

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

ЮДИН Ростислав Юрьевич

**КОСВЕННАЯ ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ УСТАНОВКОЙ
ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА**

Специальность 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

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

Пермь – 2025

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 обуславливает 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.

Степень разработанности темы исследования. Моделированию электротехнической и гидродинамической подсистем нефтедобывающих установок посвящены работы таких ученых, как Ш. К. Гиматулинов, 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.

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.

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.

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 для 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%.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 116 наименований, изложена на 143 страницах машинописного текста и включает 35 рисунков, 10 таблиц и 2 приложения.

Во введении представлено обоснование актуальности работы, поставлена цель и сформулированы научные задачи. Определены объект и предмет исследования. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту, и их новизна.

В первой главе проведен анализ существующих систем управления УЭЦН. Рассмотрены использующиеся системы телеметрии для измерения технологических параметров УЭЦН, состоящие как из наземной, так и подземной подсистем. Определены недостатки существующих измерительных систем. Предложено использование косвенного метода оценки электротехнических и технологических параметров УЭЦН. Рассмотрены методы косвенной оценки переменных состояния ПЭД, как основного элемента в технологическом процессе добычи нефти с использованием УЭЦН. Описаны достоинства и недостатки существующих методов наблюдения переменных состояния ПЭД в составе УЭЦН. Предложена структура системы косвенной оценки и управления ПЭД в составе УЭЦН, основанная на применении векторной системы управления и сигма-точечного фильтра Калмана. Определена концептуальная структура, позволяющая косвенно оценивать дебит для управления УЭЦН (рисунок 1). Данная структура позволяет формировать задание скорости вращения ПЭД, при котором ЭЦН будет работать в желаемой точке рабочей области.

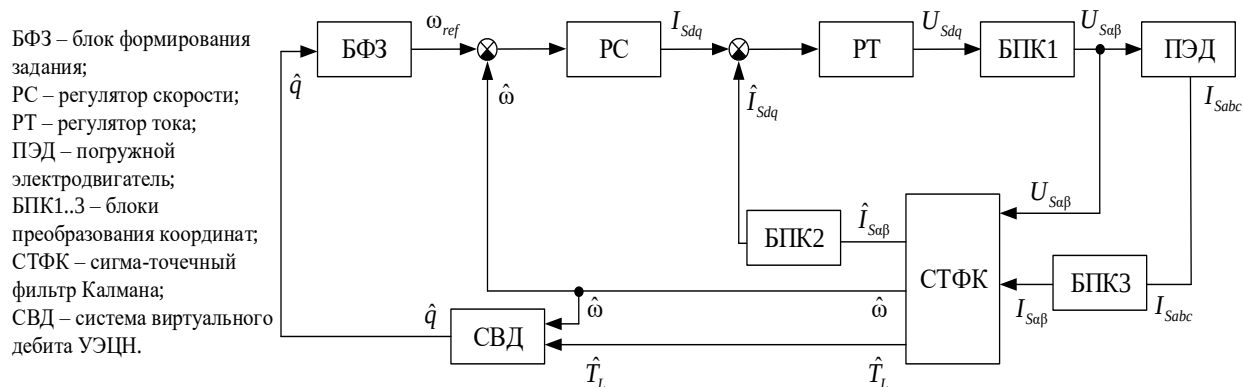


Рисунок 1 – Структура системы косвенной оценки электротехнических и технологических параметров и управления УЭЦН

(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 $dq0$; $I_{Sa\beta}$, $\hat{I}_{Sa\beta}$ – задание и наблюдаемый ток статора ПЭД в системе координат $\alpha\beta0$; I_{Sabc} – ток статора ПЭД в системе координат abc ; U_{Sdq} – напряжение статора ПЭД в системе координат $dq0$; $U_{Sa\beta}$ – напряжение статора ПЭД в системе координат $\alpha\beta0$)

Во второй главе разработана комплексная модель УЭЦН как технологического объекта управления, включающая математические и имитационные модели подсистем УЭЦН. Модель УЭЦН была декомпозирована на две составляющие: ЭТК УЭЦН и ГМС УЭЦН. В состав ЭТК УЭЦН были включены следующие модели: станция управления с частотным преобразователем, трехфазный масляный трансформатор для погружных насосов (ТМПН), кабельная линия, ПЭД (асинхронный двигатель (АД)) с системой

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

Математическое и имитационное моделирование элементов ЭТК УЭЦН производилось на основе схемы замещения, представленной на рисунке 2.

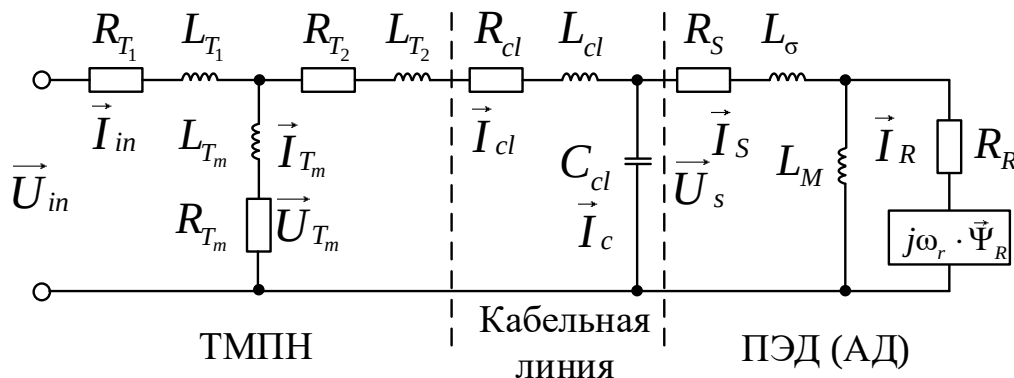


Рисунок 2 – Схема замещения ЭТК УЭЦН

($\vec{U}_{in}$ 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, $\vec{I}_{cl}$ – вектор тока кабельной линии, $\vec{I}_c$ – вектор тока емкости, R_{cl} , L_{cl} и C_{cl} – активное сопротивление, индуктивность и емкость (на броню) кабельной линии, $\vec{U}_s$ и $\vec{I}_s$ – вектора напряжения и тока статора ПЭД, R_s – активное сопротивление статора ПЭД, L_σ – приведенная индуктивность рассеяния 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 потокоцепления ротора ПЭД)

Математическая и имитационная модели станции управления с частотным преобразователем представлены в виде модели автономного инвертора напряжения с силовыми ключами, что позволяет формировать импульсы широтно-импульсной модуляции и исследовать переходные процессы в ПЭД.

Повышающий трансформатор серии ТМПН описывается Т-образной схемой замещения, так как данная схема замещения в достаточной степени точно описывает энергетические и электромагнитные процессы, протекающие в трансформаторе. Также Т-образная схема замещения позволяет проводить анализ статических и динамических режимов работы трансформатора.

В разработанной модели кабельная линия описывается как последовательное соединение активного сопротивления и индуктивности с подключенной в параллель емкостью, которая эквивалента емкости жилы кабеля на броню. В общем виде распределение емкостей в трехжильном кабеле подразумевает также наличие междуфазной емкости, которая не учитывалась в разработанной модели, так как в рассматриваемой марке кабеля – кабель погружной бронированный плоский (КПБП), каждая из трех фаз кабельной линии оснащена собственным заземленным экраном (свинцовой оболочкой), который лишает фазы кабельной линии междуфазных емкостей. Таким образом, из-за экранов любая фаза кабельной линии с точки зрения емкости ведет себя независимо от двух других фаз. В рассматриваемом случае емкость определяется только свойствами изоляции между жилой

и броней и не зависит от того, какое напряжение приложено к соседним фазам, и какой данное напряжение имеет угловой сдвиг.

В комплексной модели УЭЦН ПЭД представлен асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором (АДКЗ). Для описания ПЭД используется обратная Г-образная схема замещения АДКЗ. Данная схема замещения позволяет полноценно исследовать как статические, так и динамические режимы работы ПЭД.

Для реализации модели системы управления ПЭД использовалось уравнение равновесия ЭДС для обратной Г-образной схемы замещения в векторной форме:

$$L_{\sigma} \frac{d\vec{I}_S}{dt} = \vec{U}_S - (R_S + R_R + j\omega_1 \cdot L_{\sigma}) \cdot \vec{I}_S - \left(j\omega_r - \frac{R_R}{L_M} \right) \cdot \vec{\Psi}_R, \quad (1)$$

где ω_1 – это скорость вращения поля ротора.

Механическая часть ПЭД описывалась следующим уравнением:

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{C \cdot \omega}{J} + \frac{T_e - T_L}{J}, \quad (2)$$

где ω – механическая угловая скорость ротора, T_e – электромагнитный момент ПЭД, T_L – нагрузочный момент, C – коэффициент трения, J – момент инерции.

В качестве системы управления была выбрана векторная система управления АД с косвенной оценкой электротехнических параметров (рисунок 3). Регуляторы скорости и тока имеют ПИ-структуру и настроены на апериодический оптимум, при этом в структуру регулятора тока были добавлены обратные нелинейности для линеаризации системы уравнений.

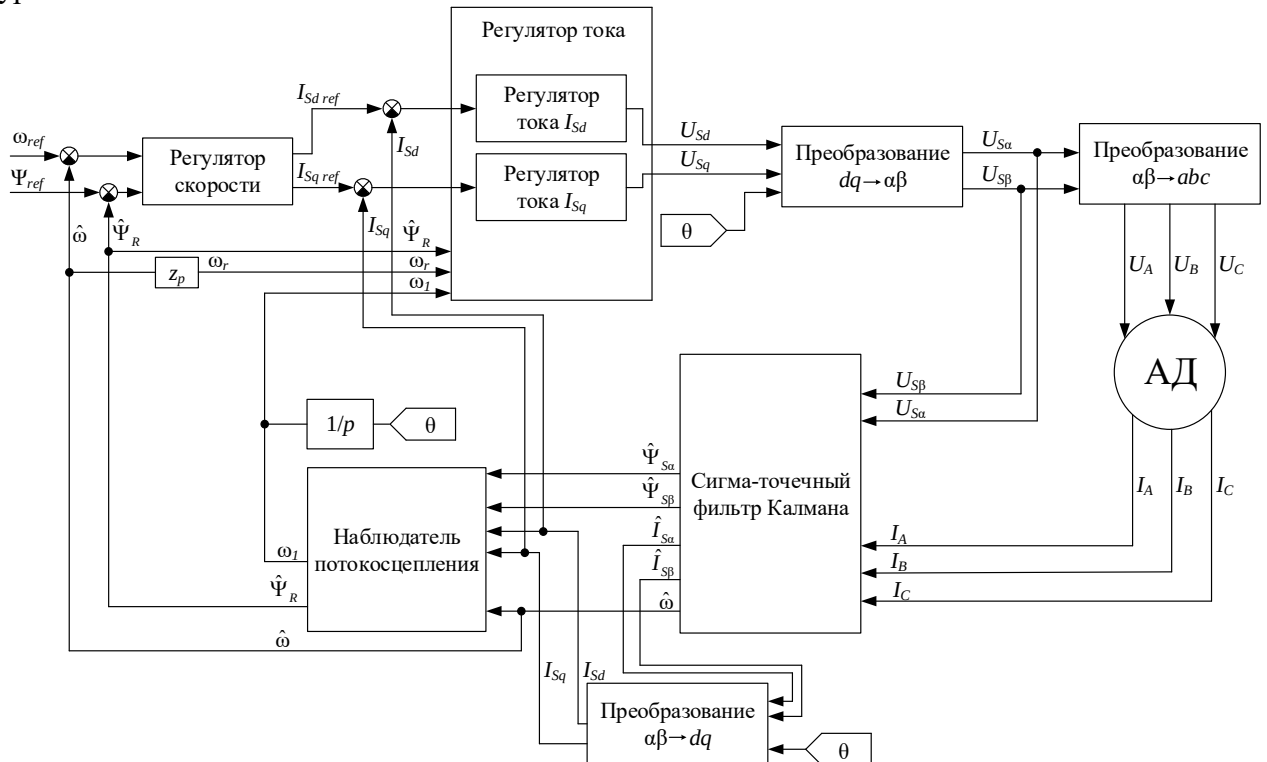


Рисунок 3 – Структурная схема системы управления ПЭД УЭЦН с косвенной оценкой электротехнических параметров

(Ψ_{ref} – задание потокосцепления ротора, θ – электрический угол, p – оператор Лапласа, z_p – количество пар полюсов двигателя)

В рассматриваемой конфигурации УЭЦН присутствуют только датчики тока и напряжения, находящиеся в станции управления, поэтому в системе управления были реализованы сигма-точечный фильтр Калмана и наблюдатель потокосцепления для оценки

переменных ПЭД. Для ориентации вращающейся системы координат и выполнения преобразований координат необходима информация об угловом положении вектора потокосцепления ротора. В разработанной системе реализован наблюдатель потокосцепления ротора, описываемый следующей системой уравнений в неподвижной системе координат $\alpha\beta 0$ в комплексной области (на вход наблюдателя поступают потокосцепления статора, оцененные с помощью сигма-точечного фильтра Калмана):

$$\begin{cases} \Psi_{R\alpha} = \hat{\Psi}_{S\alpha} - L_{\sigma} \cdot I_{S\alpha} \\ \Psi_{R\beta} = \hat{\Psi}_{S\beta} - L_{\sigma} \cdot I_{S\beta} \end{cases} \quad (3)$$

Имитационная модель ЭЦН, как элемента ГМС УЭЦН, описывается системой из трех уравнений, в которую входят полиномы мощности, напора и КПД. Математическая модель ЭЦН была получена аппроксимацией степенными полиномами каталожных характеристик насоса. В модели ЭЦН также учитывалось количество ступеней, на которых работает насос.

Модель притока нефтяной жидкости к забою скважины представлена аperiodическим звеном первого порядка:

$$\frac{H}{Q} = \frac{1}{F \cdot p + Kpg}, \quad (4)$$

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.

Разработанные модели ЭТК и ГМС УЭЦН составляют комплексную модель УЭЦН, которая позволит исследовать метод и алгоритм косвенной оценки и управления электротехническими и технологическими параметрами УЭЦН.

В третьей главе разработан метод косвенной оценки и реализован алгоритм управления электротехническими и технологическими параметрами УЭЦН. Представлен синтез разработанной системы косвенной оценки электротехнических и технологических параметров для управления УЭЦН, состоящей из сигма-точечного фильтра Калмана и системы виртуального дебита скважины.

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

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \mathbf{x}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t; \boldsymbol{\beta}) + \mathbf{w}_d(t) \\ \mathbf{z}_k = \mathbf{h}(\mathbf{x}(t_k)) + \mathbf{n}_k \end{cases}, \quad (5)$$

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:

$$\mathbf{x} \in \mathbb{R}^8; \mathbf{z}_k \in \mathbb{R}^3; \mathbf{u} \in \mathbb{R}^2. \quad (6)$$

Вектор состояния системы состоит из токов статора ПЭД в системе координат $\alpha\beta 0$ $I_{S\alpha}$ и $I_{S\beta}$, потокосцеплений статора ПЭД в системе координат $\alpha\beta 0$ $\Psi_{S\alpha}$ и $\Psi_{S\beta}$, угловой скорости вращения ПЭД ω , активного сопротивления кабельной линии R_{cl} , момента нагрузки ПЭД T_L и псевдоконстанты, описывающей динамику нагрузки c_p :

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} I_{S\alpha} & I_{S\beta} & \Psi_{S\alpha} & \Psi_{S\beta} & \omega & R_{cl} & T_L & c_p \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Вектор управляющих воздействий состоит из напряжений статора ПЭД в системе координат $\alpha\beta$ U_{s_α} и U_{s_β} :

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} U_{s_\alpha} & U_{s_\beta} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

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

$$\mathbf{z}_k = \begin{bmatrix} I_a & I_b & I_c \end{bmatrix}. \quad (9)$$

В комплексной модели УЭЦН для описания ПЭД, представленного асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором, использовалась обратная Г-образная схема замещения. В системе обыкновенных дифференциальных уравнений (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. Для этого с помощью выражения $\vec{\Psi}_r = \vec{\Psi}_s - L_\sigma \cdot \vec{I}_s$ был осуществлен переход от потокосцепления ротора к потокосцеплению статора. Уравнение, описывающее токи статора, приняло следующий вид:

$$L_\sigma \frac{d\vec{I}_s}{dt} = \vec{U}_s - (R_s + R_r + j\omega_r \cdot L_\sigma - \frac{R_r \cdot L_\sigma}{L_M}) \cdot \vec{I}_s + (\frac{R_r}{L_M} - j\omega_r) \cdot \vec{\Psi}_s. \quad (10)$$

Разложение полученного выражения на компоненты $\alpha\beta$ приводит к двум дифференциальным уравнениям для сигма-точечного фильтра Калмана.

Потокосцепления статора описываются уравнениями равновесия статора с учетом активного сопротивления кабельной линии, так как падение напряжения возникает не только на обмотках статора, но и по всей кабельной линии.

$$\frac{d\vec{\Psi}_s}{dt} = \vec{U}_s - (R_s + R_{cl}) \cdot \vec{I}_s. \quad (11)$$

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

$$\frac{dR_{cl}}{dt} = 0. \quad (12)$$

Уравнение для описания угловой скорости вращения ПЭД выводится из уравнения (2), описывающего механические взаимосвязи в асинхронном двигателе:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{3z_p}{2J} \cdot (\Psi_{s_\alpha} I_{s_\beta} - \Psi_{s_\beta} I_{s_\alpha}) - \frac{C}{J} \cdot \omega - \frac{T_L}{J}. \quad (13)$$

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:

$$BHP(\omega, q_{op}) = \sum_{n=0}^N \left[a_n \cdot \left(q_{op} \frac{\omega_{ref}}{\omega} \right)^N \right] \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ref}} \right)^3, \quad (14)$$

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:

$$T_L(\omega_r) = k_0 + k_1\omega_r + k_2\omega_r^2. \quad (15)$$

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, было выведено следующее выражение:

$$\frac{dT_L}{dt} = \frac{dT_L}{d\omega_r} \frac{d\omega_r}{dt} = (k_1 + 2k_2\omega_r) \frac{d\omega_r}{dt}. \quad (16)$$

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:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{S\alpha} \\ I_{S\beta} \\ \Psi_{S\alpha} \\ \Psi_{S\beta} \\ \omega \\ R_{cl} \\ T_L \\ c_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{R_R}{L_M} - \frac{R_S + R_{cl} + R_R}{L_\sigma} \right) \cdot I_{S\alpha} - z_p \cdot \omega \cdot I_{S\beta} + \frac{R_R \cdot \Psi_{S\alpha}}{L_M \cdot L_\sigma} + \\ \frac{z_p}{L_\sigma} \cdot \omega \cdot \Psi_{S\beta} + \frac{U_{S\alpha}}{L_\sigma} \\ z_p \cdot \omega \cdot I_{S\alpha} + \left(\frac{R_R}{L_M} - \frac{R_S + R_{cl} + R_R}{L_\sigma} \right) \cdot I_{S\beta} - \frac{z_p}{L_\sigma} \cdot \omega \cdot \Psi_{S\alpha} + \\ \frac{R_R \cdot \Psi_{S\beta}}{L_M \cdot L_\sigma} + \frac{U_{S\beta}}{L_\sigma} \\ -(R_S + R_{cl}) \cdot I_{S\alpha} + U_{S\alpha} \\ -(R_S + R_{cl}) \cdot I_{S\beta} + U_{S\beta} \\ \frac{3z_p}{2J} \cdot (\Psi_{S\alpha} I_{S\beta} - \Psi_{S\beta} I_{S\alpha}) - \frac{C}{J} \cdot \omega - \frac{T_L}{J} \\ 0 \\ c_p \left(\frac{3z_p}{2J} \cdot (\Psi_{S\alpha} I_{S\beta} - \Psi_{S\beta} I_{S\alpha}) - \frac{C}{J} \cdot \omega - \frac{T_L}{J} \right) \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

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. На шаге прогнозирования (18) и коррекции (19) использовались следующие уравнения:

$$\begin{cases} \mathcal{Y} = \mathbf{f}(\chi) \\ \hat{\mathbf{x}}_k^- = \sum_{i=0}^{2n} w_i^m \mathcal{Y}_i \\ \mathbf{P}_{x_k}^- = \sum_{i=0}^{2n} w_i^c (\mathcal{Y}_i - \hat{\mathbf{x}}_k^-)(\mathcal{Y}_i - \hat{\mathbf{x}}_k^-)^T + \mathbf{Q} \end{cases}, \quad (18)$$

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

$$\begin{cases} \mathcal{Z} = \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_k^-) \\ \boldsymbol{\mu}_z = \sum_{i=0}^{2n} w_i^m \mathcal{Z}_i \\ \mathbf{y} = \mathbf{z} - \boldsymbol{\mu}_z \\ \mathbf{P}_z = \sum_{i=0}^{2n} w_i^c (\mathcal{Z}_i - \boldsymbol{\mu}_z)(\mathcal{Z}_i - \boldsymbol{\mu}_z)^T + \mathbf{R} \\ \mathbf{K} = \left[\sum_{i=0}^{2n} w_i^c (\mathcal{Z}_i - \hat{\mathbf{x}}_k^-)(\mathcal{Z}_i - \boldsymbol{\mu}_z)^T \right] \mathbf{P}_z^{-1} \\ \hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K} \mathbf{y} \\ \mathbf{P}_{x_k} = \mathbf{P}_{x_k}^- - \mathbf{K} \mathbf{P}_z \mathbf{K}^T \end{cases}, \quad (19)$$

где $\mathcal{Z}$ – множество априорных состояний, преобразованное функцией измерения $\mathbf{h}$, $\boldsymbol{\mu}_z$ – средневзвешенное значение сигма-точек, преобразованное в измерения, $\mathbf{z}$ – вектор измерений, $\mathbf{y}$ – остаток, $\mathbf{K}$ – матрица коэффициентов усиления, $\mathbf{R}$ – ковариационная матрица шума. Для рассматриваемой системы функция измерения примет следующий вид:

$$\mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_k^-) = \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \mathbf{0}_{2 \times 6} \\ 0 & 1 & \end{bmatrix}. \quad (20)$$

Фактический вектор измерения состоит из трех компонентов: токов статора I_a , I_b и I_c , полученных с датчиков тока. В сфере электроприводов 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:

$$\begin{aligned} \text{VAR}(T_{\alpha\beta} \mathbf{n}_k) &= \mathbb{E}[(T_{\alpha\beta} \mathbf{n}_k)(T_{\alpha\beta} \mathbf{n}_k)^T] \\ &= \mathbb{E}[T_{\alpha\beta} \mathbf{n}_k \mathbf{n}_k^T T_{\alpha\beta}^T] = T_{\alpha\beta} \mathbb{E}[\mathbf{n}_k \mathbf{n}_k^T] T_{\alpha\beta}^T, \end{aligned} \quad (21)$$

где $T_{\alpha\beta}$ – матрица преобразования Кларка размера 3×2 . Исходя из предположения, что измерения датчиков не коррелированы, было выведено следующее выражение для матрицы шума $\mathbf{R}$ в терминах дисперсии, характеризующее шум $\mathbf{n}_k$:

$$\mathbf{R} = T_{\alpha\beta} \begin{bmatrix} \sigma_a^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_b^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_c^2 \end{bmatrix} T_{\alpha\beta}^T, \quad (22)$$

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 $\mathbf{Q}$ и $\mathbf{R}$ для параметризации системы и шума измерений.

Параметры матрицы $\mathbf{R}$ определяются экспериментально в зависимости от используемых в системе датчиков тока.

Процесс расчета матрицы $\mathbf{Q}$ 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 $\mathbf{Q}$, имеют одинаковую форму, так как через напряжения шум определяется одинаковыми элементами в системе. Таким образом, матрица входа шума $\mathbf{L}$ принимает следующий вид:

$$\mathbf{L} = \left[\begin{array}{cccc|c} \frac{1}{L_\sigma} & 0 & 1 & 0 & \\ 0 & \frac{1}{L_\sigma} & 0 & 1 & \end{array} \right] \mathbf{0}_{2 \times 4}^T. \quad (23)$$

При наличии шума, поступающего в систему через матрицу $\mathbf{L}$, система ОДУ будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{x}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t); \boldsymbol{\beta}) + \mathbf{L} \begin{bmatrix} (u_{Sa} + \tilde{u}_{Sa}) \\ (u_{S\beta} + \tilde{u}_{S\beta}) \end{bmatrix}, \quad (24)$$

где $\tilde{u}_{Sa}$ и $\tilde{u}_{S\beta}$ – шум датчиков в системе координат $\alpha\beta 0$.

Зная матрицу $\mathbf{L}$, можно найти ковариационную матрицу $\mathbf{Q}$:

$$\begin{aligned} \mathbf{Q} &= \mathbb{E}[(\mathbf{L}\tilde{\mathbf{u}}_{Sa}\tilde{\mathbf{u}}_{Sa\beta})(\mathbf{L}\tilde{\mathbf{u}}_{Sa\beta})^T] \\ &= \mathbb{E}[\mathbf{L}\tilde{\mathbf{u}}_{Sa\beta}\tilde{\mathbf{u}}_{Sa\beta}^T\mathbf{L}^T] = \mathbf{L}\mathbb{E}[\tilde{\mathbf{u}}_{Sa\beta}\tilde{\mathbf{u}}_{Sa\beta}^T]\mathbf{L}^T. \end{aligned} \quad (25)$$

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:

$$\tilde{\mathbf{Q}} = \begin{bmatrix} \sigma_{u_{Sa}}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{u_{S\beta}}^2 \end{bmatrix}, \quad (26)$$

где $\sigma_{u_{Sa}}^2$ и $\sigma_{u_{S\beta}}^2$ – дисперсия измерения шума в системе координат $\alpha\beta 0$. Соответственно матрица $\mathbf{Q}$, при учете дискретизации шума, примет следующий вид:

$$\mathbf{Q} = \left[\begin{array}{cccc|c} \frac{\sigma_{u_{Sa}}^2 \Delta t^2}{L_\sigma^2} & 0 & \frac{\sigma_{u_{Sa}}^2 \Delta t^2}{L_\sigma} & 0 & \\ 0 & \frac{\sigma_{u_{S\beta}}^2 \Delta t^2}{L_\sigma^2} & 0 & \frac{\sigma_{u_{S\beta}}^2 \Delta t^2}{L_\sigma} & \\ \frac{\sigma_{u_{Sa}}^2 \Delta t^2}{L_\sigma} & 0 & \sigma_{u_{Sa}}^2 \Delta t^2 & 0 & \\ 0 & \frac{\sigma_{u_{S\beta}}^2 \Delta t^2}{L_\sigma} & 0 & \sigma_{u_{S\beta}}^2 \Delta t^2 & \\ \hline & & \mathbf{0}_{4 \times 4} & & \mathbf{0}_{4 \times 4} \end{array} \right] \mathbf{0}_{4 \times 4}^T. \quad (27)$$

Вне зависимости от источника возникновения шума (неопределенность в управляющих воздействиях или шум измерения датчиков напряжения) параметризация матрицы $\mathbf{Q}$ 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. Применяв к напряжениям преобразование из формулы (22), можно найти дисперсию шума для системы координат $\alpha\beta 0$. 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.

Выбор начальных значений для ковариационной матрицы $\mathbf{P}$ был основан на предположении, что в начальный момент времени двигатель работает в режиме холостого хода. Соответственно, диагональные элементы матрицы $\mathbf{P}$ близки к нулю.

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

В исследовании использовался подход к реализации системы виртуального дебита УЭЦН на основе модели машинного обучения. Выходным параметром модели является дебит скважины. Входные параметры – угловая скорость вращения вала ПЭД, нагрузочный момент на валу ПЭД и плотность нефтяной жидкости.

Разработанный алгоритм управления УЭЦН с косвенной оценкой электротехнических и технологических параметров состоит из трех этапов – инициализация начальных параметров; формирование управляющих воздействий; оценка параметров. На этапе инициализации задаются начальные параметры системы – желаемая точка рабочей области ЭЦН (желаемый дебит); коэффициент трансформации; активное сопротивление кабельной линии; параметры ПЭД для обратной Г-образной схемы замещения АД; плотность нефтяной жидкости скважины; начальные параметры сигматочечного фильтра Калмана матрицы $\mathbf{P}$, $\mathbf{L}$, $\mathbf{Q}$, $\mathbf{R}$. На этапе формирования управляющих воздействий векторная система управления ПЭД формирует управляющие сигналы для двигателя. Этап оценки параметров системы состоит из четырех составляющих: шаг прогнозирования фильтра Калмана, шаг коррекции фильтра Калмана, оценка наблюдателя потокосцепления, оценка системы виртуального дебита. На шаге прогнозирования фильтра Калмана вычисляются составляющие вектора состояния системы и их ковариации. На шаге коррекции фильтра Калмана вычисленные составляющие вектора состояния системы и их ковариации уточняются в соответствии с показаниями датчиков тока. Следует отметить, что при реализации разработанного алгоритма на микроконтроллере шаг прогнозирования вычисляется каждую 10^{-5} с, а уточнение на шаге коррекции происходит, когда приходят показания датчиков тока – примерно каждые 10^{-3} с. С помощью полученных с фильтра Калмана проекций тока статора, потокосцепления статора, а также угловой скорости вращения ПЭД, наблюдатель потокосцепления оценивает электрический угол, угловую скорость вращения координатной системы $dq0$ и потокосцепление ротора. Оцененные фильтром Калмана нагрузочный момент на валу ПЭД и угловая скорость вращения вала ПЭД, а также заданная на этапе инициализации плотность нефтяной жидкости используются моделью машинного обучения в системе виртуального дебита. Наблюдаемый дебит позволяет оценить работает ли УЭЦН в желаемой точке рабочей области и сформировать следующее задание для системы управления двигателем.

В четвертой главе проведена апробация разработанной системы косвенной оценки электротехнических и технологических параметров для управления УЭЦН. Составлено технико-экономическое обоснование внедрения разработанной системы косвенной оценки. Апробация метода косвенной оценки проводилась на разработанных в среде визуального

программирования *Matlab Simulink* цифровых моделях. Цифровая модель УЭЦН является комплексной и состоит из двух основных блоков – ЭТК УЭЦН и ГМС УЭЦН.

Цифровая модель ЭТК УЭЦН включает следующие элементы: автономный инвертор напряжения совместно с алгоритмами векторной широтно-импульсной модуляции, имитирующий работу частотного преобразователя; ТМПНГ-100/10-УХЛ1 – трансформатор силовой трехфазный масляный для погружных насосов герметичного исполнения; КПБП 3х16-3,3 – кабель погружной бронированный плоский трехжильный, длина – 1,5 км; ПЭД 32-117 – асинхронный погружной электродвигатель. Также в блоке цифровой модели ЭТК УЭЦН были реализованы следующие элементы системы управления: регулятор скорости; регулятор тока; наблюдатель потокосцепления; сигматочечный фильтр Калмана.

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). 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:

$$\begin{cases} P(q) = N \cdot \left(31,96380 - 0,45788 \cdot q + 0,01786 \cdot q^2 + 0,00071 \cdot q^3 - 2,89181 \cdot 10^{-5} \cdot q^4 \right. \\ \quad \left. + 2,62443 \cdot 10^{-7} \cdot q^5 \right) \\ H(q) = N \cdot \left(6,17107 - 0,03825 \cdot q + 0,00410 \cdot q^2 - 0,00061 \cdot q^3 + 3,74231 \cdot 10^{-5} \cdot q^4 \right. \\ \quad \left. - 1,11309 \cdot 10^{-6} \cdot q^5 + 1,55288 \cdot 10^{-8} \cdot q^6 - 8,19364 \cdot 10^{-11} \cdot q^7 \right) \\ \eta(q) = N \cdot \left(0,01776 + 2,16101 \cdot q + 0,05599 \cdot q^2 - 0,00735 \cdot q^3 + 0,00031 \cdot q^4 \right. \\ \quad \left. - 7,76671 \cdot 10^{-6} \cdot q^5 + 9,79378 \cdot 10^{-8} \cdot q^6 - 4,8907 \cdot 10^{-10} \cdot q^7 \right) \end{cases}, \quad (28)$$

где $P(q)$ – полином мощности, $H(q)$ – полином напора, $\eta(q)$ – полином КПД, N – количество ступеней насоса, q – производительность насоса.

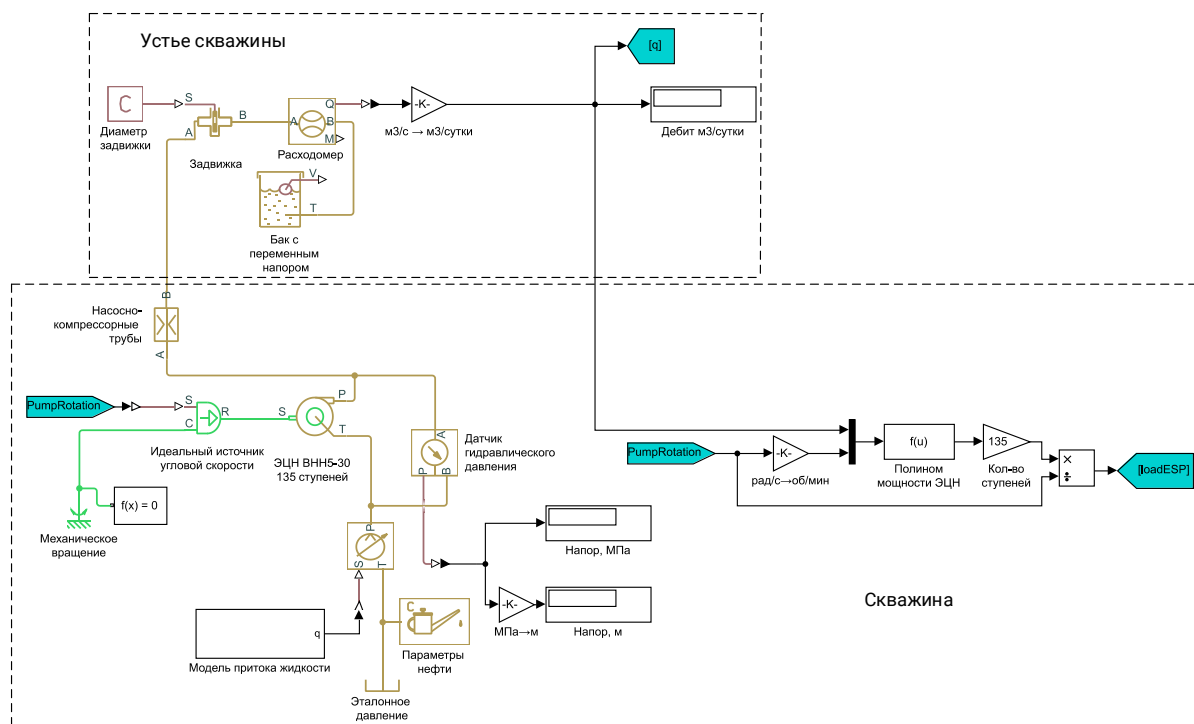


Рисунок 4 – Цифровая модель ГМС УЭЦН

Результаты верификации цифровой модели представлены в таблице 1. Верификация результатов моделирования осуществлялась с помощью метрики относительной погрешности.

Таблица 1 – Результаты верификации цифровой модели УЭЦН

	$f = 50 \text{ Гц}$		$f = 55 \text{ Гц}$		$f = 60 \text{ Гц}$	
	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

С помощью верифицированной комплексной модели УЭЦН были сгенерированы дополнительные наборы данных, так как данных, полученных со скважины, недостаточно для обучения моделей машинного обучения. Результат работы моделей оценивался с помощью метрики «средняя абсолютная ошибка в процентах» (*MAPE – mean absolute percentage error*):

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{|y_i|} \cdot 100\%. \quad (29)$$

Таблица 2 – Сравнительная таблица результатов оценки дебита регрессионными моделями

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

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. Основными недостатками линейной регрессии являются трудоемкость поиска коэффициентов модели и невозможность адекватно моделировать нелинейные процессы, что является причиной большого значения ошибки по сравнению с моделями, показавшими наилучший результат, поскольку функция вида $q = f(\omega, T_L, \rho)$ нелинейная. В алгоритме

k -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. Сравнительный анализ различных ядер регрессии опорных векторов 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. Наилучший результат показала регрессия *random forest* («случайного леса») с числом деревьев $n = 40$. Эта модель была выбрана в качестве основы для системы виртуального дебита УЭЦН. Точность оценки регрессии «случайного леса» растет с увеличением количества деревьев. Таким образом, большее количество деревьев дает лучший результат. Точность оценки дебита, полученная по 40 деревьям, является достаточной. Это оптимальное количество деревьев для работы с доступными вычислительными мощностями. Большая часть используемых аппаратных вычислительных мощностей расходуется сигма-точечным фильтром Калмана.

Для апробации разработанного метода косвенной оценки электротехнических и технологических параметров для управления УЭЦН в рамках исследования были рассмотрены три режима работы нефтедобывающей установки. На рисунке 5 представлены результаты работы системы косвенной оценки при изменении рабочей точки и в условиях резкого изменения активного сопротивления кабельной линии.

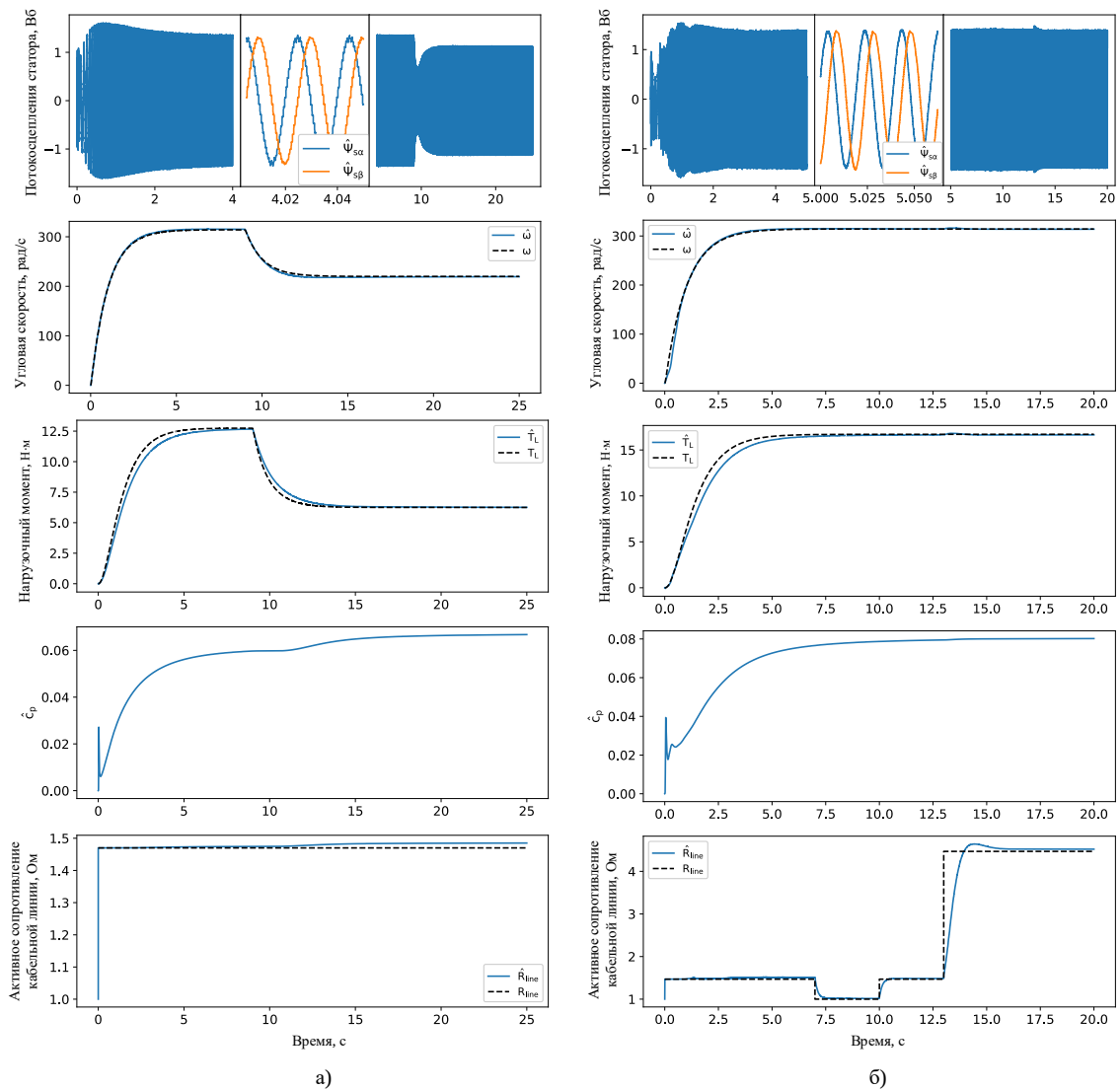


Рисунок 5 – Анализ системы косвенной оценки электротехнических и технологических параметров для управления УЭЦН: а) – при изменении рабочей точки; б) – в условиях резкого изменения активного сопротивления кабельной линии

На рисунке 5а представлены результаты работы системы в условиях изменения рабочей точки. Испытание проходило следующим образом: запуск насоса; достижение установившегося режима для одной рабочей точки; на девятой секунде моделирования осуществляется смена рабочей точки с 314 рад/с (50 Гц) на 219 рад/с (35 Гц); достижение установившегося состояния для второй рабочей точки. На рисунке 5б представлены результаты работы системы в условиях изменения активного сопротивления кабельной линии. В ходе моделирования активное сопротивление кабельной линии подвергалось многократному изменению сопротивления: падению сопротивления, восстановлению сопротивления, повышению сопротивления. Данный режим работы может быть обусловлен аварийным состоянием установки.

Результатами проведения экспериментов стало подтверждение работоспособности метода косвенной оценки электротехнических и технологических параметров сигма-точечным фильтром Калмана для управления УЭЦН.

Для апробации физической модели был проведен эксперимент на полунатурной модели (рисунок 6). В состав стенда входят: 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 6 – Внешний вид полунатурной модели УЭЦН

На рисунке 7 представлены результаты эксперимента на полунатурной модели УЭЦН. 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. На полной скорости ПЭД подаваемая нагрузка составила $T_L = 205$ Н·м. По результатам эксперимента можно сделать следующие выводы: сигма-точечный фильтр Калмана отфильтровал шумные показания датчиков тока, перед тем как данные поступили в систему управления ПЭД; скорость ПЭД оценивалась корректно на всем диапазоне моделирования; активное сопротивление кабельной линии инициализировалось величиной в $R_{cl} = 1,5$ Ом, оценка активного сопротивления кабельной линии в начале эксперимента была подвержена колебаниям, однако, довольно быстро

сошлась на истинном значении; оценка нагрузочного момента производилась с небольшой задержкой на всем диапазоне моделирования, что можно объяснить принятыми при описании характера нагрузочного момента допущениями.

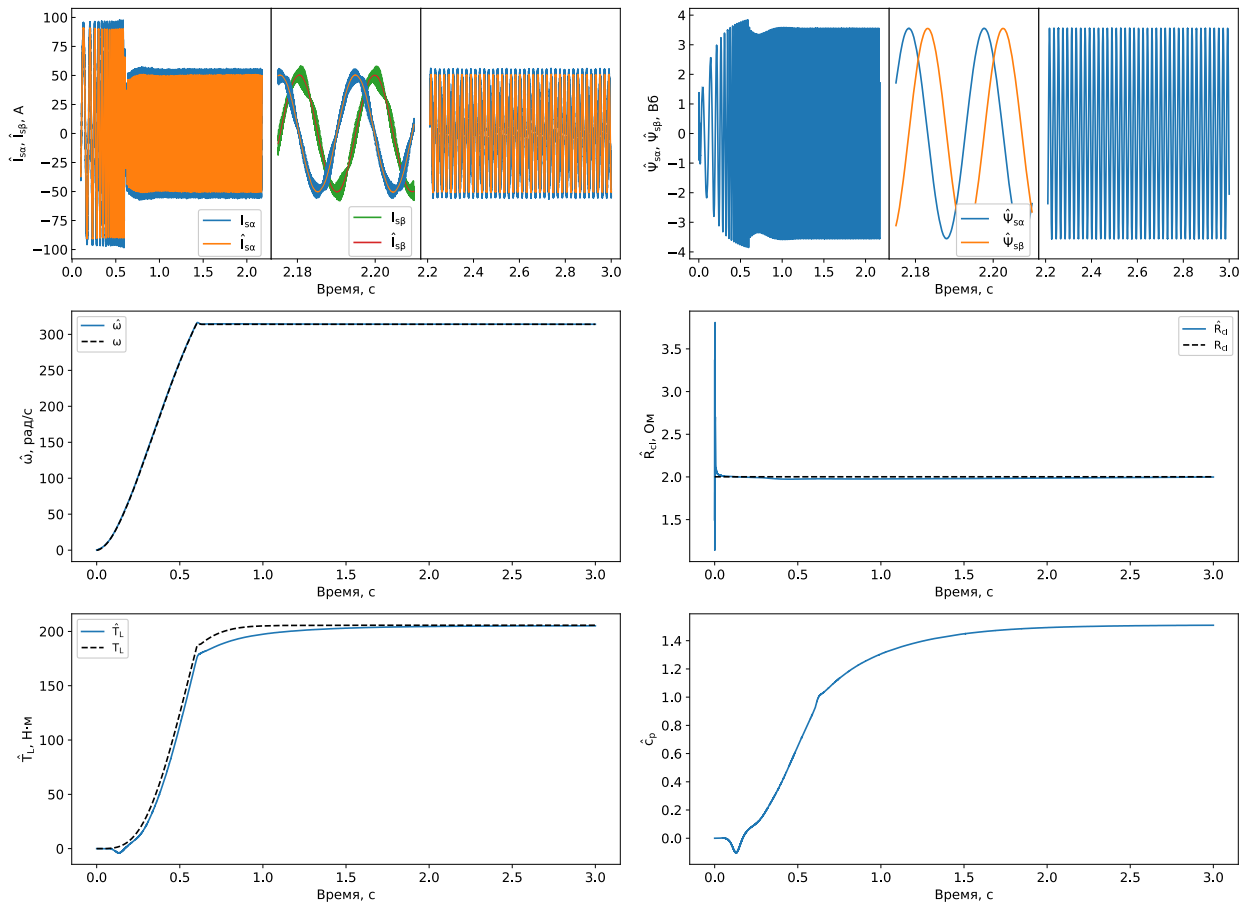


Рисунок 7 – Результаты эксперимента на полунатурной модели УЭЦН

Апробация системы косвенной оценки электротехнических и технологических параметров для управления УЭЦН доказывает ее валидность.

Технико-экономическое обоснование внедрения разработанной системы косвенной оценки электротехнических и технологических параметров для управления УЭЦН подтвердило экономическую эффективность и целесообразность проекта в рамках горизонта планирования $T_n = 5$ лет, 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) предложена концептуальная структура системы управления с косвенной оценкой электротехнических и технологических параметров УЭЦН;
- 2) разработан метод косвенной оценки электротехнических и технологических параметров ЭТК УЭЦН на основе сигма-точечного фильтра Калмана;
- 3) разработана система виртуального дебита, использующая регрессионные модели машинного обучения, основанные на методе *random forest*;
- 4) разработаны цифровая и физическая модели системы управления УЭЦН, использующие разработанные блоки машинного обучения и косвенной оценки электротехнических и технологических параметров УЭЦН.

Основные работы, опубликованные по теме диссертации

1. 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, № 1. – P. 830-843, DOI: 10.1109/JSEN.2023.3331354, **Web of Science**.
2. 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., DOI: 10.53891/00135860_2022_11_48, **БАК**. An optimum control method to improve the power efficiency of an electrically driven centrifugal pump / D. D. Vishnyakov, E. M. Solodkiy, A. B. Petrochenkov, R. Y. Yudin, S. V. Salnikov // Russian Electrical Engineering. – 2022. – Vol. 93, № 11. – P. 728-731., DOI: 10.3103/S1068371222110128, **Scopus**.
3. 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 Engineering of Riga Technical University (RTUCON). – P. 1-5, DOI: 10.1109/RTUCON53541.2021.9711743, **Scopus**.
4. Формирование эталонного движения электромеханических систем управления / В. П. Казанцев, Д. А. Даденков, Р. Ю. Юдин // Электротехника. – 2019. – № 11. – с. 28-33., **БАК**. A reference model for the motion of electromechanical control system / V. P. Kazantsev, D. A. Dadenkov, R. Y. Yudin // Russian Electrical Engineering. – 2019. – Vol. 90, № 11. – P. 729-733., DOI: 10.3103/S1068371219110051, **Scopus**.
5. 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., DOI: 10.53891/00135860_2023_11_2, **БАК**. A study of finite control system for permanent-magnet synchronous motors / R. Y. Yudin, A. B. Petrochenkov, E. M. Solodkiy, D. D. Vishnyakov, S. V. Salnikov // Russian Electrical Engineering. – 2023. – Vol. 94, № 11. – P. 779-785., DOI: 10.3103/s1068371223110159, **Scopus**.
6. 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., DOI: 10.53891/00135860_2023_11_56, **БАК**. Transients in the collector circuit of an open bipolar transistor under inductive load / A. V. Lyakishev, E. M. Solodkiy, R. Y. Yudin, A. B. Petrochenkov // Russian Electrical Engineering. – 2023. – Vol. 94, № 11. – P. 834-838., DOI: 10.3103/s106837122311007x, **Scopus**.
7. Разработка методики уравнивания балансирующего станка-качалки с роторными противовесами и определение ее работоспособности в ходе натурного эксперимента / Е. М. Солодкий, А. Б. Петроченков, С. Н. Кривошеков, С. В. Сальников, Д. Д. Вишняков, Р. Ю. Юдин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 5. – с. 174-182., DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4734, **БАК**. Development of a technique for balancing a rocking machine with rotary counterweights and determination of its operability during a field experiment / E. M. Solodkiy, A. B. Petrochenkov, S. N. Krivoshchekov, S. V. Salnikov, D. D. Vishnyakov, R. Y. Yudin // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. – 2025. – Vol. 336, № 5. – P. 174-182., **Web of Science**.
8. Semi-natural simulation system of a sucker-road pump / E. M. Solodkiy, N. A. Efimov, D. A. Dadenkov, R. Y. Yudin // 2019 Journal of Physics: Conference Series. – P. 12-17, DOI: 10.1088/1742-6596/1415/1/012017, **Scopus**.
9. 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). – P. 210-214, DOI: 10.1109/SCM58628.2023.10159097, **Scopus**.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022611088. Программа бездатчикового наблюдения параметров установки электроцентробежного насоса / Р. Ю. Юдин; заявитель и правообладатель: Р. Ю. Юдин. – №2022610368; заявл. 04.01.2022; опубл. 19.01.2022.

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023669247. Программа измерения электрических параметров насосных установок / Р. Ю. Юдин; заявитель и правообладатель: Р. Ю. Юдин. – №2023668555; заявл. 29.08.2023; опубл. 12.09.2023.

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024619770. Программа косвенной оценки технологических параметров насосных установок на основе сигма-точечного фильтра Калмана / Р. Ю. Юдин; заявитель и правообладатель: ООО "Пермская преобразовательная техника". – №2024618970; заявл. 22.04.2024; опубл. 25.04.2024.