

На правах рукописи



**ЯШИН Антон Николаевич**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ  
УСТАНОВОК ШТАНГОВЫХ ГЛУБИННЫХ НАСОСОВ  
НЕФТЕДОБЫВАЮЩИХ СКВАЖИН**

**Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата технических наук**

**Уфа-2025**

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» на кафедре «Электротехника и электрооборудование предприятий».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент  
**Хакимьянов Марат Ильгизович**  
заведующий кафедрой электротехники и  
электрооборудования предприятий  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный  
нефтяной технический университет»

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Зюзов Анатолий Михайлович**  
профессор кафедры «Электропривод и  
автоматизация промышленных установок»  
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный  
университет имени первого Президента  
России Б.Н. Ельцина»

кандидат технических наук,  
**Мишуриных Сергей Владимирович**  
доцент кафедры «Микропроцессорные  
средства автоматизации» ФГАОУ ВО  
«Пермский национальный  
исследовательский политехнический  
университет»

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Российский государственный  
университет нефти и газа (национальный  
исследовательский университет) имени  
И.М. Губкина», г. Москва

Защита диссертации состоится «19» сентября 2025 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.479.10 на базе ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» по адресу: 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» и на сайте <https://uust.ru/dc/dissertations/>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук, доцент

 А.Ю. Демин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Скважинная механизированная добыча является наиболее энергоемким из всех технологических процессов нефтедобычи. Это объясняется тем, что количество скважин велико, они рассредоточены на больших расстояниях, многие из них работают в неэффективных режимах со значительными непроизводительными потерями.

В нашей стране штанговые глубинные насосы (ШГН) являются одним из основных типов скважинных насосов, уступая лишь установкам электроцентробежных погружных насосов по количеству эксплуатируемых скважин и объемам добываемой нефти.

Работа электроприводов установок штанговых глубинных насосов (УШГН) имеет ряд особенностей. Электроприводы УШГН работают с переменной циклически изменяющейся нагрузкой при мощностях, ниже номинальных, что отрицательно влияет на коэффициент мощности сети и коэффициент полезного действия самого двигателя. Из-за необходимости обеспечения высокого момента при пуске насосной установки, особенно в зимнее время, УШГН комплектуются электродвигателями (ЭД) заведомо большей мощности, которые во время работы оказываются в значительной степени недогруженными.

Для улучшения энергетических характеристик электроприводов УШГН необходимо точно сбалансировать противовесы, а также снизить электрическую мощность установленных двигателей, что позволит увеличить коэффициент загрузки.

Существующие интеллектуальные станции управления, имеющие скважинный контроллер, для своей работы требуют подключения датчиков ваттметрирования и динамометрирования, однако датчики динамометрирования часто выходят из строя, их монтаж и замена сопровождаются значительными сложностями.

Перспективным направлением является использование вентильных двигателей (ВД) в приводах УШГН. Вентильные двигатели обладают более высокими КПД и перегрузочной способностью, чем асинхронные. Это позволит увеличить коэффициент загрузки электродвигателей при меньшей установленной мощности. Однако широкое использование ВД сдерживается их высокой стоимостью, обусловленной использованием дорогостоящих материалов в конструкции ротора и достаточно сложной системой управления.

Таким образом, решение проблемы повышения эффективности электроприводов установок штанговых глубинных насосов нефтедобывающих скважин является актуальной задачей.

### **Степень разработанности темы исследования.**

В разработку теории значительный вклад в области контроля, диагностики, проектирования и моделирования ЭТК скважинных насосов внесли российские и зарубежные исследователи: А.М. Зюзев, М.С. Ершов,

В.В. Сушков, Ю.В. Шевырев, В.З. Ковалев, А.Б. Петроченков, Д.Н. Нурбосынов, Е.М. Солодкий, В.Б. Садов, М.И. Хакимьянов, S. G. Gibbs, Tackas Gobar, A Koncz, S. Miska, В.М. Wilamowski, L. H. Torres, B. Ordonez, M. Xing, G. Xianwen, S. Dong, Z. Boyuan, X. Sun, F. ZiMing, X.Liu и др. Оптимизация и повышение энергоэффективности электроприводов в целом были в центре внимания многих исследователей, таких как: Р.Т. Шрейнер, А.С. Анучин, Ф.Р. Исмагилов, В.Е. Вавилов, М.А. Григорьев, В.Р. Храмшин и др. Все это говорит о том, что в данной тематика является актуальной и востребованной.

**Объектом исследования** является электротехнический комплекс «система электроснабжения – УШГН – скважина» с системой управления и обратной связью по потребляемой электроприводом мощности.

**Предметом** исследования является моделирование и исследование процессов в электроприводах УШГН; методики проектирования и расчета.

**Цель и задачи.** Цель работы заключается в разработке технических решений, позволяющих с меньшими затратами времени и средств повысить энергоэффективность электроприводов установок штанговых глубинных насосов нефтедобывающих скважин.

Для достижения поставленной цели потребовалось решение следующих задач.

1. Исследовать взаимосвязь между усилиями в точке подвеса штанг УШГН и значениями потребляемой электроприводом активной мощности с учетом кинематической схемы станка-качалки и влияния инерционных масс.

2. Исследовать влияние изменения параметров балансирующего контргруза на выходные параметры УШГН на основе разработки компьютерной модели системы «УШГН – станок-качалка».

3. Усовершенствовать методику проектирования вентильных приводов УШГН с учетом характеристик приводного механизма УШГН и конструктивных особенностей ВД для них, а также разработать экспериментальный стенд для исследования работы электроприводов УШГН на основе ВД.

4. Предложить структуру электротехнического комплекса УШГН с повышенными характеристиками автономности электроснабжения и решить задачу оптимизации уровня избыточной электроэнергии и количества неудовлетворенной нагрузки гибридной ветросолнечной электростанции для установки штангового глубинного насоса.

5. Разработать усовершенствованные скважинный контроллер и интеллектуальную станцию управления электроприводом УШГН, обеспечивающие функции диагностики нефтедобывающего оборудования и управления режимом эксплуатации скважины в реальном времени, а также автоматической балансировки уравновешивающих контргрузов.

**Научная новизна** работы заключается в следующем.

1. В результате исследования взаимосвязи между значениями усилия в точке подвеса штанг УШГН и значениями активной мощности, потребляемой электроприводом, разработана усовершенствованная модель для численного получения динамограммы из массива ваттметрограммы, отличающаяся тем, что учитывает кинематическую схему станка-качалки и влияние инерционных масс, применение которой позволяет отказаться от использования физических датчиков динамометрирования.

2. В результате исследования влияния уравновешенности установок ШГН на потребление электроэнергии разработана усовершенствованная компьютерная модель «ШГН – станок качалка», отличающаяся тем, что позволяет имитировать влияние изменения параметров балансирного уравновешивающего контргруза на выходные параметры УШГН.

3. Разработана усовершенствованная методика проектирования электроприводов УШГН на базе вентильных электродвигателей, отличающаяся тем, что учитывает характеристики приводного механизма для УШГН и конструктивные особенности ВД для них.

4. Разработана усовершенствованная методика расчета гибридной ветросолнечной электростанции для установки штангового глубинного насоса, отличающаяся тем, что учитывает эксплуатационные расходы и количество неиспользованной электроэнергии, и позволяет решить задачу оптимизации уровня избыточной электроэнергии и количества неудовлетворенной нагрузки, предложенная структура электротехнического комплекса УШГН с использованием возобновляемых источников энергии позволяет снизить отрицательное влияние на сеть работающих с циклически изменяющейся нагрузкой электродвигателей.

5. Разработана интеллектуальная станция управления электроприводами УШГН, отличающаяся от известных тем, что имеющийся в ней разработанный скважинный контроллер позволяет обеспечить функцию автоматической балансировки уравновешивающих контргрузов.

**Теоретическая и практическая значимость** работы заключается в следующем.

1. Модель для численного получения динамограммы из массива ваттметрограммы позволяет отказаться от установки на УШГН физических датчиков динамометрирования, имеющих низкую надежность из-за обрывов кабеля и механических повреждений (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2024666412).

2. Усовершенствованная модель «ШГН – станок качалка» с имитацией влияния изменения параметров балансирного уравновешивающего контргруза на выходные параметры УШГН может быть использована при отладке интеллектуальных станций управления с функцией автоматического уравновешивания балансирных грузов.

3. Предложенная методика проектирования электроприводов УШГН на базе вентильных электродвигателей позволяет сократить время и затраты на

выполнение расчетов и проектных работ при модернизации электроприводов УШГН с целью повышения эффективности. Разработанный экспериментальный электромеханический стенд позволяет имитировать работу ШГН и исследовать работу ВД в условиях критичных режимов эксплуатации.

4. Усовершенствованная методика расчета параметров ветросолнечной электростанции для установок штанговых глубинных насосов учитывает эксплуатационные расходы и количество неиспользованной электроэнергии, что позволяет снизить отрицательное влияние на сеть работающих с циклически изменяющейся нагрузкой электродвигателей (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2024618777).

5. Разработанная интеллектуальная станция управления позволяет отказаться от физических датчиков динамометрирования, что повышает надежность станции управления электроприводом скважины (патент на полезную модель № 229611).

Предложенные автором модели использованы при выполнении НИР «Автоматизированная система управления оптимизацией добычи нефти» по договору № Р582/2022п от 30.06.2022 между АО «ИК «Квантор» и УГНТУ, а также в учебном процессе на кафедре электротехники и электрооборудования предприятий УГНТУ.

**Методика проведения исследований.** 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 типа Лагранжа. К экспериментальным методам относятся: компьютерное моделирование, лабораторные исследования на испытательном стенде. В исследованиях использовались следующие программные продукты: MatLab R2017b, Mathcad.

#### **Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Результаты исследования взаимосвязи между усилиями в точке подвеса штанг УШГН и значениями потребляемой электроприводом активной мощности с учетом кинематической схемы станка-качалки и влияния инерционных масс.

2. Результаты исследования влияния изменения параметров балансирующего уравновешивающего контргруза на выходные параметры УШГН на основе разработанной модели «ШГН – станок качалка».

3. Усовершенствованная методика проектирования электроприводов УШГН на базе вентильных электродвигателей.

4. Усовершенствованная методика проектирования гибридной ветросолнечной электростанции для электроприводов УШГН нефтедобывающих скважин.

5. Усовершенствованная интеллектуальная станция управления электроприводом УШГН со скважинным контроллером, обеспечивающие функцию автоматической балансировки уравновешивающих контргрузов.

**Соответствие диссертации специальности.** 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».

**Степень достоверности.**

1. При математическом описании и моделировании элементов электротехнического комплекса скважинной насосной установки использованы общепринятые в электроприводе и теоретической электротехнике, проверенные практическими разработками допущения.

2. Корректное использование математических и имитационных методов моделирования, результаты моделирования и теоретических исследований подтверждены экспериментальными данными, полученными автором.

3. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях и опубликованы в печати, в том числе в изданиях, рекомендованных ВАК и индексируемых в базах SCOPUS и Web of Science.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на следующих научно-практических конференциях: 72-ая научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ (Уфа, 2021); International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS) : The international scientific and practical conference materials (Ufa, 2021); 73-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ (Уфа, 2022); Завалишинские чтения, Международная конференция по электромеханике и робототехнике (Санкт-Петербург, 2022); International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon) (Magnitogorsk, 2022); Завалишинские чтения, Международная конференция по электромеханике и робототехнике (Санкт-Петербург, 2023).

**Публикации.** По результатам диссертационной работы опубликовано 10 научных трудов, в том числе 2 статьи в изданиях, входящих в перечень Scopus, 5 статей, входящих в перечень ВАК РФ, один патент на полезную модель и два свидетельства РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Личный вклад автора.** Все результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно. Автором исследована взаимосвязь между усилиями в точке подвеса штанг УШГН и значениями потребляемой электроприводом активной мощности; разработана усовершенствованная цифровая модель «ШГН – станок качалка» с учетом кинематической схемы станка-качалки и влияния инерционных масс; разработана усовершенствованная методика проектирования электроприводов УШГН на базе вентильных электродвигателей; разработана усовершенствованная методика проектирования электротехнического комплекса УШГН с использованием возобновляемых источников энергии; разработана интеллектуальная станция управления электроприводом УШГН с функцией диагностики нефтедобывающего оборудования в реальном времени.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав основного текста объемом 157 страницы, заключения, списка литературы из 117 наименований, 4 приложений. Общий объем диссертации 170 страниц, включая 90 рисунков и 19 таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** сформулированы цель и задачи исследования, изложены методы исследования, указаны положения, выносимые на защиту, отражена научная новизна, показана практическая значимость работы, сообщается об апробации работы и публикациях, излагаются представления автора о степени изученности темы, о неисследованных аспектах.

**В первой главе** рассматриваются роль глубиннонасосных установок в нефтедобывающей промышленности РФ, конструктивные особенности установок ШГН, структура ЭТК УШГН, проведен анализ характерных неисправностей и проблем, связанных с их эксплуатацией. Рассматриваются вопросы влияния качества электрической энергии на энергоэффективность УШГН. Указаны возможные пути обеспечения требуемых показателей качества электрической энергии для повышения энергоэффективности электротехнического комплекса добывающих скважин с автономной системой электроснабжения.

Описаны особенности работы электродвигателя в составе установки ШГН. Электродвигатель выбирается с запасом по мощности в связи с тем,

что необходимо обеспечить большой пусковой момент, поэтому после запуска ЭД работает в недогруженном режиме. Нагрузка на ЭД имеет циклически изменяющийся характер (рисунок 1).

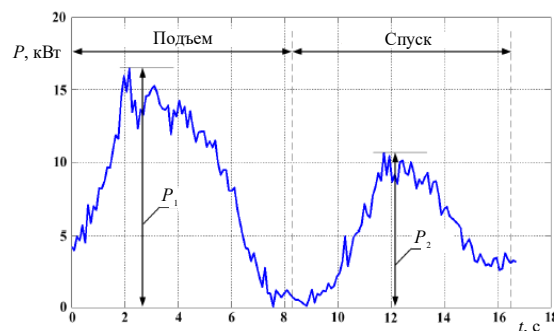


Рисунок 1 – Ваттметрограмма электродвигателя УШГН за цикл качания

Непостоянство нагрузки в течение цикла качания приводит к изменению всех характеристик ЭД. Это приводит к изменению КПД и коэффициента мощности  $\cos \varphi$ , которые могут варьироваться в широких пределах; средние значения за цикл обычно бывают очень низкие. Изменение этих параметров в течение цикла качания негативно влияет на работу ЭД и электросети. На основе проведенного анализа и выявленных недостатков сформулированы цели и задачи работы.

**Во второй главе** представлены исследования способов повышения эффективности электротехнических комплексов нефтедобывающих скважин.

Исследованы способы определения уравновешенности установок ШГН на основе анализа ваттметрограмм. Уровень сбалансированности установки ШГН оценивают при помощи коэффициента неуравновешенности, который определяется следующим образом:

$$k = \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2}, \quad (1)$$

где  $P_1$  – максимальное значение активной мощности при подъеме колонны штанг, Вт;  $P_2$  – максимальное значение активной мощности при спуске колонны штанг, Вт.

В процессе исследования установлено, что недостаточная уравновешенность установок ШГН приводит к дополнительным потерям мощности. На рисунке 2 приводится диаграмма уравновешенности фонда скважин. Как видно из диаграммы, сбалансированными можно считать лишь 2% скважин, имеющих коэффициент неуравновешенности от минус 0,05 до +0,05.



Рисунок 2 – Диаграмма уравновешенности фонда скважин

Был произведен анализ ваттметрограмм более чем 50 скважин, эксплуатируемых ШГН, месторождений Западной Сибири. При этом ставилась задача оценить общий уровень сбалансированности насосных установок, а также возможный эффект энергосбережения, который может быть получен в результате их уравнивания. Были проведены расчеты, которые показали, что если произвести балансировку проанализированных скважин, то суммарная потребляемая их электроприводами мощность снизится более чем в 2 раза. Таким образом, балансировка установок ШГН способна существенно снизить потребление электроэнергии скважинных насосных установок при сохранении объемов добычи на прежнем уровне.

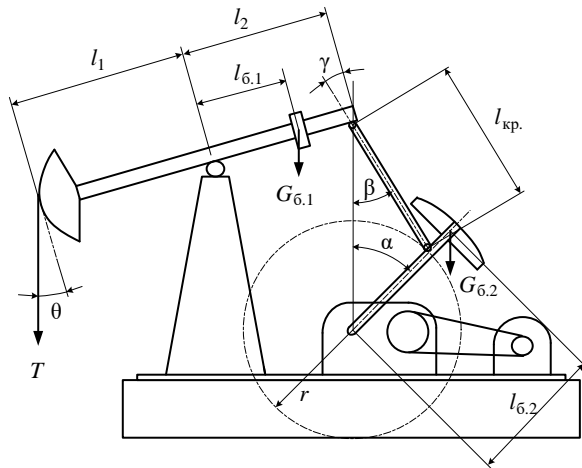


Рисунок 3 – Кинематическая схема станка-качалки с уравнивающими контргрузами

Наиболее информативным методом контроля и управления УШГН является использование датчиков динамометрирования. Однако датчики динамометрирования часто выходят из строя, их монтаж и замена связаны с большими трудностями. Поэтому более предпочтительным является математическое вычисление динамограммы из измеренной ваттметрограммы. Автором разработана модель преобразования ваттметрограммы УШГН в динамограмму.

Модель основана на расчете кинематической схемы станка-качалки с учетом динамических явлений. Кинематическая схема станка-качалки представлена на рисунке 3.

Связь между нагрузкой на полированный шток и мощностью, затрачиваемой электродвигателем в период цикла качания:

$$P_{\text{ТПШ}}(t) = \frac{P(t) - P_{\text{XX}} + G_{6.1} \cdot \frac{L \cdot \omega \cdot l_{6.2}}{l_2 \cdot \eta_{\text{ЭД}} \cdot \eta_{\text{пер}}} \cdot \left( \cos\left(\frac{\delta_{\text{max}}}{2} - \delta\right) - \frac{L \cdot a(t)}{l_2 \cdot g} \right)}{\frac{l_1}{l_2 \cdot \eta_{\text{ЭД}} \cdot \eta_{\text{пер}}} \cdot v(t)} + \frac{\frac{\omega \cdot l_{6.2}}{\eta_{\text{ЭД}} \cdot \eta_{\text{пер}}} \cdot G_{6.2} \cdot \sin(2\pi\omega t)}{\frac{l_1}{l_2 \cdot \eta_{\text{ЭД}} \cdot \eta_{\text{пер}}} \cdot v(t)}, \quad (2)$$

где  $\omega$  – угловая скорость ротора ЭД;  $L$  – расстояние от центра тяжести сборки балансира до оси вращения;  $G$  – вес кривошипного уравнивающего контргруза;  $l_1$  – длина переднего плеча балансира;  $l_2$  – длина заднего плеча балансира;  $l_{6.2}$  – длина плеча балансира;  $\eta_{\text{ЭД}}$  – коэффициент полезного действия ЭД;  $\eta_{\text{пер}}$  – коэффициент полезного действия передаточного механизма;  $v(t)$  – скорость перемещения точки подвеса штанг (ТПШ);





Рисунок 6 – Блок-схема алгоритма проектирования электроприводов УШГН на базе вентильного электропривода

В третьей главе рассматривается применение вентильного привода УШГН. ВД по сравнению с асинхронными обладают более высокими КПД и перегрузочной способностью. Это позволяет использовать электродвигатель меньшей мощности и увеличить коэффициент загрузки.

В УШГН применение вентильных двигателей приводит к снижению потребления электроэнергии приводом на (10 – 12) %.

Методика проектирования электроприводов УШГН на базе вентильных электродвигателей была реализована в виде программы для ЭВМ, блок-схема которой представлена на рисунке 6.

Представленная структура вентильного электропривода УШГН имеет особенность в том, что использует информацию не только с датчика положения ротора двигателя, но и с датчика положения точки подвеса штанг, что позволяет

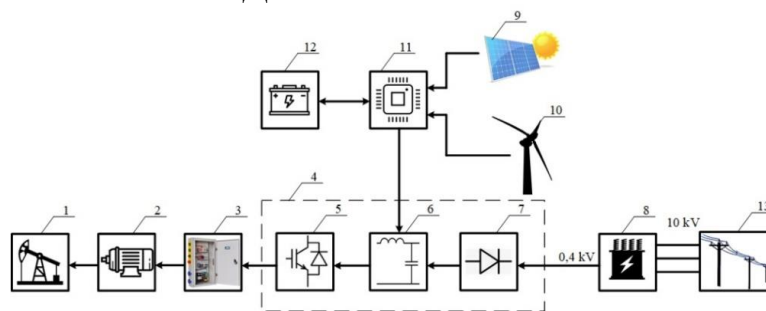
улучшить качество процессов регулирования системы.

Разработанные модели позволяют ускорить и упростить процесс проектирования вентильного электропривода УШГН, а также смоделировать его работу в условиях возможных осложнений, таких как запарафинивание скважины и цилиндра насоса, образование высоковязких эмульсий и других.

**Четвертая глава** посвящена повышению автономности и надежности электроснабжения УШГН. Нефтяные скважины обычно находятся в удаленных труднодоступных районах, где проблематично обеспечить надежное и качественное электроснабжение. Поэтому нефтедобывающие предприятия пытаются устанавливать на месторождениях собственные электростанции, обычно газотурбинные или газопоршневые. Однако их установка не везде оказывается целесообразной. Выходом является применение электростанций на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ). Использование ВИЭ позволяет повысить надежность электроснабжения, а также является одним из способов снижения потребления электроэнергии электродвигателями скважинных насосов из сети.

Обычная схема подключения ветряных генераторов и солнечных батарей для питания электропривода ШГН может быть следующей. Ветряные

генераторы и солнечные батареи подключаются к контроллеру, выработанная электроэнергия запасается в аккумуляторных батареях. Постоянный ток преобразуется в переменный с помощью инвертора. Энергия ветряных генераторов и солнечных батарей в нормальном режиме используется одновременно с энергией электрической сети. Таким образом может быть снижена нагрузка на электрическую сеть. В случае перерыва электроснабжения УШГН полностью переходит на питание от ВИЭ, что позволяет сохранить его в работе. Если используется частотно-регулируемый электропривод, то схема имеет звено постоянного тока. Постоянный ток может подаваться с контроллера в звено постоянного тока напрямую (рисунок 7). Такое решение повышает КПД системы на 10%.



1 – установка ШГН; 2 – электродвигатель; 3 – станция управления; 4 – преобразователь частоты; 5 – инвертор; 6 – звено постоянного тока; 7 – выпрямитель; 8 – трансформатор 10/0,4 кВ; 9 – солнечные батареи; 10 – ветрогенераторы; 11 – контроллер; 12 – аккумуляторная батарея; 13 – электрическая сеть

Рисунок 7 – Схема подключения ветряного генератора и солнечной батареи к звену постоянного тока частотно-регулируемого электропривода

Использование ветрогенераторов и солнечных батарей позволит потреблять меньше энергии от электрической сети и повысить надежность электроснабжения. Постоянная часть мощности может потребляться из электрической сети, а циклически изменяющаяся часть мощности может поступать от ветрогенератора и солнечных батарей. Это сделает нагрузку более равномерной и улучшит условия работы электрической сети.

Методика расчета параметров ветросолнечной электростанции для УШГН была реализована в виде программы ЭВМ.

Чтобы найти наиболее выгодный вариант с технической и экономической точек зрения были применены два способа решения задачи:

- с помощью разработанной программы ЭВМ (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 20241877);
- с применением графического метода решения однокритериальных задач (рисунок 8).

В условиях задачи сформулирована цель – добиться минимальных финансовых затрат, т.е. критерием являются суммарные затраты на закупку оборудования для электростанции на основе ВИЭ.

На рисунке 9 представлен график количественных составляющих электростанции, показывающий зависимость комбинации солнечных фотоэлектрических и ветряных генераторов от принятых ранее критериев выбора.

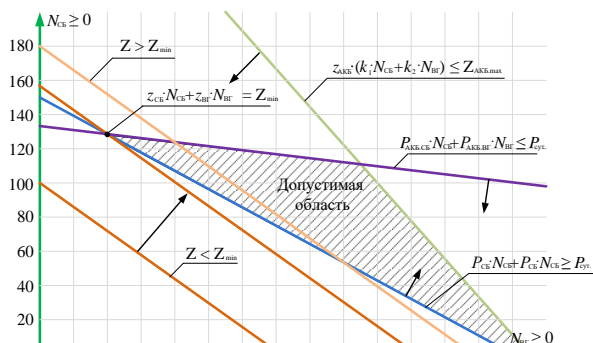


Рисунок 8 – Графический метод решения задачи оптимизации

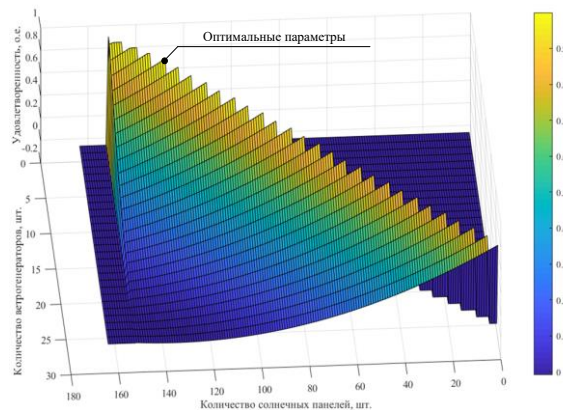


Рисунок 9 – График количественных составляющих электростанции

Были получены вольтамперные характеристики системы фотоэлектрического преобразователя при различных значениях интенсивности солнечного излучения и температуры окружающей среды, которые говорят об адекватности разработанной модели. Также были получены графики влияния ступенчатого изменения скорости ветра на напряжение, ток и мощность ветроэнергетической установки.

Разработанная модель ветросолнечной энергетической установки может быть полезна для моделирования переходных процессов энергетических установок на базе возобновляемых источников энергии.

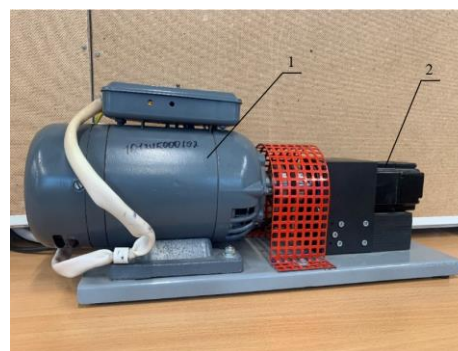
В пятой главе представлены результаты испытаний предложенных технических решений. При непосредственном участии автора ИК «Квантор» была разработана интеллектуальная станция управления электроприводом УШГН (рисунок 10).

Работа вентильного привода УШГН исследовалась на экспериментальном электромеханическом стенде, состоящем из генератора постоянного тока (ГПТ) и вентильного двигателя (ВД).

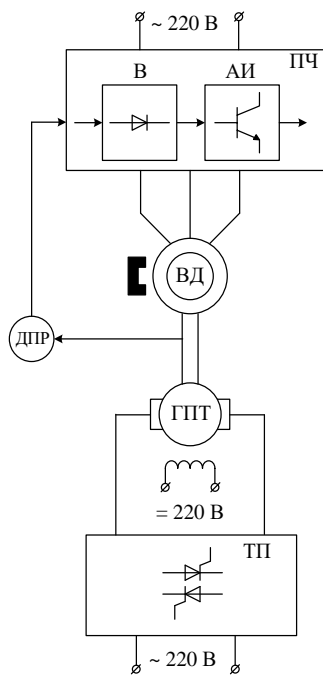
Имитация работы штангового насоса реализована путем трапецеидального изменения нагрузки в цепи якоря ГПТ модулем добавочных сопротивлений. Фотография экспериментальной установки показана на рисунке 11, а схема – на рисунке 12. В качестве объекта управления используется ВД.



Рисунок 10 – Внешний вид интеллектуальной станции управления электроприводом УШГН (патент № 229611)



1 – генератора постоянного тока, имитирующий нагрузку УШГН; 2 – вентильный электродвигатель  
Рисунок 11 – Внешний вид экспериментального стенда



В – выпрямитель; АИ – автономный инвертор; ПЧ – преобразователь частоты; ДПР – датчик положения ротора;

ТП – тиристорный преобразователь  
 Рисунок 12 – Схема подключения испытательной установки

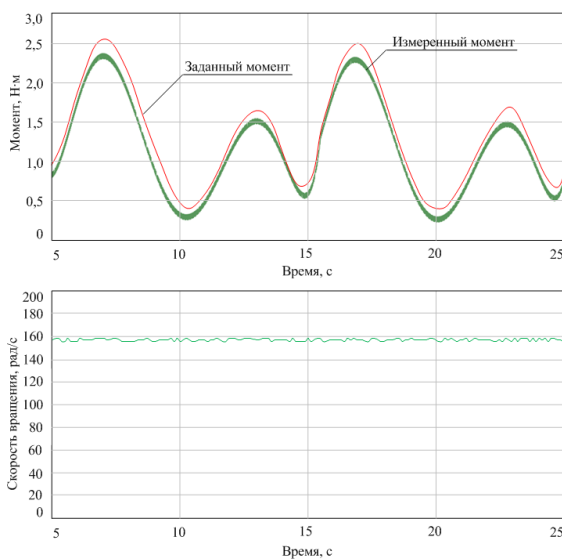


Рисунок 13– Осциллограммы нагрузочного момента и частоты вращения

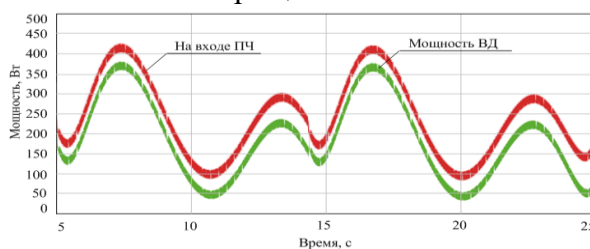


Рисунок 14 – Осциллограмма активной мощности в рабочем цикле

При проведении испытаний воспроизводились различные режимы работы оборудования, являющиеся наиболее критичными при эксплуатации:

- 1) режимы резкого увеличения и резкого сброса нагрузочного момента;
- 2) режим резкого увеличения напряжения питающей сети.

Контролировались следующие параметры: значения частоты вращения, токов фаз и КПД двигателя, момент сопротивления, входное напряжение преобразователя частоты.

На рисунках 13 – 15 представлены результаты испытаний вентильного привода при циклически изменяющихся нагрузках, проведенных на стенде.

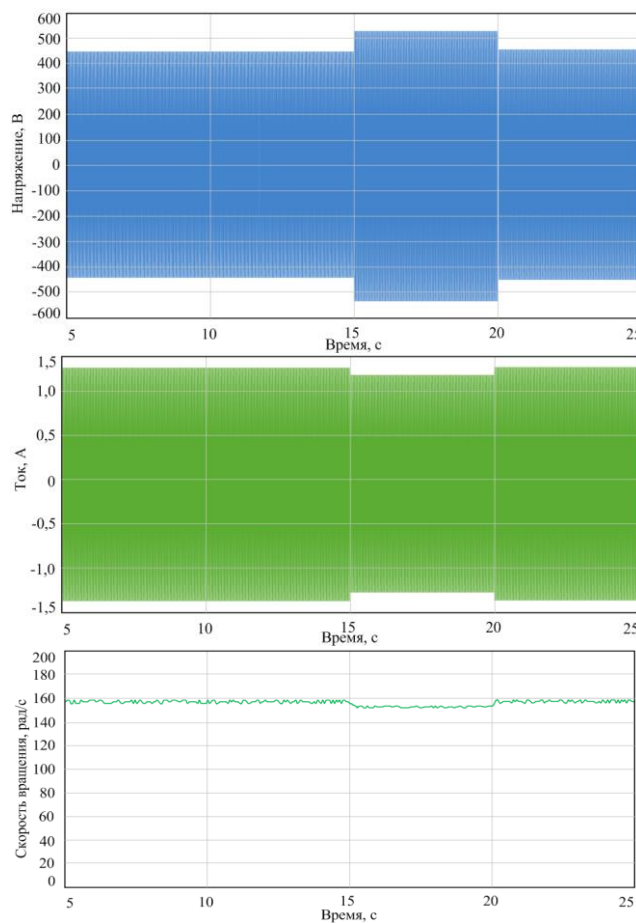


Рисунок 15 – Осциллограммы переходных процессов при скачках напряжения сети

Учитывая возможности испытательного стенда при проверке на однократный ступенчатый скачок напряжения питающей сети, вместо скачка напряжения питающей сети от  $U_{ном.}$  до  $1,2 \cdot U_{ном.}$  был исследован скачок напряжения питающей сети от  $0,8 \cdot U_{ном.}$  до  $U_{ном.}$ , что допустимо, поскольку характер переходного процесса сохраняется. На рисунке 15 представлены осциллограммы переходных процессов при имитации скачков напряжения в сети. По данным осциллограммам можно сделать следующий вывод: при скачкообразных изменениях напряжения провалы токов и частоты вращения практически отсутствуют, что доказывает устойчивость вентильного привода в критичных режимах работы.

Проведены расчеты экономической эффективности мероприятий по повышению степени уравниваемости УШГН и автономности электроснабжения.

Экономический эффект от доуравнивания балансировочных грузов УШГН для месторождения, содержащего 50 скважин, составил 2000 тыс. руб.

Экономический эффект от использования автономного источника питания на базе ветросолнечной электростанции для одной скважины составил 1725 тыс. руб. в год, при этом срок окупаемости электростанции составляет менее 6 лет.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате исследования взаимосвязи между усилиями в точке подвеса штанг УШГН и значениями потребляемой электроприводом активной мощности с учетом кинематической схемы станка-качалки и влияния инерционных масс получена модель, позволяющая вычислять динамограмму из измеренной ватметрограммы и отказаться от использования физических датчиков динамометрирования. Установлено, что погрешность между измеренной и полученной на основе данной модели динамограммами не превышает 5 %.

2. Результаты исследования влияния изменения параметров балансирного уравнивающего контргруза на выходные параметры УШГН на основе разработанной модели «ШГН – станок качалка», показали, что разработанная модель позволяет отладить программное обеспечение интеллектуальной станции управления с функцией автоматической балансировки УШГН. Погрешность вычислений с использованием разработанной модели не превышает (10 – 15) %.

3. Предложена усовершенствованная методика проектирования электроприводов УШГН на базе вентильных электродвигателей, позволяющая ускорить и упростить процесс проектирования вентильного электропривода УШГН, а также смоделировать его работу при скачках напряжений и в условиях возможных осложнений, таких как запарафинивание скважины и цилиндра насоса, образование высоковязких эмульсий и других.

4. Предложена усовершенствованная методика расчета гибридной ветросолнечной электростанции для установки штангового глубинного насоса, отличающаяся тем, что учитывает уровень избыточной электроэнергии и количество неудовлетворенной нагрузки, предложена структура электротехнического комплекса УШГН с использованием возобновляемых источников энергии, которая позволяет снизить отрицательное влияние циклического характера нагрузки на сеть, а также сохранить в работе электроприводы УШГН при перерывах электроснабжения.

5. Разработан скважинный контроллер, который рассчитывает коэффициент неуравновешенности УШГН и позволяет осуществлять функцию автоматической балансировки уравновешивающих контргрузов.

6. Разработана интеллектуальная станция управления, которая осуществляет функции диагностики нефтедобывающего оборудования в реальном времени. Дефекты погружного оборудования определяются на основе анализа динамограмм, а дефекты наземного оборудования – на основе анализа ваттметрограмм.

#### **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ**

##### **В изданиях, рекомендованных ВАК:**

1. Яшин, А.Н. Уравновешенность установок скважинных штанговых насосов на основе анализа ваттметрограмм / А. Н. Яшин, М. И. Хакимьянов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. - 2021. - Т. 332, № 8. - С. 36-44.

2. Яшин, А.Н. Лабораторная установка для исследования применения возобновляемых источников энергии / А. Н. Яшин, А. С. Бодылев, Р. Т. Хазиева, М. И. Хакимьянов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. - 2022. - Т. 18, № 2. - С. 82-97.

3. Пачин, М.Г. Разработка интеллектуальной станции управления для установок штанговых глубинных насосов / М. Г. Пачин, А. Н. Яшин, А. С. Бодылев, М. И. Хакимьянов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. - 2022. - Т. 333, № 3. - С. 68-75.

4. Яшин, А.Н. Преобразование ваттметрограммы электропривода установки штангового глубинного насоса в динамограмму / А. Н. Яшин // Электротехнические и информационные комплексы и системы. - 2024. - Т. 20, № 3. - С. 80-88.

5. Яшин, А.Н. Исследование влияния параметров балансирующего уравновешивающего контргруза на выходные параметры электротехнического комплекса установки штангового глубинного насоса / А. Н. Яшин // Электротехнические и информационные комплексы и системы. - 2024. - Т. 20, № 4. - С. 73-83.

**Патенты и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:**

6. Яшин, А.Н. Бездатчиковая интеллектуальная станция управления скважиной / М.И. Хакимьянов, А.Н. Яшин // Патент на полезную модель. – № 229611. –Заявл. от 11.04.2024. Оpubл. 16.10.2024.

7. Яшин, А.Н. Расчет параметров ветро-солнечной электростанции для установок штанговых глубинных насосов / А.Н. Яшин, М.И. Хакимьянов // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. – № 2024618777. –Заявл. от 11.04.2024. Оpubл. 17.04.2024.

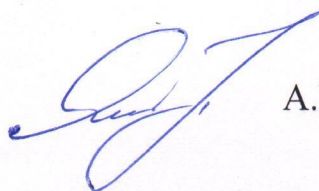
8. Яшин, А.Н. Расчет динамограммы установки штангового глубинного насоса из массива ваттметрограммы / А.Н. Яшин, М.И. Хакимьянов // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. – № 22024666412. –Заявл. от 02.07.2024. Оpubл. 12.07.2024.

**В изданиях, индексируемых в базе SCOPUS:**

9. Яшин, А.Н. Power Supply of The Sucker Rod Pump Unit Electric Drive Using Renewable Energy Sources / А. Н. Яшин, А. А. Конев, М. И. Хакимьянов // International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS) : The international scientific and practical conference materials, 16–18 November 2021, Ufa, Russia / USATU. - Уфа, 2021. - P. 43-46.

10. Яшин, А.Н. Wattmeter Cards Analysis of Oil-Producing Pumps Electric Drives / А. Н. Яшин, М. И. Хакимьянов // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon) : 24-26 Sept. 2021, Magnitogorsk, Russian Federation. - 2021.

Соискатель



А.Н. Яшин