при разработке систем реального времени. Переход от потокосцеплений ротора к потокосцеплениям статора осуществляется с помощью следующего выражения:

$$\vec{\Psi}_R = \vec{\Psi}_S - L_\sigma \cdot \vec{I}_S. \quad (3.6)$$

Подстановка выражения (3.6) в уравнение равновесия ЭДС для Г-образной схемы замещения АД приводит к ОДУ первого порядка для тока статора в форме пространственного вектора без явного использования потокосцеплений ротора:

$$L_\sigma \frac{d\vec{I}_S}{dt} = \vec{U}_S - (R_S + R_R + j\omega_r \cdot L_\sigma - \frac{R_R \cdot L_\sigma}{L_M}) \cdot \vec{I}_S + (\frac{R_R}{L_M} - j\omega_r) \cdot \vec{\Psi}_S. \quad (3.7)$$

Разложение полученного выражения на компоненты αβ приводит к двум дифференциальным уравнениям для сигма-точечного фильтра Калмана.

Потокосцепления статора описываются уравнениями равновесия статора с одной модификацией в них. Поскольку падение напряжения возникает не только на обмотке статора, но и на всей длине погружной кабельной линии, к

сопротивлению статора необходимо добавить активное сопротивление погружной кабельной линии.

$$\frac{d\vec{\Psi}_S}{dt} = \vec{U}_S - (R_S + R_{cl}) \cdot \vec{I}_S. \tag{3.8}$$

Активное сопротивление кабельной линии также будет являться состоянием системы, описываемое дифференциальным уравнением, из которого следует, что активное сопротивление кабельной линии не меняется со временем:

$$\frac{dR_{cl}}{dt} = 0. \tag{3.9}$$

Завершающим этапом описания ПЭД, представленного АД, является описание механической динамики двигателя. Уравнение (2.19) устанавливает взаимосвязь между тремя основными механическими параметрами электродвигателя – угловой скоростью вращения вала ПЭД, электромагнитным моментом ПЭД и моментом нагрузки на вал ПЭД:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{3z_p}{2J} \cdot \left(\Psi_{S\alpha} I_{S\beta} - \Psi_{S\beta} I_{S\alpha} \right) - \frac{C}{J} \cdot \omega - \frac{T_L}{J}. \tag{3.10}$$

Момент нагрузки напрямую зависит от выражения тормозной мощности *BHP*, которое представляет собой механическую мощность, необходимую для привода насоса, и является произведением электромагнитного момента и угловой механической скорости ротора. Каталожные характеристики электроцентробежных насосов описывают напор, мощность и КПД (соотношение механической и гидравлической мощности) и представляют собой семейство кривых. Для описания этих характеристик в функциональной форме осуществляется полиномиальная интерполяция. Используя законы аффинности и полиномиальную интерполяцию между точками, взятыми из каталога, была получена функция следующего вида:

$$BHP(\omega, q_{op}) = \sum_{n=0}^{N} \left[a_n \cdot \left(q_{op} \frac{\omega_{ref}}{\omega} \right)^N \right] \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ref}} \right)^3, \tag{3.11}$$

где a_n – полиномиальный коэффициент, q_{op} – производительность насоса в рабочей точке.

Разделив эту функцию на механическую скорость ротора, было получено прямое выражение для описания крутящего момента нагрузки в диапазоне рабочих скоростей ПЭД, за исключением режима остановки УЭЦН:

$$T_L\left(\omega_r\right) = k_0 + k_1\omega_r + k_2\omega_r^2. \tag{3.12}$$

Выражение (3.12) описывает нагрузочный момент насоса в диапазоне значений рабочих угловых скоростей, за исключением режима останова УЭЦН. Расхождение расчетных значений момента нагрузки зависит от точности полинома *BHP*, полученного либо на основе каталожных характеристик ЭЦН, либо посредством интерполяции по набору тестовых данных.

Коэффициенты k_1 и k_2 определяют значение момента нагрузки в зависимости от текущего значения угловой скорости, поэтому это выражение можно использовать для описания переходных процессов в нагрузке. Основываясь на рассуждении о пропорциональной зависимости между моментом нагрузки и скоростью изменения угловой скорости ПЭД, а также пренебрегая динамикой притока нефтяной жидкости, взяв производную по времени, было выведено следующее выражение:

$$\frac{dT_L}{dt} = \frac{dT_L}{d\omega_r}\frac{d\omega_r}{dt} = \left(k_1 + 2k_2\omega_r\right)\frac{d\omega_r}{dt}. \tag{3.13}$$

Таким образом, пропорциональная связь скоростей изменения определяется с помощью аффинной функции. При достижении установившегося значения константа пропорциональности сходится к определенному значению, с учетом этого можно сделать аппроксимацию нулевого порядка и рассматривать эту переменную как псевдоконстанту c_p, которую затем можно включить в систему ОДУ для сигма-точечного фильтра Калмана. С учетом сделанных допущений система нелинейных ОДУ,

используемая на шаге прогнозирования сигма-точечным фильтром Калмана, примет следующий вид:

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} I_{S\alpha} \\ I_{S\beta} \\ \Psi_{S\alpha} \\ \Psi_{S\beta} \\ \omega \\ R_{cl} \\ T_L \\ c_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{R_R}{L_M} - \frac{R_S + R_{cl} + R_R}{L_\sigma}\right)\cdot I_{S\alpha} - z_p \cdot \omega \cdot I_{S\beta} + \frac{R_R \cdot \Psi_{S\alpha}}{L_M \cdot L_\sigma} + \\ \frac{z_p}{L_\sigma}\cdot\omega\cdot\Psi_{S\beta} + \frac{U_{S\alpha}}{L_\sigma} \\ z_p \cdot \omega \cdot I_{S\alpha} + \left(\frac{R_R}{L_M} - \frac{R_S + R_{cl} + R_R}{L_\sigma}\right)\cdot I_{S\beta} - \frac{z_p}{L_\sigma}\cdot\omega\cdot\Psi_{S\alpha} + \\ \frac{R_R \cdot \Psi_{S\beta}}{L_M \cdot L_\sigma} + \frac{U_{S\beta}}{L_\sigma} \\ -\left(R_S + R_{cl}\right)\cdot I_{S\alpha} + U_{S\alpha} \\ -\left(R_S + R_{cl}\right)\cdot I_{S\beta} + U_{S\beta} \\ \frac{3z_p}{2J}\cdot\left(\Psi_{S\alpha} I_{S\beta} - \Psi_{S\beta} I_{S\alpha}\right) - \frac{C}{J}\cdot\omega - \frac{T_L}{J} \\ 0 \\ c_p\left(\frac{3z_p}{2J}\cdot\left(\Psi_{S\alpha} I_{S\beta} - \Psi_{S\beta} I_{S\alpha}\right) - \frac{C}{J}\cdot\omega - \frac{T_L}{J}\right) \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3.14)$$

3.1.2 Математический аппарат сигма-точечного преобразования

Сигма-точечное преобразование позволяет вычислять среднее и ковариацию сигма-точек, преобразованных нелинейным векторным полем. Идея алгоритма заключается в передаче набора сигма-точек, являющихся случайной величиной, имеющей нормальное распределение, через нелинейную функцию, а затем, используя сигма-точечное преобразование, получить на выходе средневзвешенное значение и ковариацию, которые характеризуют новую априорную оценку системы.

Существует множество алгоритмов реализации сигма-точечного преобразования, которые определяют количество сигма-точек, как извлечь сигма-точки из гауссова нормального распределения и как как оценить среднее значение и ковариацию полученного преобразованного набора точек.

В исследовании рассматривается общее сигма-точечное преобразование, которое первоначально было выведено *Rudolph van der Merwe* [95] и с тех пор используется во многих как научных, так и производственных решениях. Уравнения, определяющие сигма-точки для общего сигма-точечного преобразования имеют следующий вид:

$$\boldsymbol{\chi}_{\mathbf{i}} = \begin{cases} \hat{\mathbf{x}}_k, & i = 0 \\ \hat{\mathbf{x}}_k + [\sqrt{(n+\lambda)\mathbf{P}_{x_k}}]_i, & i = 1,...,n \\ \hat{\mathbf{x}}_k - [\sqrt{(n+\lambda)\mathbf{P}_{x_k}}]_{i-n}, & i = n+1,...,2n \end{cases} \tag{3.15}$$

где $n = 8$, согласно выведенной системе уравнений (3.14), нижние индексы i^{th} и $(i - n)^{th}$ указывают соответствующий столбец матрицы подкоренного выражения, λ – параметр, который определяет разброс сигма-точек вокруг средней оценки $\hat{\mathbf{x}}_k$. Параметр λ определяется следующим образом:

$$\lambda = \alpha^2(n - \kappa) - n, \tag{3.16}$$

где α и κ – первичный и вторичный параметры масштабирования, соответственно.

Каждая точка имеет два весовых коэффициента, которые используются для расчета среднего значения и ковариации, нулевая сигма-точка имеет разные веса для расчета среднего и ковариации, остальные точки имеют одинаковые веса для обоих статистических моментов:

$$w_0^m = \frac{\lambda}{n+\lambda}, \tag{3.17}$$

$$w_0^c = \frac{\lambda}{n+\lambda} + (1 - \alpha^2 + \beta), \tag{3.18}$$

$$w_i^m = w_i^c = \frac{1}{2(n+\lambda)}, \tag{3.19}$$

где w_0^m – весовой коэффициент нулевой сигма-точки для расчета среднего значения, w_0^c – весовой коэффициент нулевой сигма-точки для расчета ковариации, w_i^m и w_i^c – весовые коэффициенты не нулевых сигма-точке для

расчета среднего значения и ковариации, β – параметр, оценивающий значимость учета априорных знаний о среднем распределении **x**.

Впоследствии эти весовые коэффициенты используются на шаге прогнозирования и коррекции сигма-точечного фильтра Калмана:

$$\begin{cases} \mathcal{Y} = \mathbf{f}(\boldsymbol{\chi}) \\ \hat{\mathbf{x}}_k^- = \sum_{i=0}^{2n} w_i^m \mathcal{Y}_i \\ \mathbf{P}_{x_k}^- = \sum_{i=0}^{2n} w_i^c (\mathcal{Y}_i - \hat{\mathbf{x}}_k^-)(\mathcal{Y}_i - \hat{\mathbf{x}}_k^-)^T + \mathbf{Q} \end{cases}, \tag{3.20}$$

где $\boldsymbol{\chi}$ – множество сигма-точек, $\mathcal{Y}$ – преобразованное множество сигма-точек, **P** – ковариационная матрица состояния, **Q** – ковариационная матрица процесса.

Чтобы получить преобразованное множество сигма-точек, каждую из предыдущих сигма-точек необходимо пропустить через схему интегрирования Рунге-Кутты, которая интегрирует описанные ранее уравнения (3.14).

$$\begin{cases} \mathcal{Z} = \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_k^-) \\ \boldsymbol{\mu}_z = \sum_{i=0}^{2n} w_i^m \mathcal{Z} \\ \mathbf{y} = \mathbf{z} - \boldsymbol{\mu}_z \\ \mathbf{P}_z = \sum_{i=0}^{2n} w_i^c (\mathcal{Z}_i - \boldsymbol{\mu}_z)(\mathcal{Z}_i - \boldsymbol{\mu}_z)^T + \mathbf{R} \\ \mathbf{K} = \left[\sum_{i=0}^{2n} w_i^c (\mathcal{Z}_i - \hat{\mathbf{x}}_k^-)(\mathcal{Z}_i - \boldsymbol{\mu}_z)^T \right] \mathbf{P}_z^{-1} \\ \hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}\mathbf{y} \\ \mathbf{P}_{x_k} = \mathbf{P}_{x_k}^- - \mathbf{K}\mathbf{P}_z\mathbf{K}^T \end{cases}, \tag{3.21}$$

где $\mathcal{Z}$ – множество априорных состояний, преобразованное функцией измерения **h**, $\boldsymbol{\mu}_z$ – средневзвешенное значение сигма-точек, преобразованное в измерения, **z** – вектор измерений, **y** – остаток, **K** – матрица коэффициентов усиления, **R** – ковариационная матрица шума.

Для рассматриваемой системы функция измерения примет следующий вид:

$$\mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_k^-) = \mathbf{H} = \left[\begin{array}{cc|c} 1 & 0 & \\ 0 & 1 & \mathbf{0}_{2\times 6} \end{array}\right]. \tag{3.22}$$

Фактический вектор измерения состоит из трех компонентов: токов статора I_a, I_b и I_c, полученных с датчиков тока. В теории электропривода принято преобразовывать трехфазные измерения в двухфазный эквивалент, что приводит к упрощению матрицы измерений. Однако приходится учитывать шум, который вносит каждый из трех датчиков. Преобразование трехфазного шума в двухкомпонентный эквивалентный шум, осуществляемое с использованием определения неопределенности измерения, отражающей поведение шума, вносимого при измерениях:

$$\begin{aligned} VAR(T_{\alpha\beta}\mathbf{n}_k) &= \mathbb{E}\left[(T_{\alpha\beta}\mathbf{n}_k)(T_{\alpha\beta}\mathbf{n}_k)^T\right] \\ &= \mathbb{E}\left[T_{\alpha\beta}\mathbf{n}_k\mathbf{n}_k^T T_{\alpha\beta}^T\right] = T_{\alpha\beta}\mathbb{E}\left[\mathbf{n}_k\mathbf{n}_k^T\right]T_{\alpha\beta}^T, \end{aligned} \tag{3.23}$$

где $T_{\alpha\beta}$ – матрица преобразования Кларка размера 3×2.

Исходя из предположений, что измерения датчиков не коррелированы, и шум каждого из датчиков является белым гауссовым шумом с нулевым математическим ожиданием, было выведено следующее выражение для матрицы шума **R** в терминах дисперсии, характеризующее шум $\mathbf{n}_k$:

$$\mathbf{R} = T_{\alpha\beta}\begin{bmatrix} \sigma_a^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_b^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_c^2 \end{bmatrix}T_{\alpha\beta}^T, \tag{3.24}$$

где σ_a^2, σ_b^2 и σ_c^2 – дисперсия шума для каждого из датчиков.

На этапе прогнозирования и обновления фильтра Калмана используются ковариационные матрицы **Q** и **R** для параметризации системы и шума измерений. Параметры матрицы **R** определяются экспериментально в зависимости от используемых в системе датчиков тока.

Процесс расчета матрицы **Q** зависит от источника шума. В исследовании предполагается, что шум поступает в систему непосредственно из измерения

напряжения. Для асинхронного двигателя шум может быть определен, как неопределенность в генерируемых управляющих воздействиях или шум измерения, поступающий от датчиков напряжения. При этом уравнения, описывающие матрицу **Q**, имеют одинаковую форму, так как через напряжения шум определяется одинаковыми элементами в системе. Таким образом, матрица входа шума **L** принимает следующий вид:

$$\mathbf{L}=\left[\begin{array}{cccc|c} \frac{1}{L_\sigma} & 0 & 1 & 0 & \\ & & & & \mathbf{0}_{2\times 4} \\ 0 & \frac{1}{L_\sigma} & 0 & 1 & \end{array}\right]^T. \tag{3.25}$$

Такой вид матрицы **L** обусловлен тем, что в рассматриваемом случае шум исходит от датчиков напряжения и, соответственно, оказывает влияние на первые четыре фазовые переменные – $I_{S\alpha}$, $I_{S\beta}$, $\Psi_{S\alpha}$, $\Psi_{S\beta}$.

При наличии шума, поступающего в систему через матрицу **L**, система ОДУ будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{d}{dt}\mathbf{x}(t)=\mathbf{f}(\mathbf{x}(t);\boldsymbol{\beta})+\mathbf{L}\begin{bmatrix}(u_{S\alpha}+\tilde{u}_{S\alpha})\\(u_{S\beta}+\tilde{u}_{S\beta})\end{bmatrix}, \tag{3.26}$$

где $\tilde{u}_{S\alpha}$ и $\tilde{u}_{S\beta}$ – шум датчиков в системе координат αβ0.

Зная матрицу **L**, можно найти ковариационную матрицу **Q**:

$$\begin{aligned}\mathbf{Q}&=\mathbb{E}\left[(\mathbf{L}\tilde{u}_{S\alpha}\tilde{\mathbf{u}}_{\mathbf{S\alpha\beta}})(\mathbf{L}\tilde{\mathbf{u}}_{\mathbf{S\alpha\beta}})^T\right]\\&=\mathbb{E}\left[\mathbf{L}\tilde{\mathbf{u}}_{\mathbf{S\alpha\beta}}\tilde{\mathbf{u}}^T_{\mathbf{S\alpha\beta}}\mathbf{L}^T\right]=\mathbf{L}\mathbb{E}\left[\tilde{\mathbf{u}}_{\mathbf{S\alpha\beta}}\tilde{\mathbf{u}}^T_{\mathbf{S\alpha\beta}}\right]\mathbf{L}^T.\end{aligned} \tag{3.27}$$

В исследовании предполагалось, что шум измерения от отдельных датчиков напряжения независим, поэтому ожидаемое значение примет форму диагональной матрицы $\tilde{\mathbf{Q}}$ с дисперсией шума каждого датчика по диагонали:

$$\tilde{\mathbf{Q}}=\begin{bmatrix}\sigma^2_{u_{S\alpha}} & 0\\ 0 & \sigma^2_{u_{S\beta}}\end{bmatrix}, \tag{3.28}$$

где $\sigma^2_{u_{S\alpha}}$ и $\sigma^2_{u_{S\beta}}$ – дисперсия измерения шума в системе координат αβ0. Соответственно матрица **Q**, при учете дискретизации шума, примет следующий вид:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \begin{array}{cccc} \frac{\sigma^2_{u_{S\alpha}}\Delta t^2}{L_\sigma^2} & 0 & \frac{\sigma^2_{u_{S\alpha}}\Delta t^2}{L_\sigma} & 0 \\ 0 & \frac{\sigma^2_{u_{S\beta}}\Delta t^2}{L_\sigma^2} & 0 & \frac{\sigma^2_{u_{S\beta}}\Delta t^2}{L_\sigma} \\ \frac{\sigma^2_{u_{S\alpha}}\Delta t^2}{L_\sigma} & 0 & \sigma^2_{u_{S\alpha}}\Delta t^2 & 0 \\ 0 & \frac{\sigma^2_{u_{S\beta}}\Delta t^2}{L_\sigma} & 0 & \sigma^2_{u_{S\beta}}\Delta t^2 \end{array} & \mathbf{0}_{4\times4} \\ \mathbf{0}_{4\times4} & \mathbf{0}_{4\times4} \end{bmatrix}. \quad (3.29)$$

где Δt – период дискретизации системы.

Вне зависимости от источника возникновения шума (неопределенность в управляющих воздействиях или шум измерения датчиков напряжения) параметризация матицы **Q** определяется дисперсией шума, вносимого в сигнал.

Для напряжений, представленных измерениями, определение дисперсии шума сводится к эксперименту по подаче постоянного напряжения на обмотки двигателя. После чего с помощью стандартных методов статистики и анализа данных определяется дисперсия шума для каждого из датчиков. Применив к напряжениям преобразование из формулы (3.24), можно найти дисперсию шума для системы координат αβ0. Экспериментальное определение дисперсии шума для датчиков тока может быть реализовано идентичным методом.

Для напряжений, являющихся управляющими воздействиями, не существует интуитивно понятных методов определения дисперсии, поскольку данные дисперсии охватывают неопределенности моделирования. В этом случае значения дисперсии можно определять итеративно посредством серии экспериментов до тех пор, пока не будет достигнут удовлетворительный

результат оценки параметров системы. Также существуют методы, которые используют адаптивный и оптимизационный подход для настройки матрицы **Q** [96, 97]. Во многих работах, посвященных исследованию фильтра Калмана применительно к АД, использование диагональной матрицы **Q**, дает допустимые результаты [46, 47, 98].

В рассматриваемой системе выбор начальных значений для ковариационной матрицы **P** основывается на предположении, что в начальный момент времени двигатель работает в режиме холостого хода. Соответственно, диагональные элементы матрицы **P** близки к нулю.

3.2 Система виртуального дебита

При разработке системы косвенной оценки электротехнических и технологических параметров для управления УЭЦН нельзя ограничиваться наблюдением только параметров ПЭД [82]. Также необходимо оценить дебит скважины, так как этот параметр позволяет воссоздать рабочее состояние насоса и обеспечивает возможность управления с обратной связью [19, 99].

На основе проведенного анализа методов косвенной оценки переменных состояния технологического процесса добычи нефти с использованием УЭЦН было выявлено, что наиболее предпочтительным для оценки дебита является подход с использованием статистических методов анализа данных.

В исследовании использовался подход к реализации системы виртуального дебита УЭЦН на основе регрессионной модели машинного обучения. Для реализации системы виртуального дебита наиболее подходящим подходом является «обучение с учителем». Суть данного подхода заключается в том, что алгоритмы работают с таким набором данных, в котором известны как входные атрибуты (независимые переменные), так и выходное значение (зависимая переменная) [100]. Выходное значение также называется целевым. Задача алгоритма состоит в том, чтобы минимизировать ошибку обучения, то есть разницу между целевым и фактическим значением зависимой переменной. Математическое описание у такого способа будет

следующее – при наличии набора данных $\{(x_1, y_1), \ldots (x_n, y_n)\}$, состоящего из n значений, где x_i – вектор неззависимых переменных, а y_i – зависимая перемнная, алгоритм ищет функцию $g : X \to Y$, которая бы для каждой комбинации независимых переменных X находила соответствующее значение зависимой перемнной Y. Таким образом, алгоритм ищет функцию $Y = f(X)$ [101, 102].

Технологический процесс добычи нефти с использованием УЭЦН характеризуется большим количеством параметров. В задаче оценки дебита скважины целевой (зависимой) переменной будет являться дебит – $y_i = q$. Для определения параметров, оказывающих наибольшее влияние на дебит q, была построена матрица корреляции. Матрица корреляции строилась на наборе данных со скважин, эксплуатирующих УЭНЦ с насосом ЭЦН ВНН5-30. Рассматриваемый набор данных содержал 844 набора параметров УЭЦН. В каждом из наборов содержались следующие параметры: q – дебит скважины, м^3/сут; $U_{вхAB/BC/CA}$ – фазные напряжения на входе в частотный преобразователь, В; *Дисб.* $U_{вх}$ – дисбаланс входных фазных напряжений, %; $U_{выхТМПН}$ – напряжением на выходе ТМПН, В; $U_{выхПЧ}$ – напряжение на выходе частотного преобразователя, В; $I_{АВС\ ПЭД}$ – токи ПЭД, А; *Дисб.* $I_{ПЭД}$ – дисбаланс токов ПЭД, %; $cos\ \varphi$ – отношение активной мощности к полной мощности в цепи переменного тока; $P_{ПЭД}$ – активная мощность ПЭД, кВт; $S_{ПЭД}$ – полная мощность ПЭД, кВА; T_L – нагрузочный момент на валу ПЭД, Н·м; *Вибр. XY* – уровень вибрации ПЭД в горизонтальной плоскости, g; *Вибр. Z* – уровень вибрации ПЭД в вертикальной плоскости, g; ω – угловая скорость вращения вала ПЭД, рад/с; $T_{обм}$ – температура обмотки статора ПЭД, °С; $T_{вх.ЭЦН}$ – температура на входе ЭЦН, °С; $T_{ПЭД}$ – температура корпуса ПЭД, °С; ρ – плотность нефтяной жидкости, кг/м^3.

Корреляционная матрица была рассчитана с помощью коэффициента корреляции Пирсона (рисунок 3.1), являющегося мерой линейной связи между двумя переменными [103]:

$$r = \frac{\mathrm{cov}(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y}, \tag{3.30}$$

где $\mathrm{cov}(X, Y)$ – ковариация между переменными X и Y, σ_X ,σ_Y — стандартные отклонения X и Y.

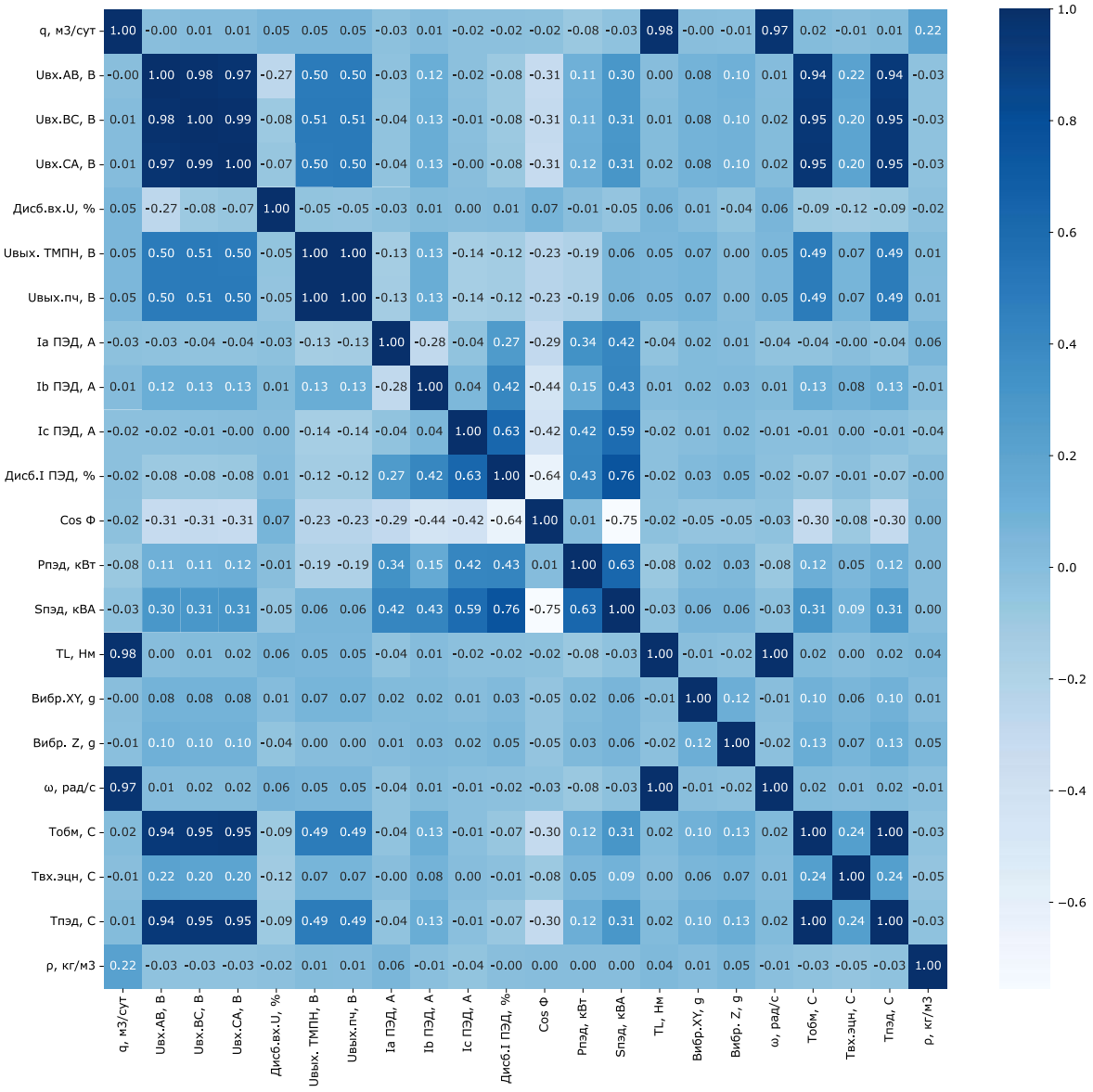

Рисунок 3.1 – Матрица корреляции параметров УЭЦН

Рассмотрим корреляционную матрицу, представленную на рисунке 3.1. На корреляционной матрице отчетливо видно, что наиболее связаны с дебитом скважины q следующие параметры – нагрузочный момент на валу ПЭД T_L и угловая скорость вращения вала ПЭД ω. Также среди других параметров выделяется связь дебита и плотности нефтяной жидкости ρ.

Таким образом, вектор входных параметров системы виртуального дебита будет содержать следующие переменные: угловая скорость вращения вала ПЭД, нагрузочный момент на валу ПЭД и плотности нефтяной жидкости. Соответственно, задача регрессионной модели сводится к аппроксимации многопараметрической функции вида:

$$q = f\left(\omega, T_L, \rho\right). \tag{3.31}$$

Рассмотрим наиболее подходящие для решения данной задачи регрессионные моедли – линейная регресся, регрессия методом *k*-ближайших соседей, регрессия опорных векторов (*support vector regression*), регрессия *random forest* («случайного леса»).

Линейная регрессия представляет собой статистический метод, устанавливающий прямолинейную зависимость между входными параметрами и целевой переменной [104]. В стандартном подходе, при наличии единственной целевой переменной и единственного входного параметра, математическая модель принимает форму уравнения прямой $y = ax + b$, где параметры определяют наклон и смещение линии относительно осей координат. Данный подход к решению задачи регрессии заключается в подборе оптимальных значений параметров таким образом, чтобы минимизировать совокупное расхождение между предсказанными и фактическими значениями целевого параметра. Критерием оптимальности выступает сумма квадратов отклонений, что обеспечивает устойчивость решения к случайным колебаниям в данных. В практических задачах, включая рассматриваемую, зачастую приходится учитывать влияние нескольких факторов одновременно, что требует перехода к множественной линейной регрессии. В этом случае математическая модель принимает форму гиперплоскости в многомерном пространстве, где каждый независимый параметр вносит свой вклад в итоговое значение целевой переменной. Коэффициенты уравнения $a_1 - a_n$ отражают степень влияния соответствующих входных параметров, а свободный член b_0 задает базовый уровень реакции:

$$y = b_0 + a_1 x_1 + a_1 x_1 + ... + a_n x_n. \quad (3.31)$$

Метод *k*-ближайших соседей для многопараметрической регрессии опирается на предположение о локальной непрерывности целевой функции в пространстве признаков [105]. Используемый методом математический аппарат определяется метрикой в *n*-мерном пространстве признаков, где каждый объект представлен вектором $x = (x_1, x_2, ..., x_n)$. Наиболее распространенная евклидова метрика вычисляет расстояние между прогнозируемым объектом *x* и каждым элементом обучающей выборки x_i как корень квадратный из суммы квадратов разностей по всем координатным осям. Однако в случае разнородных шкал признаков или специфической структуры данных могут применяться альтернативные метрики, учитывающие, например, ковариационную структуру данных. Для заданного объекта *x* алгоритм находит подмножество $N_k(x) \subseteq D$, состоящее из *k* ближайших соседей в обучающей выборке *D*, где близость определяется выбранной метрикой расстояния. Прогнозируемое значение $\hat{y}_i$ вычисляется как взвешенное среднее целевых значений y_i соседних объектов, где веса w_i обычно задаются обратно пропорциональными расстоянию $d(x, x_i)$. В простейшем случае равных весов реализуется обычное среднее арифметическое, более сложные схемы взвешивания могут использовать ядерные функции.

Метод регрессии опорных векторов для многопараметрических задач основывается на принципе нахождения оптимальной гиперплоскости в пространстве высокой размерности, минимизирующей отклонения предсказаний при сохранении общей гладкости решения [106]. Математический аппарат регрессии опорных векторов преобразует исходное пространство признаков в пространство более высокой размерности через нелинейное отображение $\varphi(x)$, где ищется гиперплоскость $f(x) = \langle w, \varphi(x) \rangle + b$, минимизирующая норму вектора весов *w* при

соблюдении условий ε-чувствительной зоны. В отличие от большинства методов регрессии, данный метод допускает отклонения предсказаний от фактических значений в пределах заданной ε-чувствительной зоны, что реализуется через ε-интенсивную функцию потерь, игнорирующую ошибки меньшие ε.

Алгоритм регрессии *random forest* использует в своей основе деревья решений и метод ансамблевого обучения [107]. Существует два типа ансамблевого обучения – бустинг и бэггинг. Бустинг – это алгоритм, суть которого заключается в том, что каждая новая модель обучается, используя информацию об ошибках, полученную на предыдущей итерации. Бэггинг – это алгоритм, позволяющий каждой модели в процессе обучения работать независимо, а затем объединяющий результаты всех моделей. Регрессия «случайного леса» использует в своей основе бэггинг. Таким образом, создаваемые алгоритмом деревья в процессе построения не взаимодействуют друг с другом. Деревья состоят из узлов и ветвей. Процесс принятия решения начинается в корневом узле. В каждом узле принимается решение о выборе той или иной ветви, исходя из условия. Так как прогноз каждого дерева по отдельности является неточным, алгоритм регрессии «случайного леса» выбирает не то решение, которое выбрало большинство деревьев, а решение, являющееся средним среди всех деревьев.

3.3 Алгоритм управления установкой электроцентробежного насоса с косвенной оценкой электротехнических и технологических параметров

В рамках исследования был разработан алгоритм работы системы косвенной оценки электротехнических и технологических параметров для управления УЭЦН представленный на рисунке 3.2. Разработанный алгоритм можно представить в виде трех основных этапов - инициализация начальных параметров; формирование управляющих воздействий; оценка параметров. Разработанный алгоритм является циклическим и многоитерационным, выполняющимся на всем протяжении работы УЭЦН – от старта до останова технологического процесса добычи нефти.

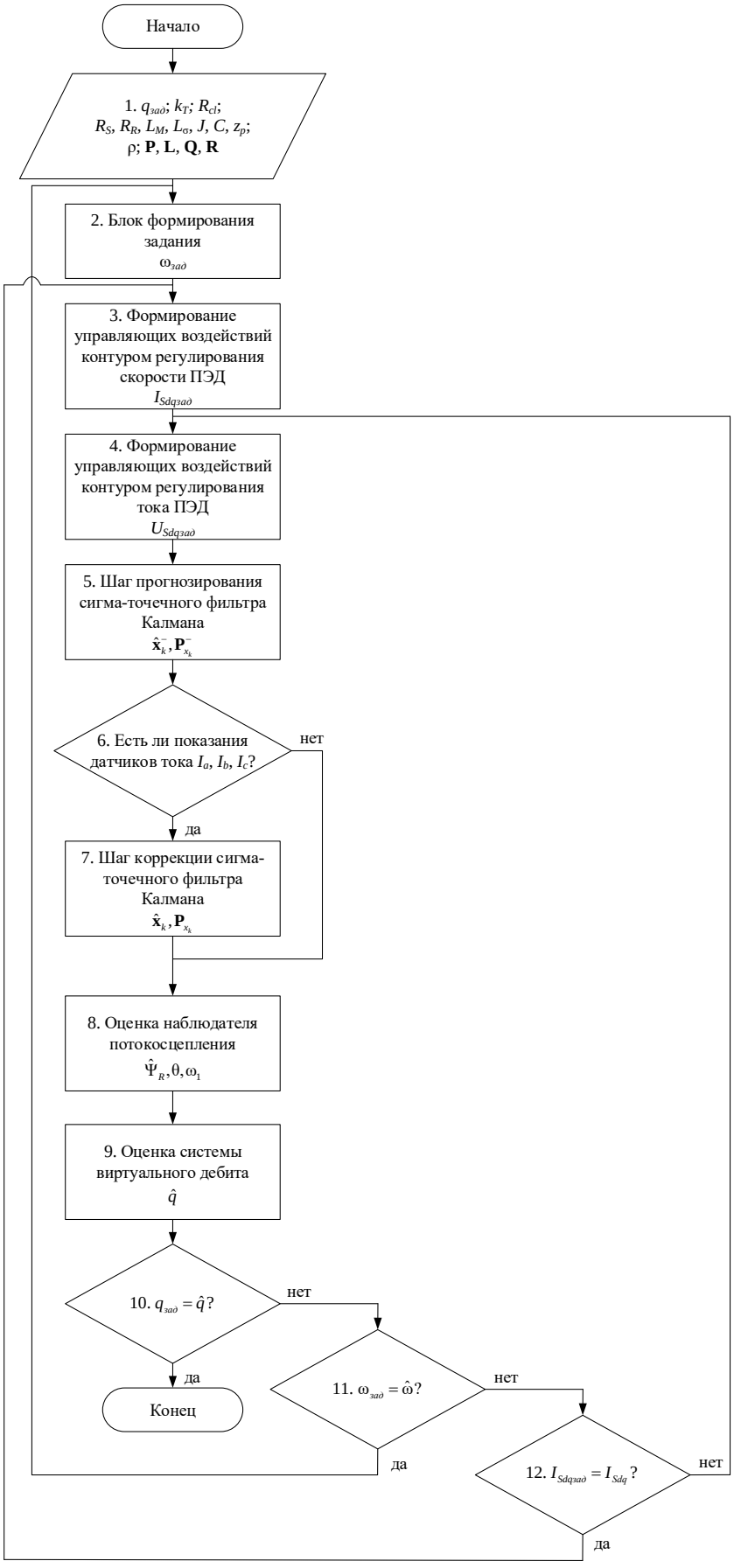

Рисунок 3.2 – Блок-схема алгоритма управления УЭЦН с косвенной оценкой электротехнических и технологических параметров

Рассмотрим работу разработанного алгоритма:

Блок 1. На этапе инициализации задаются начальные параметры системы – желаемая точка рабочей области ЭЦН (желаемый дебит) $q_{зад}$; коэффициент трансформации k_T; активное сопротивление кабельной линии R_{cl}; параметры ПЭД для обратной Г-образной схемы замещения АД R_S, R_R, L_M, L_σ, J, C, z_p; плотность нефтяной жидкости скважины; начальные параметры сигма-точечного фильтра Калмана – ковариационная матрица состояния **P**, матрица входа шума **L**, ковариационная матрица процесса **Q**, ковариационная матрица шума **R**.

Блок 2. Блок формирования задания определяет необходимую скорость ПЭД $\omega_{зад}$ для достижения заданной рабочей точки, согласно паспортным характеристикам ЭЦН.

Блок 3. Контур регулирования скорости формирует задание тока статора $I_{Sdqзад}$ во вращающейся системе координат *dq0*.

Блок 4. Контур регулирования тока формирует задание напряжения статора $U_{Sdqзад}$ во вращающейся системе координат *dq0*.

Блок 5. На шаге прогнозирования фильтра Калмана вычисляются составляющие вектора состояния системы $\hat{\mathbf{x}}_k^-$ и их ковариации $\mathbf{P}_{x_k}^-$. При реализации разработанного алгоритма на микропроцессорном устройстве шаг прогнозирования вычислялся каждую 10^{-5} с.

Блок 6. Проводится проверка наличия показания с датчиков тока, поступающих на аналого-цифровой преобразователь микропроцессорного устройства. В случае наличия показаний, выполняется шаг коррекции фильтра Калмана, при отсутствии показаний, выполняются следующие действия алгоритма.

Блок 7. На шаге коррекции фильтра Калмана вычисленные составляющие вектора состояния системы $\hat{\mathbf{x}}_k$ их ковариации $\mathbf{P}_{x_k}$ уточняются в соответствии с показаниями датчиков тока. Уточнение на шаге коррекции фильтра Калмана осуществляется каждый раз, когда приходят показания с

датчиков тока, при реализации системы на микропроцессорном устройстве, период получениях данных с датчиков тока составил примерно 10^{-3} с.

Блок 8. Оцененные фильтром Калмана проекции тока статора $\hat{I}_{S\alpha\beta}$ и потокосцепления статора $\hat{\Psi}_{S\alpha\beta}$ на оси αβ, а также угловая скорость вращения вала ПЭД используются в блоке наблюдателя потокосцепления для оценки электрического угла θ, угловой скорости вращения системы координатной системы *dq0* ω_1 и потокосцепления ротора $\hat{\Psi}_R$.

Блок 9. Оцененные фильтром Калмана нагрузочный момент на валу ПЭД $\hat{T}_L$ и угловая скорость вращения вала ПЭД $\hat{\omega}$, а также заданная на этапе инициализации плотность нефтяной жидкости ρ используются регрессионной моделью машинного обучения в системе виртуального дебита для оценки текущей производительности ЭЦН $\hat{q}$.

Блок 10. Производится сравнение заданного значения дебита (желаемой рабочей точки насоса) $q_{зад}$, с текущей оцененной производительность $\hat{q}$. Если значения сходятся, то данная итерация разработанного алгоритма считается завершенной. Если значения не сходятся, то осуществляется следующая проверка в блоке 11.

Блок 11. В случае невыполнения условия в блоке 10 производится сравнение заданной угловой скорости $\omega_{зад}$ с текущей оцененной угловой скоростью вращения вала ПЭД $\hat{\omega}$. В случае, если скорости совпадают, то выполняется переход к блоку 2 для формирования нового задания угловой скорости $\omega_{зад}$. Если же условие не выполняется, то осуществляется следующая проверка в блоке 12.

Блок 12. При несоответствии условия в блоке 11 производится сравнение заданной проекции тока статора $I_{Sdqзад}$ с текущим значением проекции тока статора I_{Sdq}, полученного путем преобразования отфильтрованных показаний с датчиков тока фильтром Калмана во вращающуюся систему координат *dq0*. Если проекции тока статора

совпадают – выполняется переход к блоку 3 с целью формирования нового задания для проекций тока статора на оси вращающейся системы координат *dq0*. Если же проекции тока статора не совпадают, то производится переход к блоку 4 для формирования нового задания проекции напряжения статора $U_{Sdqзад}$.

Выводы по главе 3

1. Реализован синтез сигма-точечного фильтра Калмана применительно к ПЭД. Выполнено математическое описание процедуры сигма-точечного преобразования с учетом специфики эксплуатируемого в технологическом процессе добычи нефти с использованием УЭЦН оборудования.

2. Определен подход к реализации системы виртуального дебита, в основе которого предложено использовать регрессионные модели машинного обучения. Проведен корреляционный анализ параметров УЭЦН, по результатам которого были выявлены параметры УЭЦН, оказывающие наибольшее влияние на дебит скважины q – нагрузочный момент на валу ПЭД T_L, угловая скорость вращения вала ПЭД ω, плотность нефтяной жидкости ρ. Рассмотрены наиболее подходящие для решения задачи многопараметрической регрессии модели машинного обучения.

3. Разработан алгоритм управления УЭЦН с косвенной оценкой электротехнических и технологических параметров. Разработанный алгоритм отличается от существующих возможностью автоматического поддержания работы УЭЦН в желаемой рабочей точки за счет применения системы виртуального дебита, сигма-точечного фильтра Калмана и системы управления ПЭД.

4 РАЗРАБОТКА ИММИТАЦИОННЫХ И ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ КОСВЕННОЙ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ УСТАНОВКОЙ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

4.1 Апробация метода и алгоритма косвенной оценки на имитационных моделях

4.1.1 Апробация цифровой комплексной модели установки электроцентробежного насоса

Разработанные математические и имитационные модели элементов ЭТК и ГМС УЭЦН были интегрированы в единую цифровую комплексную модель УЭЦН. Цифровая комплексная модель УЭЦН была реализована в программной среде *Matlab Simulink*, объединяя все основные компоненты технологического процесса и позволяя анализировать их совместную работу [19, 82]. Взаимодействие электрических и гидравлических процессов нашло свое отражение в программной реализации, где каждый элемент представлен соответствующими блоками с заданными параметрами и характеристиками. Комплексное моделирование предоставляет возможность оценивать взаимное влияние электротехнических и гидродинамических параметров, что невозможно при раздельном рассмотрении компонентов системы.

Разработанная модель учитывает особенности функционирования как отдельных узлов, так и всей системы в целом, обеспечивая возможность исследования различных режимов работы. Программная среда для моделирования *Matlab Simulink* была выбрана благодаря своей гибкости и широким возможностям для анализа динамических систем. В *Matlab Simulink* можно наглядно представить структуру системы и выстроить процесс взаимодействия между элементами рассматриваемой системы. Выбор данной среды для имитационного моделирования также обусловлен тем, что данная среда предоставляет инструменты для интеграции электротехнических и гидродинамических моделей в единую систему с помощью библиотеки

Simscape. Гибкость *Matlab Simulink* обосновывается возможностью комбинирования разных подходов к моделированию – от детализированных математических описаний до более высокоуровневых имитационных моделей технологических объектов, обеспечивая при этом необходимую точность расчетов. Также программная среда *Matlab Simulink* предоставляет возможности для моделирования нелинейных объектов и процессов, где традиционные аналитические подходы оказываются неэффективными. Кроме этого, в данной программной среде поддерживается возможность выбора метода численного интегрирования, что является важным для решаемой задачи, так как при использовании некоторых методов, разрабатываемая система становится численно неустойчивой.

Интеграция всех элементов в единую комплексную модель существенно повышает достоверность результатов и позволяет проводить испытания установки в различных рабочих условиях, что является важным при проектировании систем управления такими сложными технологическими объектами, как УЭЦН [108].

Моделируемое в комплексной цифровой модели УЭЦН оборудование соответствует оборудованию, эксплуатируемому на скважине № 55 Кукуштанского месторождения Пермского края.

Цифровая модель ЭТК УЭЦН включает следующие элементы: АИН с силовыми ключами совместно с алгоритмами векторной ШИМ, имитирующий работу частотного преобразователя, являющегося частью станции управления УЭЦН; ТМПНГ-100/10-УХЛ1 – трансформатор силовой трехфазный масляный для погружных насосов герметичного исполнения; КПБП 3х16-3,3 – кабель погружной бронированный плоский трехжильный, длина – 1,47 км; ПЭД 32-117 – асинхронный погружной электродвигатель мощностью 32 кВт. Также в блоке цифровой модели ЭТК УЭЦН были реализованы следующие элементы системы управления: контур регулирования скорости; контур регулирования тока; наблюдатель потокосцепления; сигма-точечный фильтр Калмана.

Рассмотрим подробнее параметры имитационных моделей элементов ЭТК УЭЦН в цифровой комплексной модели УЭЦН, реализованной в программной среде *Matlab Simulink*.

Для описания имитационной модели трансформатора в цифровой комплексной модели УЭЦН использовалась Т-образная схема замещения.

Таблица 4.1 – Параметры имитационной модели ТМПНГ-100/10-УХЛ, рассчитанные для Т-образной схемы замещения

$S_{ном}$, кВА	U_1, В	U_2, В	$R_{T_1} = R_{T_2}$, о.е.	$X_{T_1} = X_{T_2}$, о.е.	R_{T_m}, о.е.	X_{T_m}, о.е.
100	380	1250	0,010	0,026	344,818	53,230

Используемые обозначения в таблице 4.1:

U_1 – напряжение первичной обмотки трансформатора, U_2 – напряжение вторичной обмотки трансформатора.

Следует отметить, что используемый в имитационной модели системы управления ПЭД коэффициент трансформации был принят равным $k_T = \frac{U_2}{U_1} = 3,289$.

Имитационная модель погружной кабельной линии (марка кабеля КПБП 3х16-3,3) была реализована как последовательное соединение активного сопротивления и индуктивности с подключенной в параллель емкостью.

Таблица 4.2 – Параметры имитационной модели погружной кабельной линии КПБП 3х16-3,3

R_{cl}, Ом/км	L_{cl}, мГн/км	C_{cl}, мкФ/км	l, км
1,001	0,230	0,770	1,47

Используемые обозначения в таблице 4.2:

l – длина погружной кабельной линии.

Для описания имитационной модели ПЭД 32-117, являющегося АД с короткозамкнутым ротором, использовалась обратная Г-образная схема замещения.

Таблица 4.3 – Параметры имитационной модели ПЭД 32-117, рассчитанные для обратной Г-образной схемы замещения АД

$P_{ном}$, кВт	$U_{ном}$, В	R_S, Ом	R_R, Ом	L_M, Гн	L_σ, Гн	J, кг·м^2	z_p	C, Н·м·с
32	1000	0,6600	0,9749	0,2064	0,0093	0,1700	1	0,0007

Используемые обозначения в таблице 4.3:

$P_{ном}$ – номинальная мощность ПЭД, $U_{ном}$ – номинальное напряжение ПЭД.

Рассмотрим инициализацию начальных параметров для сигма-точечного фильтра Калмана.

Инициализация начальных параметров ковариационной матрицы состояния **P** была основана на суждении о том, что в начальный момент времени ПЭД работает в режиме холостого хода, поэтому диагональные элементы матрицы близки к 0:

$$\begin{aligned}\mathbf{P} = \operatorname{diag}\Big[& (0{,}1/3)^2\ (\text{А})^2 \quad (0{,}1/3)^2\ (\text{А})^2 \\ & (0{,}01/3)^2\ (\text{Вб})^2 \quad (0{,}01/3)^2\ (\text{Вб})^2 \\ & (0{,}01/3)^2\ (\text{рад/с})^2 \quad (0{,}5/3)^2\ (\text{Ом})^2 \\ & (0{,}01/3)^2\ (\text{Н}\cdot\text{м})^2 \quad (1/3)^2 \Big].\end{aligned} \tag{4.1}$$

Такая запись диагональных элементов ковариационной матрицы состояния **P** обусловлена тем, что элементы для заполнения матрицы были выбраны с помощью трех стандартных отклонений. Данные значения, получены из предположения, что состояние имеет вероятность 99,7 %. Последующее деление этого значения на 3 и возведение во вторую степень позволяют рассчитать дисперсию состояния. Такая форма записи является интуитивно понятной, поэтому данный подход будет использован далее.

Матрица входа шума **L** была инициализирована согласно выражению (3.25):

$$\mathbf{L} = \left[\begin{array}{cccc|c} 107,527 & 0 & 1 & 0 & \\ 0 & 107,527 & 0 & 1 & \mathbf{0}_{2\times4} \end{array}\right]^T. \qquad (4.2)$$

Ковариационная матрица процесса **Q** была вычислена согласно выражениям (3.27-3.29), опираясь на предположение о том, что шум измерения отдельных датчиков напряжения независим, соответственно, дисперсии шума в системе координат αβ0 $\sigma^2_{u_{S\alpha}}$ и $\sigma^2_{u_{S\beta}}$ были приняты равными $(1,5/3)^2$ В^2, период дискретизации $\Delta t = 10^{-5}$ с. Таким образом, ковариационная матрица процесса **Q** приняла следующий вид:

$$\mathbf{Q} = \left[\begin{array}{cccc|c} 7,23\cdot10^{-8} & 0 & 6,72\cdot10^{-10} & 0 & \\ 0 & 7,23\cdot10^{-8} & 0 & 6,72\cdot10^{-10} & \mathbf{0}_{4\times4} \\ 6,72\cdot10^{-10} & 0 & 6,25\cdot10^{-12} & 0 & \\ 0 & 6,72\cdot10^{-10} & 0 & 6,25\cdot10^{-12} & \\ \hline \multicolumn{4}{c|}{\mathbf{0}_{4\times4}} & \mathbf{0}_{4\times4} \end{array}\right]. \qquad (4.3)$$

Ковариационная матрица шума **R** определялась экспериментально:

$$\mathbf{R} = T_{\alpha\beta}\begin{bmatrix} (1,5/3)^2\ (\text{А})^2 & 0 & 0 \\ 0 & (1,5/3)^2\ (\text{А})^2 & 0 \\ 0 & 0 & (1,5/3)^2\ (\text{А})^2 \end{bmatrix} T_{\alpha\beta}^T. \qquad (4.4)$$

Реализация цифровой модели ЭТК УЭЦН в программной среде *Matlab Simulink* представлена на рисунке 4.1.

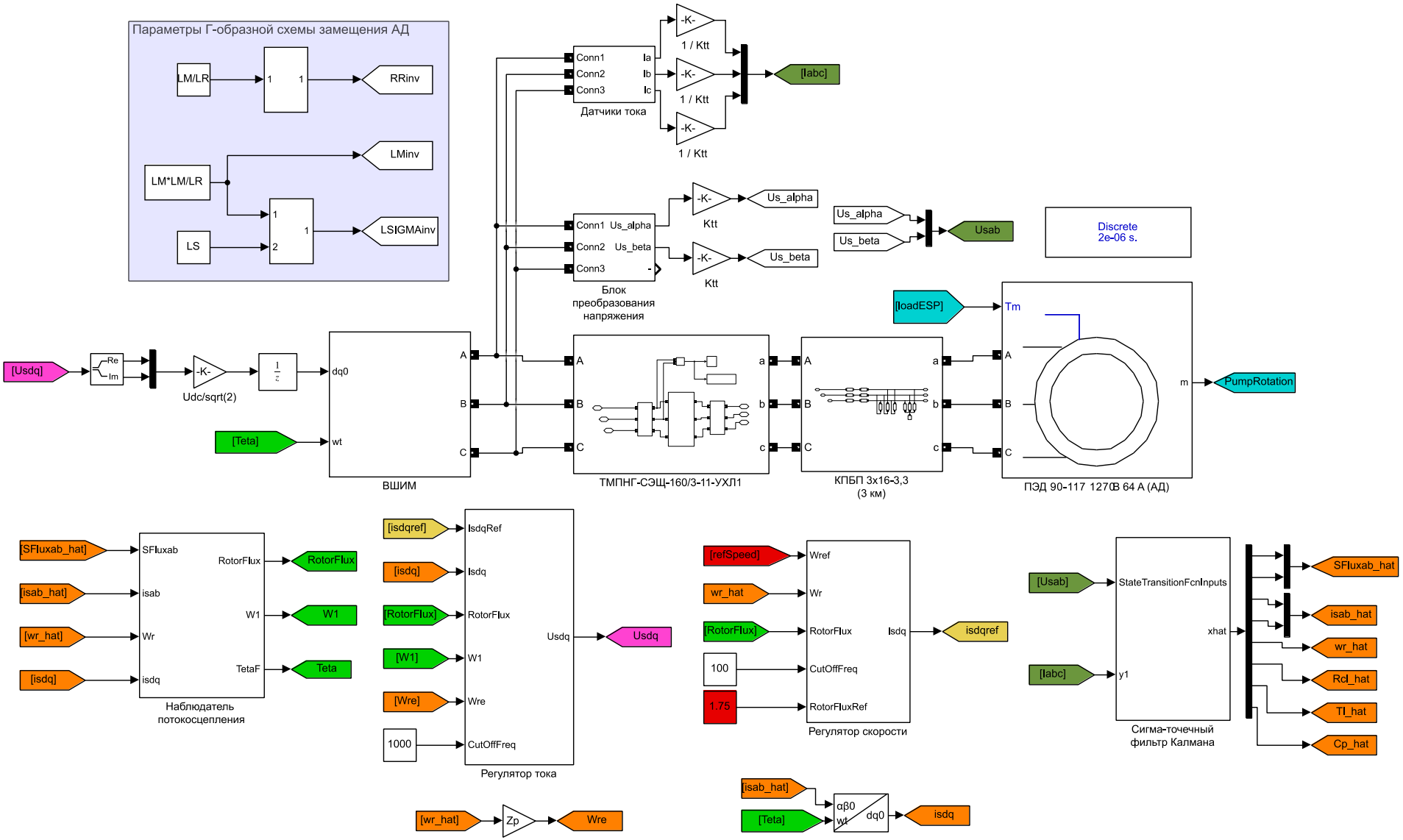

Рисунок 4.1 – Цифровая модель ЭТК УЭЦН

Цифровая модель ГМС УЭЦН включает следующие элементы: ЭЦН ВНН5-30 (электроцентробежный насос, работающий на 135 ступенях); модель нефтяной жидкости; модель притока к жидкости к забою скважины; насосно-компрессорные трубы; виртуальный дебит (рисунок 4.2).

Имитационная модель ЭЦН была построена по представленным в паспортных данных полиномам мощности, напора и КПД. Математическая модель ЭЦН ВНН5-30 была получена аппроксимацией степенными полиномами каталожных характеристик насоса:

$$\begin{cases} P(q) = N \cdot \begin{pmatrix} 31,96380 - 0,45788 \cdot q + 0,01786 \cdot q^2 + 0,00071 \cdot q^3 \\ -2,89181 \cdot 10^{-5} \cdot q^4 + 2,62443 \cdot 10^{-7} \cdot q^5 \end{pmatrix} \\ H(q) = N \cdot \begin{pmatrix} 6,17107 - 0,03825 \cdot q + 0,00410 \cdot q^2 - 0,00061 \cdot q^3 \\ +3,74231 \cdot 10^{-5} \cdot q^4 - 1,11309 \cdot 10^{-6} \cdot q^5 \\ +1,55288 \cdot 10^{-8} \cdot q^6 - 8,19364 \cdot 10^{-11} \cdot q^7 \end{pmatrix} \\ \eta(q) = N \cdot \begin{pmatrix} 0,01776 + 2,16101 \cdot q + 0,05599 \cdot q^2 - 0,00735 \cdot q^3 \\ +0,00031 \cdot q^4 - 7,76671 \cdot 10^{-6} \cdot q^5 + 9,79378 \cdot 10^{-8} \cdot q^6 \\ -4,8907 \cdot 10^{-10} \cdot q^7 \end{pmatrix} \end{cases}, \quad (4.5)$$

Передаточная функция апериодического звена первого порядка, описывающая модель притока к жидкости к забою скважины приняла следующий вид:

$$\frac{H}{Q} = \frac{1}{0,007 \cdot p + 27,9}, \quad (4.6)$$

Имитационные модели насосно-компрессорных труб и модель нефтяной жидкости были реализованы с помощью блоков библиотеки *Simscape*. Плотность нефтяной жидкости для рассматриваемой скважины – $\rho \approx 870$ кг / м^3.

Реализация цифровой модели ГМС УЭЦН в программной среде *Matlab Simulink* представлена на рисунке 4.2.

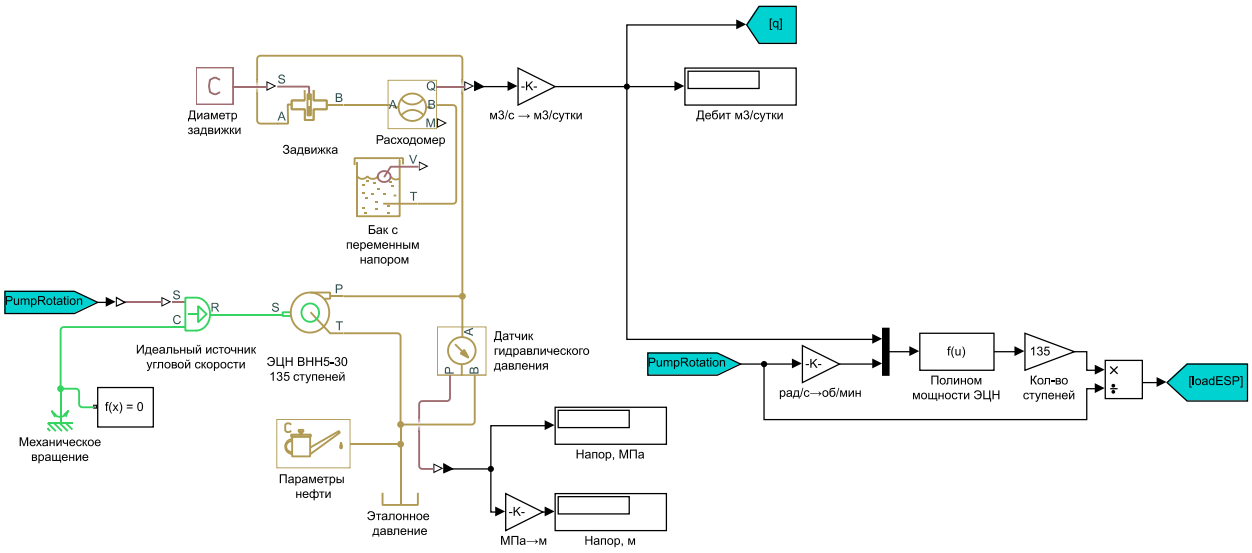

Рисунок 4.2 – Цифровая модель ГМС УЭЦН

Связь между цифровыми моделями подсистем ЭТК и ГМС УЭЦН осуществлялась через скорость вращения вала ПЭД и нагрузку, создаваемую ЭЦН при откачке нефтяной продукции из скважины. Скорость вращения вала ПЭД в об/мин передавалась на блок «Идеальный источник угловой скорости», затем на блок «Электроцентробежный насос», с заданными в нем характеристическими полиномами ЭЦН ВНН5-30, работающего на 135 ступенях. Раскручиваясь, насос поднимал нефтяную жидкость, и, соответственно, создавал нагрузку, которая поступала на вход нагрузки блока имитационной модели ПЭД.

Верификация цифровой модели осуществлялась посредством сравнения результатов моделирования с данными, полученными со скважины. Оценка адекватности моделирования производилась с помощью метрики относительной погрешности:

$$\delta = \frac{|x_\partial - x|}{x} \cdot 100\%, \qquad (4.7)$$

где δ – относительная погрешность, x_∂ – действительное значение физической величины, x – измеренное значение физической величины.

Использование относительной погрешности при верификации цифровой модели обусловлено необходимостью получить содержательную оценку

расхождений, которая была бы информативна вне зависимости от абсолютных значений измеряемых параметров. В рассматриваемом технологическом процессе, электротехнические и технологические параметры могут варьироваться на несколько порядков – от единиц до тысяч единиц измерения, соответственно, абсолютная ошибка теряет свою информативность. Относительный подход позволяет одинаково интерпретировать точность модели как для небольших, так и для значительных величин, выражая несоответствие в универсальных процентах отклонения.

Результаты верификации цифровой комплексной УЭЦН модели представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты верификации цифровой комплексной модели УЭЦН

	f = 50 Гц		f = 55 Гц		f = 60 Гц	
	q, м^3/сут	T_L, Н·м	q, м^3/сут	T_L, Н·м	q, м^3/сут	T_L, Н·м
Результаты измерений	34,2	16,7	37,6	20,0	40,9	24,1
Результаты моделирования	35,49	16,99	38,92	20,31	42,27	24,52
Относительная погрешность, %	3,77	1,73	3,45	1,55	3,34	1,74

На основании результатов, представленных в таблице 4.4, можно сделать вывод, что полученные результаты моделирования являются близкими к результатам измерений, полученных со скважины. Возможная причина возникновения отклонений в цифровой комплексной модели, заключается в принятых в процессе разработки модели допущениях, а также в некоторых неточностях заданных в модели параметров (так как параметры элементов ЭТК и ГМС УЭЦН могут изменяться в процессе эксплуатации, что учитывалось не во всех рассматриваемых моделях подсистем УЭЦН).

4.1.2 Апробация системы виртуального дебита

Разработка эффективных моделей машинного обучения неизбежно сталкивается с необходимостью обработки значительных массивов информации. Чем сложнее решаемая задача, тем более обширная и репрезентативная выборка требуется для выявления устойчивых закономерностей и построения адекватных прогностических алгоритмов [109]. Объемы необходимых данных возрастают экспоненциально с увеличением сложности модели – простые линейные зависимости могут выявляться на относительно небольших наборах, тогда как глубокие нейронные сети требуют огромной выборки для достижения удовлетворительной точности [110, 111].

Качество и разнообразие обучающей выборки зачастую оказывают большее влияние на конечный результат, чем сама архитектура модели. Так как данных, полученных со скважины, недостаточно для обучения моделей – часть данных из набора была сгенерирована с помощью верифицированной комплексной модели УЭЦН.

Для автоматического генерирования большого количества данных в процессе моделирования, была реализована функция изменения параметров цифровой комплексной модели УЭЦН в программной среде *Matlab Simulink*. Для генерирования адекватных технологическому процессу данных, диапазон изменения параметров модели был ограничен. Таким образом, изменение скорости ПЭД происходило в диапазоне от 35 до 80 Гц (от 219 до 502 рад/с), плотность нефтяной жидкости изменялась в диапазоне от 730 до 1040 кг/м^3. Разработанная функция генерации данных работает следующим образом – через 0,1 с после достижения системой устойчивого состояния, происходит запись текущих параметров УЭЦН, после чего происходит изменение параметров на новые случайные из заданного диапазона. Таким образом было сгенерировано 1200 наборов параметров к 844, полученным со скважин, эксплуатирующих насос ЭЦН ВНН5-30. Для обучения регрессионных моделей использовалось 80 % набора данных, оставшиеся 20 %

использовались в качестве тестовых значений для проверки результатов работы системы виртуального дебита. Пример данных для обучения регрессионных моделей машинного обучения представлен в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Часть набора данных, используемых при обучении регрессионных моделей машинного обучения

Входные параметры			Целевой параметр
ω, рад/с	T_L, Н·м	ρ, кг/м³	q, м³/сут
Данные со скважин, эксплуатирующих насос ЭЦН ВНН5-30			
452,40	33,88	861	47,15
408,41	28,22	1004	44,89
333,01	18,45	895	35,14
464,97	35,38	799	47,12
…	…	…	…
Данные, сгенерированные цифровой комплексной моделью УЭЦН с моделью насоса ЭЦН ВНН5-30			
377,00	22,96	740	37,01
477,52	37,69	851	49,58
358,14	21,26	874	37,44
408,41	27,30	810	41,39
333,01	18,31	851	34,49
320,44	17,11	904	33,93
502,68	42,82	1011	55,49
…	…	…	…

На сформированном наборе данных были обучены регрессионные модели, рассмотренные ранее. Результат работы моделей оценивался с помощью метрики «средняя абсолютная ошибка в процентах» (*MAPE – mean absolute percentage error*):

$$MAPE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{|y_i - \hat{y}_i|}{|y_i|}\cdot 100\%, \qquad (4.8)$$

где N – размер выборки, y_i – тестовое i-ое значение, $\hat{y}_i$ – спрогнозированное i-ое значение.

Выбор метрики *MAPE* для оценки регрессионных моделей обусловлен ее способностью предоставлять интерпретируемую и относительную меру точности, выраженную в процентах. Это делает результаты оценки интуитивно понятными и легко сравнимыми, так как ошибка выражается не в абсолютных единицах измерения, а в относительных величинах. *MAPE* естественным образом нормирует ошибку относительно фактических значений, позволяя оценивать качество модели независимо от конкретных диапазонов данных. Данная метрика для рассматриваемой прикладной задачи оценки дебита, где важно понимать не абсолютную величину расхождения результата, а относительную точность прогноза. У метрики *MAPE* существуют ограничения, когда в данных присутствуют значения, близкие к нулю, так как это может приводить к неоправданно высоким значениям ошибки, что не является характерным для рассматриваемой выборки.

Таблица 4.6 – Сравнительная таблица результатов оценки дебита регрессионными моделями

Модель	*MAPE*, %	Наибольшая относительная ошибка модели на тестовой выборке, %
Линейная регрессия	1,38	2,32
k-ближайших соседей: 1) $k = 1$ 2) $k = 5$ 3) $k = 11$	 1,43 1,33 1,32	 2,31 2,47 3,19
Регрессия опорных векторов (*SVR*): 1) Линейное ядро 2) Полиномиальное ядро 3) Радиальное ядро	 1,45 1,84 1,28	 2,78 5,94 2,78
Регрессия *random forest*: 1) $n = 10$ 2) $n = 25$ 3) $\boldsymbol{n = 40}$	 1,01 0,48 **0,13**	 1,99 1,84 **1,58**

В таблице 4.6 представлены результаты работы моделей, оцененные с помощью метрики *MAPE,* в таблицу также добавлен столбец с наибольшей относительной ошибкой модели на тестовой выборке. Данный параметр позволит оценить модели только по среднему результату, но и по величине выбросов.

Все рассмотренные модели машинного обучения при правильной настройке показали приемлемые результаты и могут быть использованы в системе виртуального дебита. Разницу в величине ошибок в разных моделях можно объяснить свойствами моделей. Рассмотрим результаты работы моделей.

Результаты линейной регрессии, хотя и уступают по точности более сложным моделям, демонстрируют вполне приемлемое качество прогнозирования дебита. Средняя абсолютная процентная ошибка на уровне 1,38 % указывает на то, что в данных присутствуют достаточно выраженные линейные зависимости между входными параметрами и целевой переменной. Такие физические характеристики, как угловая скорость, момент нагрузки и плотность жидкости связаны с дебитом линейными или близкими к линейным соотношениям, описываемыми законами гидродинамики и электромеханики. Максимальное отклонение в 2,32 % на тестовой выборке подтверждает, что даже простейшая модель способна обеспечить удовлетворительную точность для большинства практических случаев. Такой размер ошибки вполне укладывается в допустимые пределы для многих технологических процессов. Умеренный разброс между средней и максимальной ошибкой, то есть отсутствие сильных выбросов в ошибочных прогнозах, свидетельствует об устойчивости модели. Это является преимуществом, учитывая, что линейная регрессия менее склонна к переобучению по сравнению с более сложными алгоритмами. Относительно высокую, по сравнению с наилучшими моделями, ошибку можно объяснить неспособностью линейной модели учитывать

нелинейные эффекты и взаимодействия параметров функции вида $q = f\left(\omega, T_L, \rho\right)$.

Результаты алгоритма *k*-ближайших соседей демонстрируют динамику в зависимости от выбранного количества соседей. При использовании одного ближайшего соседа модель показывает достаточно высокую точность со средней ошибкой 1,43 %, что лишь незначительно уступает линейной регрессии. Однако максимальное отклонение оказывается даже немного меньшим, чем у линейного подхода, что свидетельствует о способности метода более точно предсказывать отдельные сложные случаи за счет локальной адаптации к особенностям данных. Увеличение числа соседей до пяти приводит к ожидаемому улучшению средней точности – ошибка снижается до 1,33 %, что объясняется эффектом усреднения, сглаживающего случайные выбросы в обучающих данных. Однако максимальная ошибка при этом несколько возрастает, показывая, что усреднение по небольшой окрестности может ухудшить прогноз для некоторых специфических точек. Дальнейшее увеличение количества соседей до одиннадцати дает лишь минимальное улучшение средней точности, но при этом заметно увеличивает максимальное отклонение до 3,19 %. Данные результаты характерны для метода ближайших соседей – с увеличением *k* модель становится более устойчивой к шумам в данных, но одновременно теряет способность точно предсказывать значения в областях с высокой нелинейностью зависимости. В данном случае оптимальным компромиссом между средней и максимальной ошибкой оказывается вариант с пятью соседями, хотя разница между различными значениями *k* не столь существенна. Это говорит о том, что зависимость дебита от входных параметров имеет относительно гладкий характер без резких локальных особенностей, которые требовали бы очень точной настройки данного гиперпараметра.

Результаты регрессии опорных векторов демонстрируют существенную зависимость качества прогнозирования от выбора функции ядра. При

использовании линейного ядра модель показывает сопоставимую с другими методами точность, что свидетельствует о наличии в данных выраженных линейных закономерностей. Однако максимальная ошибка достигает 2,78 %, указывая на ограниченную способность линейного ядра аппроксимировать сложные нелинейные взаимосвязи между параметрами. Полиномиальное ядро демонстрирует наихудшие показатели среди рассмотренных вариантов. Такое ухудшение характеристик может быть обусловлено избыточной сложностью модели, приводящей к переобучению на специфических особенностях обучающей выборки, либо неоптимальным выбором степени полинома. Это подчеркивает чувствительность полиномиального подхода к настройке гиперпараметров и его склонность к улавливанию искусственных закономерностей в данных. Наилучшие результаты среди различных вариантов настройки *SVR* получены с радиальным ядром, что подтверждает предположение о наличии в данных нелинейных, но гладких зависимостей. Способность радиального ядра локально адаптироваться к особенностям распределения данных позволила достичь точности, приближающейся к показателям модели *random forest*. Однако максимальная ошибка 2,78 % осталась на уровне линейного ядра, что может указывать на существование в данных специфических областей, плохо поддающихся описанию как линейными, так и радиальными функциями. Сравнительный анализ различных ядер *SVR* выявляет зависимость между сложностью модели и ее обобщающей способностью. Радиальное ядро, демонстрируя наилучшую среднюю точность, тем не менее не обеспечивает существенного преимущества в отношении максимальных ошибок, что свидетельствует о том, что природа взаимосвязей между параметрами системы включает как линейные компоненты, так и плавные нелинейные зависимости, но не содержит резких локальных особенностей, требующих сложных преобразований.

Анализ результатов регрессии «случайного леса» выявляет выраженную зависимость качества прогнозирования от количества деревьев в ансамбле.

При использовании 10 деревьев модель демонстрирует среднюю абсолютную процентную ошибку на уровне 1,01 %, что уже существенно превосходит показатели других рассмотренных алгоритмов. Максимальное отклонение при этом составляет 1,99 %, свидетельствуя о достаточно равномерном распределении ошибок по всей тестовой выборке. Увеличение количества деревьев до 25 приводит к значительному улучшению точности – *MAPE* снижается до 0,48 %, что указывает на способность модели более эффективно выявлять сложные взаимосвязи в данных при увеличении разнообразия базовых предсказателей. При этом максимальная ошибка уменьшается до 1,84 %, подтверждая устойчивость алгоритма к выбросам и его способность качественно обрабатывать различные области пространства признаков. Оптимальные результаты достигаются при 40 деревьях, где средняя ошибка составляет всего 0,13 %, а максимальное отклонение не превышает 1,58 %. Такие показатели свидетельствуют о том, что модель практически идеально адаптируется к имеющимся данным, сохраняя при этом высокую обобщающую способность. Экспоненциальное снижение ошибки с ростом количества деревьев подчеркивает важность этого гиперпараметра для рассматриваемой задачи и подтверждает наличие в данных сложных нелинейных зависимостей, которые могут быть эффективно выявлены только достаточно большим и разнообразным ансамблем. Стоит отметить, что увеличение сложности модели не приводит к переобучению – как средняя, так и максимальная ошибки продолжают монотонно уменьшаться, что позволяет сделать вывод о высокой устойчивости алгоритма «случайного леса» к избыточной параметризации применительно к задаче виртуального измерения дебита. Наилучший результат показала регрессия «случайного леса» с числом деревьев $n = 40$. Данная модель была выбрана в качестве основы для системы виртуального дебита УЭЦН. Точность оценки дебита, полученная по 40 деревьям, является достаточной. Это оптимальное количество деревьев для работы с доступными вычислительными мощностями микропроцессоров.

Большая часть используемых аппаратных вычислительных мощностей микропроцессоров расходуется сигма-точечным фильтром Калмана.

4.1.3 Апробация метода косвенной оценки электротехнических и технологических параметров для управления установкой электроцентробежного насоса

С целью верификации разработанного метода косвенной оценки электротехнических и технологических параметров для управления УЭЦН на основе сигма-точечного фильтра Калмана в разработанной цифровой комплексной модели были рассмотрены три режима работы УЭЦН.

Рассмотрим работу систему косвенной оценки электротехнических и технологических параметров для управления УЭЦН в условиях статической рабочей точки. Цель данных экспериментов – проанализировать работу УЭЦН, от запуска до установившегося состояния, в диапазоне стандартных рабочих скоростей ω от 219 рад/с до 502 рад/с. В ходе экспериментов, активное сопротивление погружной кабельной линии инициализировалось как $\hat{R}_{cl} = 1$ Ом, действительное активное сопротивление было $R_{cl} = 1,47$ Ом.

Во всех рассмотренных сценариях отфильтрованные токи статора $\hat{I}_{S\alpha\beta}$ по сравнению с измеренными токами $I_{S\alpha\beta}$ изменяются в таких же относительных диапазонах, как и токи, представленные на рисунке 4.3. Фильтр Калмана эффективно устраняет высокочастотный шум, возникающий при измерениях токов, благодаря своей способности выделять низкочастотную составляющую сигнала, соответствующую реальным электромагнитным процессам в двигателе. Потокосцепления статора $\hat{\Psi}_{S\alpha\beta}$, согласно системе уравнений (3.14), оцениваются с учетом активного сопротивления кабельной линии R_{cl}, что позволяет получать более точные оценки по сравнению с наблюдателями потокосцепления основе эталонной модели статора. Такой результат оценки объясняется тем, что учет реальных параметров питающей линии устраняет систематическую погрешность, присущую упрощенным моделям. В отличие от наблюдателей, использующих

только параметры двигателя, предложенная методика корректно компенсирует падение напряжения в погружном кабеле, которое является существенным для погружных установок с большой длиной питающей линии. Высокая точность оценки потокосцеплений и фильтрация токов улучшают качество управления.

Моделирование проводилось на наборе рабочих точек, определенных диапазоном рабочих частот, приведенным в характеристиках каталога. Таким образом, низкоскоростная рабочая точка соответствует рабочей частоте 35 Гц (219 рад/с), а высокоскоростная – 80 Гц (502 рад/с). Расчетные угловые скорости $\hat{\omega}$ с соответствующими фактическими скоростями ω и среднеквадратическая ошибка для каждой из скоростей представлены в правой части рисунка 4.3.

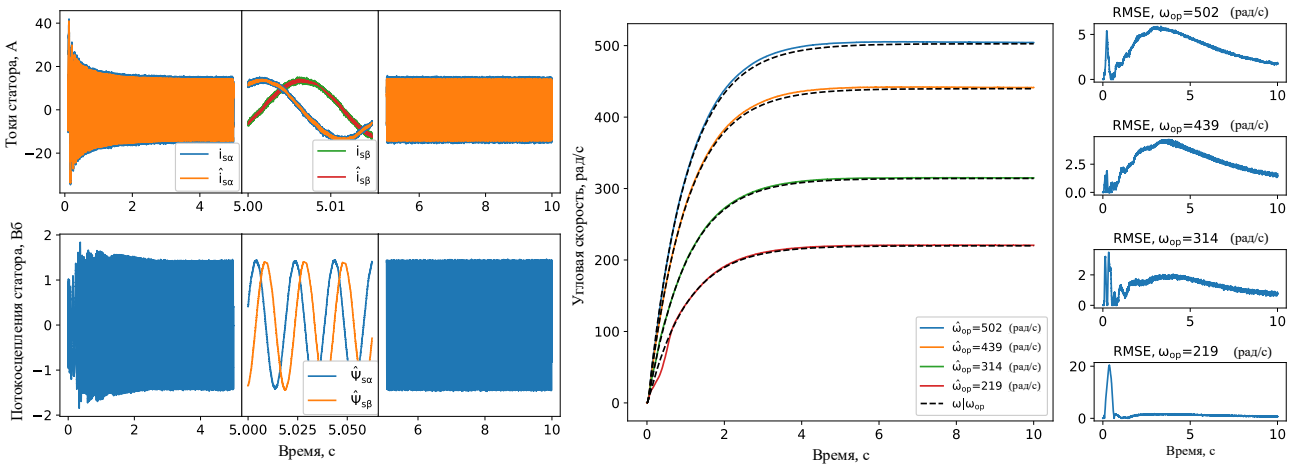

Рисунок 4.3 – Результаты оценки параметров ПЭД сигма-точечным фильтром Калмана в условиях статической рабочей точки

Оцененные в ходе эксперимента активные сопротивления погружной кабельной линии $\hat{R}_{cl}$, а также среднеквадратическая ошибка оценки на каждой из рассматриваемых скоростей представлены на рисунке 4.4. Оцениваемое сопротивление быстро сходится к окрестностям действительного значения. Среднеквадратическая ошибка на каждой из скоростей остается в пределах,

допустимых для практического применения, что подтверждает адекватность используемой математической модели. Небольшие неточности при оценке сопротивления можно объяснить тем, что погружная кабельная линия моделируется с учетом реактивных составляющих – индуктивностей и емкостей.

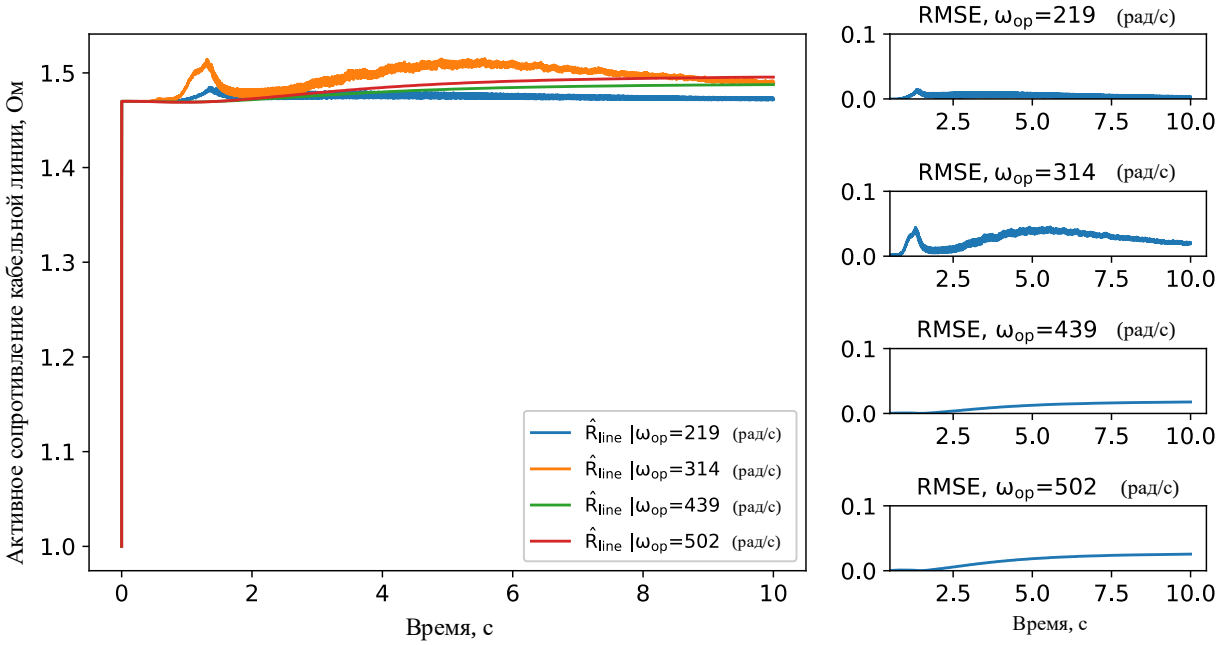

Рисунок 4.4 – Результаты оценки активного сопротивления погружной кабельной линии сигма-точечным фильтром Калмана в условиях статической рабочей точки

Оценка момента нагрузки T_L и псевдоконстанты c_p, описывающей динамику нагрузки, представлены на рисунке 4.5. Принятые при выводе ОДУ момента нагрузки допущения, приводят к отставанию оцениваемого момента нагрузки $\hat{T}_L$ от моделируемого T_L, но при приближении к установившемуся состоянию результат оценки нагрузки на валу становится более точным, что видно из среднеквадратической ошибки.

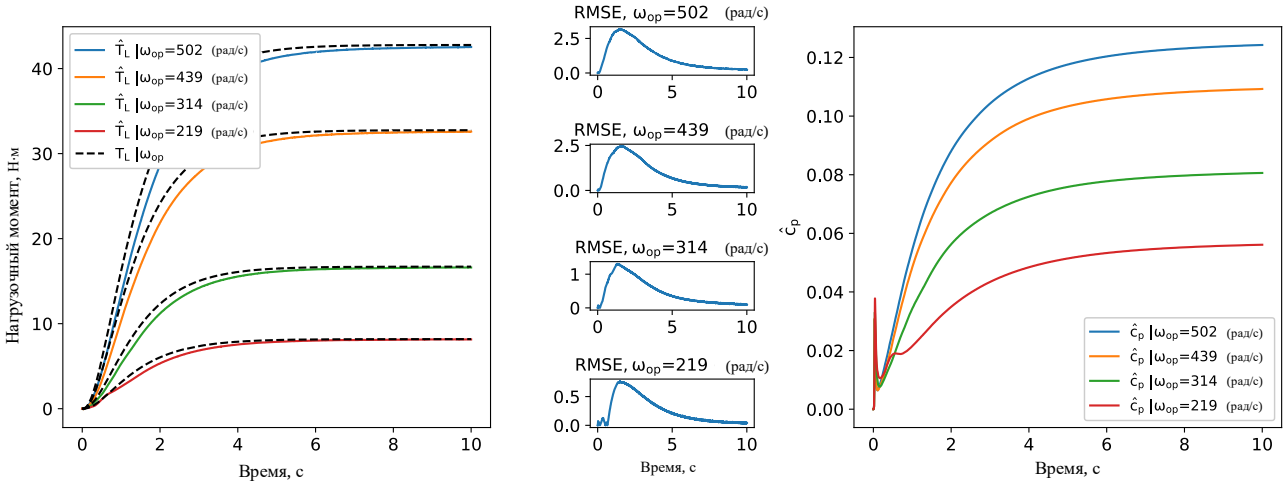

Рисунок 4.5 – Результаты оценки параметров, определяющих нагрузку, сигма-точечным фильтром Калмана в условиях статической рабочей точки

По полученным результатам экспериментов, в условиях статической рабочей точки, на цифровой комплексной модели УЭЦН, можно сделать вывод, что разработанный метод косвенной оценки электротехнических и технологических параметров для управления УЭЦН является работоспособным в диапазоне рабочих скоростей ПЭД.

Рассмотрим работу системы в условиях изменения рабочей точки. На рисунке 4.6 представлен результат оценки параметров сигма-точечным фильтром Калмана при изменении рабочей точки.

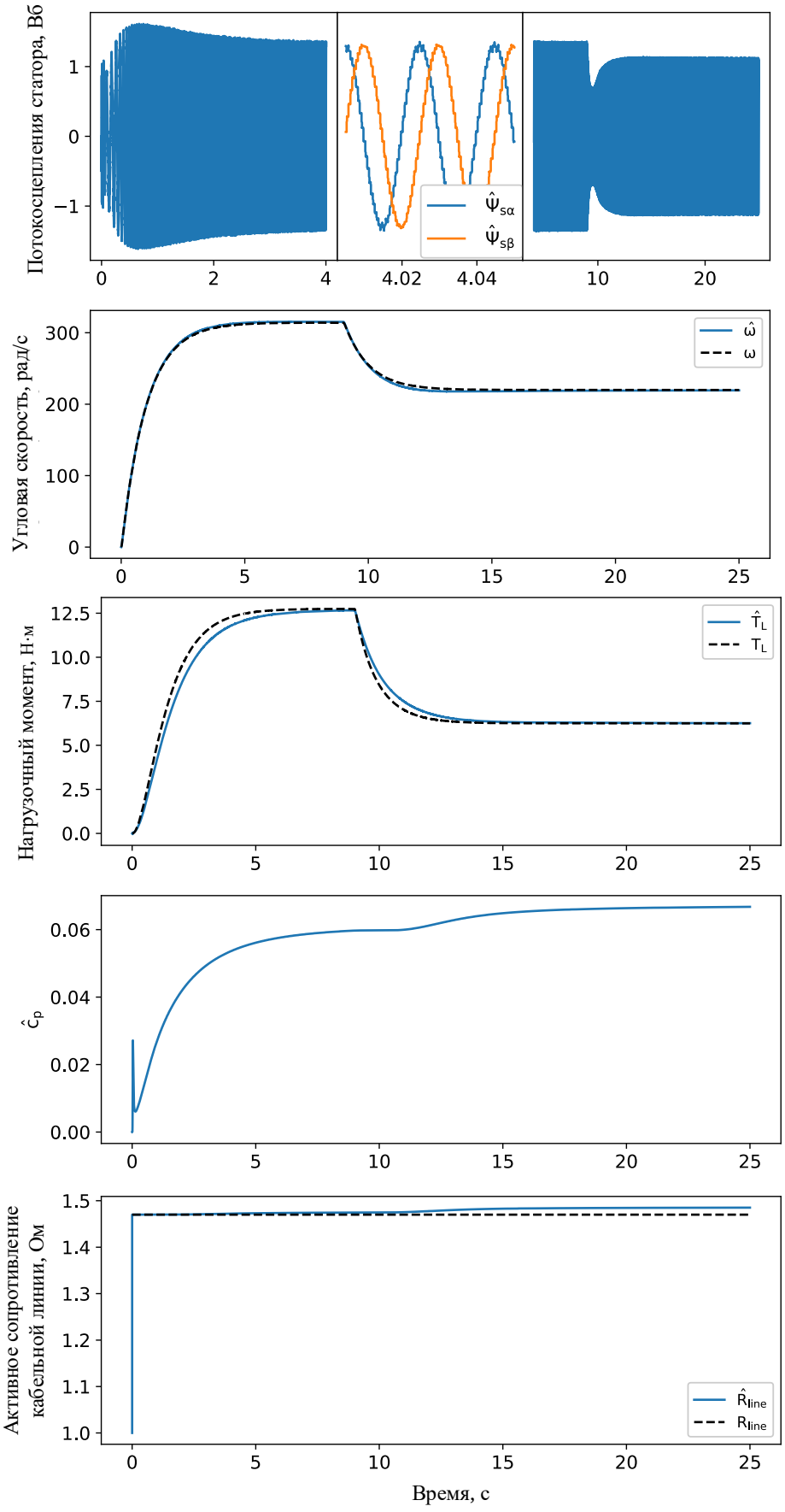

Рисунок 4.6 – Результаты оценки параметров, сигма-точечным фильтром Калмана при изменении рабочей точки

Эксперимент проходил следующим образом: запуск насоса; достижение установившегося режима для одной рабочей точки; на 9 секунде моделирования осуществляется смена рабочей точки с 50 Гц (314 рад/с) на 35 Гц (219 рад/с); достижение установившегося состояния для второй рабочей точки.

По результатам эксперимента можно сделать следующие выводы: изменение рабочей точки не повлияло на точность оценки потокосцеплений статора $\hat{\Psi}_{S\alpha\beta}$; оценка угловой скорости ПЭД $\hat{\omega}$ происходила с крайне малой задержкой, что может быть объяснено малыми значениями для скорости в ковариационных матрицах состояния **P** и процесса **Q**; оценка нагрузочного момента на валу ПЭД $\hat{T}_L$ сопровождалась небольшими задержками, как и по результатам экспериментов в условиях статической рабочей точки, что может быть объяснено принятыми допущениями при выводе ОДУ, описывающего нагрузочный момент; изменение рабочей точки негативно сказалось на оценке активного сопротивления кабальной линии R_{cl} – до изменения рабочей точки сигма-точечный фильтр Калмана точно оценивал данный параметр, после изменения появилось небольшое отклонение от истинного значения. Таким образом, подтверждается работоспособность метода косвенной оценки электротехнических и технологических параметров УЭЦН на основе сигма-точечного фильтра Калмана, при изменении рабочей точки.

Рассмотрим работу системы в условиях резкого изменения активного сопротивления кабельной линии. На рисунке 4.7 представлен результат оценки параметров сигма-точечным фильтром Калмана при резком изменении активного сопротивления кабельной линии.

В ходе моделирования активное сопротивление кабельной линии подвергалось многократному изменению сопротивления: падению сопротивления до $R_{cl} = 1,0$ Ом, восстановлению сопротивления до начального значения $R_{cl} = 1,47$ Ом, повышению сопротивления до $R_{cl} = 4,5$ Ом. Данный режим работы может быть обусловлен аварийным состоянием УЭЦН.

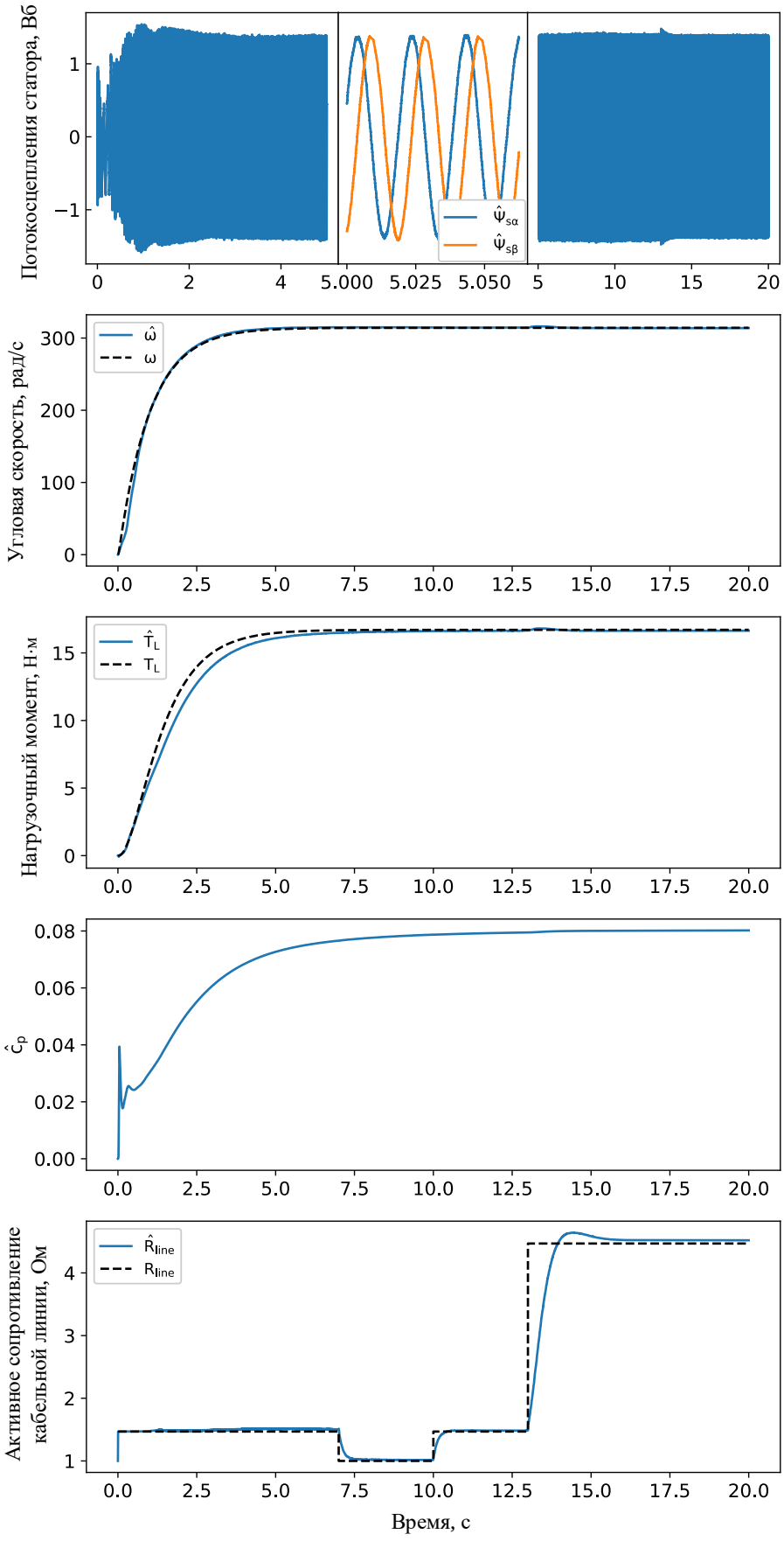

Рисунок 4.7 – Результаты оценки параметров, сигма-точечным фильтром Калмана при резком изменении активного сопротивления кабельной линии

По результатам эксперимента можно сделать следующие выводы: изменение активного сопротивления кабельной линии не оказало влияния на оценку потокосцеплений статора $\hat{\Psi}_{S\alpha\beta}$; в установившемся режиме, изменения активного сопротивления кабельной линии не оказывали влияния на оценку угловой скорости ПЭД $\hat{\omega}$ и нагрузочного момента на валу ПЭД $\hat{T}_L$; оценка активного изменения кабельной линии характеризовалась небольшими задержками в переходных режимах при незначительных изменениях оцениваемой величины, однако, при существенном изменении активного сопротивления на 13 с, задержка оценки увеличилась, что может быть объяснено как малыми значениями для сопротивления в ковариационных матрицах состояния **P** и процесса **Q**, так и тем, что в используемой на шаге прогнозирования фильтром Калмана системе ОДУ $\frac{dR_{cl}}{dt} = 0$. Таким образом, по результатам данного эксперимента подтверждается работоспособность метода косвенной оценки электротехнических и технологических параметров УЭЦН на основе сигма-точечного фильтра Калмана, при резком изменении активного сопротивления кабельной линии.

4.2 Апробация метода и алгоритма косвенной оценки на полунатурной модели

В рамках исследования была разработана физическая модель системы косвенной оценки электротехнических и технологических параметров для управления УЭЦН, испытания которой проводились на полунатурной модели УЭЦН.

Полунатурная модель УЭЦН включала следующие элементы: станция управления с частотным преобразователем мощностью 160 кВА и микроконтроллером STM32MP157F-DK2; ТМПНГ-СЭЩ-160/3-11-УХЛ1 мощностью 160 кВА; кабельная линия КПБП 3х16-3,3 длиной 2 км; погружной асинхронный двигатель ПЭД 90-117 мощностью 90 кВт, вал которого спарен с асинхронным двигателем АИР 250М2 У1 мощностью

90 кВт, имитирующем нагрузку, создаваемую электроцентробежным насосом; инкрементальный энкодер; датчик крутящего момента (рисунок 4.8).

Рисунок 4.8 – Внешний вид полунатурной модели УЭЦН

Разработка алгоритмов косвенной оценки параметров и системы управления для физической модели осуществляется в специализированной среде *Mexbios Development Studio*, предназначенной для создания программного обеспечения мехатронных систем [112]. Эта платформа предоставляет комплексный инструментарий для программирования микроконтроллеров, поддерживая различные парадигмы разработки. Среди доступных подходов – процедурное программирование с использованием функций высокого уровня, визуальное проектирование на основе функциональных блок-диаграмм, а также работа с блок-схемами, где алгоритмы представляются в виде цепочек взаимосвязанных элементов. Среда *Mexbios Development Studio* также включает возможности автоматного программирования, позволяющего описывать поведение системы через конечные автоматы, и событийно-ориентированного подхода, где выполнение кода инициируется внешними или внутренними событиями. Многообразие

методов разработки обеспечивает гибкость при реализации алгоритмов управления, позволяя выбирать наиболее подходящий стиль программирования для конкретной задачи. Особенностью платформы является возможность комбинирования различных подходов в рамках одного проекта и возможность создания собственных блоков, написанных на языках *C* и *C++*, что необходимо при создании комплексных систем, сочетающих элементы непрерывного управления и дискретной логики.

Рассмотрим структуру физической модели, представленной на рисунке 4.9.

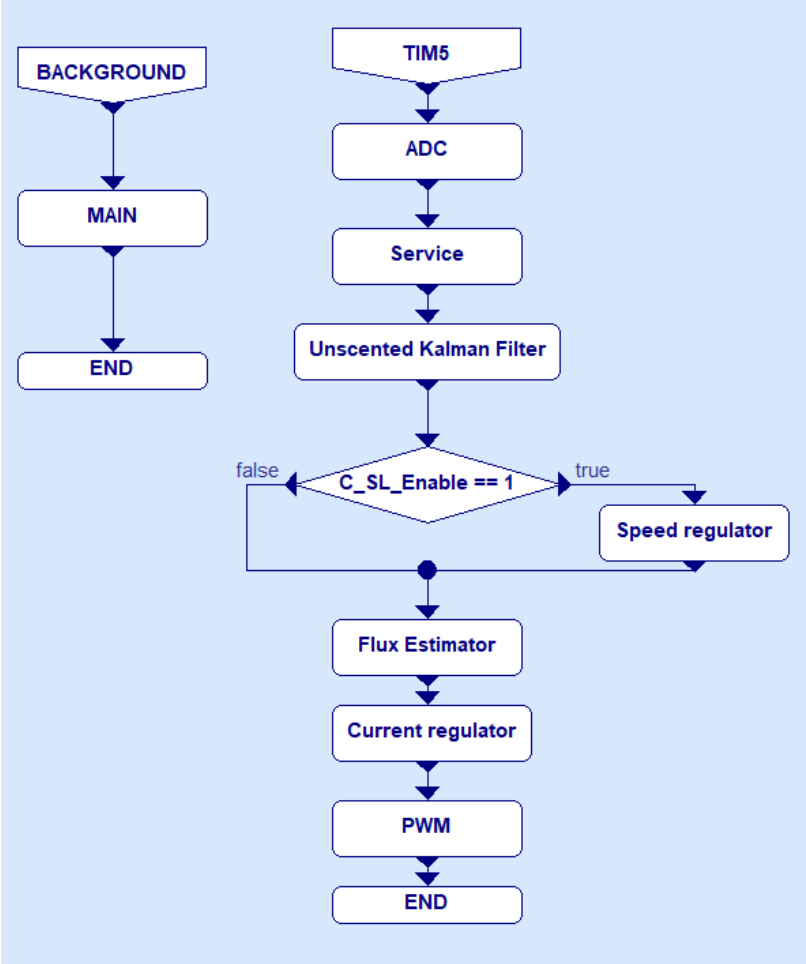

Рисунок 4.9 – Структура физической модели косвенной оценки электротехнических и технологических параметров для управления УЭЦН

Структура состоит из отдельных функциональных блоков, которые выполняются по прерыванию *TIM5* с периодом 10 мкс. В блоке *ADC*

реализуется обработка данных с датчиков. Блок *Service* выполняет различные сервисные функции – преобразование Кларка и Парка, функции делителей частоты для контуров регулирования скорости и тока и другие функции, связанные с преобразованием физических величин. В блоке *Unscented Kalman Filter* выполняется расчет шагов прогнозирования и коррекции сигма-точечного фильтра Калмана. Блок *Speed regulator* реализует функции контура регулирования скорости, а блок *Current regulator* функции контура регулирования скорости. В разработанной физической модели частота работы контура регулирования тока – 1 кГц, частота работы контура регулирования скорости – 50 Гц. В блоке *Flux Estimator* реализован наблюдатель потокосцепления и электрического угла. В блоке *PWM* выполняется алгоритм векторной ШИМ. Блок *MAIN*, находящийся в отдельной структуре, содержит цифровой пульт управления для взаимодействия с системой.

Для реализации физической модели системы косвенной оценки электротехнических и технологических параметров для управления УЭЦН использовались параметры обратной Г-образной схемы замещения ПЭД 90-117, представленные в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Параметры ПЭД 90-117, рассчитанные для обратной Г-образной схемы замещения АД

$P_{ном}$, кВт	$U_{ном}$, В	R_S, Ом	R_R, Ом	L_M, Гн	L_σ, Гн	J, кг·м^2	z_p	C, Н·м·с
90	1270	0,5652	0,7018	0,1271	0,0133	0,5000	1	0,0100

Коэффициент трансформации был принят равным $k_T = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1621}{380} = 4,266$. Длина кабельной линии полунатурной модели $l = 2$ км для данной марки кабеля активное сопротивление $R_{cl} \approx 1$ Ом / км.

Рассмотрим инициализацию начальных параметров для сигма-точечного фильтра Калмана для физической модели.

В ходе эксперимента осуществляется разгон двигателя до установившегося режима, поэтому, как и при инициализации параметров ковариационной матрицы состояния **P** для цифровой комплексной модели УЭЦН, диагональные элементы матрицы будут близки к 0:

$$\begin{aligned}\mathbf{P} = \operatorname{diag}\Big[&\left(0{,}001/3\right)^2\ \left(\text{А}\right)^2\quad \left(0{,}001/3\right)^2\ \left(\text{А}\right)^2\\ &\left(0{,}001/3\right)^2\ \left(\text{Вб}\right)^2\quad \left(0{,}001/3\right)^2\ \left(\text{Вб}\right)^2\\ &\left(10^{-5}/3\right)^2\ \left(\text{рад}/\text{с}\right)^2\quad \left(0{,}001/3\right)^2\ \left(\text{Ом}\right)^2\\ &\left(10^{-4}/3\right)^2\ \left(\text{Н}\cdot\text{м}\right)^2\quad \left(2\cdot10^{-4}/3\right)^2\Big].\end{aligned} \tag{4.9}$$

Матрица входа шума **L** рассчитывается согласно выражению (3.25):

$$\mathbf{L} = \left[\begin{array}{cccc|c} 75{,}188 & 0 & 1 & 0 & \\ 0 & 75{,}188 & 0 & 1 & \mathbf{0}_{2\times4} \end{array}\right]^T. \tag{4.10}$$

Ковариационная матрица процесса **Q** была вычислена согласно выражениям (3.27-3.29). Дисперсии шума датчиков напряжения $\sigma^2_{u_{S\alpha}}$ и $\sigma^2_{u_{S\beta}}$ были приняты равными $\left(0{,}027/3\right)^2$ В^2, период дискретизации $\Delta t = 10^{-5}$ с. Таким образом, ковариационная матрица процесса **Q** приняла следующий вид:

$$\mathbf{Q} = \left[\begin{array}{cccc|c} 4{,}58\cdot10^{-11} & 0 & 6{,}09\cdot10^{-13} & 0 & \\ 0 & 4{,}58\cdot10^{-11} & 0 & 6{,}09\cdot10^{-13} & \mathbf{0}_{4\times4} \\ 6{,}09\cdot10^{-13} & 0 & 8{,}11\cdot10^{-15} & 0 & \\ 0 & 6{,}09\cdot10^{-13} & 0 & 8{,}11\cdot10^{-15} & \\ \hline \multicolumn{4}{c|}{\mathbf{0}_{4\times4}} & \mathbf{0}_{4\times4} \end{array}\right]. \tag{4.11}$$

Ковариационная матрица шума **R** была определена экспериментально:

$$\mathbf{R} = T_{\alpha\beta}\begin{bmatrix} \left(0{,}1/3\right)^2\ \left(\text{А}\right)^2 & 0 & 0 \\ 0 & \left(0{,}1/3\right)^2\ \left(\text{А}\right)^2 & 0 \\ 0 & 0 & \left(0{,}1/3\right)^2\ \left(\text{А}\right)^2 \end{bmatrix} T_{\alpha\beta}^T. \tag{4.12}$$

Для апробации разработанного метода и алгоритма косвенной оценки электротехнических и технологических параметров для управления УЭЦН на полунатурной модели был проведен эксперимент.

Эксперимент проходил следующим образом: в систему управления ПЭД подавалось задание по скорости $\omega_{зад} = 314$ рад / с, спаренный с ПЭД асинхронный двигатель имитировал нагрузку, создаваемую ЭЦН, постепенно увеличивая ее с увеличением угловой скорости вращения спаренного вала электродвигателей. На полной скорости ПЭД, подаваемая нагрузка составила $T_L = 205$ Н·м. На рисунке 4.10 представлены результаты эксперимента на полунатурной модели.

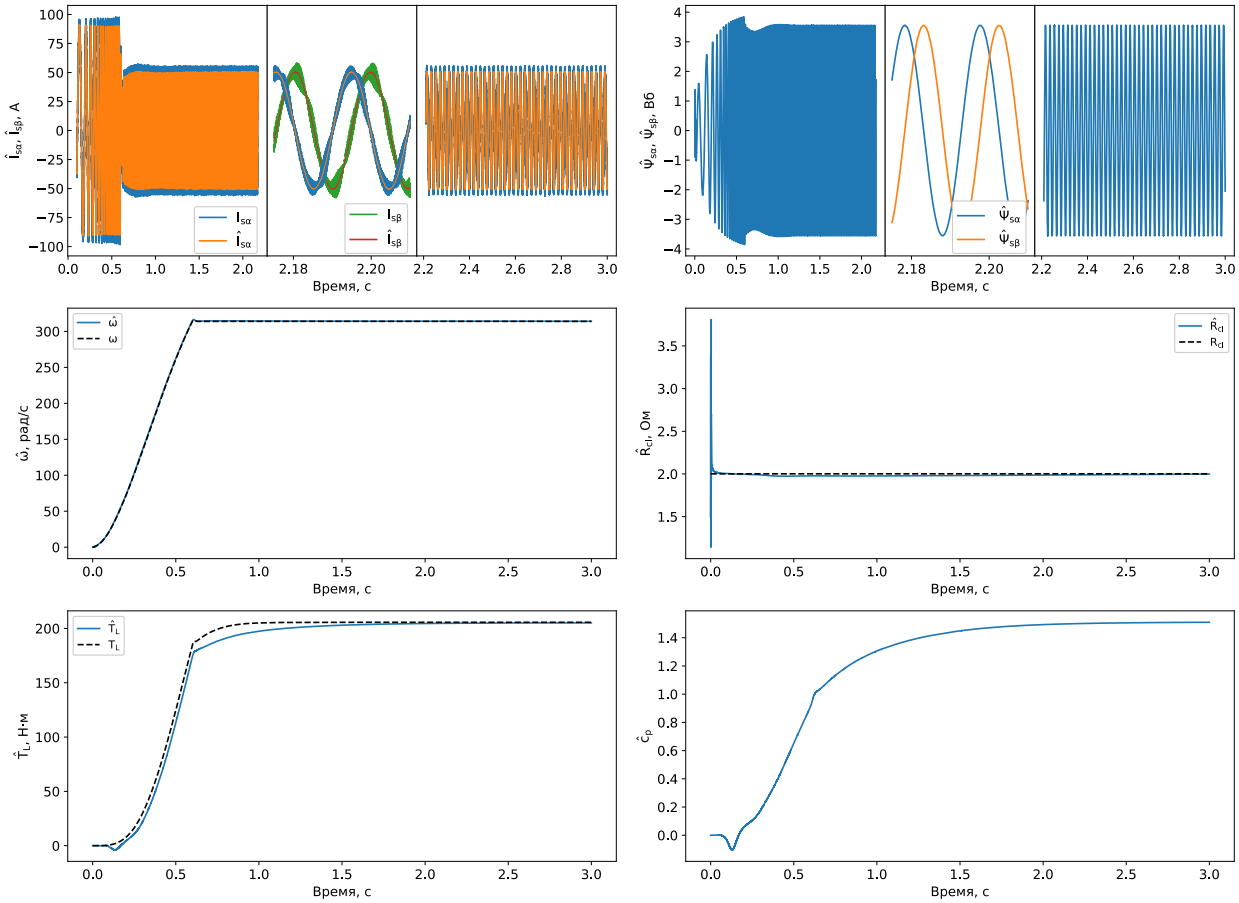

Рисунок 4.10 – Результаты эксперимента на полунатурной модели УЭЦН

По результатам эксперимента, можно сделать следующие выводы: сигма-точечный фильтр Калмана отфильтровал шумные показания датчиков тока $I_{S\alpha\beta}$ перед тем, как данные поступили в систему управления ПЭД; потокосцепление статора $\hat{\Psi}_{S\alpha\beta}$ оценивалось корректно; угловая скорость

вращения ПЭД $\hat{\omega}$ оценивалась корректно на всем диапазоне моделирования; активное сопротивление кабельной линии инициализировалось величиной $\hat{R}_{cl} = 1{,}5$ Ом, оценка активного сопротивления кабельной линии в начале эксперимента была подвержена колебаниям, однако, довольно быстро сошлась на истинном значении $\hat{R}_{cl} \approx 2{,}0$ Ом; оценка нагрузочного момента $\hat{T}_L$ производилась с небольшой задержкой на всем диапазоне моделирования, что можно объяснить принятыми при описании характера нагрузочного момента допущениями. Точность оценки параметров, сопоставима с точностью, полученной на при имитационном моделировании в цифровой комплексной модели УЭЦН.

Таким образом, можно сделать вывод, что проведенная апробация системы косвенной оценки электротехнических и технологических параметров для управления УЭЦН на полунатурной модели доказывает ее валидность.

4.3 Технико-экономическое обоснование внедрения системы косвенной оценки электротехнических и технологических параметров для управления установкой электроцентробежного насоса

В рамках исследования было составлено технико-экономическое обоснование внедрения разработанной системы косвенной оценки электротехнических и технологических параметров для управления УЭЦН.

Представленные оценочные показатели экономической эффективности носят прогнозный характер и требуют дальнейшей детализации в процессе промышленной апробации системы. Точные значения экономических параметров будут скорректированы после опытной эксплуатации с учетом реальных условий работы оборудования и особенностей конкретных скважин. Окончательные выводы об экономической целесообразности системы будут сделаны после сбора и анализа статистики в промышленных условиях.

В составе инвестиционных затрат на внедрение системы необходимо учесть следующие позиции: стоимость программного и аппаратного

обеспечения; монтаж аппаратной части в станцию управления; обучение персонала нефтедобывающих предприятий. В таблице 4.8 представлен состав инвестиционных затрат на внедрение разработанной системы для одной скважины, эксплуатирующей УЭЦН.

Экономическими выгодами внедрения разработанной системы (таблица 4.9) являются: уменьшение простоя УЭЦН за счет быстрого обнаружения неисправностей и снижение затрат на техническое обслуживание за счет постоянного мониторинга нефтедобывающей установки.

Рассмотрим экономический эффект от уменьшения времени простоя УЭЦН за счет быстрого обнаружения неисправностей. В стандартных условиях эксплуатации, без осложняющий факторов, средняя наработка УЭЦН на отказ составляет около $t_o = 730$ сут [113]. Среднее время ремонта УЭЦН при наработке на отказ составляет $t_p = 20$ сут [114, 115], за год, время ремонта и, соответственно, простоя скважины составляет $t_г = 10$ сут. Средний объем добычи нефти скважинами, эксплуатирующими УЭЦН на территории Пермского края, составляет $q_{ср} = 35$ м^3/сут, стоимость одного кубического метра нефти марки *Urals* составляет $P_н = 32{,}5$ тыс. руб. Таким образом, средний годовой убыток нефтедобывающей компании от простоя скважины, эксплуатирующей УЭЦН, составляет $E_{пг} = P_н \cdot q_{ср} \cdot t_г = 11375$ тыс. руб. Предполагается, что разработанная система косвенной оценки электротехнических и технологических параметров для управления УЭЦН позволит сократить время простоя нефтедобывающей установки за счет быстрого обнаружения неисправностей на 5 % в год, что позволит получить экономическую выгоду в размере $EP_{пг} = E_{пг} \cdot 0{,}05 = 568{,}75$ тыс. руб.

Рассмотрим экономическую выгоду от снижения затрат на техническое обслуживание за счет постоянного мониторинга нефтедобывающей установки. Данный параметр связан с экономическим эффектом от

уменьшения времени простоя УЭЦН за счет быстрого обнаружения неисправностей. Как было определено ранее, среднегодовое время ремонта скважины составляет $t_г = 10$ сут. Средняя стоимость часа ремонтных работ составляет $P_{рр} = 10$ тыс. руб. [116]. Таким образом, при 8-ми часовом рабочем дне среднегодовая стоимость технического обслуживания УЭЦН составит $E_{рг} = 8 \cdot P_{рр} \cdot t_г = 800$ тыс. руб. Исходя из предположения, что разработанная система косвенной оценки электротехнических и технологических параметров для управления УЭЦН позволит сократить временные затраты на техническое обслуживание за счет постоянного мониторинга нефтедобывающей установки на 5 % в год – экономическая выгода составит $EP_{рг} = E_{рг} \cdot 0,05 = 40$ тыс. руб.

Таблица 4.8 – Инвестиционные затраты на внедрение разработанной системы для одной скважины

Наименование инвестиционных затрат	Обозначение	Цена, тыс. руб.
Стоимость программного обеспечения	$P_{по}$	300
Стоимость аппаратной части	$P_{а}$	100
Монтаж аппаратной части в станцию управления	$P_{ма}$	20
Обучение персонала нефтедобывающих предприятий	$P_{об}$	300

Таблица 4.9 – Экономические выгоды за счет внедрения разработанной системы для одной скважины

Наименование экономической выгоды	Обозначение	Выгода, тыс. руб.
Уменьшение простоя УЭЦН за счет быстрого обнаружения неисправностей	$EP_{пг}$	568,75
Снижение затрат на техническое обслуживание за счет постоянного мониторинга нефтедобывающей установки	$EP_{рг}$	40

Для оценки экономической эффективности внедрения разработанной системы использовались следующие показатели: чистый дисконтированный доход и срок окупаемости. Чистый дисконтированный доход представляет собой разницу между текущей стоимостью всех будущих денежных потоков от реализации проекта и первоначальными инвестиционными затратами, выраженную в денежных единицах. Положительное значение этого показателя свидетельствует о том, что после полного возмещения вложенных средств с учетом временной стоимости денег проект продолжает генерировать дополнительную экономическую ценность, создавая реальный прирост капитала инвестора. Отрицательная величина указывает на невозможность достижения требуемой нормы доходности, когда совокупные приведенные доходы не покрывают даже первоначальных расходов с учетом альтернативных возможностей вложения капитала. Нулевое значение демонстрирует ситуацию предельной эффективности, при которой проект лишь возвращает инвестиции с минимально приемлемой для инвестора доходностью, не создавая дополнительной выгоды. Важно учитывать, что абсолютная величина показателя отражает масштаб создаваемой стоимости – чем выше положительное значение, тем значительнее экономический потенциал проекта. Таким образом, проект можно считать экономически целесообразным, если чистый дисконтированный доход примет положительное значение в течение рассматриваемого срока планирования, а срок окупаемости не превысит горизонт планирования.

Для расчета чистого дисконтированного дохода (ЧДД) использовалась следующая формула:

$$\text{ЧДД} = -I_0 + \sum_{t=1}^{T_n} \frac{CF_t}{(1+r)^t}, \tag{4.13}$$

где $I_0 = P_{по} + P_а + P_{ма} + P_{об}$ – инвестиционные затраты, T_n – число лет горизонта планирования, t – номер года, $CF_t = EP_{пг} + EP_{рг}$ – денежный поток в году t, r – ставка дисконтирования. Число лет горизонта планирования принята

$T_n = 5$ лет, что обуславливается возможность появления более совершенных средств косвенной оценки и управления нефтедобывающими насосными установками по истечению данного срока. Ставка дисконтирования $r = 15$ %, что является средневзвешенной стоимостью капитала для проектов нефтедобывающей отрасли в Российской Федерации. Необходимо учитывать, что в первый год планирования экономическая выгода будет равна нулю.

Срок окупаемости $T_{ок}$ рассчитывался по следующей формуле:

$$T_{ок} = t + \frac{\text{ЧДД}_t}{\text{ЧДД}_{t+1} - \text{ЧДД}_t}, \quad (4.14)$$

где t – номер года с последним отрицательным ЧДД, t+1 – номер года с первым положительным ЧДД.

Таблица 4.10 – Результаты расчета экономической целесообразности проекта в пределах рассматриваемого горизонта планирования для одной скважины

Показатели	Годы горизонта планирования				
	2025 (1)	2026 (2)	2027 (3)	2028 (4)	2029 (5)
Инвестиционные затраты, I_0, тыс. руб.	720	0	0	0	0
Денежный поток в году t, CF_t, тыс. руб.	0	608,75	608,75	608,75	608,75
Дисконтный множитель, $(1+r)^t$	1,15	1,32	1,52	1,75	2,01
Дисконтированный денежный поток, тыс. руб.	0	461,17	400,49	347,86	302,86
ЧДД, тыс. руб.	–720	–258,83	141,66	489,52	792,38

Срок окупаемости проекта согласно формуле (4.14) составит $T_{ок} = 2,65$ лет. Таким образом, проект является экономически эффективным и целесообразным, так как в пределах рассматриваемого горизонта планирования достигнут срок окупаемости и $\text{ЧДД} > 0$.

Выводы по главе 4

1. Разработана цифровая комплексная модель УЭЦН в программной среде *Matlab Simulink*, включающая математические и имитационные модели элементов ЭТК и ГМС УЭЦН, а также модель системы косвенной оценки электротехнических и технологических параметров для управления УЭЦН, основанную на сигма-точечном фильтре Калмана и системе виртуального дебита.

2. Проведена верификация цифровой комплексной модели УЭЦН. Показания цифровой комплексной модели были сравнены с показаниями скважины, эксплуатирующей моделируемое оборудование. Относительная погрешность результатов моделирования составила менее 4 % для дебита и менее 2 % для нагрузочного момента.

3. Проведена апробация системы виртуального дебита на основе регрессионных моделей машинного обучения. Решена задача генерации адекватных технологическому процессу добычи нефти с использованием УЭЦН данных с помощью верифицированной цифровой комплексной модели УЭЦН. Проведен анализ результатов работы обученных регрессионных моделей машинного обучения и выбрана наиболее точная и устойчивая к выбросам модель – модель регрессии *random forest* с количеством деревьев $n = 40$.

4. Проведена апробация метода и алгоритма косвенной оценки на имитационной и полунатурной модели УЭЦН. Эксперименты на имитационной модели были проведены в трех режимах работы: при статических условиях рабочей точки; при изменении рабочей точки; при резком изменении активного сопротивления погружной кабельной линии. Во всех экспериментах система отработала качественно. Эксперимент, проведенный на полунатурной модели УЭЦН, также подтвердил работоспособность разработанной системы косвенной оценки электротехнических и технологических параметров для управления УЭЦН.

5. Приведено технико-экономическое обоснование внедрения системы косвенной оценки электротехнических и технологических параметров для управления УЭЦН. Подтверждена экономическая эффективность и целесообразность проекта в рамках рассматриваемого горизонта планирования, для одной скважины срок окупаемости проекта составляет $T_{ок} = 2,65$ лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом диссертационной работы является решение актуальной научной задачи, заключающейся в разработке системы косвенной оценки электротехнических и технологических параметров для управления УЭЦН, и имеющей важное значение для нефтедобывающей отрасли.

В ходе работы:

1) разработана концептуальная структура системы управления УЭЦН с косвенной оценкой электротехнических и технологических параметров, позволяющая в автоматическом режиме поддерживать работу ЭЦН в желаемой точке рабочей области, за счет формирования задания угловой скорости вращения ПЭД.

2) разработан метод косвенной оценки электротехнических и технологических параметров ЭТК УЭЦН на основе сигма-точечного фильтра Калмана. Разработанный метод позволяет достичь оптимальных показателей качества регулирования при управлении ПЭД за счет точной оценки электротехнических и технологических параметров не только электропривода, но и активного сопротивления кабельной линии.

3) разработана система виртуального дебита, работающая на регрессионных моделях машинного обучения, основанных на методе *random forest*. Разработанная система виртуального дебита позволяет достаточно точно оценивать текущий дебит скважины и оперативно определять возможные аварийные режимы работы УЭЦН.

4) разработаны цифровая и физическая модели системы управления УЭЦН, содержащие блоки машинного обучения и косвенной оценки электротехнических и технологических параметров ЭТК УЭЦН. Цифровая и физические модели системы управления с косвенной оценкой электротехнических и технологических параметров УЭЦН были апробированы на верифицированной комплексной имитационной и полунатурной моделях УЭЦН.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

IGBT – Insulated-gate bipolar transistor;

MAPE – Mean absolute percentage error;

SVR – Support vector regression;

АГЗУ – Автоматическая групповая замерная установка;

АД – Асинхронный двигатель;

АИН – Автономный инвертор напряжения;

ГМС – Гидродинамическая система;

МПСУ – Микропроцессорная система управления;

ОДУ – Обыкновенное дифференциальное уравнение;

ПЭД – Погружной электродвигатель;

РС – Регулятор скорости;

РТ – Регулятор тока;

СУЭП – Система управления электроприводом;

ТМПН – Трехфазный масляный трансформатор для погружных насосов;

ТР – Технологический регулятор;

УЭЦН – Установка электроцентробежного насоса;

ЧДД – Чистый дисконтированный доход;

ШИМ – Широтно-импульсная модуляция;

ЭТК – Электротехнический комплекс;

ЭЦН – Электроцентробежный насос.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ивановский, В. Н. Установки погружных центробежных насосов для добычи нефти / В. Н. Ивановский, С. С. Пекин, А. А. Сабиров – М. : ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2002. – 255 с. – ISBN 5-7246-0172-9.

2. Takacs, G. Electrical Submersible Pumps Manual: Design, Operations, and Maintenance / G. Takacs. – USA, Burlington, MA : Gulf Professional Publishing, 2009. – 440 p.

3. Ковалев, А. Ю. Станции управления электропогружными установками насосной эксплуатации скважин : монография / А. Ю. Ковалев, Е. М. Кузнецов, В. В. Аникин – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2013. – 128 с. – ISBN 978-5-8149-1575-7.

4. Меерович, А. Ф. Назначение и технические данные УЭЦН на скважинах Приобского месторождения // А. Ф. Меерович // Энигма. – 2020. – Т. 27. – № 3. – С. 177-184.

5. Ивановский, В. Н. Учет условий эксплуатации при проектировании периодических режимов работы скважин, оборудованных УЭЦН / В. Н. Ивановский, А. А. Сабиров, С. Б. Якимов, А. А. Клусов // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2013. – № 6. – С. 33-39.

6. Антипин, М. Н. Результаты внедрения циклической эксплуатации УЭЦН в ОАО "Самотлорнефтегаз" / М. Н. Антипин // Инженерная практика. – 2011. – № 5.

7. Фаткуллин, И. Д. Энергетическая эффективность технологических процессов добычи нефти / И. Д. Фаткуллин, Р. И. Гарифуллин, Д. С. Грабовецкий, Р. Р. Ахметов, Р. А. Гилязов // Экспозиция Нефть Газ. – 2013. – Т. 31. – № 6. – С. 55-57.

8. Вахитова, Р. И. Энергопотребление установок электроцентробежных насосов при добыче обводненных нефтей / Р. И. Вахитова, В. А. Молчанова // Территория нефтегаз. – 2016. – № 12. – С. 108-113.

9. Щербакова, К. О. Анализ проблемы высокой обводненности добываемой продукции горизонтальных скважин / К. О. Щербакова // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2022. – Т. 64. – № 6. – С. 29-38.

10. Системы управления автоматизированным электроприводом переменного тока : учебное пособие / А. М. Макаров, А. С. Сергеев, Е. Г. Крылов, Ю. П. Сердобинцев. – Волгоград : Изд-во ВолгГТУ. – 2016. – 192 с.

11. Чиликин, М. Г. Общий курс электропривода / М. Г. Чиликин, А. С. Сандлер. – М. : Энергоиздат, 1981. – 576 с.

12. Зюзев, А. М. К построению бездатчикового электропривода системы ТПН-АД / А. М. Зюзев, К. Е. Нестеров // Электротехника. – 2005. – № 9. – С. 38-41.

13. Ключев, В. И. Теория электропривода: учебник для ВУЗов / В. И. Ключев. – 3-е изд., перераб. И доп. – М. : Энергоатомиздат, 2001. – 696 с. – ISBN 978-5-8149-1575-7.

14. Браславский, И. Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И. Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, В. Н. Поляков. – М. : Издательский центр "Академия", 2004. – 256 с. – ISBN 5-7695-1704-2.

15. Справочник по добыче нефти / В. В. Андреев, К. Р. Уразаков, В. У. Далимов [и др.]. – М. : ОООНедраБизнес-Центр, 2000. – 371 с. – ISBN 5-8365-0048-7.

16. Гизатуллин, Ф. А. Анализ режимов работы электроприводов штанговых скважинных насосных установок / Ф. А. Гизатуллин, М. И. Хакимьянов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2017. – Т. 13. – № 1. – С. 11-18.

17. Хакимьянов, М. И. Интеллектуальная система управления электроприводом штанговой глубиннонасосной установки / М. И. Хакимьянов, Р. А. Семисынов, Е. С. Киселев // Нефтегазовое дело. – 2015. – Т. 13. – № 4. – С. 226–233.

18. Калькулятор ЭЦН [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании "Новомет". – [2025]. – Режим доступа: https://www.novomet.ru/rus/products-and-services/artificial-lift/software/esp-calculator/ (дата обращения: 23.06.2025).

19. Iudin, R. Software complex for sensorless control of an electrical submersible pump / R. Iudin, A. Petrochenkov, E. Solodkiy, D. Vishnyakov, B. Krause, S. Salnikov // IEEE Sensors Journal. – 2024. – Vol. 24. – № 3. – P. 830-843.

20. Чувашев, В. А. Совершенствование асинхронных двигателей малой мощности / В. А. Чувашев, В. Я. Броди, Ю. Н. Папазов // Электротехника. – 2002. – № 10. – С. 21-26.

21. Шаньгин, Е. С. Автоматизированный привод глубинных насосов / Е. С. Шаньгин. – Уфа : Изд-во УТИС, 2001. – 102 с.

22. Шрейнер, Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р.Т. Шрейнер. – Екатеринбург: УрО РАН, 2000. – 654 с. – ISBN 5-7691-1111-9.

23. Колыбельников, А. И. Обзор технологий беспроводных сетей / А. И. Колыбельников // Труды Московского физико-технического института. – 2012. – Т. 4. – № 2-14. – С. 3-29.

24. Artale G. A Line Impedance Calculator Based on a G3 PLC Modem Platform / G. Artale, G. Caravello, A. Cataliotti, V. Cosentino, D. Di Cara, R. Fiorelli // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2022. – Vol. 71, – P. 1-10.

25. Mlynek, P. Measurements and evaluation of PLC modem with G3 and PRIME standards for Street Lighting Control / P. Mlynek, M. Koutny, J. Misurec, Z. Kolka // 18th IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, Glasgow, UK. – IEEE, 2014. – P. 238-243.

26. Shafikov, I. Assessment of reliability of the electric submersible pump variable frequency drive / I. Shafikov, M. Khakimyanov // 2020 International

Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – IEEE, 2020. – P. 1-5.

27. Powers, M. L. Economic considerations for sizing tubing and power cable for electric submersible pumps / M. L. Powers // SPE production engineering. – 1988. – Vol. 3. – № 2. – P. 217-226.

28. Khurmy, M. Reliability of electrical submersible pumps at oil fields / M. Khurmy, M. Ramzan // 2008 5th Petroleum and Chemical Industry Conference Europe-Electrical and Instrumentation Applications. – IEEE, 2008. – P. 1-6.

29. Kirschbaum, L. AI-driven maintenance support for downhole tools and electronics operated in dynamic drilling environments / L. Kirschbaum, D. Roman, G. Singh, J. Bruns, V. Robu, D. Flynn // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 78683-78701.

30. Abou-Houzifa, O. A. 1st slim line ESP deployment in side track Slim 5 inch casing in middle east / O. A. Abou-Houzifa, A. Ismail Ahmed // SPE Middle East Artificial Lift Conference and Exhibition. – SPE, 2016. – P. 1-7.

31. Al-Khalifa, M. A. Electric Submersible Pump Installation and Commissioning-Challenges and Lesson Learned from Field Development / M. A. Al-Khalifa, R. L. Cox, H. Saad // SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition. – SPE, 2015. – P. 1-7.

32. Arteaga, A. K. Recommended safety practices for permanent magnet motors in artificial lift operations / A. K. Arteaga, G. Montero, C. E. Collins // SPE Artificial Lift Conference and Exhibition-Americas. – OnePetro, 2020. – P. 1-7.

33. Chen, K. C. Magnetic drive system with levitated flow-through permanent magnet motors and magnetic bearings to increase the reliability and retrievability of electrical submersible pumps for offshore production / K. C. Chen, H. Artinian, D. Harris, J. Xiao // Offshore Technology Conference Brasil. – OTC, 2019. – P. 21-27.

34. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического управления : учебное пособие / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Профессия, 2004. – 747 с. – ISBN 5-93913-035-6.

35. Ключников, А. Т. Бездатчиковое векторное управление асинхронным двигателем при расчёте в комплексной форме / А. Т. Ключников, А. М. Трупак // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2020. – № 33. – С. 160-176.

36. Solodkiy, E. Induction motor sensorless vector control with an adaptive speed observer and direct electrical angle correction in coordinate transformations / E. Solodkiy, P. Varzanosov, A. Belonogov // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – IEEE, 2017. – P. 1-4.

37. Xu, L. A new high-frequency injection method for sensorless control of doubly fed induction machines / L. Xu, E. Inoa, Y. Liu, B. Guan // IEEE transactions on industry applications. – 2012. – Vol. 48. – № 5. – P. 1556-1564.

38. Zhu, H. A simplified high frequency injection method for PMSM sensorless control / H. Zhu, X. Xiao, Y. Li // 2009 IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference. – IEEE, 2009. – P. 401-405.

39. Ha, J. I. Physical understanding of high frequency injection method to sensorless drives of an induction machine / J. I. Ha, S. K. Sul // Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy. – IEEE, 2000. – Vol. 3. – P. 1802-1808.

40. Анучин, А. С. Системы управления электроприводов : учебник для вузов / А. С. Анучин. – М. : издательский дом МЭИ. – 2015. – 373 с. – ISBN 978-5-383-01258-1.

41. Синюкова, Т. В. Неадаптивные наблюдатели в системах управления электроприводами / Т. В. Синюкова, А. С. Синюков // Управление большими системами. – 2018. – С. 103-109.

42. Вдовин, В. В. Синтез адаптивного наблюдателя координат бездатчикового асинхронного электропривода / В. В. Вдовин,

В. В. Панкратов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2012. – Т. 320. – № 4. – С. 147-153.

43. Вишневский, В. Адаптивный скользящий наблюдатель скорости для бездатчикового асинхронного электропривода / В. Вишневский, С. А. Лазарев, П. В. Митюков // Вестник чувашского университета. – 2010. – № 3. – С. 213-222.

44. Панкратов, В. В. Задачи синтеза алгоритмов идентификации для бездатчиковых асинхронных электроприводов с векторным управлением и вариант их решения / В. В. Панкратов, М. О. Маслов // Силовая интеллектуальная электроника. – 2007. – № 1. – С. 23-43.

45. Yujie, L. Model reference adaptive control system simulation of permanent magnet synchronous motor / L. Yujie, C. Shaozhong // 2015 IEEE Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). – IEEE, 2015. – P. 498-502.

46. Akin, B. State estimation of induction motor using unscented Kalman filter / B. Akin, U. Orguner, A. Ersak // Proceedings of 2003 IEEE Conference on Control Applications, 2003. CCA 2003. – IEEE, 2003. – Vol. 2. – P. 915-919.

47. Li, J. Unscented Kalman filter for speed estimation in induction motor drives / J. Li, Y. Zhong // Trans. of China Electrotechnical Society. – 2006. – Vol. 21. – № 2. – P. 45-50.

48. Wan, E. A. The unscented Kalman filter for nonlinear estimation / E. A. Wan, R. van der Merwe // Proceedings of the IEEE 2000 adaptive systems for signal processing, communications, and control symposium. – IEEE, 2000. – P. 153-158.

49. Kullick, J. Dynamic modeling and simulation of deep geothermal electric submersible pumping systems / J. Kullick, C. Hackl // Energies. – 2017. – Vol. 10. – № 10. – P. 1659-1695.

50. Солодкий, Е. М. Метод косвенного измерения дебита установки электроприводного центробежного насоса / Е. М. Солодкий,

А. Б. Петроченков, Д. Д. Вишняков, С. В. Сальников // Электротехника. – 2021. – № 11. – С. 29-34.

51. Binder, B. J. T. Estimation of flow rate and viscosity in a well with an electric submersible pump using moving horizon estimation / B. J. T. Binder, A. Pavlov, T. A. Johansen // IFAC-PapersOnLine. – 2015. – Vol. 48. – № 6. – P. 140-146.

52. Сычев, Ю. А. Математическое моделирование электротехнических систем. / Ю. А. Сычев, А. А. Бельский – СПб. : ЛЕМА, 2016. – 190 с.

53. Ляхомский, А. В. Управление электромеханическими системами горных машин. / А. В. Ляхомский, В. Н. Фащиленко – М. : Горная книга (МГГУ), 2004. – 296 с. – ISBN 5-7418-0333-4.

54. Мишуринских, С. В. Повышение энергетической эффективности системы «погружной электрический двигатель – электроцентробежный насос» на основе рациональных параметров режимов электротехнологического оборудования нефтяных скважин : дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук : 05.09.03 / Мишуринских Сергей Владимирович ; ПНИПУ. – Пермь, 2022. – 173 с.

55. Мищенко, И. Т. Скважинная добыча нефти : учебное пособие для вузов / И. Т. Мищенко – М. : ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2003. – 816 с. – ISBN 5-7246-0234-2.

56. Гиматудинов, Ш. К. Физика нефтяного и газового пласта / Ш. К. Гиматудинов, А. И. Ширковский – М. : Недра, 1982. – 311 с.

57. Neely, A. B. Experience with pumpoff control in the permian basin / A. B. Neely, H. O. Tolbert // Journal of petroleum technology. – 1988. – Vol. 40. – № 5. – P. 645-649.

58. Mukherjee, H. Multiphase flow in wells / H. Mukherjee, J. P. Brill – Henry L. Doherty Memorial Fund of AIME, Society of Petroleum Engineers, 1999. – 156 p. – ISBN 1-5556-3080-4.

59. Ильясов, Б. Г. Интеллектуальная автоматизированная система управления установкой электроцентробежного насоса / Б. Г. Ильясов,

А. В. Комелин, К. Ф. Тагирова // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2007. – Т. 9. – № 2. – С. 58-70.

60. Сагдатуллин, А. М. Моделирование пуска погружного электродвигателя при выводе на рабочий режим установки электроцентробежного насоса / А. М. Сагдатуллин // Бурение и нефть. – 2014. – № 2. – С. 26-29.

61. Лякишев, А. В. Переходные процессы в коллекторной цепи открытого биполярного транзистора при индуктивной нагрузке / А. В. Лякишев, Е. М. Солодкий, Р. Ю. Юдин, А. Б. Петроченков // Электротехника. – 2023. – № 11. – С. 56-60.

62. Семенов, А. С. Применение системы электропривода с преобразователем частоты и автономным инвертором напряжения на проходческом комбайне / А. С. Семенов // Технические науки – от теории к практике. – 2013. – № 18. – С. 71-77.

63. Баев, А. П. Современные системы управления асинхронным электроприводом / А. П. Баев, А. С. Исаков // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2006. – № 33. – С. 30-34.

64. Солодкий, Е. М. Управление штанговой скважинной насосной установкой для добычи нефти с наблюдателем переменных состояния технологического процесса : дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук : 05.13.05 / Солодкий Евгений Михайлович ; ПНИПУ. – Пермь, 2020. – 172 с.

65. Солодкий, Е. М. Моделирование режимов работы автономного инвертора напряжения на базе IGBT транзисторов с использованием техники векторной широтно-импульсной модуляции / Е. М. Солодкий, Д. А. Даденков // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2014. – Т. 12. – № 9. – С. 45-51.

66. Шевырев, Ю. В. Улучшение качества электроэнергии при работе полупроводникового преобразователя частоты / Ю. В. Шевырев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 2. – С. 171-178.

67. Маклаков, А. С. Влияние на сеть трёхфазного мостового двухуровневого активного выпрямителя напряжения при различных видах ШИМ / А. С. Маклаков, А. А. Радионов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. – Т. 1. – № 2. – С. 40-47.

68. Ровкина, Н. В. Исследование причин возникновения дефектов силовых трансформаторов, питающих установки погружных электроцентробежных насосов нефтяных скважин / Н. В. Ровкина, В. В. Сушков, А. А. Зябкин // Омский научный вестник. – 2012. – № 3. – С. 231-235.

69. Костенко, М. П. Электрические машины : учебник в 2-х частях / М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. – Л. : Энергия. – 1972. – 543 с.

70. Раков, И. В. Методика оценивания параметров и переменных состояния электротехнического комплекса «Кабельная линия - Асинхронный двигатель» на основе баланса мгновенной полной потребляемой мощности : дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук : 2.4.2 / Раков Иван Витальевич ; ТПУ. – Томск, 2024. – 143 с.

71. Cheng, Q. Vector Control of an Induction Motor based on a DSP. Master of Science Thesis. / Q. Cheng, L. Yuan. – Sweden, Gothenburg: Chalmers Bibliotek, 2011. – 76 p.

72. Калачев, Ю. Н. Векторное регулирование (заметки практика) / Ю. Н. Калачев – М. : Издательский дом МЭИ, 2013. – 72 с.

73. Renukrishna, B. Sensorless vector control of induction motor drives using rotor flux observer / B. Renukrishna, S. S. Beevi // 2012 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES). – IEEE, 2012. – P. 1-5.

74. Peña-Gonzalez, I. Scalar/vector sensorless control combination solution for induction motor drives at whole speed range operation / I. Peña-Gonzalez, A. Sanchez-Ruiz, I. Martinez-Ramos, I. Rebollo, J. Arza, P. Catalán // 2019 21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'19 ECCE Europe). – IEEE, 2019. – P. 1-10.

75. Юдин, Р. Ю. Исследование финитных систем управления синхронным двигателем с постоянными магнитами / Р. Ю. Юдин, А. Б. Петроченков, Е. М. Солодкий, Д. Д. Вишняков, С. В. Сальников // Электротехника. – 2023. – № 11. – С. 2-9.

76. Казанцев, В. П. Формирование эталонного движения электромеханических систем управления / В. П. Казанцев, Д. А. Даденков, Р. Ю. Юдин // Электротехника. – 2019. – № 11. – С. 28-33.

77. Даденков, Д. А. Моделирование системы векторного управления асинхронным двигателем в пакете Matlab/Simulink / Д. А. Даденков, Е. М. Солодкий, А. М. Шачков // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2014. – № 11. – С. 117-128.

78. Солдкий, Е. М. Параметрическая идентификация асинхронного двигателя на основе алгоритма фазовой автоподстройки частоты / Е. М. Солодкий, Д. А. Даденков, А. М. Костыгов // Электротехника. – 2018. – № 11. – С. 53-57.

79. Калачев, Ю. Н. Наблюдатели состояния в векторном электроприводе / Ю. Н. Калачев – М. : ЭФО, 2015. – 81 с.

80. Wu, Z. A practical torque estimation method for interior permanent magnet synchronous machine in electric vehicles / Z. Wu, K. Lu, Y. Zhu // PloS one. – 2015. – Vol. 10. – № 6.

81. Вишняков, Д. Д. Метод оптимального управления как способ повышения энергоэффективности электроприводного центробежного насоса / Д. Д. Вишняков, Е. М. Солодкий, А. Б. Петроченков, Р. Ю. Юдин, С. В. Сальников // Электротехника. – 2022. – № 11. – С. 48-52.

82. Iudin, R. Electrical submersible pump complex model for sensorless parameters observing / R. Iudin, A. Petrochenkov, B. Krause, E. Solodkiy, G. Panchenko // 2021 IEEE 62st International Scientific Conference on Power and Electrical Engneering of Riga Technical University (RTUCON). – IEEE, 2021. – P. 1-5.

83. Шафиков, И. Н. Повышение энергоэффективности электроприводов погружных электроцентробежных насосов : дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук : 05.09.03 / Шафиков Игорь Наилевич ; УГНТУ. – Уфа, 2020. – 176 с.

84. Солодкий, Е. М. Разработка методики уравновешивания балансирного станка-качалки с роторными противовесами и определение ее работоспособности в ходе натурного эксперимента / Е. М. Солодкий, А. Б. Петроченков, С. Н. Кривощеков, С. В. Сальников, Д. Д. Вишняков, Р. Ю. Юдин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 5. – С. 174-182.

85. Solodkiy, E. M. Semi-natural simulation system of a sucker-road pump / E. M. Solodkiy, N. A. Efimov, D. A. Dadenkov, R. Y. Yudin // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Vol. 1415. – № 1. – P. 12-17.

86. Хакимьянов, М. И. Функциональные возможности современного контроллера автоматизации штанговых глубиннонасосных установок / М. И. Хакимьянов, М. Г. Пачин // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2011. – № 2. – С. 19-34.

87. Персиянцев, М. Н. Добыча нефти в осложненных условиях / М. Н. Персиянцев. – М.: Недра–Бизнесцентр, 2000. – 653 с. – ISBN 5-8365-0052-5.

88. Menegaz, H. M. T. A systematization of the unscented Kalman filter theory / H. M. T. Menegaz, J. Y. Ishihara, G. A. Borges, A. N. Vargas // IEEE Transactions on automatic control. – 2015. – Vol. 60. – № 10. – P. 2583-2598.

89. Chang, L. Transformed unscented Kalman filter / L. Chang, B. Hu, A. Li, F. Qin // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2012. – Vol. 58. – № 1. – P. 252-257.

90. Kandepu, R. Applying the unscented Kalman filter for nonlinear state estimation / R. Kandepu, B. Foss, L. Imsland // Journal of process control. – 2008. – Vol. 18. – № 7-8. – P. 753-768.

91. Impraimakis, M. An unscented Kalman filter method for real time input-parameter-state estimation / M. Impraimakis, A. W. Smyth // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2022. – Vol. 162. – P. 1-30.

92. He, H. Real-time estimation of battery state-of-charge with unscented Kalman filter and RTOS μCOS-II platform / H. He, R. Xiong, J. Peng // Applied energy. – 2016. – Vol. 162. – P. 1410-1418.

93. György, K. Unscented Kalman filters and particle filter methods for nonlinear state estimation / K. György, A. Kelemen, L. Dávid // Procedia Technology. – 2014. – Vol. 12. – P. 65-74.

94. Qu, C. C. Process monitoring and parameter estimation via unscented Kalman filtering / C. C. Qu, J. Hanh // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2009. – Vol. 22. – № 6. – P. 703-709.

95. Merwe, R. van der Sigma-point Kalman filters for probabilistic inference in dynamic state-space models / R. van der Merwe – Oregon Health & Science University, 2004.

96. Karasalo, M. An optimization approach to adaptive Kalman filtering / M. Karasalo, X. Hu // Automatica. – 2011. – Vol. 47. – № 8. – P. 1785-1793.

97. Oshman, Y. Optimal tuning of a Kalman filter using genetic algorithms / Y. Oshman, I. Shaviv // AIAA guidance, navigation, and control conference and exhibit. – 2000. – P. 4558-4570.

98. Barut, M. Speed-sensorless estimation for induction motors using extended Kalman filters / M. Barut, S. Bogosyan, M. Gokasan // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2007. – Vol. 54. – № 1. – P. 272-280.

99. Salnikov, S. V. Induction motor diagnosis based on machine learning / S. V. Salnikov, E. M. Solodkiy, D. D. Vishnyakov, R. Y. Iudin, A. B. Petrochenkov // 2023 XXVI International Conference on Soft Computing and Measurements (SMC). – IEEE, 2023. – P. 210-214

100. Мыльников, Л. А. Статистические методы интеллектуального анализа данных / Л. А. Мыльников. – СПб. : BHV-СПб, 2020. – 240 с. – ISBN 978-5-9775-6733-6.

101. Mitchel, T. M. Machine learning / T. M. Mitchel, T. M. Mitchel – New York : McGraw-hill, 1997. – 432 p. – ISBN 978-0-0704-2807-2.

102. Lee, J. H. Machine learning: Overview of the recent progresses and implications for the process systems engineering field / J. H. Lee, J. Shin, M. J. Realff // Computers & Chemical Engineering. – 2018. – Vol. 114. – P. 111-121.

103. Саадалов, Т. Методика расчета коэффициента корреляции Фехнера и Пирсона, и их области применения / Т. Саадалов, Р. Мырзаибраимов, Ж. Д. Абдуллаева // Бюллетень науки и практики. – 2021. – Т. 7. – № 10. – С. 270-276.

104. Myers, R. H. Generalized linear models: with applications in engineering and the sciences / R. H. Myers, D. C. Montgomery, G. G. Vining, T. J. Robinson – John Wiley & Sons, 2012. – 520 p. – ISBN 978-0-4704-5463-3.

105. Hamed, Y. Two steps hybrid calibration algorithm of support vector regression and K-nearest neighbors / Y. Hamed, A. I. Alzahrani, A. F. Shafie, Z. Mustaffa, M. C. Ismail, K. K. Eng // Alexandria Engineering Journal. – 2020. – Vol. 59. – № 3. – P. 1181-1190.

106. Clarke, S. M. Analysis of support vector regression for approximation of complex engineering analyses / S. M. Clarke, J. H. Griebsch, T. W. Simpson // Journal of Mechanical Design. – 2005. – Vol. 127. – № 6. – P. 1077-1087.

107. Zhu, F. Load forecasting of the power system: an investigation based on the method of random forest regression / F. Zhu, G. Wu // Energy Engineering: Journal of the Association of Energy Engineers. – 2021. – Vol. 118. – № 6. – P. 1703-1712.

108. Ding, L. Sensorless control of CSC-fed PMSM drives with low switching frequency for electrical submersible pump application / L. Ding, Y. W. Li, N. R. Zargari, R. Paes // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2020. – Vol. 56. – № 4. – P. 3799-3808.

109. Willard, J. Integrating scientific knowledge with machine learning for engineering and environmental systems / J. Willard, X. Jia, S. Xu, M. Steinbach, V. Kumar // ACM Computing Surveys. – 2022. – Vol. 55. – № 4. – P. 1-37.

110. Reich, Y. Evaluating machine learning models for engineering problems / Y. Reich, S. V. Barai // Artificial Intelligence in Engineering. – 1999. – Vol. 13. – № 3. – P. 257-272.

111. Zhong, S. Machine learning: new ideas and tools in environmental science and engineering / S. Zhong, K. Zhang, M. Bagheri, et al. // Environmental science & technology. – 2021. – Т. 55. – №. 19. – С. 12741-12754.

112. Solodkiy, E. Practice of using MexBIOS Development Studio technologies in educational process / E. Solodkiy, D. Dadenkov, A. Terehin, I. Yusupov // 2016 IX International Conference on Power Drives Systems (ICPDS). – IEEE, 2016. – P. 1-5.

113. Шабонас, А. Р. Оптимизация работы электроцентробежного насоса для повышения наработки на отказ / А. Р. Шабонас // Нефтепромысловое дело. – 2021. – Т. 8. – № 632. – С. 30-36.

114. Al-Ballam, S. A data-based reliability analysis of esp failures in oil production wells / S. Al-Ballam, H. Karami, D. Devegowda // Journal of Energy and Power Technology. – 2022. – Т. 4. – №. 4. – С. 1-29.

115. Sobhy, M. A. Dual-Level Electric Submersible Pump (ESP) Failure Classification: A Novel Comprehensive Classification Bridging Failure Modes and Root Cause Analysis / M. A. Sobhy, G. M. Hegazy, A. H. El-Banbi // Energies. – 2025. – Т. 18. – №. 15. – С. 1-25.

116. Копырин, В. А. Оценка совокупной стоимости владения установкой электроцентробежного насоса с внутрискважинным компенсатором / В. А. Копырин, Р. Н. Хамитов, А. С. Глазырин, С. Н. Кладиев, И. В. Раков, А. Л. Портнягин, А. А. Маркова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 2. – С. 166-175.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Объекты интеллектуальной собственности

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022611088

Программа бездатчикового наблюдения параметров установки электроцентробежного насоса

Правообладатель: ***Юдин Ростислав Юрьевич (RU)***

Автор(ы): ***Юдин Ростислав Юрьевич (RU)***

Заявка № **2022610368**

Дата поступления **04 января 2022 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ ***19 января 2022 г.***

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Владелец Ивлиев Григорий Петрович

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023669247

Программа измерения электрических параметров насосных установок

Правообладатель: ***Юдин Ростислав Юрьевич (RU)***

Автор(ы): ***Юдин Ростислав Юрьевич (RU)***

Заявка № **2023668555**

Дата поступления **29 августа 2023 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ ***12 сентября 2023 г.***

Руководитель Федеральной службы

по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат 429b6a0fe3953164baf96f83b73b4aa7

Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**

Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024619770

Программа косвенной оценки технологических параметров насосных установок на основе сигма-точечного фильтра Калмана

Правообладатель: ***ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ "ПЕРМСКАЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА" (RU)***

Автор(ы): ***Юдин Ростислав Юрьевич (RU)***

Заявка № **2024618970**

Дата поступления **22 апреля 2024 г.**

Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ ***25 апреля 2024 г.***

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 429b6a0fe386304bdf96f83b73b4aa7
Владелец Зубов Юрий Сергеевич
Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Акты внедрения результатов диссертационного исследования

Министерство науки и высшего образования
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
ПЕРМСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ПНИПУ)

УТВЕРЖДАЮ:
Проректор по науке и инновациям,
д. ф.-м. н., доцент
Швейкин Алексей Игоревич

А К Т

о внедрении в учебный процесс Пермского национального исследовательского политехнического университета результатов диссертационной работы Юдина Ростислава Юрьевича «Косвенная оценка электротехнических и технологических параметров для управления установкой электроцентробежного насоса», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук

Мы, нижеподписавшиеся, декан электротехнического факультета, к.т.н., Черняев В. В., и. о. заведующего кафедрой «Микропроцессорные средств автоматизации», к.т.н., доцент Ромодин А. В. Составили настоящий акт о том, что в учебный процесс кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации» внедрены результаты диссертационной работы Юдина Р. Ю., в части:

1) комплексной цифровой модели установки электроцентробежного насоса, включающей модели электротехнического комплекса и гидродинамической системы нефтедобывающей установки;

2) структуры системы управления установкой электроцентробежного насоса с косвенной оценкой параметров технологического процесса;

3) метода и алгоритма косвенной оценки электротехнических и технологических параметров электротехнического комплекса установки электроцентробежного насоса;

4) системы виртуального дебита на основе регрессионной модели машинного обучения.

Разработанный метод, алгоритм и модели используются при проведении лабораторных работ и практических занятий по дисциплинам «Системы управления исполнительными механизмами», «Микропроцессорные средства автоматизации и управления», «Основы робототехники и мехатроники», «Электромеханические системы управления», «Цифровые технологии управления электроприводом», «Электрические приводы мехатронных и робототехнических систем» при подготовке студентов по образовательным программам бакалавриата и магистратуры по направлениям «Электроэнергетика и электротехника» и «Автоматизация технологических процессов и производств».

Декан
Электротехнического факультета,
к.т.н. В. В. Черняев

И. о. заведующего кафедрой
«Микропроцессорные средства автоматизации»,
к.т.н., доцент А. В. Ромодин

ООО «ПРОГРАММНЫЕ РЕШЕНИЯ»
Юридический адрес: 426004, Российская Федерация, г. Ижевск, ул. Ленина, д. 45, офис 801
ИНН/КПП: 1800010296 / 180001001 ОГРН: 1231800020593
тел.: +7 (342) 259 8750

АКТ

Внедрения результатов диссертационной работы аспиранта Юдина Р. Ю. «Косвенная оценка электротехнических и технологических параметров для управления установкой электроцентробежного насоса», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук

Мы, нижеподписавшиеся, генеральный директор Лопатин Денис Евгеньевич, главный инженер Бузмаков Алексей Владимирович, составили настоящий акт, подтверждая, что компанией ООО «Программные решения» используются разработанный в ходе диссертационного исследования Юдина Р. Ю. метод и алгоритм косвенной оценки электротехнических и технологических параметров для управления установкой электроцентробежного насоса.

Представленный метод и алгоритм косвенной оценки электротехнических и технологических параметров установки электроцентробежного насоса используется в наблюдении переменных технологических процессов нелинейных систем. Полученные результаты диссертационного исследования позволяют применять метод косвенной оценки электротехнических и технологических параметров технологического процесса на основе сигма-точечного фильтра Калмана для управления нелинейными технологическими объектами.

Генеральный директор Лопатин Д.Е.

Главный инженер Бузмаков А.В.

УДМУРТСКАЯ РЕСПУБЛИКА г. ИЖЕВСК
ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«ПРОГРАММНЫЕ РЕШЕНИЯ»
ОГРН 1231800020593
ИНН 1800010296

СИСТЕМНЕФТЕАВТОМАТИКА

А К Т от 23.04.25

Внедрения результатов диссертационной работы аспиранта Юдина Р. Ю. «Косвенная оценка электротехнических и технологических параметров для управления установкой электроцентробежного насоса», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук

Мы, нижеподписавшиеся, директор Горшков Дмитрий Борисович, главный инженер Баруткин Александр Вячеславович, составили настоящий акт о том, что ООО «Системнефтеавтоматика» использовала результаты диссертационного исследования Юдина Ростислава Юрьевича, а именно:

1) структура системы управления установкой электроцентробежного насоса с косвенной оценкой электротехнических и технологических параметров;

2) метод косвенной оценки электротехнических и технологических параметров установки электроцентробежного насоса на основе сигма-точечного фильтра Калмана;

3) система виртуального дебита на основе регрессионной модели машинного обучения (метод *random forest*).

Разработанный метод и алгоритм косвенной оценки электротехнических и технологических параметров для управления установкой электроцентробежного позволит уменьшить время простоя нефтедобывающей установки за счет своевременного обнаружения неисправностей и наблюдения параметров технологического процесса.

Директор
ООО «Системнефтеавтоматика», Д. Б. Горшков

Главный инженер
ООО «Системнефтеавтоматика», А. В. Баруткин

Общество с ограниченной ответственностью
«Системнефтеавтоматика»
ОГРН 1105904019869
ИНН /КПП 5904241217 /590401001
ОКПО 55046897

Юр. адрес: 614002, Пермский край, Г. О. ПЕРМСКИЙ, Г ПЕРМЬ, УЛ ФОНТАННАЯ, Д. 2А.
Почт. адрес:614002, Пермский край, г. ПЕРМЬ, ул. Фонтанная, д.2А.
E-mail: info@snaperm.ru
Тел. (342) 216-81-87, Факс (342) 216-14-58