

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

САЛЬНИКОВ Савелий Витальевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ШТАНГОВОЙ
СКВАЖИННОЙ НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ
РЕЖИМОВ НАГРУЗОК ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

Специальность 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

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

Пермь – 2026

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. На сегодняшний день на территории Пермского края существенная часть нефтедобывающих скважин эксплуатируется штанговыми скважинными насосными установками (ШСНУ). Вместе с широким распространением способа добычи с использованием ШСНУ актуальными являются вопросы оценки технического состояния нефтедобывающего оборудования. Своевременный контроль работы скважины и оперативная диагностика состояния оборудования позволяют предотвратить дорогостоящие ремонты и сократить потери при добыче нефти.

В промышленной практике за счет высокой визуальной интерпретируемости нашел широкое применение способ диагностики ШСНУ на основе анализа ее динамограммы. В дополнение к этому, за длительный срок эксплуатации ШСНУ нефтедобывающими предприятиями была накоплена историческая база результатов динамометрирования, интерпретируемая на экспертном уровне для выявления основных видов неисправностей и осложнений, возникающих при эксплуатации ШСНУ. Однако прямое измерение динамограммы требует монтажа динамографа, что увеличивает капитальные затраты и трудозатраты на обслуживание. Альтернативой является оценка динамограммы по электрическим переменным двигателя (тока и напряжения) с использованием математических моделей станка-качалки (СК) и электропривода. Ключевой проблемой при косвенной оценке динамограммы является сложность преобразования нагрузочного момента электродвигателя в усилие на полированном штоке. Данная проблема обусловлена необходимостью непрерывного и точного определения углового положения кривошипа СК в течение всего цикла качания. Для реализации возможности оперативной оценки технического состояния оборудования и скважины, эксплуатируемой с ШСНУ, необходима непрерывная оценка усилия в точке подвеса колонны штанг по переменным состояния электропривода за счет комплексной оценки кинематических переменных СК (в том числе точного определения углового положения кривошипа), а также наблюдаемых и вычисленных механических величин (электромагнитный момент и момент на выходном валу редуктора, динамические усилия в основных конструктивных элементах СК).

Дополнительным фактором, снижающим эффективность эксплуатации ШСНУ, является принятый на нефтедобывающих предприятиях регламент периодического анализа сохраненных динамограмм "постфактум". Подобный подход сопряжен со значительными временными затратами на сбор, передачу и ручную интерпретацию данных квалифицированным персоналом. Возникающая задержка при принятии оперативных решений по корректировке технологического режима добычи приводит к росту операционных затрат и существенно повышает риск преждевременного выхода из строя скважинного оборудования. При этом, в «Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2050» указывается, что необходимо «создание условий для ... цифрового мониторинга, оценки и прогнозирования состояний и процессов в отраслях топливно-энергетического комплекса».

В связи с этим возникает необходимость разработки системы непрерывной автоматизированной диагностики, функционирующей в режиме реального времени и исключающей участие оператора из процесса оценки технического состояния ШСНУ. В качестве диагностической основы в данной системе предложен метод анализа динамограмм. Использование данной системы позволит полностью отказаться от монтажа, калибровки и технического обслуживания устьевых датчиков, а также рационализировать использование штатных электрических измерительных преобразователей станции управления.

Степень разработанности темы исследования. Моделированию электротехнических и гидродинамических подсистем нефтедобывающих установок посвящены работы таких ученых, как А.С. Вирнавский, А.Ф. Сакаев, Ю.А. Сычев, М.И. Хакимьянов, А.В. Ляхомский, М.С. Ершов, Ю.В. Шевырев, *G. Takacs*, *S. G. Gibbs* и др.

Вопросами косвенной оценки технологических параметров комплексных нелинейных электромеханических объектов посвящены работы таких ученых, как А.С. Анучин, И.Я. Браславский, А.М. Зюзев, Ю.Н. Калачев, Р.Т. Шрейнер, К. Ф. Тагирова, С. Yuan, и др.

Объектом исследования является технологический процесс механизированной добычи нефти штанговыми скважинными насосными установками.

Предметом исследования являются методы и алгоритмы диагностики технического состояния ШСНУ по косвенно восстанавливаемой динамограмме на основе анализа режимов нагрузки электропривода без использования устьевых датчиков нагрузки.

Идея работы заключается в использовании функции косвенной непрерывной оценки усилия в точке подвеса колонны штанг, получаемой путём преобразования электрических переменных состояния электропривода с учётом динамики станка-качалки и положения противовеса, как информационной основы для диагностирования ШСНУ в режиме реального времени.

Целью работы является разработка системы оценки состояния ШСНУ, функционирующей в реальном времени, позволяющей идентифицировать типовые неисправности по восстановленной динамограмме без монтажа устьевых датчиков.

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

- 1) предложить концептуальную структуру системы непрерывной диагностики ШСНУ, основанную на косвенной непрерывной оценке усилия в точке подвеса колонны штанг по переменным состояниям электропривода;
- 2) разработать комплексную имитационную математическую модель ШСНУ, включающую в себя модель приводного асинхронного двигателя (АД), модель станции управления (СУ), кинематическую модель станка-качалки, модель нагрузки на полированный шток и модель притока жидкости в скважину;
- 3) разработать методы и алгоритмы диагностики технического состояния ШСНУ по оценке динамограммы, обеспечивающие идентификацию типовых неисправностей в реальном времени;
- 4) провести экспериментальные исследования разработанной системы оценки динамограммы с верификацией результатов на лабораторной физической установке.

Основные научные положения и результаты, выносимые на защиту:

- 1) концептуальная структура системы диагностики ШСНУ, *отличающаяся от существующих* реализацией принципа косвенной непрерывной оценки усилия в точке подвеса колонны штанг на основе анализа переменных состояний электропривода, без применения датчиков прямого измерения нагрузки;
- 2) классификатор технических состояний ШСНУ, *отличающийся от существующих* использованием комбинации сверточной нейронной сети и метода k-ближайших соседей, без повторного обучения модели при дополнении базы диагностических данных новыми образцами неисправностей;
- 3) метод и алгоритм косвенной оценки динамограммы ШСНУ, *отличающиеся от существующих* использованием оценки электромеханических переменных электропривода, а также классификатора на основе сверточной нейронной сети для определения углового положения роторного противовеса;
- 4) полунатурная физическая модель ШСНУ с нагрузочным и приводным агрегатами, *отличающаяся от существующих* наличием информационно-управляющего устройства формирования нагрузочного момента, имитирующего в реальном времени различные режимы работы установки на основе математических моделей.

Научная новизна работы:

- 1) разработана концептуальная структура системы технической диагностики ШСНУ, основанная на принципах оценки механических переменных элементов установки, без использования физических датчиков нагрузки;

2) создан классификатор технических состояний ШСНУ на основе совместного применения сверточной нейронной сети и метода k -ближайших соседей, обеспечивающий возможность расширения базы диагностических данных новыми образцами неисправностей без повторного обучения модели;

3) разработаны метод и алгоритм косвенной оценки динамограммы ШСНУ на основе оцениваемых электромеханических переменных электропривода и нейросетевой идентификации углового положения роторного противовеса;

4) обоснован принцип построения и разработано математическое и программное обеспечение полунатурной физической модели ШСНУ, реализующее воспроизведение в реальном времени переменного нагрузочного момента и имитацию основных режимов работы установки.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в: разработке комплексной математической и цифровой имитационной модели ШСНУ, объединяющей гидродинамические, электромеханические и электромагнитные процессы; разработке метода косвенной оценки динамограммы на основе анализа электромеханических переменных электропривода с применением сверточной нейронной сети для определения углового положения роторного противовеса; разработке классификатора технических состояний ШСНУ, построенного на комбинации сверточной нейронной сети и метода k -ближайших соседей и не требующего повторного обучения при дополнении базы диагностических данных.

Разработанный метод диагностики ШСНУ на основе косвенной и непрерывной оценки усилия в точке подвеса колонны штанг был использован при создании интеллектуальных станций управления в рамках 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» (Постановление № 218 Правительства РФ от 09.04.2010 г., 2021–2024 гг.). Разработанные метод и алгоритм получения диагностической информации ШСНУ внедрены в учебный процесс 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»; п. 4 «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях, диагностика электротехнических комплексов.».

Достоверность результатов подтверждается корректным использованием апробированного математического аппарата теории электротехники, теории управления, теории электропривода, математической статистики и математического анализа; сопоставлением результатов расчета с данными, приведёнными в технической литературе,

а также с данными, полученными в результате инструментальных замеров на реальных технологических объектах и на 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 – 2026 гг.); XII международной конференции «Инновационная энергетика» (ПНИПУ, г. Пермь, 2021 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 9 печатных работ (из них 6 в изданиях, входящих в международные системы цитирования *SCOPUS* и *Web of Science*,) получены 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора состоит в: анализе существующих систем диагностики ШСНУ; разработке концептуальной структуры системы диагностики ШСНУ; разработке имитационной модели ШСНУ, описывающей электромеханические и гидродинамические процессы добычи; разработке метода косвенной оценки динамограммы; разработке метода и алгоритма диагностики ШСНУ с применением наблюдателей переменных состояния электропривода. В работах в соавторстве личный вклад соискателя составляет не менее 70%.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 128 наименований, изложена на 153 страницах машинописного текста и включает 64 рисунков, 12 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 проведён анализ существующих систем диагностики ШСНУ. Рассмотрены применяемые в промышленной практике инструментальные измерители усилия на полированном штоке и существующие регламенты проведения динамометрирования. Выявлены основные недостатки существующего подхода к диагностике, занимающего доминирующее положение в промышленной практике. Рассмотрены методы косвенной оценки динамограммы, основанные на пересчете нагрузочного момента электродвигателя в усилие на точке подвеса колонны штанг (ТПКШ), определены их достоинства и недостатки. Также приведены существующие методы и алгоритмы диагностики ШСНУ, основанные на анализе ваттметограммы и динамограммы. Определена концептуальная структура системы диагностики ШСНУ (рисунок 1), источником диагностической информации которой является восстановленная по оцененным электромеханическим переменным приводного электродвигателя динамограмма.

На рисунке 1: СУ – станция управления; АД – асинхронный двигатель; АНС – адаптивный наблюдатель скорости; НМ – наблюдатель момента; КМСК – кинематическая модель станка качалки; БОУ – блок оценки начального угла положения кривошипа, содержит в себе классификатор на основе сверточной нейронной сети; СНС – блок сверточной нейронной сети, извлекающей признаковые векторы динамограммы; kNN – блок классификации неисправности на основе алгоритма k -ближайших соседей; БИ – блок индикации; ω_r – угловая скорость вращения ротора, рад⁻¹; ω_c – оценка угловой скорости вращения роторного противовеса, рад⁻¹; Θ_{cr} – угол положения кривошипа, рад; k_{gear} – суммарный коэффициент редукции; $\vec{I}_{s\alpha\beta}$ – ток статора в системе координат $\alpha\beta$; $\vec{U}_{s\alpha\beta}$ – напряжение статора в системе координат $\alpha\beta$; T_e – момент электродвигателя, Нм; T_λ – момент на кривошипе, Нм; X_{rod} – перемещение точки подвеса колонны штанг, м; F_λ – усилие на точке подвеса колонны штанг, Н; δ – оценка углового рассогласования

положения роторного противовеса, рад; $\mathbf{O}$ – признаковый вектор динамограммы; $y \in \{C_0, C_1, \dots, C_N\}$ – оцененный класс неисправности, где $\{C_0, C_1, \dots, C_N\}$ – конечное множество известных классов неисправностей.

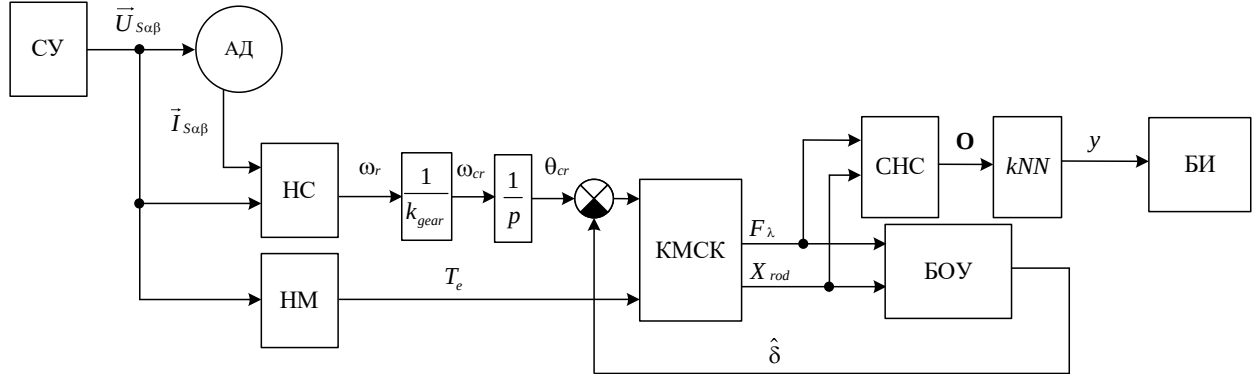


Рисунок 1 – Структура системы диагностики ШСНУ

Во второй главе разработана комплексная модель ШСНУ (рисунок 2), включающая в себя математические и имитационные модели подсистем. ШСНУ может быть представлена совокупностью компонентов, а именно: станция управления (СУ); приводной асинхронный двигатель (АД); редукторная передача; ременная передача; станок-качалка (СК); глубинный плунжерный насос; жидкость в скважине.

На рисунке 2: ω_{ref} – задание скорости, рад⁻¹; ψ_{ref} – задание потокосцепления ротора, Вб; $I_{sd ref}$, $I_{sq ref}$ – задания токов статора в dq системе координат, А; ω_r – скорость вращения ротора электродвигателя, рад⁻¹; $\vec{U}_{s ref}$ – задание статорного напряжения, В; T_0 , T_1 , T_2 – временные интервалы действия нулевого, первого и второго активных векторов, с; T_C – момента нагрузки на валу электродвигателя, Нм; ВШИМ – векторный широтно-импульсный модулятор; ПК – преобразование координат; АИН – автономный инвертор напряжения; v_{rod} – скорость ТПКШ, м/с; H – уровень жидкости в затрубном пространстве, м; Q – величина оттока жидкости из скважины, м³/сут; $\vec{U}_s$ – вектор напряжения статора, В; $\vec{I}_s$ – вектор тока статора; ψ_r – потокосцепление ротора, Вб; θ_e – угол положения вектора потокосцепления ротора, рад.

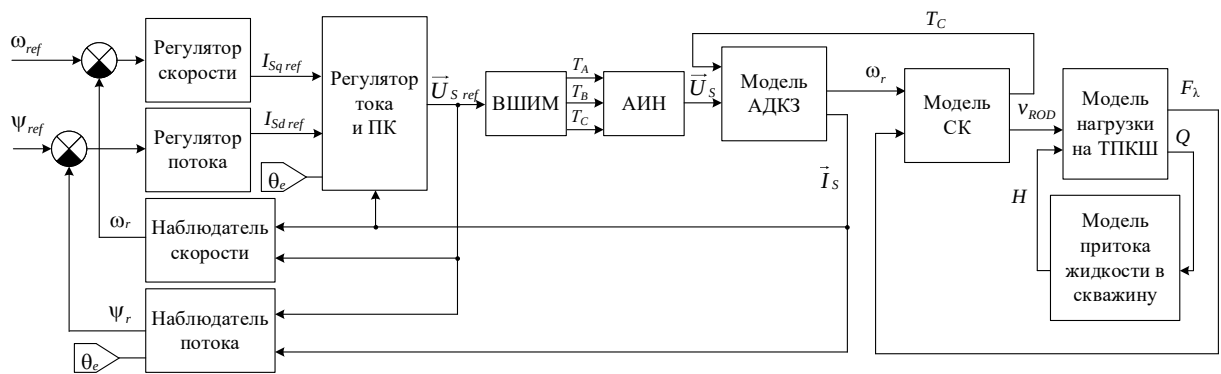


Рисунок 2 – Структурная схема векторной системы управления с адаптивным наблюдателем скорости

Станция управления ШСНУ реализована в виде математической модели преобразователя частоты с автономным инвертором напряжения. Для обеспечения высоких показателей качества регулирования асинхронного двигателя в качестве системы управления было выбрано векторное регулирование с ориентациями по вектору потокосцепления ротора (рисунок 2). Уравнения равновесия статорной цепи АД при ориентации системы dq по потокосцеплению ротора записаны следующим образом:

$$\begin{cases} U_{sd} = \frac{d}{dt}[(L_s - L_m K_R)I_{sd} + K_R \psi_R] + I_{sd} R_s - \omega_e I_{sq} (L_s - L_m K_R) \\ U_{sq} = \frac{d}{dt}[(L_s - L_m K_R)I_{sq}] + I_{sq} R_s + \omega_e [I_{sd} (L_s - L_m K_R) + K_R \psi_R] \end{cases}, \quad (1)$$

где I_{sd}, I_{sq} – статорные токи в dq системе координат, А; U_{sd}, U_{sq} – статорные напряжения в dq системе координат, В; ψ_R – магнитный поток ротора, Вб; ω_e – электрическая радиальная скорость, рад⁻¹; $L_s = L_{s\sigma} + L_m$ – полная индуктивность статора, Гн; $K_R = L_m / L_R$ – коэффициент ротора; $L_R = L_{R\sigma} + L_m$ – полная индуктивность ротора, Гн; R_s – сопротивление статора, Ом; L_m – индуктивность намагничивания, Гн.

Наблюдатель скорости построен на принципе сравнения потоков ротора, полученных из опорной модели статора и адаптируемой модели ротора. Расчет потокосцеплений ротора асинхронного двигателя по статорной модели в $\alpha\beta$ системе координат, которую принимают в качестве эталонной, осуществляется следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{d\vec{\psi}_{s\alpha\beta}}{dt} = \vec{U}_{s\alpha\beta} - \vec{I}_{s\alpha\beta} R_s \\ \vec{\psi}_{r\alpha\beta}^s = \frac{1}{K_R} (\vec{\psi}_{s\alpha\beta} - \sigma L_s \vec{I}_{s\alpha\beta}) \end{cases}, \quad (2)$$

где $\vec{\psi}_{r\alpha\beta}^s$ – потокосцепление ротора по модели статора в осях $\alpha\beta$, Вб; $\vec{U}_{s\alpha\beta}$ – статорное напряжение в осях $\alpha\beta$, В; $\vec{I}_{s\alpha\beta}$ – ток статора в осях $\alpha\beta$, А; $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s L_R)$.

Модель ротора является адаптируемой по потоку под модель статора:

$$\frac{d\vec{\psi}_{r\alpha\beta}^R}{dt} = \vec{\psi}_{r\alpha\beta}^R \left(j\omega_{er} - \frac{1}{T_R} \right) + \frac{L_m \vec{I}_{s\alpha\beta}}{T_R}, \quad (3)$$

где $\vec{\psi}_{r\alpha\beta}^R$ – потокосцепление ротора, полученные из адаптируемой модели, Вб; $\omega_{er} = Z_p \omega_r$, Z_p – число пар полюсов; $T_R = L_R / R_R$ – постоянная времени ротора.

Задатчик закона адаптации выражается следующим образом:

$$\omega_{er} = \left(K_p + \frac{K_i}{p} \right) \sqrt{(\psi_{R\alpha}^s - \psi_{R\alpha}^R)^2 + (\psi_{R\beta}^s - \psi_{R\beta}^R)^2}, \quad (4)$$

где K_p и K_i – пропорциональный и интегральный коэффициенты ПИ регулятора.

Кинематическая модель станка-качалки описывает преобразование вращательного момента и угловой скорости кривошипа в возвратно-поступательное движение точки подвеса колонны штанг. Связь усилия на полированном штоке и переменных электропривода может быть получена как:

$$F_\lambda = \frac{T_\lambda}{k(\theta_{cr})} + F_{CU} = \frac{T_C \cdot k_{gear} \cdot \eta_{gear} + T_{cw} \sin(\theta_{cr})}{k(\theta_{cr})} + F_{CU}, \quad (5)$$

где F_{CU} – конструктивная неуравновешенность, Н; T_λ – момент на кривошипе, Нм; T_{cw} – максимальный момент роторного противовеса, Нм; $k(\theta_{cr})$ – кинематическая переменная, определяемая параметрами СК и угловым положением кривошипа; η_{gear} – КПД редукторной передачи.

Величина и характер усилия на полированном штоке формирует изменение режима нагрузок электропривода, что в свою очередь является диагностической основой для работы методов и алгоритмов диагностики установки.

Моделирование нагрузки на полированный шток базируется, исходя из определения сил, действующих на ТПКШ с учетом веса штанг в пластовой среде и массы поднимаемого столба жидкости. Определение дополнительных усилий, вызванных упругими колебаниями в моменты отрыва плунжера и смены направления хода в мертвых точках, реализуется путем решения волнового уравнения гиперболического типа с учетом демпфирования:

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} - c \frac{\partial u(x,t)}{\partial t}, \quad (6)$$

где c – коэффициент демпфирования, c^{-1} ; $v = \sqrt{Eg / \rho_r}$ – скорость распространения упругой волны в материале штанги, м/с; E – модуль Юнга, Па; ρ_r – плотность материала штанги, кг/м³; g – ускорение свободного падения.

Для решения волнового уравнения также возможно применение численных методов, в частности, метода конечных разностей:

$$u(x, t + \Delta t) = \frac{\left\{ \frac{\Delta t^2 v^2}{\Delta x^2} [u(x + \Delta x, t) - 2u(x, t) + u(x - \Delta x, t)] + 2u(x, t) - u(x, t - \Delta t) + u(x, t)c\Delta t \right\}}{1 + c\Delta t} \quad (7)$$

Моделирование неисправностей, которые могут возникать в процессе работы установки, также является одной из задач, решаемых при разработке комплексной модели ШСНУ. Использование метода численного моделирования нагрузки на полированном штоке в данном случае затруднительно, поскольку он требует введения дополнительных граничных условий, необходимых для воспроизведения таких неисправностей, как утечка нагнетающего клапана, утечка всасывающего клапана и малая подача насоса. Для решения указанной проблемы была разработана имитационная модель в среде *MATLAB/Simulink* (рисунок 3), позволяющая моделировать наиболее распространённые виды неисправностей ШСНУ с использованием блоков библиотеки *Simscape*.

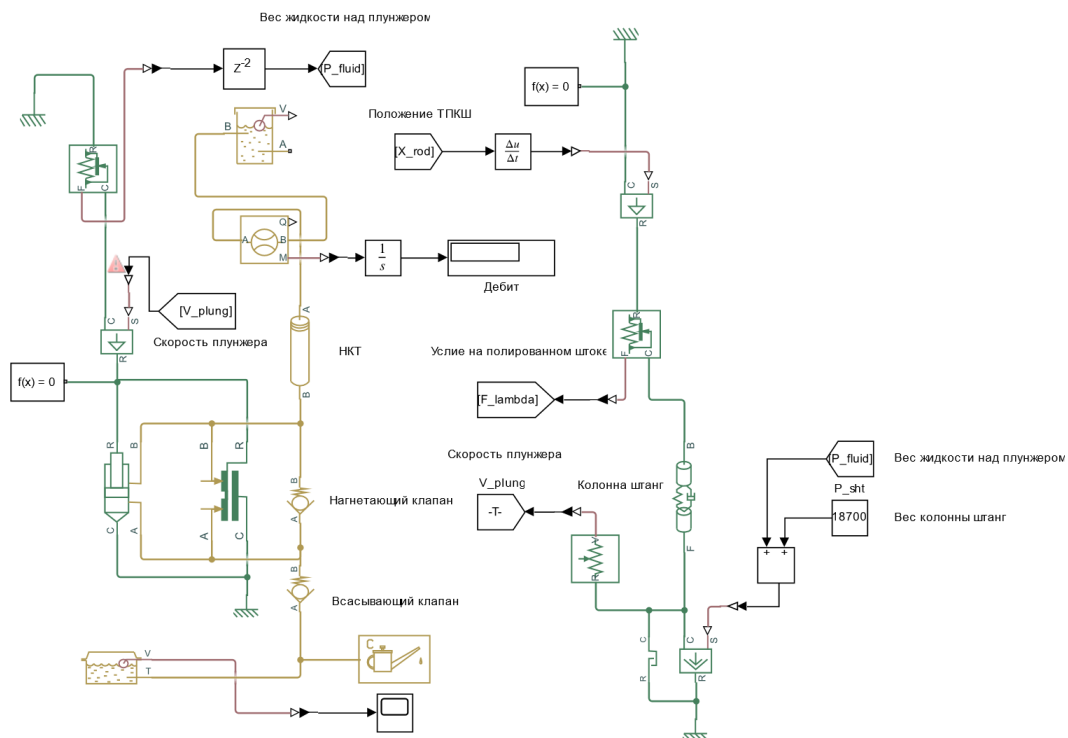


Рисунок 3 – Модель нагрузки на полированном штоке

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

$$\frac{H}{Q} = \frac{1}{F \cdot p + K \rho g}, \quad (8)$$

где F – площадь сечения кольцевого пространства между обсадной колонной и насосными трубами, м^2 ; K – коэффициент, характеризующий приток жидкости в скважину, ρ – плотность нефтяной жидкости, кг/м^3 ; g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

Представленные математические описания образуют комплексную модель ШСНУ, позволяющую проводить детальный анализ режимов её эксплуатации и имитировать различные сценарии возникновения неисправностей. Данный инструментарий обеспечивает апробацию алгоритмов восстановления динамограмм и диагностики установки.

В третьей главе разработан метод оценки динамограммы ШСНУ по электромеханическим переменным работы АД, полученным при помощи наблюдателя скорости, а также наблюдателя электромагнитного момента. Представлен алгоритм классификации неисправностей ШСНУ на основе комбинации сверточной нейронной сети и метода k -ближайших соседей.

Оценка нагрузочного момента на двигателе произведена при помощи наблюдателя на модели статора, реализация осуществлена по следующим формулам:

$$\begin{cases} T_e = \frac{3}{2} \cdot Z_p (\bar{\Psi}_{s\alpha\beta} \times \bar{I}_{s\alpha\beta}) \\ T_c = T_e - B\omega - J \frac{d\omega}{dt} \end{cases}, \quad (9)$$

где B – коэффициент сухого трения, Нм/рад^{-1} ; J – момент инерции ротора, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$.

При известных параметрах СК восстановление усилия на ТПКШ может быть реализовано на базе кинематической модели (3), однако критическим остается определение углового положения кривошипа θ_{cr} . Традиционно эта задача решается путем прямой установки датчиков угла, но на практике монтаж дополнительного оборудования зачастую технически невозможен или экономически нецелесообразен.

Профиль изменения углового положения кривошипа СК может быть восстановлен путем интегрирования угловой скорости выходного вала редуктора ω_{cr} на интервале периода качания. Период качания определяется путем выделения локальных максимумов сигнала момента нагрузки пороговой фильтрацией по амплитуде и минимальному расстоянию между экстремумами, при низкой частоте дискретизации применяется кубическая сплайн-интерполяция для уточнения положения максимумов. Значение угловой скорости, по аналогии с принципами представленной векторной системы управления, вычисляется с помощью адаптивного наблюдателя скорости. Однако начальное угловое положение θ_{cr0} не может быть получено напрямую. Для решения данной проблемы разработан алгоритм, базирующийся на генерации ансамбля фазовых траекторий и их последующего анализа с использованием методов машинного обучения:

1. Формирование матрицы фазовых гипотез

Основой метода является предположение о конечном множестве состояний начального угла θ_{cr0} . Пространство состояний $[0, 2\pi)$ дискретизируется на M равноотстоящих значений с шагом $\Delta\varphi = 2\pi / M$. Для описания динамики системы за один период качания T формируется матрица фазовых гипотез Θ размерностью $M \times n$ (где n – количество временных отсчетов):

$$\Theta = \begin{bmatrix} \theta_{cr1,1} & \theta_{cr1,2} & \cdots & \theta_{cr1,n} \\ \theta_{cr2,1} & \theta_{cr2,2} & \cdots & \theta_{cr2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \theta_{crM,1} & \theta_{crM,2} & \cdots & \theta_{crM,n} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Элементы матрицы определяются законом численного интегрирования выходного сигнала адаптивного наблюдателя угловой скорости ω_{cr} :

$$\theta_{cr\ i,k} = \theta_{cr\ 0,i} + \sum_{j=1}^k \omega_{cr\ j} \Delta t, \quad (11)$$

где $\theta_{cr\ 0,i}$ – фазовое смещение для i -й строки.

2. Расчет ансамбля нагрузок

На данном этапе для каждой фазовой гипотезы из матрицы Θ производится пересчет наблюдаемого крутящего момента двигателя в эквивалентное усилие на полированном штоке. Расчет базируется на уравнении моментов, приведенных к валу кривошипа:

$$F_{\lambda}^{(i)}[j] = \frac{T_c[j] \cdot k_{gear} \cdot \eta_{gear} - T_{cw} \sin(\theta_{cr\ i,k})}{k(\theta_{cr\ i,k})} + F_{CU} \quad (12)$$

Результатом этапа является матрица F_{λ} , объединяющая векторы восстановленных усилий для всего ансамбля фазовых гипотез:

$$F_{\lambda} = \begin{bmatrix} F_{\lambda}^{(1)}[1] & F_{\lambda}^{(1)}[2] & \dots & F_{\lambda}^{(1)}[n] \\ F_{\lambda}^{(2)}[1] & F_{\lambda}^{(2)}[2] & \dots & F_{\lambda}^{(2)}[n] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ F_{\lambda}^{(M)}[1] & F_{\lambda}^{(M)}[n] & \dots & F_{\lambda}^{(M)}[n] \end{bmatrix} \quad (13)$$

3. Нейросетевая идентификация истинной гипотезы

Выбор истинного значения фазы из сформированного ансамбля реализуется с помощью нейросетевого классификатора f_{NN} . В основу обучения сети заложен принцип распознавания физической достоверности образа усилия на полированном штоке: при неверном фазовом сдвиге восстановленное усилие $F_{\lambda i}$ приобретает аномальные геометрические признаки (нехарактерные петли, нарушение знака работы за цикл, всплески в верхней и нижней мертвых точках).

Для каждой из гипотез вычисляются индексы правдоподобия, формирующие вектор P :

$$P = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{NN}(F_{\lambda}^{(1)}) \\ f_{NN}(F_{\lambda}^{(2)}) \\ \vdots \\ f_{NN}(F_{\lambda}^{(M)}) \end{bmatrix} \quad (14)$$

Искомое значение начального угла $\theta_{cr,0,opt}$ соответствует индексу строки с максимальным значением функции правдоподобия:

$$\theta_{cr\ 0,opt} = \theta_{cr\ 0,i} \text{ при } i = \arg \max_{j \in \{1..M\}} p_j \quad (15)$$

Описанная последовательность операций формирует алгоритм восстановления динамограммы по механическим переменным электропривода (рисунок 4).

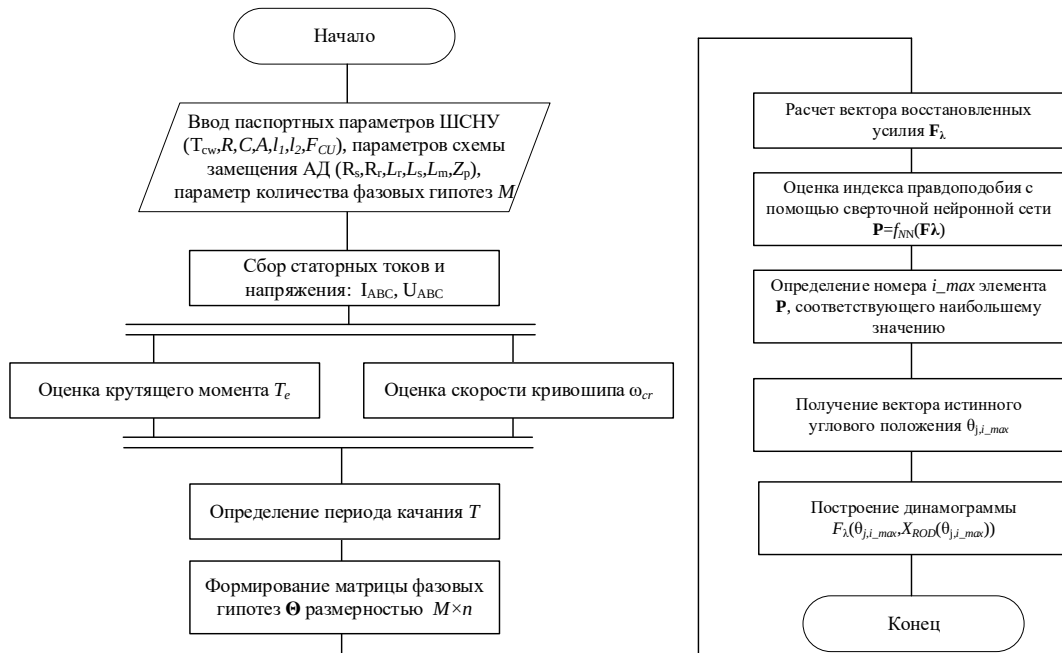


Рисунок 4 – Алгоритм восстановления динамограммы

Нейросетевой классификатор (рисунок 5), предназначенный для выбора истинного углового положения кривошипа реализован на базе одномерной сверточной архитектуры (1D CNN). Сеть включает три каскадных сверточных слоя с нарастающим количеством фильтров (64, 128, 256). Применение ядер свертки различной размерности (от 7 до 3) позволяет алгоритму идентифицировать как макроструктурные изменения нагрузки, так и локальные динамические аномалии, возникающие при некорректном фазовом сдвиге гипотезы.

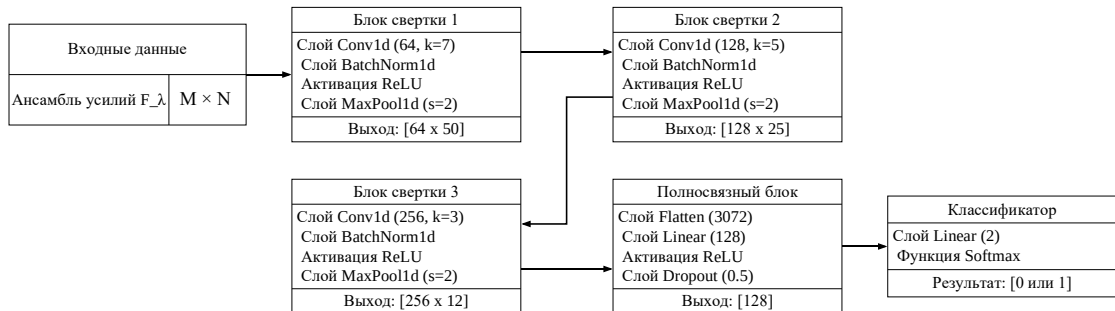


Рисунок 5 – Структура сверточной нейронной сети для оценки индекса правдоподобия динамограммы

Задача классификации неисправностей ШСНУ традиционно решается путем анализа устьевой динамограммы установки, так как данный график обладает высокой визуальной интерпретируемостью. Для автоматизации процесса диагностирования в данной работе используются методы машинного обучения.

Подготовка данных для обучения основывалась на представлении каждой динамограммы в виде многоканального временного ряда. На этапе предварительной обработки исходные сигналы подвергались сплайновой аппроксимации и приводились к единой фазе путем выравнивания всех циклов относительно нижней мертвой точки. Для повышения информативности входного сигнала формировался четырехканальный сигнал, включающий нормированные значения усилия, положения, а также их производные по времени $\frac{dF_\lambda}{dt}$ и перемещению $\frac{dF_\lambda}{dX_{ROD}}$.

В настоящей работе предложен альтернативный способ диагностирования неисправностей ШСНУ. Он сочетает: автоматическое извлечение признаков с помощью одномерной сверточной сети *ResNet1D*; классификацию полученных векторных представлений алгоритмом *k*-ближайших соседей. В отличие от сквозных нейросетевых классификаторов, предлагаемый подход не требует переобучения и изменения структуры классификатора при появлении нового класса неисправности. В отличие от деревьев и бустингов, данный подход не требует ручного формирования табличных дескрипторов, признаки извлекаются автоматически и адаптивно.

В представленном решении традиционная двумерная сеть *ResNet* адаптирована для одномерных сигналов путём замены двумерных сверток на одномерные. *ResNet1D* сохраняет главное свойство оригинальной архитектуры – остаточные блоки, выход которых описывается выражением:

$$y = F(x, \{W_i\}) + x, \quad (16)$$

где y – выходной вектор блока; x – входной вектор блока (фрагмент временного ряда); $F(x, \{W_i\})$ – последовательность одномерных сверточных слоёв с нелинейностями, применяемая к x ; $\{W_i\}$ – совокупность обучаемых весов (ядер свертки и смещений) слоёв внутри блока.

В качестве метода обучения нейронной сети был выбран способ метрического обучения, при котором входной сигнал преобразуется в вектор фиксированного размера. Для обучения нейронной сети, была выбрана триплетная функция потерь. При таком подходе формируются тройки сигналов – триплеты, состоящие из якоря A , позитивного P и негативного сигнала N . Цель обучения – минимизация расстояния между векторными представлениями якоря $f(A)$ и позитивного сигнала $f(P)$, а также максимизация расстояния между векторными представлениями якоря и негативного сигнала $f(N)$. Триплет будет считаться решенным, если расстояние между якорем и позитивным сигналом не менее чем на значение порога α меньше, чем между якорем и негативным сигналом:

$$L = \max(|f(A) - f(P)|^2 - |f(A) - f(N)|^2 + \alpha, 0), \quad (17)$$

где α – гиперпараметр отступа, задающий минимальную разность между расстояниями до отрицательного и положительного сигнала.

Полученные при помощи обученной модели векторные представления сигнала динамического усилия являются входными параметрами для алгоритма *k*-ближайших соседей, который на основе ранее предоставленной выборки векторных представлений определяет, к какому классу относится поступивший сигнал. Описанная последовательность действий для осуществления диагностики в автоматическом режиме сформирована в алгоритм, блок-схема которого представлена на рисунке 6.

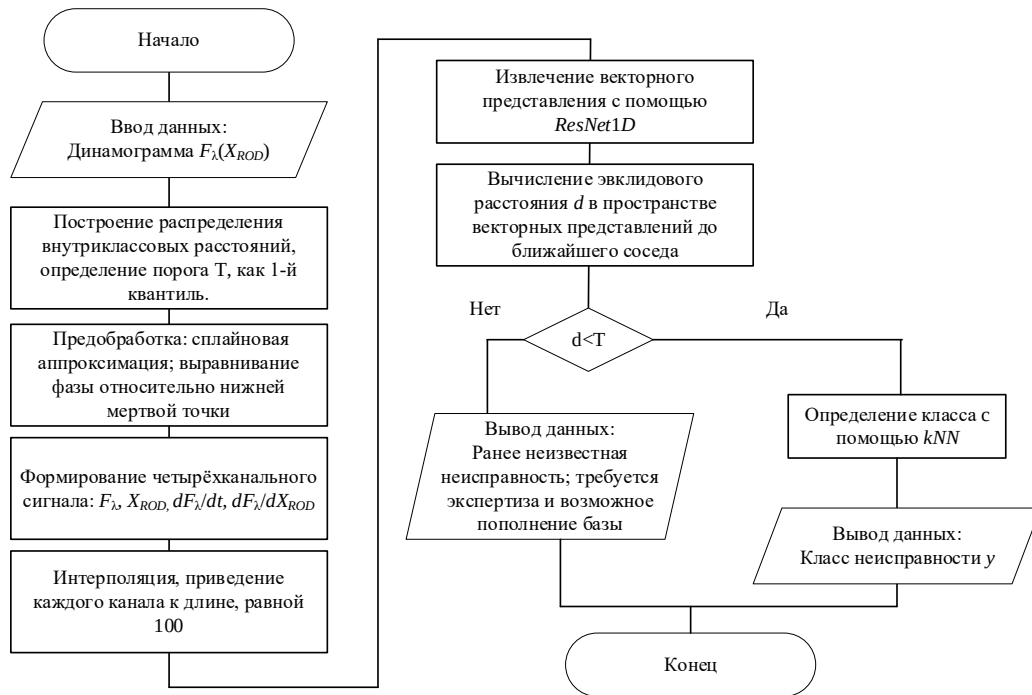


Рисунок 6 – Алгоритм диагностики ШСНУ

В результате автоматического диагностирования глубинно-насосного оборудования ШСНУ выявленный при помощи классификатора тип неисправности вместе с самой расчетной динамограммой передаются на диспетчерский пункт с целью принятия технологом обоснованного решения по её устранению (рисунок 7).

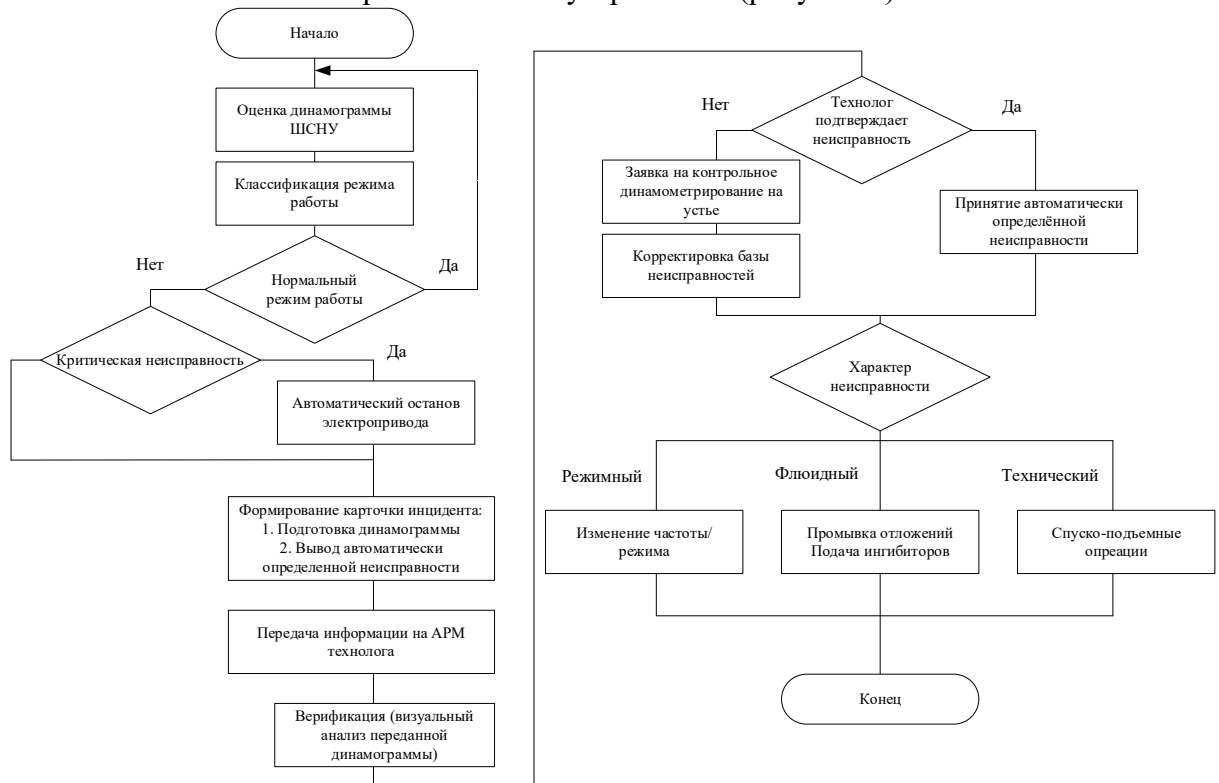


Рисунок 7 – Алгоритм обработки неисправностей ШСНУ

В четвертой главе проведена апробация разработанной системы диагностики ШСНУ на основе оценки динамограммы. Представлено технико-экономическое обоснование внедрения системы диагностики на нефтедобывающем предприятии. Апробация метода косвенной оценки динамограммы, а также алгоритма диагностики

ШСНУ была проведена на разработанной в среде *Matlab Simulink* цифровой модели установки.

Цифровая модель электротехнического комплекса ШСНУ, включающая в себя модель АД и модель СУ с АИН и с векторной системой управления, была промоделирована с использованием параметров схемы замещения двигателя марки АИР 200 L4, номинальной мощностью 45 кВт. На рисунке 8 представлены результаты работы векторной системы регулирования. На рисунке 8: а) совмещенная переходная характеристика скорости (синий цвет) и электромагнитного момента (красный цвет); б) переходная характеристика по скорости задание (красный цвет), фактическая скорость (синий цвет); в) переходная характеристика регулятора тока оси q задание (красный цвет), фактическое значение тока (синий цвет); г) переходная характеристика регулятора потока ротора задание (красный цвет), фактическое значение (синий цвет).

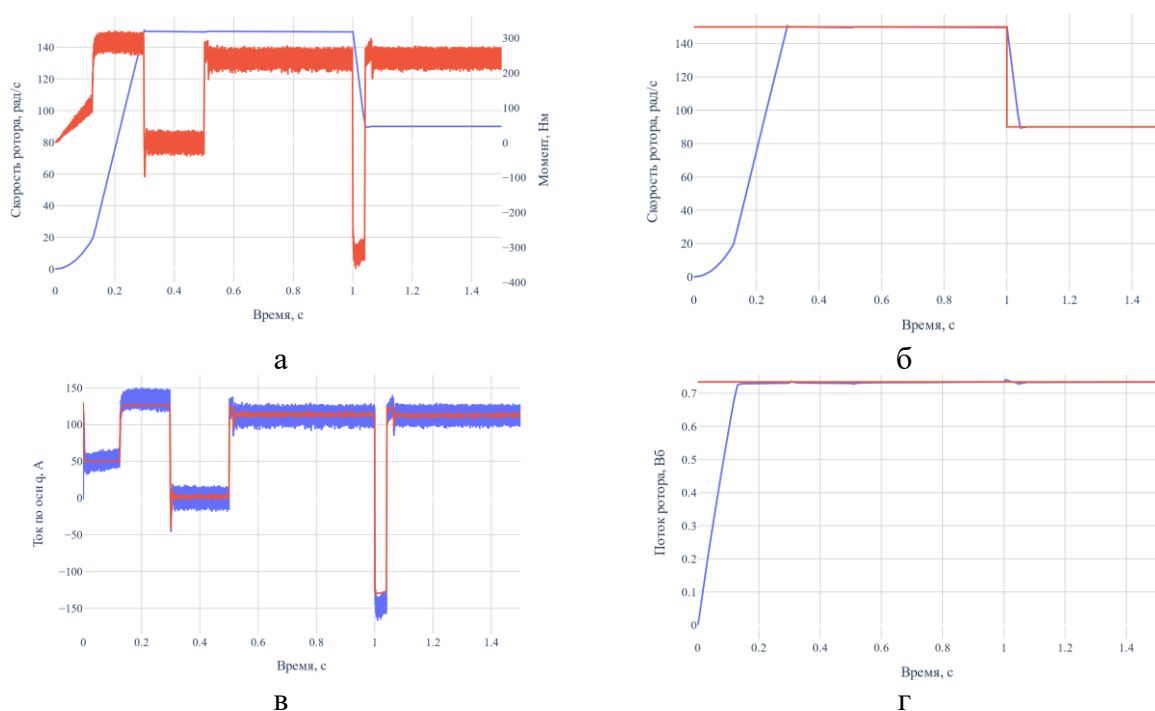


Рисунок 8 – Анализ системы управления приводного электродвигателя

Также вместе с системой управления проведено моделирование наблюдателей скорости (2-4) и момента (10) асинхронного двигателя (рисунок 9).

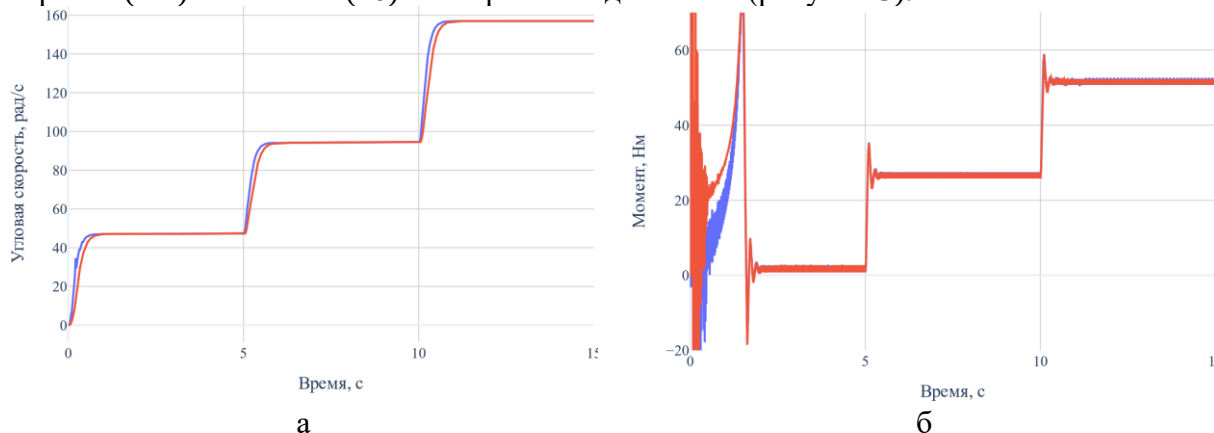


Рисунок 9 – Результат работы наблюдателя скорости (а) и наблюдателя момента (б): реальное (синий цвет) и оцененное (красный цвет) значения

Проведено моделирование нагрузки на полированный шток; в работе представлены результаты, полученные на основе решения конечно-разностного уравнения, а также полученные при имитационном моделировании в *MATLAB/Simulink* (рисунок 10). Параметры глубинного насоса, принятые для моделирования, соответствуют параметрам скважины 250 цеха добычи нефти и газа «Ильинский» Пермского края.

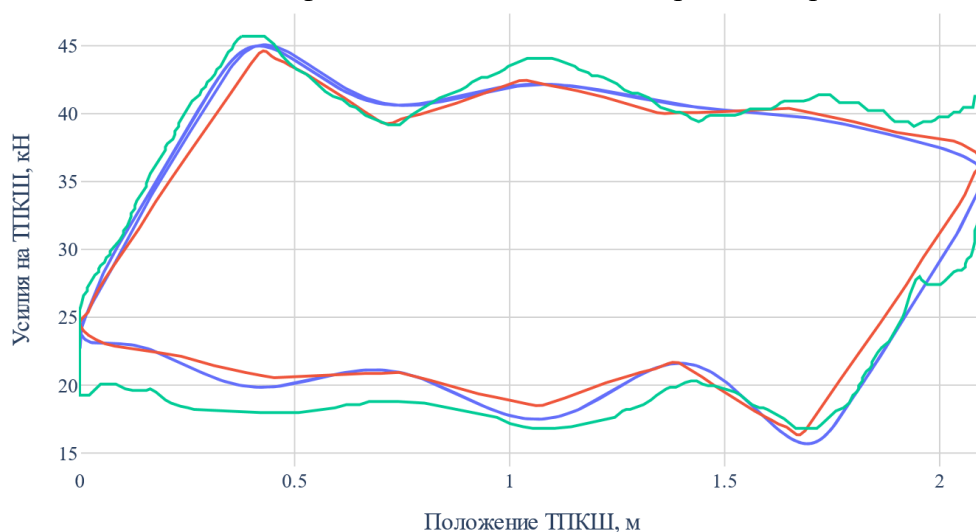


Рисунок 10 – Результат моделирования нагрузки на ТПКШ: исходная динамограмма (зеленый цвет); конечно-разностное уравнение (красный цвет); в среде *MATLAB/Simulink* (синий цвет).

Для апробации работы алгоритма диагностики ШСНУ, с помощью имитационной модели была сформирована обучающая выборка, включающая 6 классов, соответствующих наиболее распространенным состояниям и неисправностям ШСНУ: исправная работа установки; малая подача насоса; утечка в нагнетательном клапане; утечка во всасывающем клапане; обрыв колонны штанг; наличие парафиновых отложений (рисунок 11). Для каждого состояния было сгенерировано по 1000 циклов при варьировании конструктивных и эксплуатационных параметров ШГН.

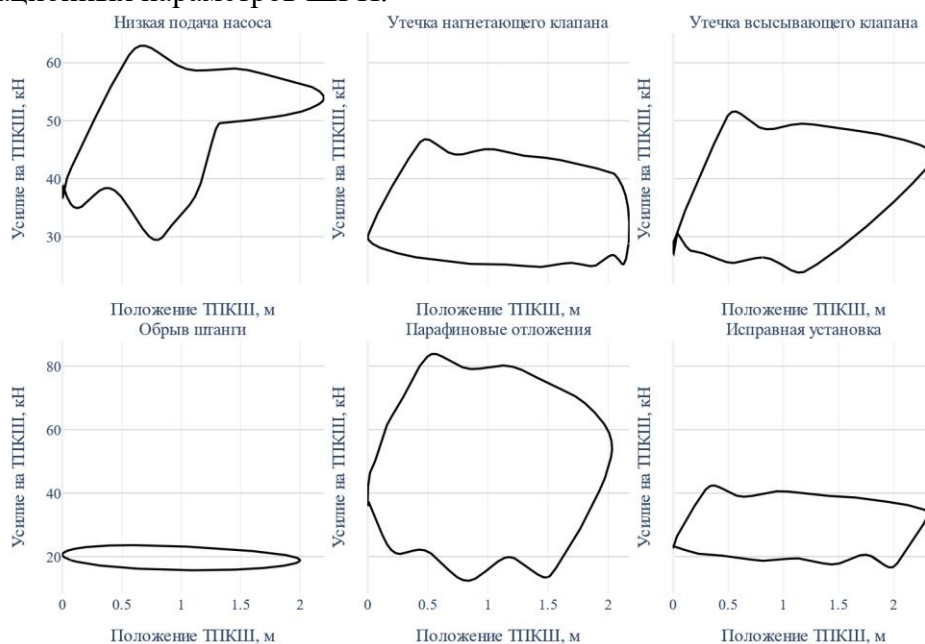
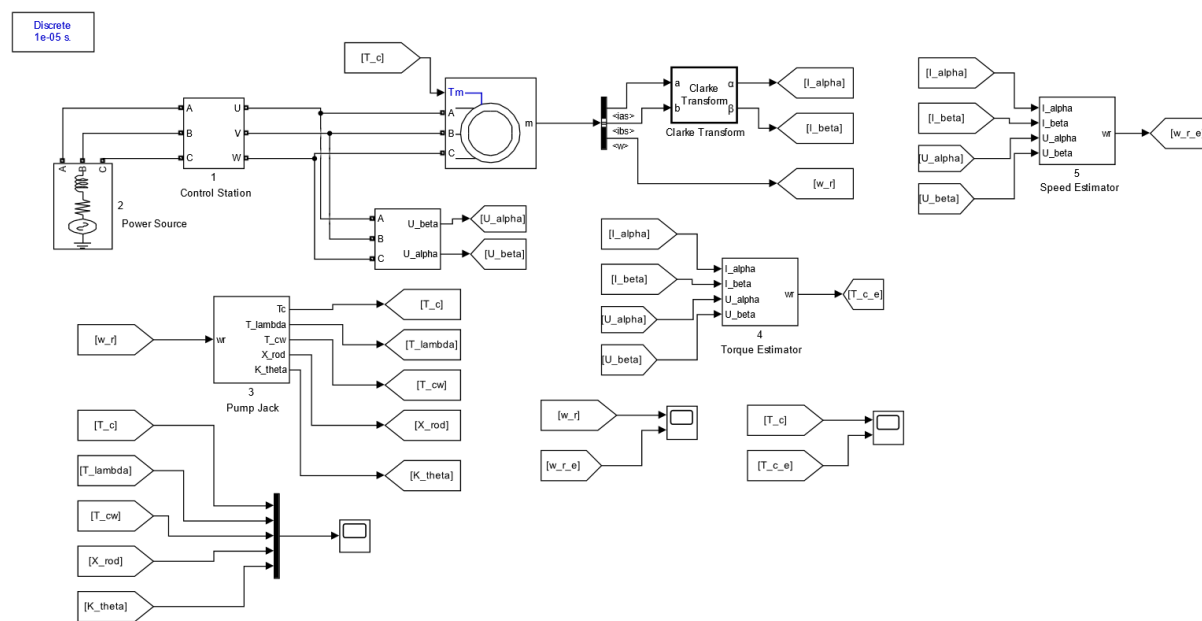
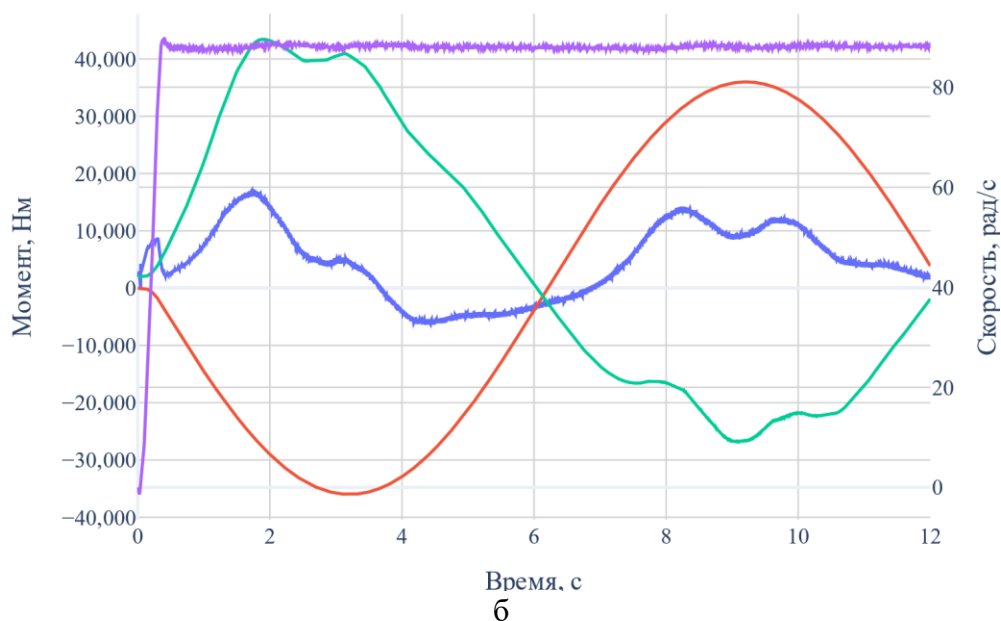


Рисунок 11 – Результат моделирования неисправностей при различных режимах работы установки штангового глубинного насоса

Параметры СК соответствуют модели СК8-3.5-4000. Совокупность описанных ранее имитационных моделей формирует комплексную модель (рисунок 12), результаты которой использовались для отладки разработки и тестирования алгоритма оценки динамограммы ШСНУ.



a



6

Рисунок 12 – а) комплексная модель ШСНУ; б) результат работы модели: суммарный момент на выходном валу редуктора – синий, момент противовеса – красный цвет, момент на кривошипе – зеленый цвет, наблюдаемая скорость – фиолетовый цвет.

Для верификации алгоритма оценки динамограммы, а также алгоритма диагностики ШСНУ была разработана лабораторная установка, являющаяся полунатурной моделью ШСНУ. Установка позволяет воспроизвести следующие режимы работы: нормальная работа; малая подача насоса; утечка в нагнетательном клапане; утечка во всасывающем клапане; обрыв колонны штанг; наличие парафиновых отложений.

Лабораторная установка, с технической точки зрения, представляет собой два асинхронных двигателя марки АИР 200 L4 (выполняющий функцию привода – АД1 и выполняющий функцию нагрузки – АД2). Управление электродвигателями производится

двумя преобразователями частоты фирмы «Мехатроника-ПРО», охваченных обратной связью в виде датчика скорости (ДС). Функции формирования скорости, расчета нагрузки и классификации неисправностей выполняются на одноплатном компьютере (ОК). Преобразователи частоты ПЧ1 и ПЧ2 реализуют векторную систему управления двигателем, ПЧ1 работает в режиме задания момента, ПЧ2 работает в режиме задания скорости. Таким образом, с учётом параметров СК и выбранного типа осложнения или неисправности, формируется режимы изменения нагрузок электропривода, которые являются основой для работы методов диагностики. Реализация алгоритмов управления и наблюдения параметров АД, реализовывалась в среде *MexBIOS Development Studio*. Структурная схема стенда представлена на рисунке 13.

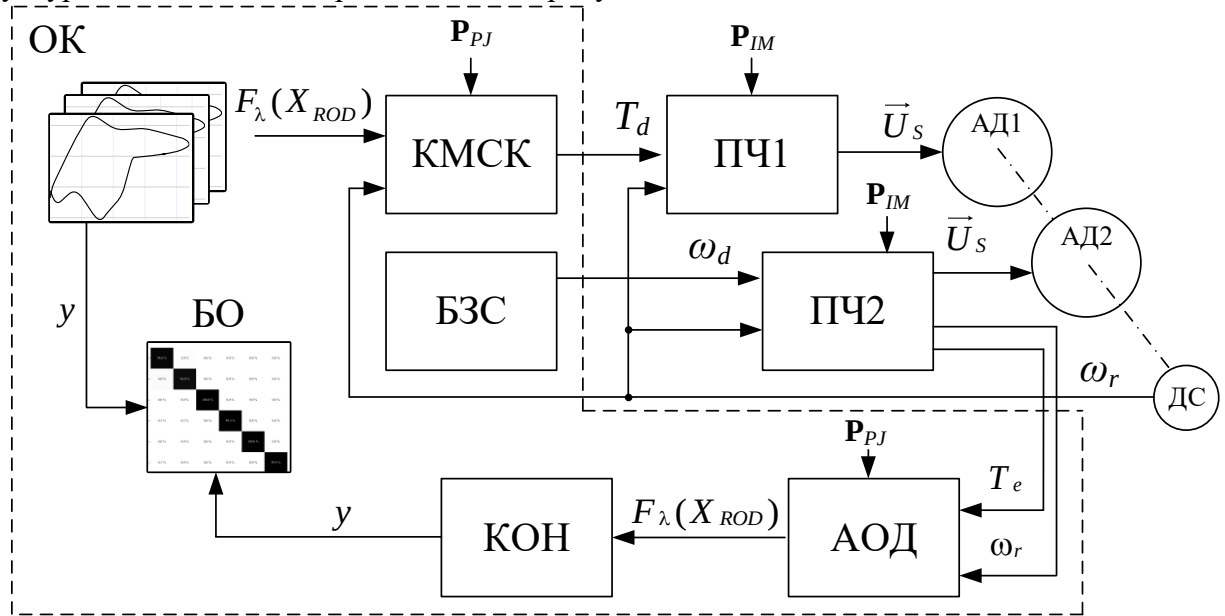


Рисунок 13 – Структурная схема лабораторного стенда ШСНУ

На рисунке 13: БЗС – блок задания скорости; КМСК – кинематическая модель СК; АОД – алгоритм оценки динамограммы; КОН – классификатор осложнений и неисправностей; T_d – задание момента ПЧ1, Нм; ω_d – задание частоты ПЧ2, рад⁻¹; P_{PJ} – параметры станка качалки; P_{IM} – параметры АД.

Результат эксперимента оценки работоспособности алгоритма восстановления динамограммы представлен на рисунке 14. В результате экспериментов было установлено, что средняя абсолютная ошибка при оценке не превышает 700 Н.

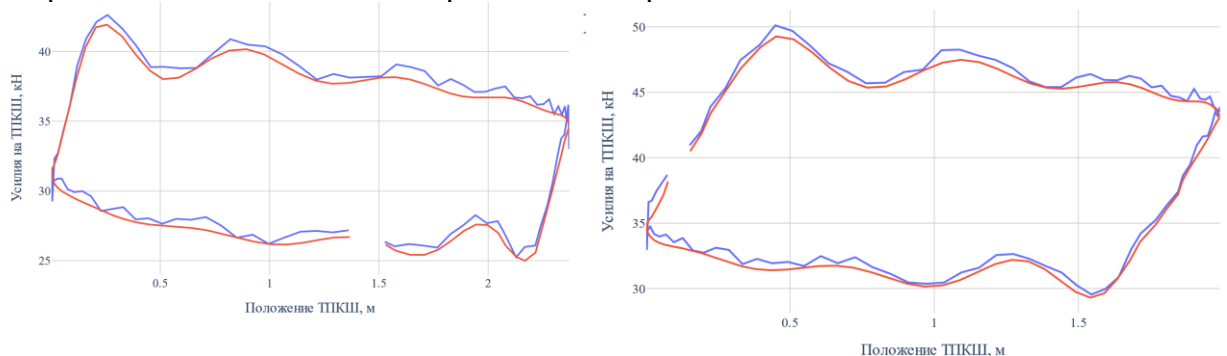


Рисунок 14 – Результаты оценки динамограммы на лабораторном оборудовании: красный цвет – заданная динамограмма, синий цвет – оцененная.

В результате экспериментов установлено, что точность классификатора неисправностей составила 94,5% для 6 ранее описанных классов. Данный показатель является допустимым, учитывая наличие шумов в системе. Последние обусловлены погрешностью перевода сохраненных динамограмм в нагрузочный момент, точностью отработки регулятора и

наблюдателей в составе частотно-регулируемого привода, а также ошибкой восстановления динамограммы по оцененным механическим переменным электропривода. Сверточная нейронная сеть *ResNet1D*, извлекающая векторные представления, была обучена на 4 из 6 классов (обрыв штанги и парафиновые отложения не были представлены). Таким образом, была смоделирована ситуация добавления новой неисправности во время эксплуатации системы (см .рис. 15).

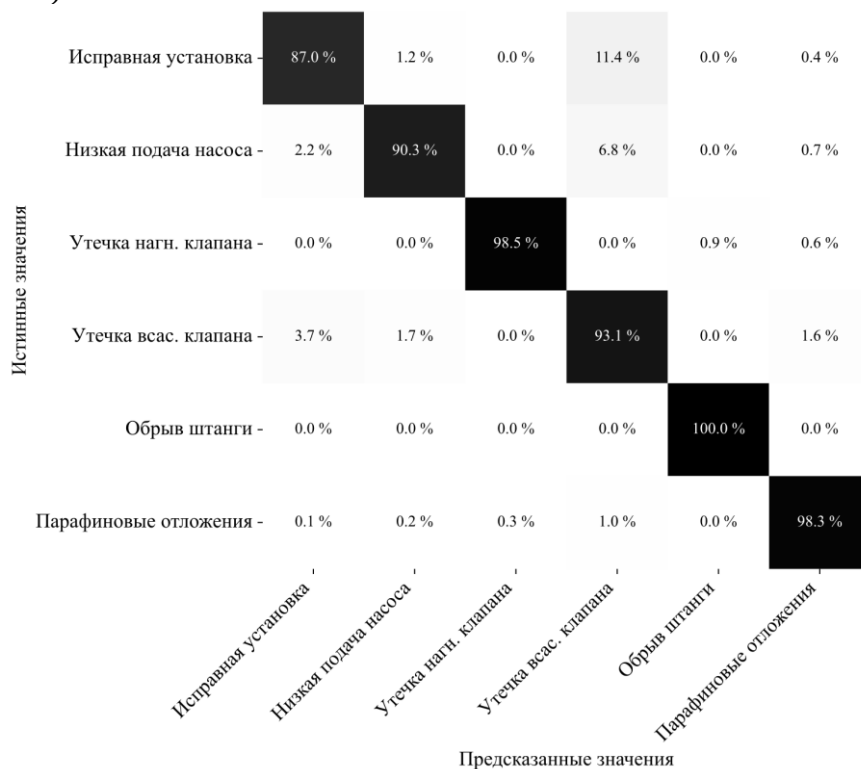


Рисунок 15– Матрица ошибок классификатора неисправностей ШСНУ

Проведены полевые испытания системы оценки динамограммы (рисунок 16), в результате испытаний было установлено, что среднеквадратичная ошибка оценки составляет 2,65 кН (6,34%).

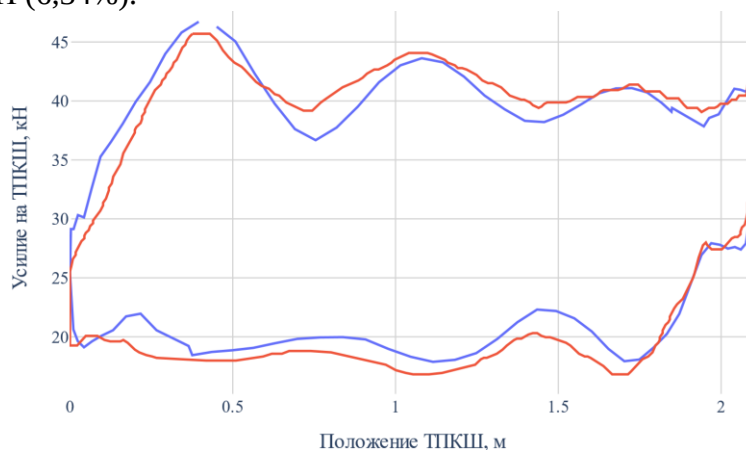


Рисунок 16 – Результат работы алгоритма оценки динамограммы

Несмотря на погрешность оценки динамограмм, система эффективно выполняет функцию идентификации отклонений в работе установки. Качественная оценка эффективности подобных решений в практике эксплуатации электротехнических комплексов показывает снижение объема внеплановых аварийных работ, значительное сокращение времени вынужденного простоя оборудования и уменьшение общего времени внеплановых технологических простоев, что минимизирует риски потерь в добыче нефти.

Также практика внедрения систем непрерывного диагностирования ШСНУ показывает, что удаётся достичь увеличения среднего времени наработки на отказ и коэффициента готовности более чем на 20 %. Своевременный автоматический останов привода при упреждающем выявлении дефектов позволяет избежать крупных отказов, стоимость устранения которых в среднем в 10 раз превышает затраты на устранение вовремя обнаруженной неисправности. Переход от календарного планирования к обслуживанию по наработке снижает трудоемкость технического обслуживания и ремонта, повышая надежность функционирования электротехнических комплексов ШСНУ при минимальных капитальных вложениях за счет отказа от устьевых датчиков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом диссертационной работы является решение актуальной научной задачи, заключающейся в разработке системы автоматизированной диагностики ШСНУ, функционирующей в реальном времени, и имеющей важное значение для нефтедобывающей отрасли. В ходе работы:

1) предложена концептуальная структура системы непрерывной диагностики ШСНУ, которая основана на косвенной непрерывной оценке усилия в точке подвеса колонны штанг по переменным состояния электропривода;

2) разработана комплексная имитационная математическая модель ШСНУ, включающая в себя модель приводного асинхронного двигателя, модель станции управления, кинематическую модель станка-качалки, модель нагрузки на полированный шток и модель притока жидкости в скважину;

3) разработаны методы и алгоритмы диагностики технического состояния ШСНУ по косвенно восстановленной динамограмме, обеспечивающие идентификацию типовых неисправностей в реальном времени;

4) проведены экспериментальные исследования разработанной системы оценки динамограммы с верификацией результатов на лабораторной физической установке.

Основные работы, опубликованные по теме диссертации

1. Классификатор неисправностей работы штанговой скважинной насосной установки / Сальников С. В., Солодкий Е. М., Юдин Р. Ю., Петроченков А. Б. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2026. – № 58. – С.217–235. – DOI 10.15593/2224-9397/2026.2.11. ВАК.

2. Косвенный способ оценки усилия на полированном штоке штанговой скважинной насосной установки / Сальников С. В., Петроченков А. Б., Солодкий Е. М., Юдин Р. Ю. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2026. – № 57. – С.155–176. – DOI 10.15593/2224-9397/2026.1.08. ВАК.

3. Повышение эффективности эксплуатации штанговой скважинной насосной установки за счет внутрициклового регулирования координат движения точки подвеса колонны штанг / Солодкий Е. М., Сальников С. В., Котельников С. С., Юхневский А. В. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2025. – № 53. – С.66–87. – DOI 10.15593/2224-9397/2025.1.04. ВАК.

4. Разработка методики уравнивания балансира станка-качалки с роторными противовесами и определение ее работоспособности в ходе натурного эксперимента / Солодкий Е. М., Петроченков А. Б., Кривошеков С. Н., Сальников С. В., Вишняков Д. Д., Юдин Р. Ю. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336, № 5. – С. 174–182. – DOI 10.18799/24131830/2025/5/4734. Web of Science.

5. Sucker-rod pump energy efficiency through electric drive movement control / Vishnyakov D., Solodkiy E., Salnikov S. // 2021 28th International Workshop on Electric Drives:

Improving Reliability of Electric Drives (IWED). – IEEE, 2021. – P. 1–3. – DOI 10.1109/IWED52055.2021.9376317. Scopus.

6. Induction motor diagnosis based on machine learning / Salnikov S. V., Solodkiy E. M., Vishnyakov D. D., Iudin R. Y., Petrochenkov A. B. // 2023 XXVI International Conference on Soft Computing and Measurements (SMC). – 2023. – P. 210–214. – DOI 10.1109/SCM58628.2023.10159097. Scopus.

7. Software complex for sensorless control of an electrical submersible pump / Iudin R., Petrochenkov A., Solodkiy E., Vishnyakov D., Krause B., Salnikov S. // IEEE Sensors Journal. – 2024. – Vol. 24, № 1. – P. 830–843. – DOI 10.1109/JSEN.2023.3331354. Web of Science.

8. Метод оптимального управления как способ повышения энергоэффективности электроприводного центробежного насоса / Вишняков Д. Д., Солодкий Е. М., Петроченков А. Б., Юдин Р. Ю., Сальников С. В. // Электротехника. – 2022. – № 11. – С. 48–52. – DOI 10.53891/00135860_2022_11_48. БАЗ. 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.

9. Исследование финитных систем управления синхронным двигателем с постоянными магнитами / Юдин Р. Ю., Петроченков А. Б., Солодкий Е. М., Вишняков Д. Д., Сальников С. В. // Электротехника. – 2023. – № 11. – С. 2–9. – DOI 10.53891/00135860_2023_11_2. БАЗ. 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.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026668296. Программа косвенной оценки усилия на полированном штоке штанговой скважинной насосной установки / Сальников С. В., Петроченков А. Б. ; заявитель и правообладатель: ФГАОУ ВО ПНИПУ. – № 2026669714 ; заявл. 01.07.2026 ; опубл. 01.07.2026.

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026668297. Программа классификации неисправностей штанговой скважинной насосной установки / Сальников С. В., Петроченков А. Б. ; заявитель и правообладатель: ФГАОУ ВО ПНИПУ. – № 2026669715 ; заявл. 01.07.2026 ; опубл. 01.07.2026.