

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»



На правах рукописи

Текле Самуэль Исаак

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ
ДИАГНОСТИКИ И ПОВЫШЕНИЯ
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ШТАНГОВЫХ
ГЛУБИННО-НАСОСНЫХ УСТАНОВОК С ПРИВОДОМ ОТ
АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Екатеринбург — 2023

Работа выполнена на кафедре «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Уральского энергетического института ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Зюзов Анатолий Михайлович

Официальные оппоненты: **Петроченков Антон Борисович**, доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь, заведующий кафедрой «Микропроцессорные средства автоматизации»;

Хакимьянов Марат Ильгизович, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, заведующий кафедрой «Электротехника и электрооборудование предприятий»;

Ковалев Владимир Захарович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет», г. Ханты-Мансийск, профессор Политехнической школы

Защита состоится «25» мая 2023 г. в 14:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 2.4.09.23 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=4589>

Автореферат разослан «__» _____ 2023 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Хальясмаа Александра Ильмаровна

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Нефть, по-прежнему, является одним из крупнейших мировых источников первичной энергии. Согласно отчету компании British Petroleum за 2022 год, добыча нефти в 2021 году доходила до 89,877 млн. баррелей в сутки, причем у крупнейших производителей она составляла: в США - 16,585 млн. баррелей в сутки; в Российской Федерации - 10,944 млн. баррелей в сутки. Сообщается, что более 70% действующих нефтедобывающих скважин используют искусственные методы подъема нефти на поверхность. В большинстве случаев применяются штанговые глубинно-насосные установки (ШГНУ), которые хорошо изучены и освоены в эксплуатации, обеспечивают низкую совокупную стоимость эксплуатации, простоту и адаптируемость к широкому диапазону производительности. Тем не менее, по-прежнему существует потребность в исследованиях, направленных на поиск путей улучшения их эксплуатационных показателей.

Одним из способов достижения этой цели является разработка эффективных систем мониторинга и диагностики оборудования. Подземные элементы конструкции ШГНУ (погружной насос плунжерного типа), работает в тяжелых условиях на глубине тысячи метров под землей и частота его отказов высока. Отчеты об анализе неисправностей штанговых насосов показывают, что большинство из них связано с глубинным насосом, колонной штанг или колонной насосно-компрессорных труб. Из-за отказа подземного компонента или нестабильной подачи жидкости могут возникать различные сбои в работе ШГНУ. Эксплуатация оборудования со скрытыми дефектами в некоторых рабочих состояниях может привести к аномальному развитию событий и экономическим потерям. Динамограмма (зависимость усилия в подвеске полированного штока от его хода) является основным средством для определения состояния подземных элементов ШГНУ в нефтяной отрасли с 1963 года. Различные рабочие условия штанговых насосных систем можно отчетливо распознать по форме динамограммы. При традиционном подходе к диагностике квалифицированный персонал может диагностировать состояние подземной части на основе формы динамограммы. Однако диагностика, основанная на этом методе, неэффективна, поскольку на ее точность влияют личные качества технического персонала, и она не поддерживает средства мониторинга в режиме реального времени. Кроме того, этот метод требует применения специальных датчиков. С другой стороны, диаграмма мощности двигателя (ваттдиаграмма) является многообещающей альтернативой динамограмме. Такая диаграмма вполне информативна,

что привлекает внимание большого числа исследователей, однако её обработка требует специальных компьютерных технологий.

Другой широко обсуждаемой в специальной литературе проблемой является оценка мгновенной потребляемой мощности электропривода ШГНУ, которая является достаточно сложной из-за периодического характера нагрузки во время цикла откачки. В ШГНУ расходы на потребляемую электроэнергию составляют основную часть эксплуатационных затрат. Следовательно, снижение эксплуатационных расходов может быть получено за счет снижения энергопотребления привода штангового насоса. Поскольку во всем мире установлено большое количество штанговых глубинно-насосных установок, любые усилия, направленные на снижение энергопотребления, принесут значительную экономическую выгоду и помогут достичь целей и высоких стандартов энергоэффективности.

Известно несколько методов для снижения энергопотребления в ШГНУ. Использование оптимального противовеса и правильный выбор режима откачки (сочетание размера плунжера, длины хода, скорости откачки) позволяют сэкономить некоторое количество энергии. Определённого снижения энергопотребления также можно добиться за счет управления напряжением питания в зависимости от положения полированного штока. Однако практическое применение этого метода ограничено нагрузками, вызывающими режим генерации двигателя. Управление откачкой, основанное на контроле уровня жидкости, также позволяет сэкономить энергию в случае недостаточного уровня жидкости. Однако этот метод не подходит для скважин с обводнением. Еще одним предлагаемым подходом является применение многофункционального энергосберегающего устройства, которое включает в себя управление отключением питания, автоматическое переключение по схеме «звезда-треугольник» с компенсацией реактивной мощности. Этот метод применим для различного типа профилей нагрузки: легкая нагрузка с генераторным режимом, легкая нагрузка без генераторного режима, большая нагрузка с генераторным режимом, тяжелая нагрузка без генераторного режима. Еще одним возможным решением задачи энергосбережения является снижение эксплуатационных расходов за счет адаптации некоторых стратегий управления, сводящих к минимуму потребление энергии двигателем.

Проблемы, связанные с организацией и проведением экспериментов в электромеханических системах, также привлекают внимание исследователей. Одной из таких систем является ШГНУ. Из-за недостатка площадей и крупных финансовых затрат нецелесообразно держать комплекс ШГНУ в исследовательской лаборатории. Экспериментальные задачи могут быть успешно выполнены с использованием альтернативных средств,

таких как электромеханический испытательный стенд, комплекс Hardware-in-the-Loop (HiL) с его расширением Power Hardware-in-the-Loop (PHiL) и их комбинации.

Степень разработанности темы. ШГНУ является ведущим средством механизированной добычи в нефтегазовой отрасли. В разработку штанговых насосных установок значительный вклад в области моделирования, контроля и диагностики, проектирования и анализа себестоимости внесли российские и зарубежные исследователи: Р.Т. Ахметгаряев, Е.М. Солодкий, Г. Гуляев, В.Б. Садов, И.Н. Шардаков, S. G. Gibbs, Tackas Gobar, A. Koncz, S. Miska, В.М. Wilamowski, L. H. Torres, В. Ordonez, M. Xing, G. Xianwen, S. Dong, Z. Boyuan, X. Sun, F. ZiMing, X.Liu и др. Оптимизация энергоэффективности электроприводов в целом была в центре внимания многих исследователей, таких как В.Н. Поляков, Р.Т. Шрейнер и др. Всё это говорит о том, что потенциал для исследований в этом направлении есть.

Цель работы заключается в развитии методов диагностики и повышения эффективности работы штанговых глубинно-насосных установок с асинхронным электроприводом.

Для достижения цели ставятся и решаются следующие **задачи**:

1. Разработка комплексной компьютерной модели электропривода ШГНУ с имитацией основных рабочих состояний;
2. Получение обучающей выборки ваттдиаграмм электропривода и разработка диагностической модели основных рабочих состояний ШГНУ;
3. Разработка специальной стратегии формирования тока намагничивания асинхронного двигателя и оценка её эффективности в системе векторного управления частотно-регулируемым электроприводом ШГНУ;
4. Разработка симуляторов реального времени ШГНУ.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана имитационная модель ШГНУ в среде MatLab, воспроизводящая типовые режимы работы штангового насоса.
2. Разработана модель диагностики основных неисправностей штангового насоса на основе диаграмм мощности двигателя и метода опорных векторов (SVM) путем построения обучающей выборки с помощью имитационной модели штангового насоса.
3. Предложена специальная стратегии формирования траектории тока намагничивания в системе векторного управления частотно-регулируемым электроприводом штангового насоса с асинхронным двигателем, обеспечивающая определённое снижение энергопотребления.

4. Предложена структура симулятора реального времени электропривода ШГНУ в среде LabVIEW и на её основе создан электромеханический стенд для исследования динамических режимов ШГНУ.
5. Предложена и реализована стратегия управления нагрузочной машиной электромеханического стенда для имитации режимов работы штангового насоса (в масштабе).

Теоретическая значимость работы состоит в развитии математической и компьютерной модели электропривода штанговых глубинно-насосных установок, которая позволяет выполнять детальное исследование различных режимов работы и состояний ШГНУ и предлагается для решения задач оптимизации энергопотребления и построения обучающей выборки ваттдиаграмм электропривода при реализации компьютерных методов диагностики.

Практическая значимость работы заключается в разработке алгоритмов диагностики и структуры симулятора ШГНУ, которые могут быть использованы при построении испытательных стендов для отработки функций и отладки интеллектуальных станций управления ШГНУ. Кроме того, симулятор ШГНУ можно использовать в будущих исследованиях, направленных на повышение эффективности работы электроприводов штанговых насосов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Имитационная модель ШГНУ для создания образцов диаграмм мощности различных режимов работы.
2. Диагностическая модель на основе диаграммы мощности двигателя и метода опорных векторов.
3. Процедура формирования специальной траектории тока намагничивания в системах векторного управления частотно-регулируемым электроприводом штангового насоса с асинхронным двигателем.
4. Модель ШГНУ в режиме реального времени в среде программирования LabVIEW.
5. Система управления нагрузочным агрегатом для имитации режимов работы ШГНУ (в масштабе).

Методология и методы исследования. В диссертационной работе для решения поставленных задач используются теоретические и экспериментальные методы исследования. Теоретические исследования основаны на положениях теории электропривода, электрических машин, систем автоматического управления, теоретической механики, теории дифференциальных уравнений, методах численного интегрирования, прямого и обратного преобразования Лапласа, методах оптимизации на основе

множителей Лагранжа. К экспериментальным методам относятся: компьютерное моделирование, лабораторные исследования на испытательном стенде - симуляторе ШГНУ. В исследованиях использовались следующие программные продукты: MatLab R2019b, LabVIEW 8.0.

Достоверность. Диагностика состояния ШГНУ в диссертационной работе основана на анализе диаграммы мощности двигателя, характеристики которой непосредственно связаны с условиями работы глубинного насоса. Диаграмма мощности является периодической (с периодом, равным длительности одного цикла работы насоса) и отражает влияние различных сил, действующих на поверхностные и подземные компоненты оборудования в течение двойного хода полированного штока. Разработка и исследование способа снижения энергопотребления основана на минимизации тока двигателя за счет воздействия на намагничивающую составляющую ток статора, что является широко распространенным приемом. Результаты эксперимента на электромеханическом испытательном стенде подтверждают точность разработанной имитационной модели. Форма динамограммы, рассчитанная с использованием результатов измерений мощности двигателя, показывает, что смоделированные рабочие состояния ШГНУ с помощью симулятора реального времени достоверно отражаются на мощности приводной машины.

Реализация результатов работы. Результаты, представленные в работе, использованы при тестировании мобильных систем ваттметрирования ШГНУ типа СК ШС-2 (ПКБСК), производимых компанией «Большие системы» для объектов нефтедобычи.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены на 6 перечисленных ниже конференциях:

1. 2019 IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research and Practice (PEAMI), Magnitogorsk, Russia.
2. 2020 27th International Workshop on Electric Drives: MPEI Department of Electric Drives 90th Anniversary (IWED), Moscow, Russia.
3. 2020 XI International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS), St. Petersburg, Russia.
4. 2020 IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research and Practice (PEAMI), Magnitogorsk, Russia.
5. 2021 XVIII International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED), Ekaterinburg, Russia.
6. 2022 29th International Workshop on Electric Drives: Advances in Power Electronics for Electric Drives (IWED), Moscow, Russia.

Личный вклад. Автор принял активное участие в разработке модели диагностики неисправностей, системы энергоэффективного управления, экспериментального стенда и модели реального времени ШГНУ.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 12 научных работ, из них 11 статей, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, из них 10 статей индексируются в международных базах цитирования Scopus и WoS; зарегистрирована 1 программа для ЭВМ .

Содержание работы

Во **введении** представлена актуальность исследований, проводимых в рамках диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы. В последующих главах описывается общая модель штанговой глубинно-насосной установки, система диагностики неисправностей, реализованная на компьютере, энергоэффективная система управления и стенд-имитатор штанговой глубинно-насосной установки (ШГНУ).

В первой главе описана компьютерная модель ШГНУ и проведён её анализ. Комплекс ШГНУ включает в себя сложные подсистемы, поэтому при разработке модели ШГНУ последовательно разрабатываются модели асинхронного двигателя, наземной механической части насосного агрегата, колонны штанг, погружного насоса плунжерного типа и модель резервуара с пластовой жидкостью. Затем все эти модели объединяются в общую модель ШГНУ.

Объединённую модель можно представить в виде блок-схемы, показанной на рис. 1. Блок колонны штанг ШГНУ моделирует продольную вибрацию колонны. Этот блок взаимодействует с моделью наземной части насосной установки и моделью насоса для вычисления усилия на полированном штоке. Блок модели двигателя и наземной части насосной установки воспроизводит процесс преобразования электрической энергии в механическую с учетом кинематики насосной установки, взаимодействуя с блоком колонны насосных штанг. Модель насоса имитирует изменение давления в насосе, которое является ключевым параметром при определении граничных условий в модели подземной части. Модель насоса взаимодействует с моделью пласта, учитывая условия материального баланса. Модель пласта имитирует работу притока скважины.

Интегрированная имитационная модель настроена на моделирование насосного агрегата с приводом, обрабатывающим двигательный режим в III

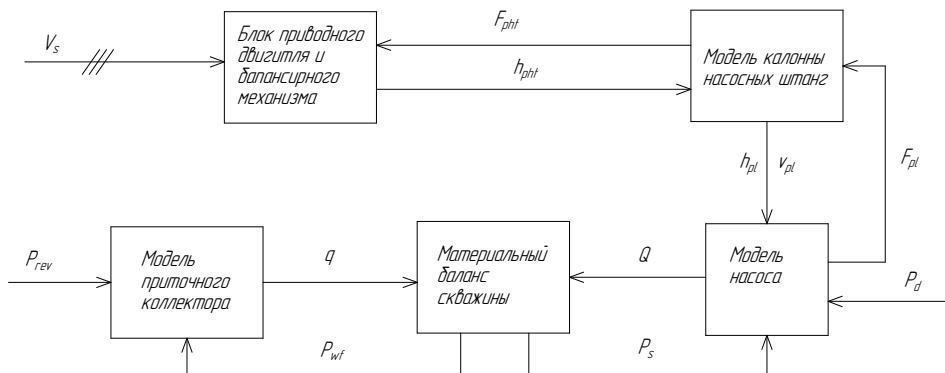


Рис. 1 — Имитационная модель штангового насосного агрегата

V_s - напряжение питания; F_{pht} - нагрузка на полированный шток; h_{pht} - перемещение полированного штока; h_{pl} - перемещение плунжера; v_{pl} - скорость плунжера; F_{pl} - нагрузка на плунжер; P_{rev} - пластовое давление; P_{wf} - забойное давление; P_s - давление всасывания; P_d - давление нагнетания; q - скорость потока жидкости

квадранте механических характеристик. Процессы в модели штангового насоса демонстрирует рис. 2, где показаны перемещение, скорость и ускорение полированного штока, а также усилие на штоке в функции времени для нормального рабочего состояния. Коэффициент приведения усилия на штоке к валу двигателя (крутящего момента) является характерным параметром насосных агрегатов. Для данной геометрии насосного агрегата изменение коэффициента приведения крутящего момента показано на рис. 3.

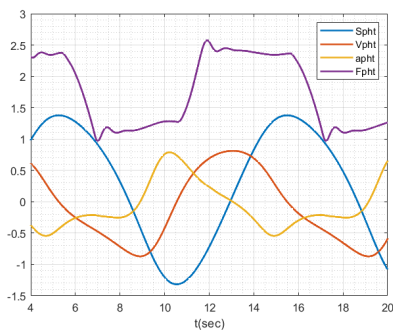


Рис. 2 — Перемещение полированного штока, скорость, ускорение и усилие

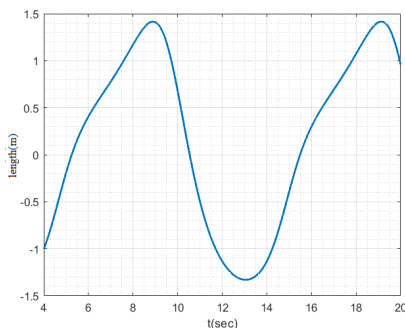


Рис. 3 — Радиус приведения момента

Выбор подходящего насосного агрегата основывается на его кинематике. В идеальном случае насосный агрегат должен иметь длинный и медленный ход вверх, более быстрый и короткий ход вниз, низкий коэффициент крутящего момента на ходе вверх, уменьшенное ускорение в начале хода вверх.

Анализ крутящего момента на редукторе важен для определения мгновенной и средней мощности и потребляемой установкой энергии. На рис. 4 показаны составляющие (компоненты) момента на редукторе, приведенные к валу ротора двигателя, а также момент двигателя. Поскольку момент инерции двигателя относительно мал, можно сказать, что двигатель развивает вращающий момент в основном для преодоления сопротивления результирующему моменту, обусловленному нагрузкой от полированного штока и противовеса. Форма динамограммы, показанная на рис. 5, является признаком нормального рабочего состояния ШГНУ.

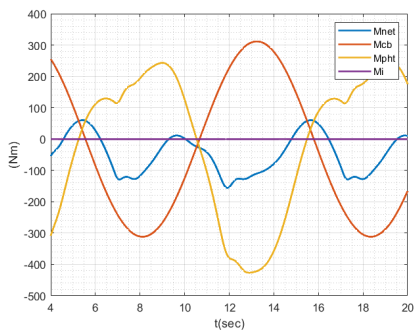


Рис. 4 — Компоненты крутящего момента редуктора, передаваемого на вал двигателя

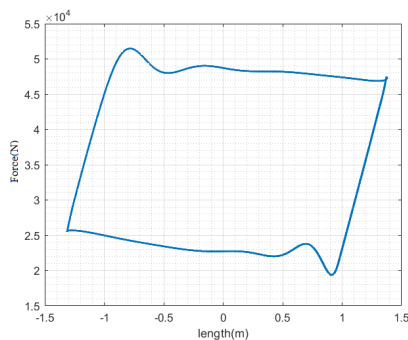


Рис. 5 — Динамограмма

Во второй главе представлена разработка компьютерной модели для системы диагностики штангового насоса, построенной на основе анализа диаграмм (осциллограмм) мощности двигателя. Для применения данного метода требуется получить необходимое количество осциллограмм, демонстрирующих различные виды рабочих состояний ШГНУ. Также требуется представить каждую осциллограмму какой-либо характеристикой/признаком и решить проблему классификации полученных данных.

Первая задача - получение необходимого набора осциллограмм, решается с помощью разработанной объединённой имитационной модели штангового насоса. Приняв различные комбинации динамического уровня и скорости откачки, можно получить ряд осциллограмм, демонстрирующих нормальное рабочее состояние. Также можно получить ряд осциллограмм для различных рабочих состояний при неисправностях, предполагая изменения в наиболее влияющем параметре рассматриваемой неисправности. Наиболее распространенные неисправности возникают из-за проблем в погружном насосе. Проявление наиболее характерных состояний может быть смоделировано путем изменения параметров притока жидкости в модели пласта, свойств жидкости или допущения различного рода механических

особенностей. Таким образом, в общей сложности получены 72 осциллограммы мощности двигателя и соответствующие динамограммы для шести рабочих состояний ШГНУ. Характерные образцы для случаев захвата газа и негерметичности нагнетательного клапана показаны на рис. 6 и рис. 7.

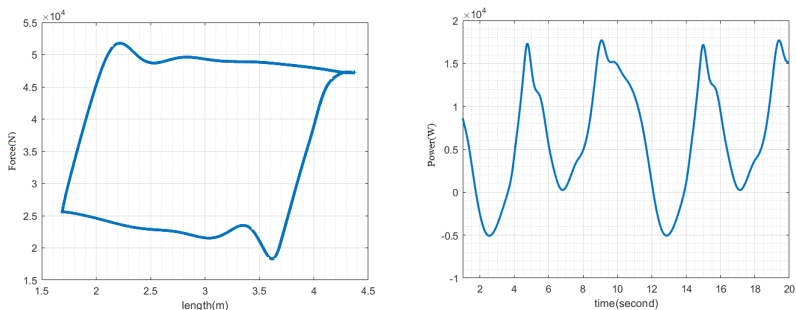


Рис. 6 — Эффект захвата газа

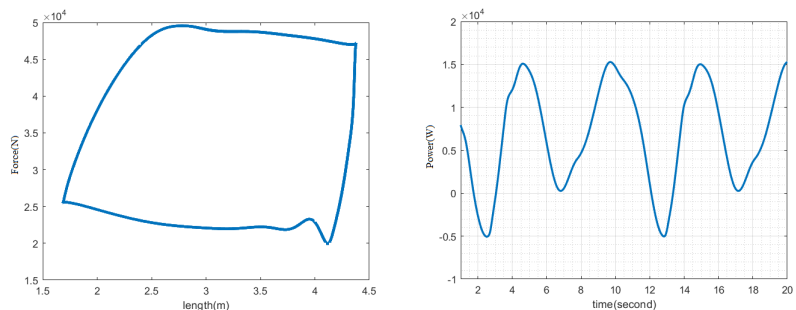


Рис. 7 — Негерметичность нагнетательного клапана

Решение второй задачи основано на анализе динамических характеристик штангового насоса, которые для нормального рабочего состояния представлены на рис. 8. Из приведённых диаграмм видно, что минимальная мощность соответствует концу хода полированного штока вверх, причём минимальные точки графика мощности соответствуют точкам закрытия клапанов, а максимальные точкам открытия клапанов. При работе штангового насоса в характерных рабочих состояниях изменяется как расположение точек переключения клапанов, так и энергия, потребляемая в различных частях цикла. Эти эффекты могут быть использованы для построения вектора признаков состояния, представляющего данный образец. В частности, предлагается определять энергию, потребляемую в различных частях цикла, и расстояние между рабочими точками клапана:

- коэффициент работы каждой из четырех частей цикла (временного интервала t_4-t_0) составляет: $w_1 = \frac{1}{w} \int_{t_0}^{t_1} p(t)dt$, $w_2 = \frac{1}{w} \int_{t_1}^{t_2} p(t)dt$, $w_3 = \frac{1}{w} \int_{t_2}^{t_3} p(t)dt$, $w_4 = \frac{1}{w} \int_{t_3}^{t_4} p(t)dt$;

где t_1, t_2, t_3, t_4 - моменты окончания четырех частей цикла; $w = \int_{t_0}^{t_4} p(t)dt$;

- на рис. 9 при условии, что координаты $(x_{SV,o}, y_{SV,o}), (x_{SV,c}, y_{SV,c}), (x_{TV,o}, y_{TV,o}), (x_{TV,c}, y_{TV,c})$ представляют точки для всасывающий клапан (SV) open, SV closed, нагнетательный клапан (TV) open и TV closed соответственно, следующие три расстояния вычисляются и используются при построении вектора признаков состояния:

$$L_a = \sqrt{(x_{SV,o} - x_{TV,o})^2 + (y_{SV,o} - y_{TV,o})^2},$$

$$L_b = \sqrt{(x_{SV,c} - x_{SV,o})^2 + (y_{SV,c} - y_{SV,o})^2},$$

$$L_c = \sqrt{(x_{TV,c} - x_{TV,o})^2 + (y_{TV,c} - y_{TV,o})^2}.$$

Для каждой осциллограммы, полученной в имитационной модели ШГНУ, с помощью предложенного метода извлекаются необходимые признаки состояния и строится вектор признаков состояния. Все векторы признаков состояния объединяются для формирования обучающего набора. В таблице 1 представлено среднее значение векторов извлечения признаков для каждого рабочего состояния. Для данного штангового насоса можно сказать, что каждый образец однозначно описывается вектором признаков, и векторы признаков для образцов с одной и той же меткой имеют схожие характеристики.

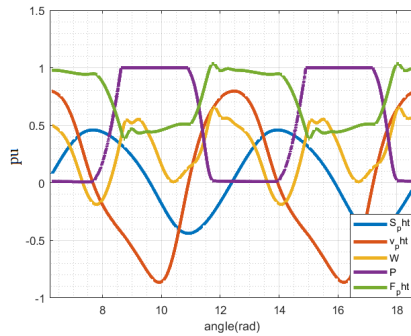


Рис. 8 — Динамические характеристики механизма

Таблица 1 — Средние значения извлеченных признаков состояния

State	L_a	L_b	L_c	w_1	w_2	w_3	w_4
Nor.	0.425	0.797	0.453	0.397	0.217	0.202	0.184
Lik.	0.477	0.729	0.462	0.355	0.217	0.241	0.187
Gaf.	0.416	0.799	0.503	0.488	0.247	0.102	0.204
Ins.	0.398	0.793	0.450	0.486	0.257	0.054	0.203
Vpb	0.422	0.711	0.437	0.185	0.183	0.409	0.222
Vpt	0.436	0.702	0.434	0.204	0.187	0.388	0.222

Nor. - нормальное рабочее состояние; Lik. - утечка в приемном клапане; Gaf. - влияние газа; Ins. - незаполнение насоса; Vpb. - низкая посадка плунжера; Vpt. - высокая посадка плунжера.

Для решения задачи классификации разработана диагностическая модель на основе метода опорных векторов (SVM), как показано на рис.10. Общий процесс диагностики делится на обучение и диагностику. Процесс

обучения выполняется в автономном режиме, в то время как процесс диагностики может быть выполнен в онлайн режиме. Полученные результаты представлены матрицей соответствия в таблице 2. В работе реализация алгоритма SVM, программ классификации и выделения признаков выполнены в среде MATLAB, но они также могут быть представлены на других языках программирования. Более того, программы классификации и извлечения признаков предлагается включать в состав по интеллектуальных станций управления ШГНУ, а программу обучения устанавливать в централизованном блоке.

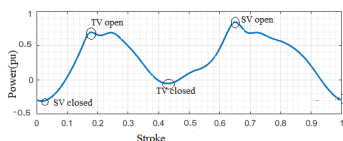


Рис. 9 — Точки переключения клапанов на диаграмме мощности двигателя

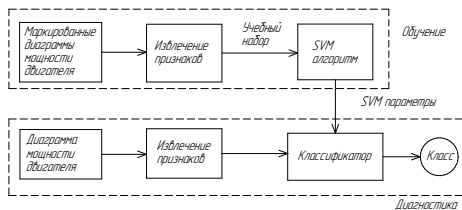


Рис. 10 — Диагностическая модель

Таблица 2 — Матрица соответствия

State	Nor.	Lik.	Gaf.	Ins
Nor.	12	0	0	0
Lik.	0	12	0	0
Gaf.	0	0	12	0
Ins.	2	0	3	7

В третьей главе модель асинхронного двигателя в объединённой модели штангового насоса модифицирована для учета влияния потерь в стали. Затем к модифицированной модели привода штангового насоса подключена модель преобразователя AC-DC-AC для исследования энергоэффективности работы привода. В установившемся режиме, применяя ограничения, ориентированные на поток ротора, упрощенная модель потерь может быть записана так:

$$P_{loss} = R_d i_{sd}^2 + R_q i_{sq}^2, \quad (1)$$

где $R_d = R_s + \frac{(1-\sigma)^2 L_s^2}{R_f + R_r'} \omega^2$, $R_q = R_s + \frac{R_f R_r'}{R_f + R_r'}$, $R_r' = \left(\frac{L_m}{L_r}\right)^2 R_r$, $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$.

Для конкретного рабочего состояния в координатах момент-скорость в системах ПЧ-АД существует оптимальный ток, создающий поток. Однако в допустимом диапазоне значений оптимального тока необходимо учитывать ограничения по напряжению и току. Ограничение по току устанавливается на основе оценки теплового состояния двигателя, эффекта насыщения и управляемости.

На рис. 11 показана зависимость между оптимальным значением составляющей тока статора, создающей поток, и составляющей тока статора, создающей момент, в рабочем диапазоне скоростей. На границах диапазона тока, создающие крутящий момент, определяют $M_{p0} = K_t \left(\frac{R_d}{R_q} \right)^{0.5} i_{sdmin}^2$ на нижней границе, $M_{p1} = K_t \left(\frac{R_d}{R_q} \right)^{0.5} i_{sdn}^2$ на верхней границе и $M_{max} = K_t i_{sdn} (I_{max}^2 - i_{sdn}^2)^{0.5}$ при максимальном токе статора.

Поскольку момент нагрузки, приложенной к приводу штангового насоса, является периодическим, задача оптимизации формулируется как:

$$\min \left\{ \int_0^T P_{loss}(i_{sd}, i_{sq}) dt \right\}, \quad (2)$$

где: T – время, затрачиваемое на один цикл работы.

В этой задаче целью является нахождение оптимальной траектории тока намагничивания для заданных траекторий крутящего момента и скорости. В системе координат, ориентированной по полю, ток намагничивания и ток статора, создающий поток, равны в установившемся режиме. Траекторию тока, создающего поток, предлагается определять из установившегося электромагнитного момента (M_p). M_p выбирается на основе абсолютного значения момента, как показано на рис. 12. На этой диаграмме обозна-

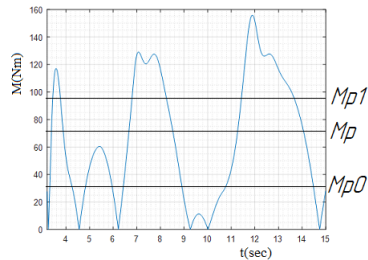
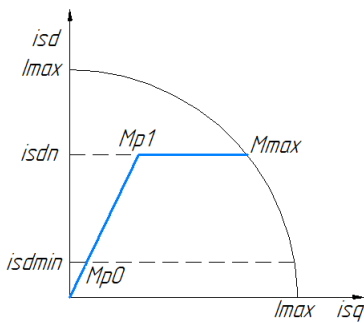


Рис. 11 — Соотношение между оптимальным током, создающим поток, и током, создающим крутящий момент, в базовом диапазоне скоростей

Рис. 12 — Абсолютное значение траектории крутящего момента двигателя

чены M_{p0} и M_{p1} , а M_p выбирается в диапазоне от M_{p0} до M_{p1} . При выборе установившегося электромагнитного момента следует учитывать минимальный интервал времени, необходимый для работы с постоянным потоком. Для участков траектории выше M_p ток, создающий поток, устанавливается равным i_{sdn} , в противном случае принимается равным оптимальному значению, соответствующему M_p . Для каждой траектории тока,

генерирующего поток, рассчитывается потребление энергии за один цикл работы насоса. Далее результаты энергопотребления для всех возможных установившихся электромагнитных моментов сравниваются и траектория тока, соответствующая минимальной потребляемой энергии, выбирается в качестве оптимальной траектории тока намагничивания. Поскольку пластовые условия скважины меняются медленно, расчет оптимальной траектории намагничивающего тока может быть выполнен в автономном режиме и загружен в контроллер, как предварительная настройка системы управления.

В реализации предложенного метода управления асинхронный двигатель питается через двунаправленный преобразователь частоты, а необходимые оптимальные условия работы достигаются с помощью специальных алгоритмов системы управления. Для проверки способа в среде MATLAB разработана схема векторного управления системой ПЧ-АД с замкнутым контуром тока намагничивания, на основе которой была создана имитационная модель привода штангового насоса с оптимальной траекторией тока намагничивания.

Расчётные значения диаграмм потребляемой мощности с управлением током намагничивания и без управления для сравнения приведены на рис. 13 (вверху), а для наглядности их разница показана на рис.13 (внизу). Видно, что можно сэкономить некоторое количество энергии, если привод штангового насоса работает с формированием специальной траектории тока намагничивания. Когда привод работает с предлагаемым управлением током намагничивания, его фактическое значение изменяется так, как показано на рис. 14.

Из таблицы 3 видно, что энергия, потребляемая за цикл работы в системе электропривода ШГНУ с управляемым током намагничивания меньше, чем при работе с номинальным током намагничивания.

Таблица 3 — Сравнение потребления энергии

Case	E	Q	V_{eff}
Operation at rated flux	65078	0.0575	0.314
Operation at optimal flux	64123	0.0575	0.309

E —Энергия, потребляемая за один цикл работы насоса (Джоули),

Q -Расход жидкости, производимой скважинным насосом (м³),

V_{eff} -Объемная эффективность (кВтч/м³).

Около 1,6% потребляемой энергии может быть сэкономлено, если привод работает с формированием оптимальной траектории тока намагничивания, а не при постоянном номинальном токе намагничивания.

В четвертой главе представлен экспериментальный электромеханический стенд, разработанный для лабораторных испытаний электропривода штангового насоса в реальном времени с системой управления нагрузочной

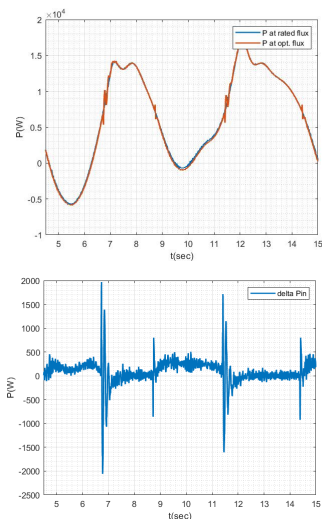


Рис. 13 — Входная мощность для двух случаев управления и их разность

машины, воспроизводящей нагрузки штангового насоса (в уменьшенном масштабе). Фотография экспериментальной установки показана на рис. 15, а общая схема на рис. 16.



Рис. 15 — Фотография экспериментального испытательного стенда

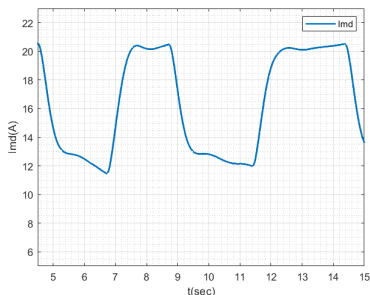


Рис. 14 — Ток намагничивания

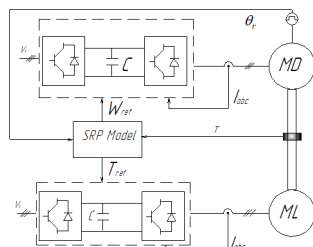


Рис. 16 — Схема экспериментальной установки

Испытательный стенд состоит из двух асинхронных двигателей 4АМА80В4У3 (1,5 кВт, КПД = 77%), соединенных общим валом, управляемых преобразователями частоты фирмы АВВ - АСS 580. На ПК, оснащенный LabVIEW и устройством ввода/вывода (PCI NI 6221), реализована компьютерная модель механической части ШГНУ. Полная схема модели реального времени штангового насоса, разработанная в среде программирования LabVIEW, показана на рис. 17. Она разделена на медленную и более быструю подсистемы. Быстрая подсистема включает в себя компьютерные модели колонны насосных штанг, самого глубинного насоса и резервуара с пластовой жидкостью. Медленная подсистема включает в себя модели наземной части насосного агрегата, клиноременной передачи,

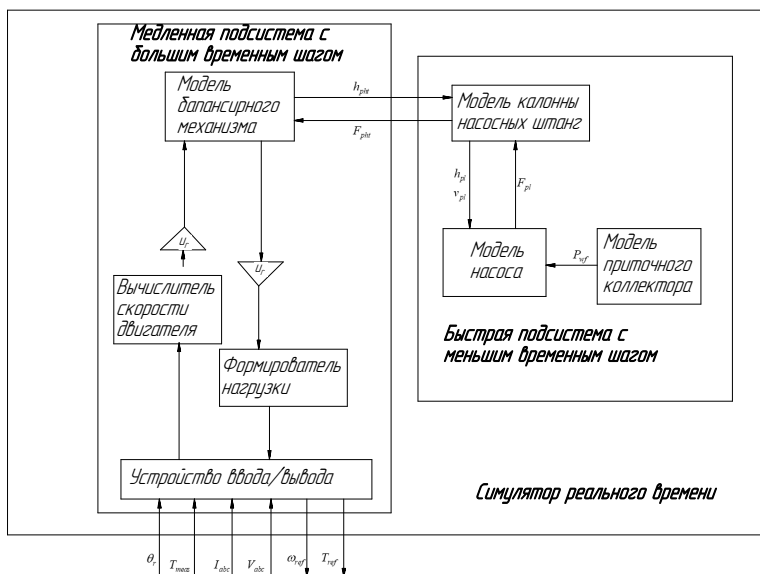


Рис. 17 — Структура модели ШГНУ в реальном времени

зубчатого редуктора и системы управления нагрузочной машиной. Шаг расчета компьютерной модели, используемый для медленной подсистемы, составляет 0,01 секунды, а для быстрой подсистемы - 0,0001 секунды.

При построении электромеханического испытательного стенда основной задачей управления нагрузочной машиной является создание такого же крутящего момента на валу испытываемого двигателя, как и при реальной нагрузке. Здесь важными становятся динамические характеристики испытательного стенда и воспроизводимой нагрузки. Механические характеристики испытательного стенда описываются (3), а характеристики механической части желаемой системы (штангового насоса) могут быть описаны (4), где: J_{em} – суммарная приведенная инерция, ω_{em} – желаемая механическая скорость, M_m – момент, развиваемый приводным двигателем на испытательном стенде, M_{e1} – момент, развиваемый приводным двигателем исследуемого механизма, J_m – момент инерции приводной машины, J_L – момент инерции нагрузочной машины, f_{vm} – коэффициент вязкого трения приводной машины, f_{vL} – коэффициент вязкого трения нагрузочной машины, $J = J_m + J_L$, $f_v = f_{vm} + f_{vL}$, M_s – суммарный момент сопротивления на редукторе, приведенный к ротору приводного электродвигателя.

$$M_m - M_e = J \frac{d\omega_m}{dt} + f_v \omega_m, \quad (3)$$

$$J_{em}(\varphi_{cr}) \frac{d\omega_{em}}{dt} = M_{e1} - M_s, \quad (4)$$

Масштабирующий коэффициент (f_c) может быть выведен из номинального крутящего момента машины, приводящей в движение реальный механизм (M_{n1}), и номинального крутящего момента приводной машины на испытательном стенде (M_{n2}). Он может быть определен как: $f_c = \frac{M_{n1}}{M_{n2}}$. Используя этот масштабирующий коэффициент, уравнение движения имитируемой системы может быть представлено выражением $J_{em} \frac{d\omega_{em}}{dt} = f_c M_m - M_s$.

Структура системы управления моментом нагрузочной машиной разработана на основе равных динамических характеристик электропривода испытательного стенда и штангового насоса, то есть $\omega_m = \omega_{em}$ и $\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{d\omega_{em}}{dt}$. В результате получено выражение для нагрузочной машины в виде:

$$M_e = \left(1 - \frac{J f_c}{J_{em}}\right) M_m + \frac{J}{J_{em}} M_s - f_v \omega_m, \quad (5)$$

Предполагая, что коэффициент вязкого трения пренебрежимо мал, можно предложить структуру объединённой системы управления нагрузочной и испытательной машины, показанную на рис. 18, реализующую закон управления (5). В этой системе используется приближённый момент инерции. F_T представляет собой контур управления моментом приводной машины, а F_L - контур управления моментом нагрузочной машины. Структура системы управления для приводной машины может быть такой же, как и структура системы, используемая в реальном механизме. В реальной экспериментальной системе полоса пропускания контуров крутящего момента велика, поэтому их эквивалентные передаточные функции могут быть заменены коэффициентом усиления, равным единице.

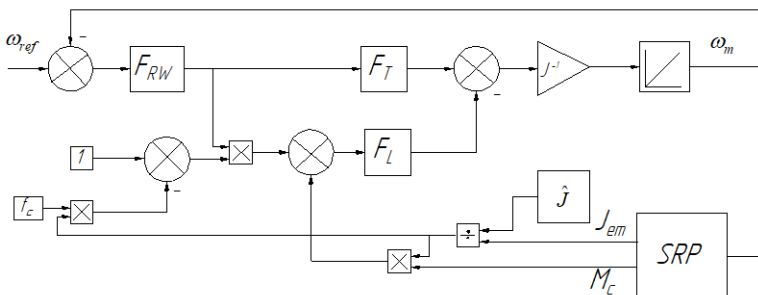


Рис. 18 — Структура системы управления испытательным стендом

Симулятор реального времени обменивается данными с внешними устройствами через PCI-карту сбора данных (NI PCI- 6221): аналоговые задающие сигналы скорости и крутящего момента выводятся из симулятора и передаются на управляющие входы преобразователей частоты, а цифровой сигнал от импульсного датчика скорости (энкодера - E40S6-1000-3-24)

и аналоговый сигнал от датчика крутящего момента (ZMDN) приходят на соответствующие входы и вводятся в симулятор.

При моделировании в реальном времени необходимо обеспечить эффективный поток данных, а также синхронизацию. Этого можно достичь путем правильной настройки функций NI-DAQmx.

Способность экспериментальной установки имитировать нагрузку оценивается с помощью измерений тока, напряжения, крутящего момента и скорости. На основе этих измерений рассчитывается механическая мощность, активная мощность на клеммах преобразователя, питающего приводную машину, и динамограмма. На рис. 19 - рис. 21 показаны результаты, полученные при имитации нормального рабочего состояния электропривода ШГНУ. Приведённые диаграммы относятся к случаю, когда симулятор в реальном времени имитирует насосную установку с приводом, работающим в двигательном режиме в III квадранте механических характеристик. На рис. 19 измеренный крутящий момент практически повторяет эталонный (заданный) крутящий момент, что подтверждает способность предложенной системы к эмуляции реальных режимов. Как видно на рис. 20 диаграммы потребляемой активной мощности и механической мощности похожи, а разница объясняется тем, что приводная машина, используемая в экспериментальной установке, имеет низкий КПД, причём её эффективность оказывается еще ниже, поскольку она работает на скорости и крутящем моменте ниже номинальных значений. На некоторых частях цикла механическая мощность становится отрицательной, это показывает, что двигатель работает в генераторном режиме. Форма расчетной динамограммы, восстановленная на основе диаграммы мощности, изображенная на рис. 21, соответствует признакам нормального рабочего состояния.

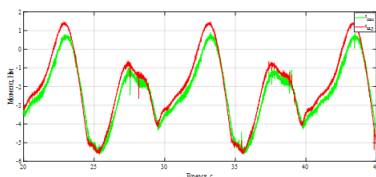


Рис. 19 — Сравнение эталонного крутящего момента (красный) и измеренного крутящего момента (зеленый)

Симулятор реального времени электропривода ШГНУ также был испытан на воспроизведение типовых неисправностей штангового насоса, таких как воздействие газа, утечка в нагнетательном клапане, утыкание плунжера в верхней или нижней мертвой точке. Экспериментальные диаграммы для одного из указанных режимов приведены на рис. 22 и рис. 23.

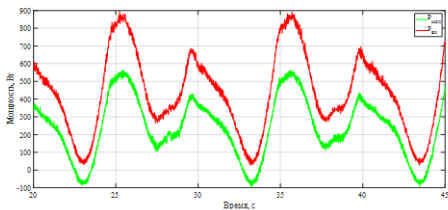


Рис. 20 — Нормальное рабочее состояние: активная мощность на входе преобразователя (красный) и механическая мощность (зеленый)

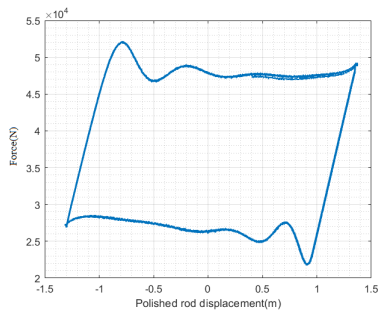


Рис. 21 — Расчётная динамограмма в нормальном рабочем состоянии

Расчётная динамограмма, как видно, содержит признаки соответствующего эмулированного рабочего состояний ШГНУ.

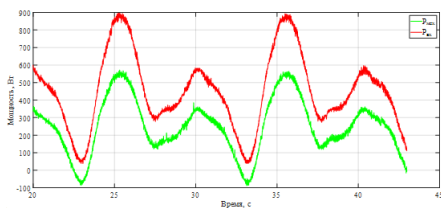


Рис. 22 — Активная мощность на входе преобразователя (красный) и механическая мощность (зеленый) при утечке нагнетательного клапана

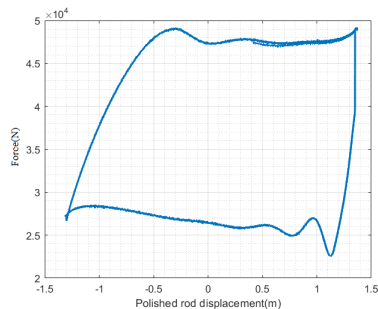


Рис. 23 — Расчётная динамограмма при утечке нагнетательного клапана

Симулятор РНiL, показанный на рис. 24, разработан в среде Simulink с использованием библиотеки Simscape для проверки способности симулятора РНiL эмулировать работу электропривода ШГНУ. Динамограмма, как и в предыдущем случае, рассчитывается на основе входной мощности электропривода с учётом потерь мощности и скорости двигателя. Для нормального рабочего состояния эта динамограмма, как видно на рис. 25, сравнима с

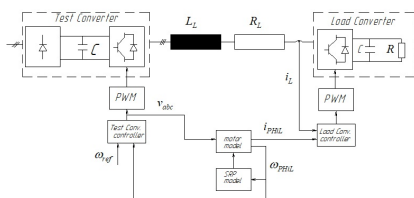


Рис. 24 — Симулятор РНiL

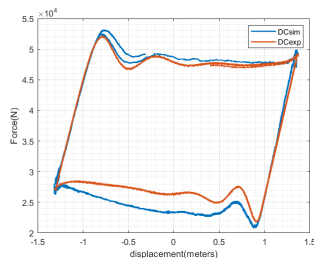


Рис. 25 — Сравнение динамограмм, полученных с помощью симулятора РНiL и испытательного стенда

динамограммой, полученной на основе экспериментальных данных электромеханического испытательного стенда ШГНУ.

В **Заключении** представлены результаты работы.

1. Исследование, проведённое в диссертации, выполнено на основе имитационной модели штангового насоса, разработанной автором в среде программирования LabVIEW и MATLAB (в виде текстового файла, с использованием библиотек Simulink и Simscape). Интегрированная модель имитирует различные режимы работы электропривода штангового насоса, что позволило установить связь параметров динамограмм и диаграмм потребляемой мощности, а также оценить энергоэффективность работы штангового насоса.
2. На имитационной модели получен учебный набор образцов диаграмм мощности двигателя (ваттдиаграмм) с целью извлечения полезных признаков для каждого образца. Установлено, что вектор признаков, построенный на основе оценки параметров ваттдиаграмм на различных частях цикла качания ШГНУ и расстояниях между моментами переключения клапанов насоса, однозначно представляет данный образец ваттдиаграммы двигателя. Полученные результаты использованы для создания диагностической модели, разработанной с использованием алгоритма SVM (метода опорных векторов) и полученной обучающей выборки. Тесты на возможности диагностической модели показывают удовлетворительные результаты.
3. Выполнена оценка эффективности применения специальной стратегии формирования траектории тока намагничивания в системе векторного управления частотно-регулируемым электроприводом штангового насоса с асинхронным двигателем. Результаты моделирования при принятых допущениях показывают, что около 1,6% энергии может быть сэкономлено, если приводной двигатель штангового насоса в цикле качания управляется по предложенной в работе траектории тока намагничивания. Эта стратегия при дальнейших исследованиях и доработке может помочь в достижении целей и стандартов энергоэффективности.
4. Для проведения экспериментальных исследований создан испытательный стенд, состоящий из двух асинхронных двигателей, соединённых общим валом, двух преобразователей частоты и ПК, оснащённого программным комплексом LabVIEW с модулем ввода/вывода. Разработана структура системы управления нагрузочной машиной для имитации работы штангового насоса (в масштабе). Предложенная структура реализована и испытана на экспериментальной платформе в реальном времени при имитации различных

рабочих состояний ШГНУ. Обнаружено, что измеренный крутящий момент двигателя практически точно соответствует эталонному крутящему моменту. Установлено также, что форма динамограммы, рассчитанной на основе измерений мощности двигателя, также очень хорошо отражает моделируемое рабочее состояние и сопоставима с динамограммой, рассчитанной на основе результатов моделирования РНiL- симулятора электропривода ШГНУ.

5. Созданная при выполнении работы имитационная модель и симулятор штангового насоса (испытательный стенд) в будущих исследованиях могут быть использованы для оценки технико-экономической целесообразности интеграции возобновляемых источников и накопителей энергии в привод штангового насоса. Кроме того, учитывая периодический характер нагрузки привода ШГНУ, имитационная модель, общая структура экспериментального стенда и РНiL-симулятор электропривода ШГНУ могут быть весьма эффективно использованы при разработке стратегии управления группой электроприводов штанговых насосов для сглаживания нагрузки на питающую сеть.

Основные публикации автора по теме диссертации

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:

1. Текле С. И. Испытательный стенд для моделирования режимов работы электропривода штанговой глубинной насосной установки / Накатаев А. А., **Текле С. И.**, Зюзов А. М., Нестеров К. Е. // Электротехнические и информационные комплексы и системы. — 2022. — Т. 18, № 3/4. — С. 75—88. — (0,87 п.л./0,26 п.л.)
2. Teclе S. I. Improving sucker rod pump efficiency using frequency controlled induction motor / **Teclе S. I.** and Ziuzev A. M. and Kostylev A. V. // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University Geo Assets Engineering. — 2022. — Vol. 333, no. 11. — P. 140—148. — (0,89 п.л./0,54 п.л.; Scopus).
3. Текле С. И. Динамические симуляторы в задачах диагностики штанговых глубинно-насосных установок / Зюзов А. М. and **Текле С. И.** // Известия Томского политехнического университета. — 2022. — Т. 333, № 1. — С. 168—177. — (1,03 п.л./0,50 п.л.; Scopus, WoS).
4. Teclе S. I. Developing and Testing a Control Strategy on Electromechanical Test Bench for Operating a Group of Sucker Rod Pumps for Smoothing the Power Demand Requirement / Nakataev A. A. and Ziuzev A. and **Teclе S. I.** // 2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). — 2022. — P. 439—444. — (0,40 п.л./0,15 п.л.; Scopus).

5. Teclе S. I. An experimental test bench for studying sucker rod pump / **Teclе S. I.**, Nakataev A. A. and Ziuzev A. // 2022 29th International Workshop on Electric Drives: Advances in Power Electronics for Electric Drives (IWED). — 2022. — P. 1—6. — (0,63 п.л./0,25 п.л.; Scopus).
6. Teclе S. I. Development of fault diagnosis model for sucker rod pump using motor power curve / **Teclе S. I.**, Ziuzev A. and Spiridonov V. // 2021 XVIII International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED). — 2021. — P. 1—6. — (0,65 п.л./0,38 п.л.; Scopus).
7. Teclе S. I. Modeling induction motor driven sucker rod pump in MATLAB simscape / Semenov A.V., **Teclе S. I.** and Ziuzev A. // 2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI). — 2020. — P. 67—71. — (0,47 п.л./0,2 п.л.; Scopus).
8. Teclе S. I. Development of Electromechanical Test Bench for Emulating Dynamics of Sucker Rod Pump / **Teclе S. I.**, Pustokhin P., Iunusov R. and Ziuzev A. // 2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI). — 2020. — P. 72—76. — (0,52 п.л./0,16 п.л.; Scopus).
9. Teclе S. I. Experience in Using Real Time Simulators in Variable-Frequency Drives / Mudrov M. B., Klimov G., **Teclе S. I.** and Ziuzev A. // 2020 XI International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS). — 2020. — P. 1—7. — (0,69 п.л./0,14 п.л.; Scopus).
10. Teclе S. I. Analysis of motor power curve for detecting fault conditions in sucker rod pump / **Teclе S. I.** and Ziuzev A. // 2020 27th International Workshop on Electric Drives: MPEI Department of Electric Drives 90th Anniversary (IWED). — 2020. — P. 1—6. — (0,72 п.л./0,43 п.л.; Scopus).
11. Teclе S. I. A review on sucker rod pump monitoring and diagnostic system / **Teclе S. I.** and Ziuzev A. // 2019 IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI). — 2019. — P. 85—88. — (0,54 п.л./0,32 п.л.; Scopus, WoS).

Патенты и программы:

12. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ. Симулятор штанговой глубинно насосной установки / Семенов А.В., Зюзов А.М., Текле, С. И. ; УрФУ. — № 2020666580 ; заявл. 04.12.2020 ; опубли. 11.12.2020.