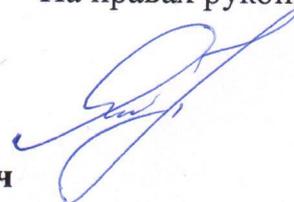


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Уфимский государственный нефтяной технический университет»

На правах рукописи

ЯШИН Антон Николаевич



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

Специальность 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Хакимьянов Марат Ильгизович

Уфа 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1. Современное состояние проблемы повышения эффективности электротехнических комплексов установок ШГН	13
1.1 Актуальность проблемы повышения эффективности технологических процессов добычи нефти с использованием установок ШГН.....	13
1.2 Оборудование электротехнических комплексов УШГН	15
1.3 Основные неисправности и проблемы при эксплуатации установок ШГН	30
Выводы по главе 1.....	37
Глава 2. Оптимизация режимов эксплуатации скважин с целью повышения энергоэффективности электротехнических комплексов нефтедобывающих скважин.....	40
2.1 Анализ режимов работы установок штанговых глубинных насосов с точки зрения энергоэффективности	40
2.2 Исследование влияния уравновешенности установок ШГН на потребление электроэнергии.....	49
2.3 Разработка модели для получения расчетной динамограммы из массива измеренных данных ваттметрограммы.....	58
2.4 Разработка и исследование компьютерной модели «ШГН – станок качалка» с учетом влияния изменения параметров балансирующего контргруза на выходные параметры	65
Выводы по главе 2	72
Глава 3. Исследование эффективности применения вентильных двигателей в системах электроприводов установки ШГН	74
3.1 Разработка усовершенствованной методики расчета параметров вентильного двигателя для привода УШГН.....	74
3.2 Построение компьютерной модели вентильного электропривода установки штангового глубинного насоса	82

Выводы по главе 3	91
Глава 4. Повышение автономности и надежности электроснабжения установок ШГН в условиях расположения месторождений в удаленных труднодоступных районах	92
4.1 Определение потенциала использования возобновляемой энергетики Орьбашского месторождения.....	92
4.2 Особенности электрической нагрузки при снабжении нефтяной скважины. Анализ профиля исследуемой нагрузки УШГН.....	97
4.3 Разработка методики расчета и подбора оборудования гибридной ветросолнечной электростанции для УШГН	98
4.4 Результаты исследований эффективности применения гибридной ветросолнечной энергетической установки при электроснабжении УШГН.....	105
4.5 Разработка и исследование имитационной модели ветросолнечной энергетической установки для электроснабжения скважины, эксплуатируемой установкой ШГН	118
Выводы по главе 4.....	124
Глава 5. Результаты лабораторных и практических испытаний предложенных технических решений	125
5.1 Разработка интеллектуальной станции управления скважиной, эксплуатируемой установкой ШГН	125
5.2 Экономия электроэнергии при механизированной добыче нефти на скважинах действующего фонда, эксплуатируемых установками ШГН.....	129
5.3 Испытания вентильного двигателя при циклически изменяющихся нагрузках на лабораторном стенде, имитирующем работу УШГН.....	132
5.4 Определение экономической эффективности мероприятий по повышению степени уравновешенности УШГН.....	137
5.5 Экономическая эффективность использования ветросолнечной электростанции для электроснабжения УШГН.....	139
Выводы по главе 5	140

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	142
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	144
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	147
ПРИЛОЖЕНИЕ А Свидетельства о регистрации результатов интеллектуальной деятельности	161
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Исходный текст программы расчета гибридной ветросолнечной подстанции для установки штангового глубинного насоса	164
ПРИЛОЖЕНИЕ В Исходный текст программы получения динамограммы установки штангового глубинного насоса из массива ваттметрограммы	167
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Материалы, относящиеся к внедрению результатов диссертационной работы.....	169

ВВЕДЕНИЕ

Добыча углеводородов является одной из важнейших отраслей в структуре экономики России. Отрасль обеспечивает значительную часть валютных поступлений в экономику страны. Также, она является одной из наиболее энергоемких: до 5% всей вырабатываемой электроэнергии потребляется нефтегазовыми предприятиями.

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 [23].

В нашей стране штанговые глубинные насосы 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 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 заведомо большей мощности, которые во время работы оказываются в значительной степени недогруженными [94].

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 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. [30]

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

Степень разработанности темы исследования.

В разработку теории значительных 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, Taskas Gobar, A Koncz, S. Miska, B.M. 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 данная 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 уравнивающих 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 уравнивающего 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 уравнивающих 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 уравнивающего контргруза на выходные параметры УШГН может быть использована при отладке интеллектуальных станций управления с функцией автоматического уравнивания 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 № P582/2022п 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 уравнивающих 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 113 наименований, 4 приложений. Общий объем диссертации 173 страницы, включая 90 рисунка и 19 таблиц.

Глава 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ УСТАНОВОК ШГН

1.1. Актуальность проблемы повышения эффективности технологических процессов добычи нефти с использованием установок ШГН

Добыча углеводородов представляет собой одну из ключевых отраслей российской экономики. Она обеспечивает значительную долю валютных поступлений в страну. Кроме того, данная отрасль отличается высокой энергоемкостью: предприятия нефтегазового сектора потребляют до 5% от общего объема вырабатываемой электроэнергии. Скважинная механизированная добыча является наиболее энергоемким процессом среди всех технологий, применяемых в нефтедобыче.

Энергоэффективность технологических процессов является важным фактором конкурентоспособности для всех промышленных предприятий. Организации проводят энергетический аудит своих технологических процессов, после которого разрабатывают меры по повышению эффективности своих производств [95].

Нефтедобывающие предприятия уделяют вопросам энергоэффективности особое внимание, так как цены на их продукцию – углеводородное сырье – в последнее десятилетие в высокой степени волатильны. В то же время затраты на добычу постоянно увеличиваются из-за роста цен на электроэнергию, удорожания оборудования, повышения уровня оплаты труда.

Снижению цен на углеводородное сырье способствует глобальное развитие возобновляемой энергетики, бурный рост количества электромобилей, ужесточение экологических стандартов. Двигатели внутреннего сгорания автомобилей, транспортных средств и другие

промышленные установки становятся более экономичными, что также способствует снижению мировых потребностей в нефти и нефтепродуктах [4]

Однако Российская Федерация в силу климатических особенностей не может полностью отказаться от углеводородного сырья, хотя доля энергии, вырабатываемой возобновляемыми источниками, будет увеличиваться. Поэтому нефтяникам важно минимизировать себестоимость добычи нефти, сократив, в первую очередь, расход электроэнергии.

Самыми энергоемкими потребителями на нефтепромыслах являются электроприводы нефтедобывающих скважинных насосов, которые хоть и имеют сравнительно небольшие мощности, но в большом количестве рассредоточены на обширных территориях. Также существенный вклад в энергопотребление вносят системы поддержания пластового давления, промысловой подготовки и трубопроводного транспорта нефти и газа.

Основными типами скважинных насосов для добычи нефти являются электроцентробежные погружные насосы, скважинные штанговые насосы и винтовые насосы. Остальные типы скважинных насосов (вибрационные, инжекторные, мембранные) используются значительно реже и не вносят существенного вклада в энергопотребление.

Штанговые глубинные насосы (ШГН) являются основным способом механизированной эксплуатации скважин во многих странах (США, Канада, Казахстан) и многих нефтяных компаниях (ПАО «Татнефть», ПАО «Роснефть»). В нашей стране установки 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 ШГН имеет ряд особенностей. Электроприводы ШГН 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 заведомо большей мощности и во время работы оказываются в значительной степени недогруженными.

1.2 Оборудование электротехнических комплексов УШГН

Схема установки ШГН показана на рисунке 1.1. Установка ШГН состоит из погружной и наземной частей. Все эти компоненты функционируют совместно, обеспечивая подъем углеводородов из забоя скважины на поверхность. Погружная часть содержит фильтр, скважинный штанговый глубинный насос, колонну насосно-компрессорных труб и колонну насосных штанг. Наземная часть включает в себя следующее оборудование: фундамент, раму, стойку, устьевую арматуру, устьевой сальник, полированный шток, траверсы канатной подвески, головку балансира, канатную подвеску, балансир, шатун, кривошип, редуктор, клиноременную передачу, электродвигатель, балансировочные грузы, тормоз, станцию управления и трансформатор [106].

Технические характеристики наиболее распространенных станков-качалок приведены в таблице 1.1. Как видно из таблицы 1.1, в основном применяются СК с длиной хода штока 1,2...3,5 м, обеспечивающие частоту качаний от 5 до 15 в минуту, допускающие нагрузку на шток до 100 кН. Также используются установки с цепным приводом, позволяющие получить длину хода до 8 и более метров при скорости 2 качания в минуту [54].

Технические характеристики штанговых насосов представлены в таблице 1.2. Промышленностью выпускаются насосы с длиной хода плунжера от 0,9 до 6 м, диаметрами 29, 32, 44, 57 мм и другие.

Таблица 1.1 – Технические характеристики СК [56]

Показатели	СК3-1,2-630	СК5-3-2500	СК6-2,1-2500	СК12-2,5-4000	СК8-3,5-4000	СК8-3,5-5600	СК10-3,5-5600	СКД3-1,5-710	СКД4-2,1-1400	СКД6-2,5-2800	СКД8-3-4000	СКД10-3,5-5600	СКД12-3,0-5600
Номинальная нагрузка (на устьевом штоке), Н	30000	50000	60000	120000	80000	80000	100000	30000	40000	60000	80000	100000	120000
Номинальная длина хода устьевого штока, м	1,2	3	2,1	2,5	3,5	3,5	3	1,5	2,1	2,5	3,0	3,5	3,0
Номинальный крутящий момент (на выходном валу редуктора), Н·м	6300	25000	25000	40000	40000	56000	56000	7100	14000	28000	40000	56000	56000
Число ходов балансира в минуту	5-15		5-12				5-15		5-14		5-12		
Редуктор	Ц2НШ-315	Ц2НШ-450		Ц2НШ-750Б		Ц2НШ-560		Ц2НШ-315		Ц2НШ-450	Ц2НШ-750Б	Ц2НШ-560	
Габаритные размеры, мм, не более:	4125	7380	6480	7450	8450	8450	7950	4050	5100	6085	6900	7280	6900
длина													
ширина	1350	1840	1840	2246	1146	2246	2246	1360	1700	1880	2250	2250	2250
высота	3245	5195	4960	5730	6210	6210	5835	2785	3650	4230	4910	5218	4910
Масса, кг	3787	9500	8600	14415	14200	14245	14120	3270	6230	7620	11600	12170	12065

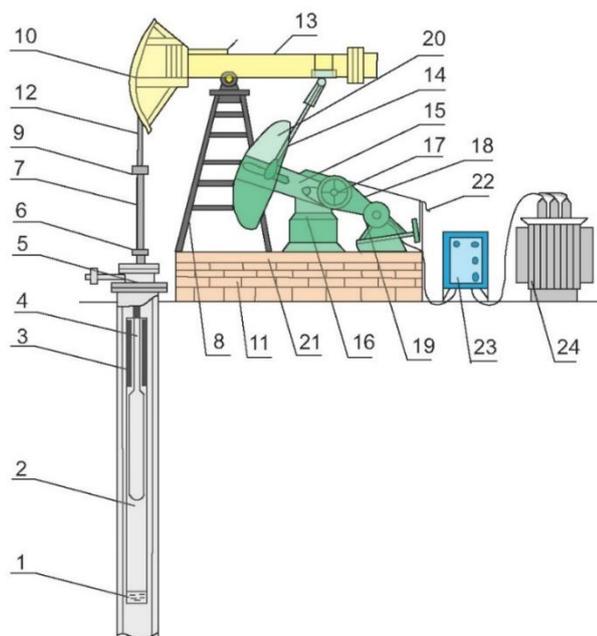


Рисунок 1.1 – Оборудование установки штангового глубинного насоса:

1 – фильтр, 2 – скважинный насос, 3 – насосно-компрессорные трубы, 4 – насосные штанги, 5 – оборудование устья, 6 – устьевой сальник, 7 – полированный шток, 8 – стойка, 9 – траверсы канатной подвески, 10 – головка балансира, 11 – фундамент, 12 – канатная подвеска, 13 – балансир, 14 – шатун, 15 – кривошип, 16 – редуктор, 17 – шкив, 18 – клиноременная передача, 19 – электродвигатель, 20 – балансировочный груз, 21 – рама, 22 – тормоз, 23 – станция управления, 24 – трансформатор.

Таблица 1.2 – Технические характеристики штанговых насосов [56]

Штанговый насос	Условный размер, мм	Длина хода, мм
НВ1Б	29; 32; 38; 44; 57	1200-6000
НВ2Б	32; 38; 44; 57	1800-6000
НН2Б	32; 44; 57; 70; 95	1200-4500
НВ1С	29; 32; 38; 44; 57	1200-3500
НН2С	32; 44; 57; 70; 95	1200-3500
НН1С	29; 32; 44; 57	900
НН2БУ	44; 57	1800-3500
ННБА	70; 95; 102	2500-4500
НВ1Б...И	29; 32; 38; 44; 57	1200-6000
НН2Б...И	32; 44; 57; 70; 95	1200-5000
НВ1БТ...И	44; 57	1200-3000
НН2БТ...И	44; 57	1200-3000
НВ1БД1	38/57; 57/44	1800-5000
ННБД1	44/29; 57/32; 70/44	1800-3000
НВ1БД2	38/57	1800-3500

1.2.1 Электродвигатели для привода установок ШГН и особенности их работы

Для привода УШГН, как правило, используются асинхронные трехфазные двигатели напряжением 0,4 кВ с высоким пусковым моментом. Синхронная частота вращения составляет 500-1500 об/мин. Мощность электродвигателей составляет от 7,5 до 37 кВт, но наиболее широко используемые ЭД имеют мощность 22 и 30 кВт. В таблице 1.3 представлены основные характеристики электродвигателей УШГН [96].

Таблица 1.3 – Основные характеристики ЭД для привода УШГН

Мощность P , кВт	Марка ЭД	Синхронная частота вращения n , об/мин	Коэффициент мощности $\cos \varphi$, о.е.
7,5	АИР180МА12СН	500	0,80
9,0	АИР180МВ12СН	500	0,80
11,0	5А200ЛА12СН	500	0,80
13,0	5А200ЛВ12СН	500	0,81
15,0	АИР180МА8СН	750	0,81
	5А200Л12СН	500	0,81
18,5	АИР180М6СН	1000	0,82
	АИР180М8СН	750	0,82
	5А200М8СН	750	0,82
	5А225М12СН	500	0,82
22,0	АИР180S4СН	1500	0,82
	5А200М6СН	1000	0,82
	5А200Л8СН	750	0,82
	5А200М12СН	500	0,82
30,0	АИР180М4СН	1500	0,83
	5А200Л6СН	1000	0,83
	5А225М8СН	750	0,83
37,0	5А200М4СН	1500	0,83
	5А225М6СН	1000	0,83

Штанговые глубинные насосы имеют более высокие значения удельного энергопотребления, чем другие типы погружных насосов, т.к. их электроприводы работают в тяжелых режимах. Это связано со следующими факторами:

- ЭД выбирается с запасом мощности, поскольку необходимо обеспечить значительный пусковой момент, однако после запуска двигатель функционирует в режиме недогрузки;

- нагрузка на вал ЭД является нестабильной и имеет циклический характер (см. рисунок 1.2).

Циклическость нагрузки объясняется принципом работы и кинематической схемой установки штангового глубинного насоса. В первой половине цикла происходит подъем колонны штанг вместе со скважинной жидкостью, тогда как во второй половине осуществляется спуск колонны штанг. Во время спуска колонны штанг вниз происходит подъем балансировочных грузов с накоплением потенциальной энергии, которая используется в следующем цикле.

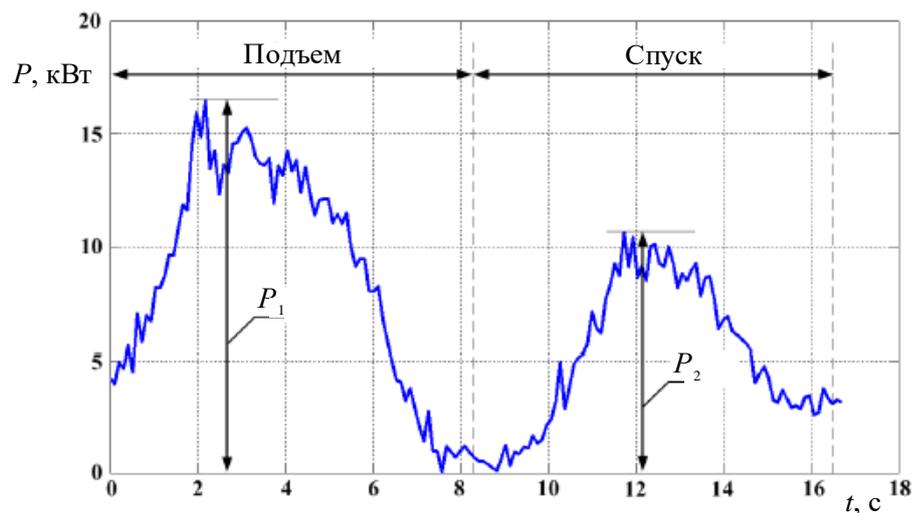


Рисунок 1.2 – Ваттметрограмма электродвигателя УШГН за цикл качания [30]

Пиковые значения мощности P_1 и P_2 , потребляемой из сети, должны быть равны при хорошей балансировке установки. Тем не менее, график загрузки всегда будет неравномерным. На практике до 90–95 % установок ШГН имеют недостаточный уровень балансировки.

Неравномерное распределение нагрузки влияет на все характеристики электрических двигателей, включая КПД и коэффициент мощности $\cos \varphi$.

Для анализа воздействия нагрузки на коэффициент полезного действия и коэффициент мощности ($\cos \varphi$) можно применять стандартные зависимости этих параметров от коэффициента загрузки (k_3), представленные в таблице 1.4. [30]:

$$k_3 = \frac{P}{P_{\text{ном.}} / \eta_{\text{ном.}}},$$

где P – значение потребляемой мощности в анализируемый момент времени;

$P_{\text{ном.}}$ – номинальная мощность ЭД;

$\eta_{\text{ном.}}$ – номинальный КПД ЭД.

Таблица 1.4 – Типовая зависимость КПД и коэффициента мощности от коэффициента загрузки АД k_3 . [30]

k_3 , о.е.	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9	1,0	1,1	1,2	1,5
η , о.е.	0,00	0,70	0,82	0,87	0,89	0,90	0,91	0,91	0,89	0,89	0,88	0,87	0,85
$\cos \varphi$, о.е.	0,07	0,31	0,50	0,62	0,73	0,80	0,84	0,86	0,88	0,89	0,89	0,88	0,87

Для улучшения энергетических характеристик электроприводов могут быть приняты следующие мероприятия:

- уравнивание установок ШГН, для чего необходимо точно сбалансировать противовесы;
- замена балансирных приводов на цепные, что обеспечивает более высокую стабильность параметров в каждом цикле колебаний;
- замена асинхронных двигателей на вентильные двигатели, которые характеризуются повышенными коэффициентами полезного действия и перегрузочной способностью, а также обеспечивают более низкие скорости вращения;
- использование частотно-регулируемого привода, что позволит регулировать производительность насоса путем изменения скорости вращения ЭД;

- использование возобновляемых источников электроэнергии, что позволит сгладить график нагрузки ЭД и сети и увеличить показатели автономности электроснабжения.

Современные СУ часто оснащаются преобразователями частоты. Источниками экономической эффективности при использовании ПЧ являются следующие факторы:

- экономия потребляемой электрической энергии более чем на 30%;
- экономия затрат на ремонт скважин и нефтедобывающего оборудования более чем на 20% за счет сокращения износа механических элементов;
- сокращение потерь добычи более чем на 2% за счет уменьшения времени простоя скважин при ремонтах;
- существенным показателем работы системы является увеличение межремонтного периода скважин более чем на 20%.

Мероприятия по повышению эффективности электроприводов УШГН представлены на рисунке 1.3.

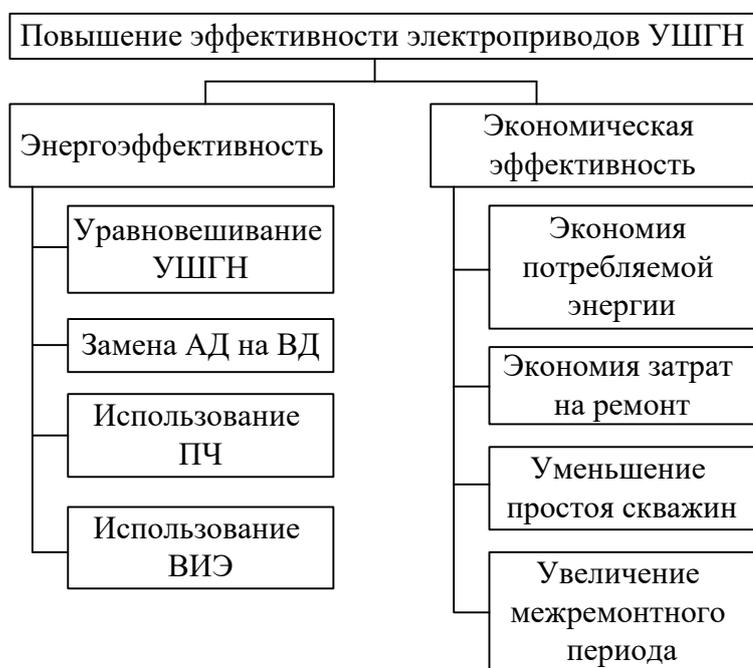


Рисунок 1.3 – Мероприятия по повышению эффективности электроприводов УШГН

Данные числовые показатели подтверждены методикой расчета экономии электрической энергии, приведенной в [14].

В работе [14] предложена следующая методика для расчета экономии электроэнергии при использовании ЧРП:

1. Измеряется выходной ток ПЧ I_2 , то есть ток, потребляемый двигателем.

2. Вычисляется значение загрузки двигателя как отношение фактического выходного тока I_2 к номинальному $I_{ном.}$. По загрузке двигателя определяется значение коэффициента мощности $\cos\varphi_2$.

3. Определяется разность входного и выходного токов ΔI [14]:

$$\Delta I = I_2 \cdot \left(1 - \frac{f_2 \cdot \cos\varphi_2}{f_1 \cdot 0,89} \right),$$

где f_1 – частота сети на входе в ПЧ;

f_2 – частота на выходе из ПЧ;

I_2 – выходной ток ПЧ;

$\cos\varphi_2$ – коэффициент мощности.

4. Определяется экономия электрической энергии за определенный промежуток времени \mathcal{E}_N из часовой экономии \mathcal{E} и входного напряжения U_1 .

Экономии электрической энергии за N часов вычисляется по формуле [14]:

$$\mathcal{E}_N = \sqrt{3} \cdot k_p \cdot U_1 \cdot \Delta I \cdot N,$$

где k_p – коэффициент использования установленной мощности.

1.2.2 Применение вентильного электропривода в УШГН

Обычно ШГН применяются для эксплуатации малодобитных скважин малых и средних глубин. Существенным недостатком УШГН с асинхронным двигателем и клиноременной передачей является невысокий КПД системы «двигатель – клиноременная передача – редуктор», невысокая управляемость,

перегрев при отклонении частоты вращения от номинального значения и риск преждевременного отказа.

Перспективным направлением является использование вентильных двигателей для приводов УШГН. ВД обладают более высоким КПД, чем асинхронные электродвигатели, и высокой перегрузочной способностью. Это позволяет использовать электродвигатели меньшей мощности с более высокой загрузкой [23].

Вентильный электропривод УШГН представляет собой привод без клиноременной передачи, состоящий из вентильного двигателя, ротор которого установлен на первичном валу редуктора, а статор механически прикреплен к его корпусу (рисунок 1.4). Однако такие ВД еще находятся на этапе опытной эксплуатации и не получили широкого распространения. Причинами этого является отсутствие доступных методик для подбора самого ВД к каждой конкретной скважине, а также алгоритмов управления ВД УШГН.

Вентильный электродвигатель не является независимым устройством, так как его работа невозможна без полупроводникового коммутатора и системы управления, в отличие от асинхронных электродвигателей, которые могут функционировать как с преобразователем частоты, так и без него. Вентильные приводы представляют собой электромеханические преобразователи, сочетая характеристики как электрической машины, так и интегрированной системы регулируемого электропривода [102]. Как и любой электродвигатель, он преобразует электрическую энергию, получаемую от питающей сети, в механическую энергию на выходе. Благодаря своей функции регулируемого электропривода, вентильный электродвигатель позволяет эффективно управлять этим процессом в зависимости от специфики нагрузки: можно регулировать частоту вращения, крутящий момент и мощность, что значительно расширяет технологические возможности при использовании УШГН.



Рисунок 1.4 – Вентильный двигатель для УШГН [46]

В ВД мощность не расходуется на передачу энергии ротору, и нет, в отличие от асинхронных двигателей, потерь в короткозамкнутой обмотке ротора. В связи с этим КПД ВД значительно выше, чем АД (рисунок 1.5), а значения рабочих токов холостого хода – значительно ниже.

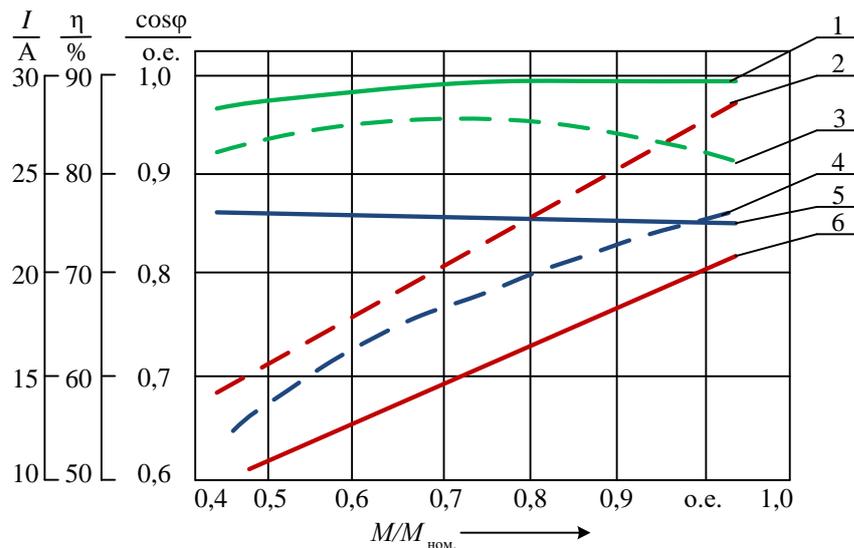


Рисунок 1.5 – Рабочие характеристики двигателей

1 – КПД вентильного двигателя, 2 – рабочий ток АД, 3 – КПД асинхронного двигателя, 4 – коэффициент мощности АД, 5 – коэффициент мощности ВД, 6 – рабочий ток ВД

К недостаткам вентильных двигателей можно отнести высокую стоимость двигателя, обусловленную использованием дорогостоящих постоянных магнитов в конструкции ротора и относительно сложную структуру двигателя и управление им [54].

Известны несколько методик расчета ВД для приводов различного назначения [28], [29], [70]. Однако привод УШГН имеет ряд конструктивных

особенностей, которые существенно влияют на характер нагрузки, а сам ВД для УШГН имеет малую осевую длину и большой диаметр. В связи с этими факторами необходимо усовершенствовать методику проектирования вентильного привода для УШГН.

Сам процесс подбора и расчета вентильного двигателя для привода установки штангового глубинного насоса достаточно сложный и дорогой, в связи с чем в данной диссертации предложена методика проектирования электроприводов УШГН на базе ВД, отличающаяся возможностью имитации основных рабочих состояний, которая позволяет сократить время и затраты на выполнение расчетов и проектных работ при модернизации электроприводов УШГН с целью повышения эффективности.

1.2.3 Обзор современных станций управления ШГН

Разработкой и производством станций управления ШГН на сегодняшний день занимается ряд компаний. В таблице 1.5 представлены основные параметры СУ ШГН. Каждая из известных станций управления обладает своими преимуществами и недостатками. Классифицировать станции управления можно несколькими критериями [76]:

- по количеству измерительных каналов и диагностируемых параметров;
- по принципу диагностики и обработки данных;
- по степени интеграции с АСУ;
- по внутреннему исполнению;
- по принципу управления приводом;
- по принципу взаимодействия с обслуживающим персоналом.

Анализ характеристик и опыта эксплуатации применяемых в настоящее время станций управления показал, что главным образом скважины оснащаются так называемыми «станциями прямого пуска», позволяющими только включать ЭД и выключать его по сигналам противоаварийной автоматики.

Таблица 1.5 – Основные параметры станций управления ШГН

Наименование	Динамограммы: сбор/обработка в реальном времени	Ваттметрирование	Контроль параметров работы двигателя	Алгоритмы откачки	Отображение параметров	Управление ПЧ	Средства связи
Электрон-06	Да	Да	Да	Нет данных	Цифро-буквенный индикатор	Нет	RS-485 Modbus Регион 2000
Мир ИСУ-07	Да/нет	Да	Да	Нет данных	Цифро-буквенный индикатор	Да	RS-485 Modbus Регион 2000
БМС-1	Нет	Нет	Да	Непрерывная	Цифро-буквенный индикатор	Нет	RS-485 USB
Стандарт	Да/нет	Нет данных	Да	Периодическая	Нет	Нет	Радиомодем
WellSim СКД-15	Да	Да	Да	Периодическая	Сенсорный дисплей	Да	WiFi, Ethernet, GPS, RF, GPRS/UMTS,
VLT SALT	Да	Да	Да	Периодическая	Сенсорный дисплей	Да	WiFi, Ethernet, GPRS/UMTS
ЭПСКН	Да	Нет	Да	Периодическая	С пульта оператора	Да	Радиомодем RS-485 Modbus
Sam Well Manager	Да/да	Да	Да	Периодическая по заполнению насоса	Графический индикатор	Да	RS-485 Modbus
МН-01	Да	Да	Да	Реализуется	С пульта оператора	Да	RS-485 Modbus Регион 2000
ШГНУ НЭК-05- 02-100	Да	Да	Да	Периодическая	Графический индикатор	Нет (Устройство плавного пуска)	RS-485 Modbus
Интел-СУС	Да	Да	Да	Периодическая	С пульта оператора	Нет	Радиомодем
Мега-СУС	Да	Да	Да	Периодическая	Нет данных	Да	Радиоканал GSM/GPRS

Станции управления прямого пуска защищают ЭД от перегрузки, коротких замыканий, неполнофазных режимов, работы с пониженным напряжением, а также отключают насосную установку по сигналу с электроконтактного манометра.

Существуют также «интеллектуальные станции управления», имеющие скважинный контроллер и интерфейс связи с диспетчерским пунктом. Интеллектуальные станции управления требуют для своей работы подключения датчиков: динамометрирования, ваттметрирования, давления и других. Нужно отметить, что в настоящее время практически нет отечественных интеллектуальных станций управления с полностью отлаженными алгоритмами управления электроприводами скважинных насосов. Все известные такие СУ находятся в опытной эксплуатации и постоянно требуют вмешательства разработчиков для корректировки заложенных алгоритмов. Как только срок технической поддержки разработчиков заканчивается, интеллектуальные станции управления переводят в режим с ручным управлением.

На нефтепромыслах стран СНГ также применяются импортные ИСУ, такие как Danfoss VLT-SALT, Unico. Такие СУ имеют ограниченный набор регулируемых параметров, алгоритмы их работы закрыты. Для внесения любых изменений необходимо обращаться к представителям фирм-производителей и платить немалые деньги.

Таким образом, задача разработки отечественных интеллектуальных станций управления электроприводами УШГН с отлаженными алгоритмами управления на основе анализа динамограмм и ваттметрограмм является актуальной задачей.

1.2.4 Применение возобновляемых источников электроэнергии для питания установок ШГН

Большинство нефтегазовых месторождений находятся в удаленных труднодоступных районах, в которых чрезвычайно трудно обеспечить надежное электроснабжение с соблюдением необходимых показателей качества электроэнергии [21]. Отсутствие качественных дорог затрудняет быстрое устранение аварий оперативно-ремонтным персоналом. Внедрение мощных частотно-регулируемых приводов на объектах инфраструктуры нефтегазовых месторождений (таких как приводы насосов дожимных и кустовых насосных станций, аппаратов воздушного охлаждения газа и других) ухудшает качество электроэнергии из-за генерации дополнительных гармоник, что может приводить к сбоям в работе систем управления.

Стоит отметить, что запуск в работу электроприводов скважинных насосов после отключения электроснабжения представляет большую проблему. Одновременный запуск всех двигателей скважинных насосов невозможен, так как пусковые токи перегружают возможности электрической сети.

Чтобы сделать своих потребителей менее зависимыми от сетей электроснабжения нефтяники устанавливают на промыслах газопоршневые и газотурбинные электростанции, которые работают на попутном нефтяном газе. Однако не везде есть возможности для установки таких электростанций.

Одним из способов повышения автономности электротехнических комплексов нефтедобывающих скважин и снижения потребления электроэнергии электродвигателями скважинных насосов является использование возобновляемых источников энергии. Основные доступные в настоящее время возобновляемые источники энергии – это ветрогенераторы и солнечные батареи [102].

Специалисты по обслуживанию нефтедобывающего оборудования продолжают сталкиваться с проблемой поддержания в рабочем состоянии

действующих добывающих скважин и ищут инновационные решения для восстановления простаивающих производственных мощностей. Следует отметить, что приостановка эксплуатации добывающих нефтяных скважин влечет за собой экономические потери из-за недополученного углеводородного сырья, а последующий запуск насосного оборудования может быть связан с технологическими проблемами. Поэтому вопросы повышения степени автономности и надежности электроснабжения электроприводов скважинных насосов являются актуальными. Одним из способов решения данной проблемы является использование для электроснабжения добывающих скважин альтернативных источников энергии. Поскольку скважины могут эксплуатироваться в различных режимах, необходимо также оценить экономическую целесообразность применения возобновляемых источников электроэнергии, особенно при различных погодных условиях. Предлагается проанализировать различные сценарии использования возобновляемых источников электроэнергии для непрерывного и периодического режимов эксплуатации скважин установками ШГН. При выборе наилучшего решения с точки зрения сочетания источников энергии и графика нагрузки учитываются технические и экономические факторы.

Использование возобновляемых источников энергии для электроснабжения нефтегазодобывающих скважин в качестве дополняющего источника энергии становится актуальной тематикой для исследований [3]. Задачей данного исследования является поиск наименее затратной и наиболее подходящей комбинации возобновляемых источников и накопителей энергии, которая повышает надежность электроснабжения и удовлетворяет спрос на энергию для производства при различных сценариях. Электрическая энергия от возобновляемых источников будет использоваться для питания электродвигателя переменного тока, который служит приводом для установки штангового глубинного насоса.

Электроснабжение не может осуществляться только от ветряных и солнечных генераторов, так как ночью и в безветренную погоду энергия вырабатываться не будет. Ветряные и солнечные генераторы могут быть подключены как дополнительные источники энергии. Возобновляемые источники энергии снижают нагрузку на электрическую сеть и повышают автономность работы электроприводов скважинных насосов [102].

В работе [5] приведено экономическое обоснование применения возобновляемых источников энергии для добычи нефти установками ШГН в тропическом климатическом поясе с преобладанием тропического пустынного климата.

В работе [12] описано применение солнечных панелей в качестве основного источника питания УШГН на неглубоких скважинах в отдаленных от доступных воздушных линий местах.

Таким образом, в рамках данной диссертации необходимо исследовать возможность применения возобновляемых источников электроэнергии для УШГН, что, в свою очередь, позволит улучшить автономность работы электротехнических комплексов, применяемых в добыче ресурсов.

1.3 Основные неисправности и проблемы при эксплуатации установок ШГН

Основные неисправности ШГН можно разделить на три крупных сегмента: механические, эксплуатационные и электрические. В каждом сегменте к выходу из строя ШГН могут привести несколько факторов. Основные элементы УШГН, которые подвержены частым поломкам, приведены на диаграмме (рисунок 1.6).



Рисунок 1.6 – Основные неисправности УШГН

1.3.1 Механические неисправности

Основные механические неисправности, которые имеют место в УШГН, включают в себя разрушение насосно-компрессорных труб (НКТ), износ насосных штанг, износ штифтов и муфт, выход из строя поверхностных элементов станка-качалки и отказ насоса.

Во время процесса добычи может возникать трение насосных штанг с насосно-компрессорными трубами. Это трение может привести к эрозии и износу как насосно-компрессорных труб, так и насосных штанг. В конечном итоге это может привести к возникновению утечек, обрывам штанг и поломке НКТ. На рисунке 1.7 показан пример эродированной из-за трения насосно-компрессорной трубы. Чтобы уменьшить трение между насосными штангами и насосно-компрессорными трубами в скважинный узел устанавливают специальные центраторы. Кроме того, правильная конструкция насосных штанг может значительно снизить вероятность трения и последующего износа.



Рисунок 1.7 – Пример разрушения НКТ [17]

Насосные штанги также подвержены износу по нескольким причинам. Во-первых, они со временем изнашиваются из-за их непрерывного движения вверх и вниз. Этот износ можно уменьшить, используя штанги повышенной прочности, а также оптимизировав их конструкцию. Вторая причина износа колонны штанг может быть связана с трением о НКТ, как было описано выше. Наконец, появление утечек жидкости значительно сокращает срок службы всех скважинных элементов УШГН.

Поскольку колонна штанг состоит из нескольких компонентов, неисправность одного из компонентов может привести к появлению утечек в колонне или выходу из строя всей колонны. Одним из компонентов, подверженных выходу из строя, является направляющая штанги, показанная на рисунке 1.8.



Рисунок 1.8 – Изношенная направляющая штанги [17]

Износ соединительных муфт может привести к обрыву колонны.

Поверхностные компоненты ШГН могут изнашиваться по двум основным причинам. Во-первых, длительная эксплуатация без надлежащего технического обслуживания может привести к снижению эффективности и, в конечном итоге, к выходу из строя некоторых поверхностных компонентов (главным образом, подшипников). Чтобы избежать этого, следует проводить техническое обслуживание компонентов и непрерывную смазку деталей. Вторая причина выхода из строя поверхностных компонентов – это влияние факторов окружающей среды и ошибки, допущенные человеком. Воздействие опасных факторов окружающей среды может быть уменьшено путем своевременной покраской и обработкой всех поверхностей. Человеческий фактор может быть исключен повышением квалификации персонала в областях правил эксплуатации и технического обслуживания оборудования УШГН.

Насос может выйти из строя из-за механических повреждений некоторых его подвижных или неподвижных компонентов. К неисправностям насоса относят утечки в клапанах, искривления плунжера, слишком высокая и слишком низкая посадки плунжера и другие. Большинство механических повреждений могут быть диагностированы путем анализа динамограмм и ваттметрограмм.

1.3.2 Эксплуатационные неисправности

Эксплуатационные неисправности чрезвычайно распространены в установках штангового глубинного насоса. Они включают в себя влияние высоких температур, проблемы с газом, коррозию, проблемы с песком и эрозией, а также проблемы с перепадом давления.

Чрезмерно высокие температуры в скважине могут привести к быстрой потере свойств и разрушению погружных элементов УШГН. Однако, такие неисправности не являются частыми для ШГН, т.к. они обычно применяются

в скважинах средней и малой глубины, в которых не бывает высоких температур.

Установки ШГН могут выкачивать из скважин продукцию со значительным объемом газа, но при этом может снизиться общий КПД насоса до 40 %. Это снижение КПД происходит, главным образом, из-за позднего открытия входного клапана при обратном ходе из-за сжатия газа под плунжером.

Одним из способов добычи жидкости с большим содержанием газа является использование газоперепускного устройства. Это позволяет кольцевому пространству между трубой и обсадной колонной выступать в качестве сепаратора. Так как газ имеет меньшую плотность, чем жидкость, он будет подниматься вверх. В горизонтальных скважинах насос не может быть установлен, поэтому необходимо использование скважинного газоотделителя.

Коррозия может привести к разрушению элементов погружного оборудования, а также к затруднению и даже прекращению эксплуатации. Коррозия возникает из-за присутствия агрессивных жидкостей с высоким содержанием растворенных солей. Чтобы избежать проблем с коррозией для таких скважин используют специальное коррозионностойкое оборудование.

Чрезмерный объем песка в продукции скважины может привести к проблемам. Во-первых, песок вызывает сильную эрозию насосных штанг и насоса, что в конечном итоге приводит к преждевременным отказам. Во-вторых, песок накапливается в плунжере и клапанах. Для эксплуатации скважин с высоким содержанием песка используют специальное оборудование, производят стабилизацию пласта с помощью химических веществ и устанавливают песочные якоря.

Следует отметить, что высокое содержание газа и загрязнение плунжера насоса, негерметичность клапанов и заклинивание плунжера в цилиндре насоса могут быть определены путем анализа динамограмм.

1.3.3 Сбои в электроснабжении

Кусты нефтедобывающих скважин находятся, как правило, в удаленных труднодоступных районах, где сложно обеспечить надежное и качественное электроснабжение.

Перебои в электроснабжении кустов скважин могут возникать из-за обрывов и замыканий в ЛЭП, ударов молний, неправильных срабатываний защит и других причин.

Перепады напряжения могут привести к выходу из строя электродвигателей, станций управления, преобразователей частоты, трансформаторов, автоматики и датчиков.

Электродвигатели установок ШГН работают в тяжелых условиях, подвергаются воздействию атмосферных осадков и значительным изменениям температуры окружающей среды.

Поэтому проблемы повышения автономности и надежности электроснабжения нефтедобывающих скважин являются достаточно важными.

1.3.4 Влияние качества электрической энергии на энергоэффективность установок ШГН

В компаниях, занимающихся добычей и транспортом углеводородного сырья, широко используются системы регулируемого электропривода с преобразователями частоты. Мощные частотные преобразователи применяются в системах электропривода для насосов, которые используются при транспортировке нефти, поддержании пластового давления и в других областях. С одной стороны, применение таких технологий способствует более эффективному расходованию электроэнергии, однако с другой стороны, это может негативно повлиять на качество электроэнергии. В результате

возникают высокие гармоники и искажения синусоидальной формы напряжения и тока в электросети [31].

Причинами этой проблемы являются устройства с нелинейной вольтамперной характеристикой. Примером является частотно-регулируемый электропривод, который состоит из преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией и асинхронного двигателя.

Для питания кустов скважин используются электрические сети напряжением 6(10) кВ. Доля электрооборудования, представляющего собой нелинейную нагрузку, может достигать до 80 % всей нагрузки [42]. Снижение качества электроэнергии негативно сказывается на функционировании регулируемых электроприводов, поскольку они чувствительны к изменениям синусоидальной формы напряжения. Основные искажения обычно возникают из-за 5-й, 7-й, 11-й и 13-й высших гармоник как тока, так и напряжения [32].

Последствия снижения качества электрической энергии представлены в виде схемы на рисунке 1.9.



Рисунок 1.9 – Последствия снижения качества электрического энергии

Повышение качества электрической энергии на производственных объектах может быть достигнуто следующими способами:

- путем совершенствования характеристик электроэнергетических установок;

- за счёт корректировки коэффициента мощности;
- путем оптимизации работы релейной защиты и автоматических систем;
- а также благодаря выбору наиболее эффективной длины линий электропередачи и других факторов.

Возможные мероприятия по повышению качества ЭЭ представлены на рисунке 1.10



Рисунок 1.10 – Возможные мероприятия по повышению качества ЭЭ

Таким образом, в рамках данной диссертации необходимо исследовать потенциальные пути достижения установленных критериев качества электрической энергии, что, в свою очередь, позволит улучшить эффективность работы электротехнических комплексов, применяемых в добыче ресурсов.

Выводы по главе 1:

1. Установки ШГН являются одними из главных инструментов для механизированной добычи углеводородного сырья в РФ и во всем мире, поэтому задачи повышения их эффективности являются в достаточно актуальными.

2. Удельные затраты электроэнергии УШГН при добыче нефти достаточно велики, что делает актуальной проблему поиска технических решений для повышения энергоэффективности их работы.

3. Повышение энергоэффективности добычи нефти установками ШГН может быть обеспечено улучшением сбалансированности, заменой

асинхронного привода на вентильный, повышением автономности и надежности электроснабжения.

4. Значительное количество неисправностей погружной части оборудования УШГН может быть обнаружено путем измерения и анализа динамограмм. Однако датчики динамометрирования имеют низкую надежность, а их ремонт и замена связаны со сложными организационными мероприятиями, поэтому отказ от физических датчиков и получение динамограммы из измеренного массива ваттметрограммы позволит повысить эксплуатационные показатели УШГН.

5. В настоящее время созданы экспериментальные вентильные двигатели для привода УШГН, однако отсутствуют методики их расчета и подбора для конкретных скважин, а также обоснованные законы оптимального управления для приводов УШГН.

5. Требуется разработка интеллектуальных станций управления для электроприводов УШГН с функциями оптимизации режимов эксплуатации скважин, анализа технического состояния насосного оборудования и контроля уровня сбалансированности по ваттметрограммам.

В связи с вышеизложенным в диссертации ставятся и решаются следующие задачи:

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 уравнивающих контргрузов.

ГЛАВА 2. ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ СКВАЖИН С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НЕФТЕДОБЫВАЮЩИХ СКВАЖИН

2.1 Анализ режимов работы установок штанговых глубинных насосов с точки зрения энергоэффективности

При подъеме жидкости с глубины подвески насоса на поверхность скважинным насосом совершается полезная работа. Эта работа определяется так называемой гидравлической мощностью $P_{\text{гидр.}}$, которая может быть рассчитана исходя из увеличения потенциальной энергии откачиваемой жидкости. На рисунке 2.1 показано, в каких элементах установки ШГН имеют место электрические, механические и эксплуатационные потери.

В процессе эксплуатации скважины в установке ШГН могут быть выделены следующие виды мощности:

- гидравлическая мощность $P_{\text{гидр.}}$, затрачиваемая на подъем скважинной жидкости или на совершение полезной работы;
- мощность насоса $P_{\text{нас.}}$, которая складывается из гидравлической мощности и потерь в насосе;
- мощность полированного штока $P_{\text{шток}}$, которая складывается из мощности насоса и потерь в колонне насосных штанг, может определяться с помощью измерений динамограмм;
- электрическая мощность $P_{\text{Эд}}$, которая потребляется электродвигателем установки и определяет общую потребляемую насосной установкой мощность, может быть определена методом ваттметрирования.

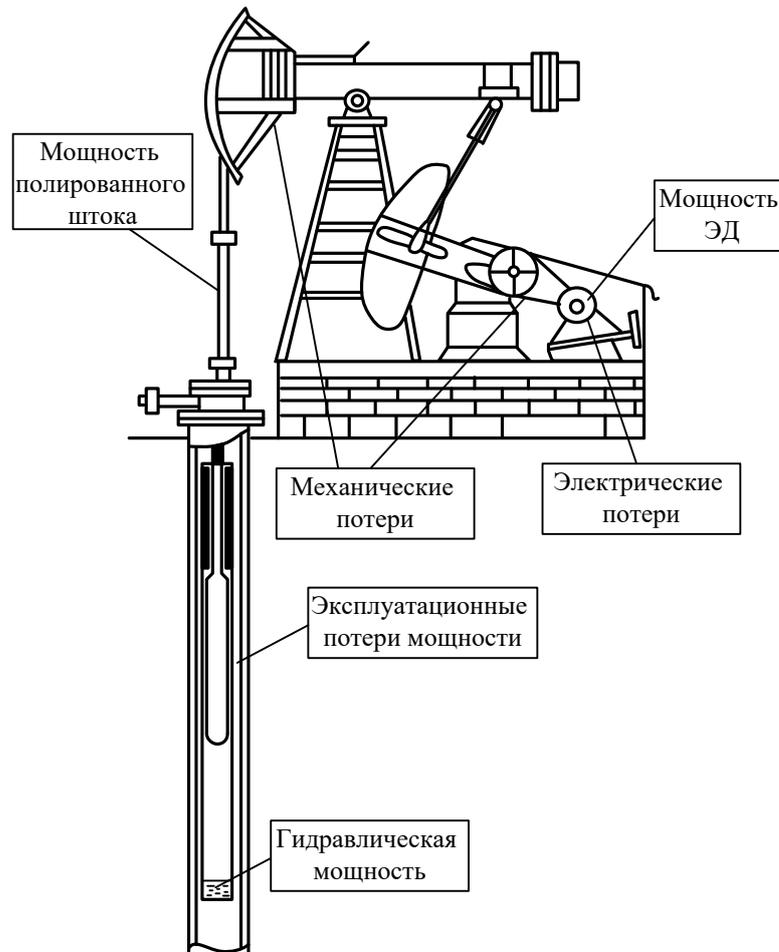


Рисунок 2.1 – Схема передачи мощности и потерь в установке штангового глубинного насоса

Гидравлическая (полезная) мощность вычисляется по формуле [88]:

$$P_{\text{гидр.}} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H, \quad (2.1)$$

где ρ – плотность добываемой нефти;

g – ускорение свободного падения;

Q – подача ШГН;

H – напор ШГН.

Напор насоса – это показатель, выражающий величину энергии, сообщаемой насосом единице веса перекачиваемой жидкости [88]:

$$H = \frac{P_{\text{давл.}}}{\rho \cdot g}, \quad (2.2)$$

где $P_{\text{давл.}}$ – давление насоса.

При применении этой формулы обычно используется подача жидкости Q , измеренная на поверхности. Таким образом, объемные потери скважинного насоса учитываются автоматически, поскольку измеренный расход жидкости включает влияние следующих объемных потерь на пути потока: неправильное заполнение насоса, потери, обусловленные утечками в насосе, а также в насосно-компрессорных трубах.

2.1.1 Потери мощности и КПД компонентов УШГН

Полезная выходная мощность насоса определяется гидравлической мощностью $P_{\text{гидр.}}$, указанной в уравнении (2.1). Мощность, необходимая для приведения в действие насоса, зависит от потерь, которые должны компенсироваться входной мощностью. Наиболее важными потерями в дополнение к тем, которые уже включены в гидравлическую мощность (потери на заполнение насоса и обусловленные утечками), являются следующие:

- потери на механическое трение между корпусом насоса и плунжером;
- потери энергии на трение жидкости и преодоление инерции добываемой жидкости, протекающей в затрубном пространстве насосно-компрессорных труб;
- потери, вызванные обратным давлением столба жидкости в колонне НКТ.

Требуемая входная мощность насоса $P_{\text{нас.}}$ должна превышать сумму полезной гидравлической мощности и приведенных выше потерь мощности. Знание значений входной и выходной мощностей позволяет рассчитать средний КПД, который описывает эффективность работы насоса:

$$\eta_{\text{нас.}} = \frac{P_{\text{гидр.}}}{P_{\text{нас.}}} \quad (2.3)$$

Расчет мощности насоса $P_{\text{нас.}}$ обычно производится с помощью измерения динамограммы и последующего решения волнового уравнения.

Используя их, можно построить плунжерную динамограмму, которая представляет собой зависимость нагрузки (усилия) насоса от перемещения плунжера, площадь которой соответствует входной энергии насоса (рисунок 2.2).

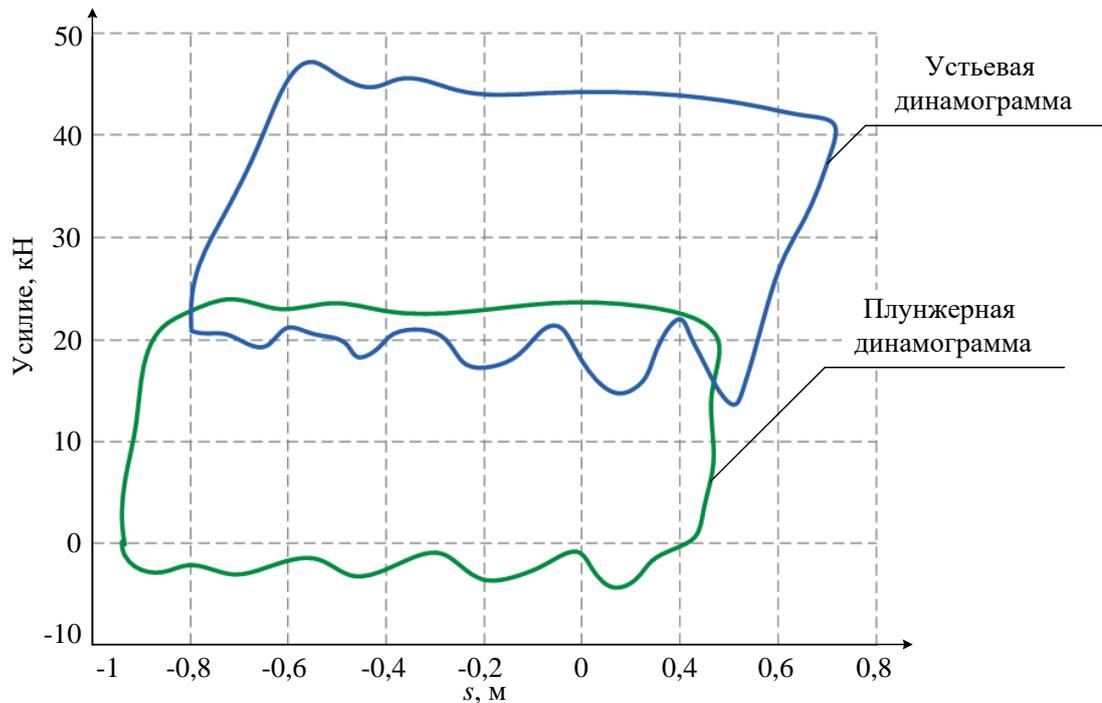


Рисунок 2.2 – Динамограммы установок ШГН

Требуемая входная мощность на полированном штоке $P_{\text{шток}}$ представляет собой сумму выходной мощности (равной входной мощности насоса $P_{\text{нас.}}$) и потерь. Исходя из этих двух мощностей, КПД насосных штанг может быть сформулирована следующим образом:

$$\eta_{\text{НШ}} = \frac{P_{\text{нас.}}}{P_{\text{шток}}}. \quad (2.4)$$

Как уже отмечалось, $P_{\text{шток}}$ является очень важным параметром, поскольку его легко определить с помощью динамометрирования, то есть измерения динамограммы. Динамограмма представляет собой замкнутую кривую зависимости нагрузки (усилия) на полированный шток от положения, ее замкнутая площадь, умноженная на среднюю скорость откачки, дает

значение $P_{\text{шток}}$. Исходя из этого значения, легко определить КПД насосных штанг $\eta_{\text{НШ}}$.

Зубчатый редуктор при передаче вращательного движения от электродвигателя уменьшает скорость вращения и увеличивает вращающий момент. В конструкции станка-качалки, которая представляет собой четырехзвенный кривошипно-шатунный механизм, имеются противовесы для сглаживания крутящего момента на редукторе.

Поскольку редуктор, полированный шток и насосные штанги соединены последовательно, выходная мощность редуктора равна входной мощности полированного штока $P_{\text{шток}}$ (если пренебречь механическими потерями в элементах станка-качалки):

$$P_{\text{вых.ред.}} = P_{\text{шток}} \quad (2.5)$$

Тот факт, что уравновешивающие и инерционные моменты не влияют на выходную мощность редуктора, позволяет сделать выводы о передаче мощности во всей наземной части штанговых насосных установок:

- не имеет значения, насколько хорошо или плохо сбалансированы противовесы, или насколько велики инерционные эффекты, средняя выходная мощность редуктора $P_{\text{вых.ред.}}$ одинакова и равна мощности, измеренной на полированном штоке;

- средняя механическая выходная мощность двигателя (мощность, вырабатываемая ротором ЭД), P_2 (включая потери мощности в редукторе и клиноременной передаче) также не зависит от условий уравновешивания и инерционных эффектов.

Требуемая входная мощность на высокоскоростном валу редуктора $P_{\text{ред.}}$, должна быть больше выходной мощности $P_{\text{шток}}$ и потерь механической мощности в шестернях и подшипниках конструкции на трение. Таким образом, средний КПД редуктора может быть определен для цикла качания следующим образом:

$$\eta_{\text{ред.}} = \frac{P_{\text{шток}}}{P_{\text{ред.}}} \quad (2.6)$$

Клиноременная передача, соединяющая редуктор с электроприводом, также уменьшает частоту вращения привода, совместное снижение частоты вращения редуктора и клинового ремня обеспечивает необходимую скорость качания на шатуне. Клиноременная передача состоит из двух шкивов и нескольких лент трапецевидного поперечного сечения. Изменение размера шкива является единственным способом изменения частоты вращения без замены электродвигателя в установках, необорудованных частотным приводом.

Клиновые ремни передают мощность за счет трения между ремнями и шкивами; мощность теряется в них из-за трения в подшипниках и постоянной ползучести и проскальзывания ремней относительно шкивов. При правильном натяжении ремней (до 70% от номинального значения натяжения) их максимальная эффективность может достигать 97%. Исходя из этого, наиболее вероятный КПД для обслуживаемых систем клиновых ремней, используемых в установках ШГН, должен быть выше 95%.

Используя выходную и входную мощности клиноременной передачи (входную мощность редуктора $P_{ред.}$ и механическую выходную мощность двигателя P_2) энергетический КПД клиноременной передачи (КП) определяется следующим уравнением:

$$\eta_{кп} = \frac{P_{ред.}}{P_2}. \quad (2.7)$$

Однако, числитель и знаменатель в этой формуле обычно неизвестны, поэтому при расчетах приходится полагаться на приведенные выше расчетные значения эффективности.

Трехфазные асинхронные двигатели переменного тока, используемые в приводах УШГН, являются надежными и достаточно эффективными электродвигателями. Требуемое значение средней механической мощности двигателя, приводящего в действие насосную систему, можно определить по мощности на полированном штоке $P_{шток}$ и сумме всех потерь мощности в приводном механизме, т.е. в редукторе и клиновых ремнях. Эта мощность

представляет собой мощность на выходном валу двигателя P_2 , которая идентична входной мощности клиноременной передачи, поскольку двигатель и клиноременная передача соединены последовательно.

В электродвигателе при преобразовании электрической мощности в механическую мощность на валу P_2 имеют место следующие потери:

- потери в сердечнике (стали), которые являются результатом действия вихревых токов в стальном сердечнике статора;
- потери в обмотках (меди), которые возникают из-за эффекта нагрева проводников током статора;
- магнитные потери, которые являются результатом рассеивания магнитного потока в воздушном зазоре;
- потери в роторе, которые представляют собой нагрев стержней ротора индуцированным током;
- потери на трение в подшипниках и потери на трение с воздухом.

Из-за этих потерь средняя потребляемая электрическая мощность за цикл качания $P_{\text{Эд}}$ превышает механическую мощность двигателя, и средний КПД двигателя может быть определен как:

$$\eta_{\text{Эд}} = \frac{P_2}{P_{\text{Эд}}}. \quad (2.8)$$

2.2.2 Определения эффективности УШГН в целом

Ниже рассмотрены различные возможные способы расчета общей энергетической эффективности системы на основе индивидуальной эффективности последовательно соединенных компонентов системы.

В идеальном случае, когда доступны надежные рабочие данные, включая среднее потребление электроэнергии двигателем $P_{\text{Эд}}$, общую эффективность системы легко определить, соотнеся полезную гидравлическую мощность с потребляемой электрической мощностью:

$$\eta_{\text{сист.}} = \frac{P_{\text{гидр.}}}{P_{\text{ЭД}}}. \quad (2.9)$$

КПД системы, с другой стороны, может быть разбит на отдельные составляющие, поскольку компоненты системы взаимосвязаны. Рекомендуется использовать следующую формулу с использованием коэффициентов полезного действия, определенных ранее:

$$\eta_{\text{сист.}} = \eta_{\text{нас.}} \cdot \eta_{\text{НШ}} \cdot \eta_{\text{ред.}} \cdot \eta_{\text{КП}} \cdot \eta_{\text{ЭД}}. \quad (2.10)$$

Другой подход классифицирует потери энергии в соответствии с местом их возникновения и использует только три отдельных коэффициента полезного действия для описания общего энергопотребления системы. Подземные потери представлены КПД подъема $\eta_{\text{под.}}$, рассчитываемой по формуле:

$$\eta_{\text{под.}} = \eta_{\text{нас.}} \cdot \eta_{\text{НШ}} = \frac{P_{\text{гидр.}}}{P_{\text{шток}}}. \quad (2.11)$$

Как видно, этот КПД легко определяется по измеренным и расчетным параметрам и характеризует энергетическую эффективность подъема жидкости на поверхность. Его значение варьируется в широком диапазоне, как правило (70 – 90) %.

Поверхностные потери мощности представлены механическим и электрическим КПД, где механический КПД $\eta_{\text{мех.}}$, включает в себя комбинированные потери в редукторе и клиноременной передаче, как определено в уравнении:

$$\eta_{\text{мех.}} = \eta_{\text{ред.}} \cdot \eta_{\text{КП}} = \frac{P_{\text{шток}}}{P_2}. \quad (2.12)$$

Поскольку прямой расчет $\eta_{\text{мех.}}$ невозможен, т.к. средняя механическая мощность на валу двигателя P_2 обычно не измеряется, приходится полагаться на опубликованные оценки, как правило (0,8 – 0,95) %.

Таким образом, КПД системы определяется как:

$$\eta_{\text{сист.}} = \eta_{\text{под.}} \cdot \eta_{\text{мех.}} \cdot \eta_{\text{ЭД}}. \quad (2.13)$$

Пакет компьютерных программ крупной сервисной компании [73] объединяет механическую и электрическую эффективность поверхностной части УШГН в один коэффициент, называемый поверхностной эффективностью $\eta_{\text{пов.}}$, определяемой выражением:

$$\eta_{\text{пов.}} = \eta_{\text{мех.}} \cdot \eta_{\text{ЭД}} = \frac{P_{\text{шток}}}{P_{\text{ЭД}}}. \quad (2.14)$$

Для случаев, когда электрическая мощность $P_{\text{ЭД}}$ неизвестна, рекомендуется использовать типовое значение $\eta_{\text{пов.}} = 0,8$ для стандартных условий добычи. Эта формула также может быть использована для определения изменения суммарного крутящего момента редуктора на основе мгновенной электрической мощности, измеренной во время цикла откачки.

В этом случае КПД насосной системы содержит только две составляющие:

$$\eta_{\text{сист.}} = \eta_{\text{под.}} \cdot \eta_{\text{пов.}}. \quad (2.15)$$

Максимальная экономичность УШГН достигается при минимальных эксплуатационных расходах, что приводит к минимальному энергопотреблению, т.е. к максимальной энергетической эффективности. Для нахождения наиболее экономичного решения для получения заданного расхода жидкости с использованием штанговой насосной установки необходимо исследовать выражения эффективности системы (2.13) и (2.15).

Во-первых, необходимо проанализировать относительную важность и обычные диапазоны варьирования параметров отдельных составляющих в формулах. Возможные значения механического КПД $\eta_{\text{мех.}}$, КПД двигателя $\eta_{\text{ЭД}}$, а также КПД поверхностного оборудования $\eta_{\text{пов.}}$ варьируются в довольно узких диапазонах, как уже обсуждалось ранее. В то же время их значения не могут быть улучшены при условии использования нужных типоразмеров редуктора и электродвигателя.

В отличие от этих показателей КПД подземной части УШГН $\eta_{\text{под.}}$ может изменяться в очень широких пределах в зависимости от выбранного режима эксплуатации скважины (сочетание диаметра плунжера, длины хода и

скорости качаний). При правильном выборе режима эксплуатации можно добиться значительного повышения эффективности лифтинга скважинной продукции. Таким образом, для достижения максимальной энергетической эффективности необходимо найти режим эксплуатации с максимально возможным значением эффективности подъема продукции. Это, в свою очередь, идентично случаю, когда мощность полированного штока $P_{\text{шток}}$ сведена к минимуму, поскольку $\eta_{\text{под.}}$ и $P_{\text{шток}}$ обратно пропорциональны (2.11).

2.2 Исследование влияния уравниваемости установок ШГН на потребление электроэнергии

Энергоэффективность технологических процессов является важным фактором конкурентоспособности для всех промышленных предприятий. Нефтедобывающие предприятия уделяют вопросам энергоэффективности особое внимание, так как цены на их продукцию – углеводородное сырье – последнее десятилетие являются нестабильными.

Электроприводы штанговых глубинных насосов работают в недогруженном режиме с циклически изменяющейся нагрузкой, что отрицательно влияет как на электрическую сеть, так и на сам двигатель. Улучшить режим работы электропривода ШГН позволяет его уравнивание, которое производится на основе ваттметрирования – измерения графиков активной мощности, потребляемой электродвигателем [99].

Поэтому проблема повышения сбалансированности (или уравнивания) установок ШГН является актуальной для нефтегазодобывающих предприятий.

Следует отметить, что кинематика установок ШГН такова, что во время спуска колонны штанг происходит подъем балансировочных грузов с накоплением в них потенциальной энергии. А во время подъема колонны штанг происходит спуск балансировочных грузов. Таким образом,

балансирующие грузы догружают электродвигатель во время спуска колонны штанг, и, разгружают его во время подъема колонны штанг и скважинной жидкости. Процесс регулирования грузов называется уравниванием или балансировкой установки ШГН.

График изменения во времени активной мощности, потребляемой электродвигателем установки ШГН, за несколько циклов качания, называется ваттметрограммой. Анализ ваттметрограмм является эффективным и распространенным способом мониторинга за работой скважинных насосных установок. Ваттметрограммы позволяют диагностировать целый ряд неисправностей наземного и подземного оборудования, таких как дефекты редуктора, подшипников станка-качалки, обрывы ремней, штанг и недостаточную уравнированность насосной установки.

При уравнивании стараются обеспечить равенство максимальных значений активной мощности, потребляемой электродвигателем, при подъеме (P_1) и спуске (P_2) колонны штанг (рисунок 2.3).

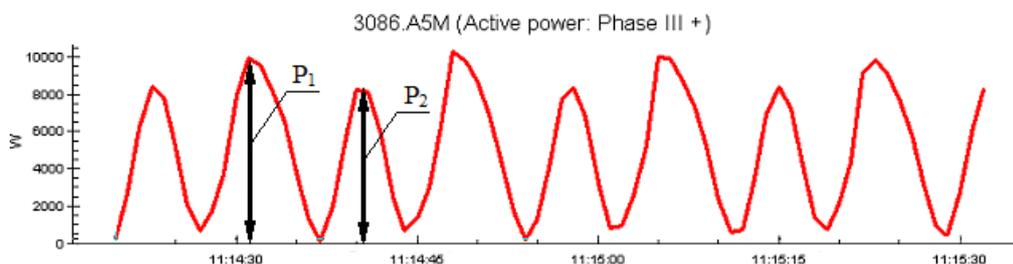


Рисунок 2.3 – Ваттметрограмма установки штангового глубинного насоса

Уровень сбалансированности установки ШГН оценивают при помощи коэффициента неуровненности, который определяется следующим образом [113]:

$$k = \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2}.$$

На практике часто уравнивание установок ШГН производят по значениям тока [113]:

$$k_i = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2},$$

где I_1 – максимальный ток при подъеме колонны штанг, А;

I_2 – максимальный ток при спуске колонны штанг, А.

Уравновешивание по току проводят по той причине, что у операторов на промысле часто отсутствуют приборы для измерения ваттметрограмм, а есть только мультиметры с токовыми клещами. Однако ток в течение цикла качания установки ШГН изменяется значительно меньше, чем активная мощность (рисунок 2.4), поэтому произвести качественную балансировку по току очень сложно. Из представленных на рисунке 2.4 синхронизированных токограммы и ваттметрограммы видно, что ток изменяется за цикл качания от 22,8 до 25,6 А (на 11 %), в то время как активная мощность изменяется с 1040 до 8000 Вт (на 87 %). Таким образом, балансировка установки ШГН по значениям активной мощности будет значительно точнее, чем балансировка по значениям тока.

Наиболее правильно было бы производить уравновешивание не по максимальным значениям токов или мощности, а по энергии, затрачиваемой при подъеме и спуске колонны штанг, то есть по интегралам активной мощности за время подъема и спуска [113]:

$$k_w = \frac{\int_{T_1} p dt - \int_{T_2} p dt}{\int_{T_1} p dt + \int_{T_2} p dt},$$

где p – мгновенное значение активной мощности, Вт;

T_1 – время подъема колонны штанг, с;

T_2 – время спуска колонны штанг, с.

Однако уравновешивание по энергии практически не используется, так как требует наличия специальных приборов, подключенных к измерительным трансформаторам тока, напряжения и датчику положения, определяющему начало хода вверх и вниз. Такие приборы могут быть интегрированы в состав интеллектуальных станций управления, но их количество пока очень мало.

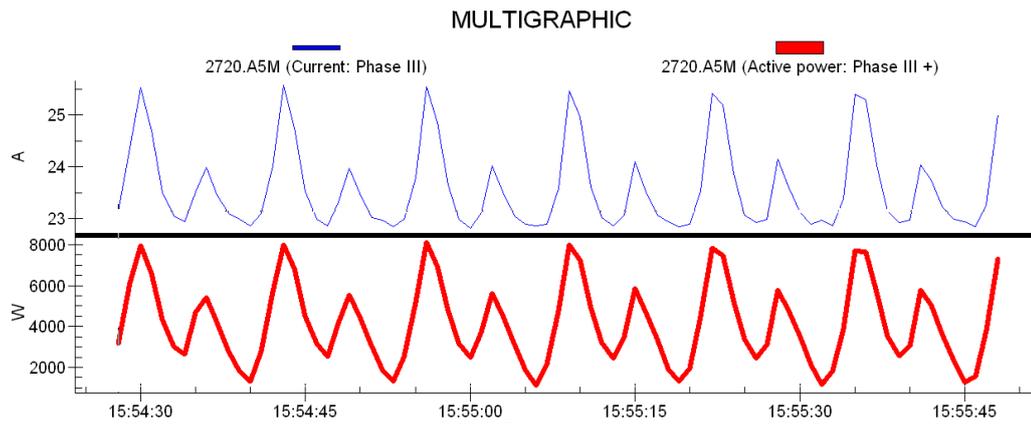


Рисунок 2.4 – Синхронизированные по времени токограмма и ваттметрограмма

Установлено, что недостаточная уравновешенность установок ШГН приводит к дополнительным потерям мощности. На рисунке 2.5 приводится диаграмма, устанавливающая связь между коэффициентом неуровненности k и непроизводительным перерасходом мощности.

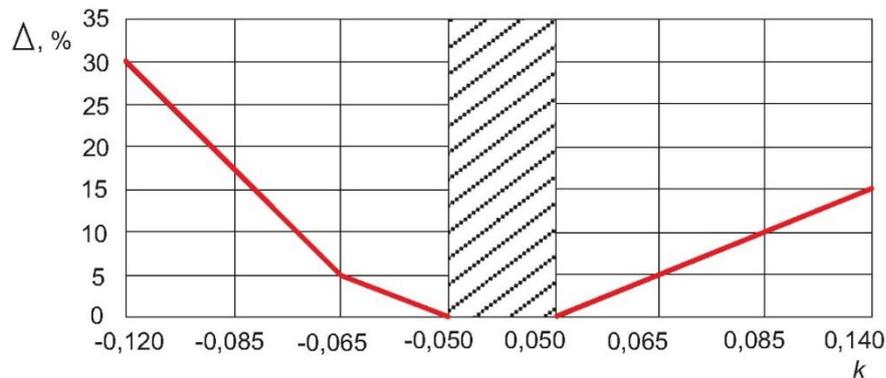


Рисунок 2.5 – Зависимость перерасхода мощности от коэффициента неуровненности установки штангового глубинного насоса

Как видно из рисунка 2.5, неуровненность значительно увеличивает потребление мощности насосной установки. Так, при коэффициенте неуровненности $k = 0,14$ перерасход мощности составит до 15 %, а при $k = -0,12$ перерасход мощности увеличится до 30 %. Если на установке ШГН установлены слишком большие грузы (двигатель потребляет при подъеме штанговой колонны мощность меньше, чем при спуске), то

коэффициент неуравновешенности принимает отрицательные значения. При этом потери мощности почти в два раза превышают потери при положительном значении коэффициента неуравновешенности.

Если коэффициент неуравновешенности находится в пределах от минус 0,05 до +0,05, то насосная установка считается уравновешенной. И дополнительные потери мощности в этом случае можно не учитывать.

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 уравновешивания.

Ваттметрограммы некоторых скважин приведены на рисунках 2.6-2.9.

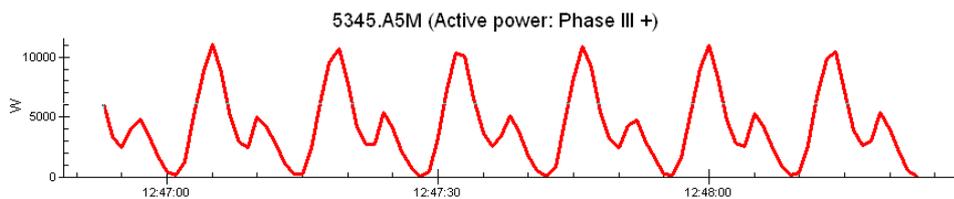


Рисунок 2.6 – Ваттметрограмма с коэффициентом неуравновешенности

$$k = -0,32$$

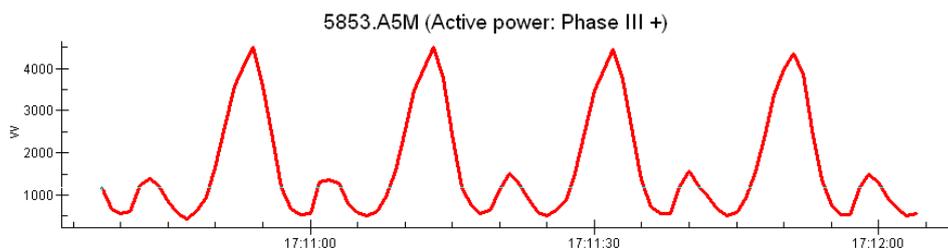


Рисунок 2.7 – Ваттметрограмма с коэффициентом неуравновешенности

$$k = -0,53$$

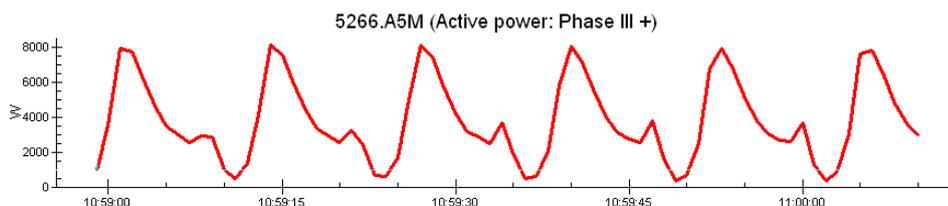


Рисунок 2.8 – Ваттметрограмма с коэффициентом неуравновешенности

$$k = 0,39$$

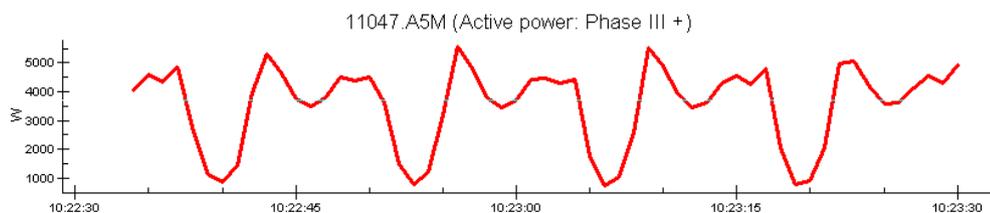


Рисунок 2.9 – Ваттметриграмма с коэффициентом неуровновешенности
 $k = 0,11$

Результаты проведенного исследования сбалансированности скважин, эксплуатируемых ШГН, приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты исследования сбалансированности скважин

Диапазон коэффициента неуровновешенности	Доля скважин, %
-1,0... -0,5	33
-0,5 ... -0,2	27
-0,2 ... -0,1	13
-0,1 ... -0,05	2
-0,05 ... 0,05	2
0,05 ... 0,1	4
0,1 ... 0,2	13
0,2 ... 0,5	4
0,5 ... 1,0	2

На рисунке 2.10 приведена диаграмма уравновешенности фонда скважин. Как видно из диаграммы, сбалансированными можно считать лишь 2% скважин, имеющих коэффициент неуровновешенности от минус 0,05 до +0,05.

При этом было зафиксировано минимальное отрицательное значение коэффициента неуровновешенности $k = -0,85$, а максимальное положительное значение $k = 0,74$. Ваттметриграммы скважин с коэффициентами неуровновешенности $k = -0,85$ и $k = 0,74$ приведены на рисунках 2.11-2.12 соответственно.



Рисунок 2.10 – Диаграмма уравновешенности фонда скважин

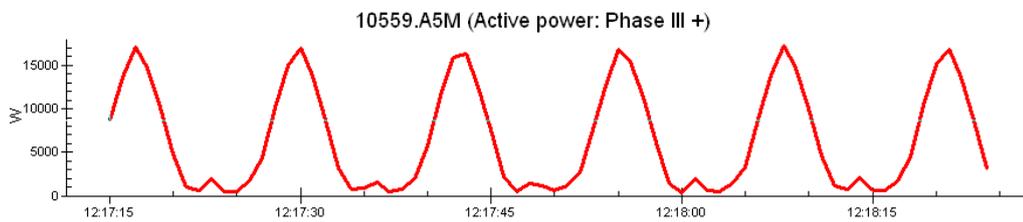


Рисунок 2.11 – Ваттметрограмма с коэффициентом неуровновешенности

$$k = -0,85$$

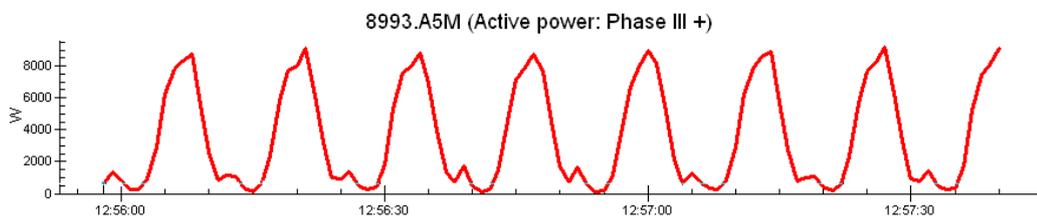


Рисунок 2.12 – Ваттметрограмма с коэффициентом неуровновешенности

$$k = 0,74$$

75% скважин имеют отрицательный коэффициент неуровновешенности, то есть мощность, потребляемая электродвигателем на подъем колонны штанг и скважинной жидкости, меньше, чем мощность, потребляемая на подъем уравновешивающих грузов. При этом потери выше, чем при таком же по модулю, но положительном значении коэффициента неуровновешенности.

Выполненные расчеты продемонстрировали, что при осуществлении балансировки исследованных скважин суммарная мощность, потребляемая их

электроприводами, уменьшится более чем в два раза. Таким образом, балансировка установок ШГН способна существенно снизить потребление электроэнергии скважинных насосных установок при сохранении объемов добычи на прежнем уровне.

Были проведены расчеты потенциала снижения потребляемой мощности в результате выполнения мероприятий по уравниванию установок ШГН.

Для этого определяется активная энергия за период качания установки ШГН [93]:

$$W = \int_0^T p dt,$$

где p – мгновенное значение активной мощности, Вт;

T – период качания установки ШГН, с.

Затем находится эффективное значение активной мощности за период качания [93]:

$$P_{ef} = \frac{W}{T} = \frac{\int_0^T p dt}{T}.$$

Далее при помощи зависимости, приведенной на рисунке 2.5, определяется перерасход мощности Δ при данном значении коэффициента неуравновешенности k .

Находится эффективное значение активной мощности, которое будет потребляться электроприводом установки ШГН после уравнивания [105]:

$$P'_{ef} = \frac{P_{ef} \cdot 100\%}{100 + \Delta},$$

где P'_{ef} – эффективное значение активной мощности после уравнивания, Вт;

Δ – перерасход мощности из-за недостаточной балансировки установки, %.

Результаты расчетов потенциала снижения потребляемой мощности в результате уравнивания установок ШГН приведены в таблице 2.2. В

таблице 2.2 обозначены: P_{ef} – эффективная мощность УШГН до уравнивания, P'_{ef} – эффективная мощность УШГН после уравнивания.

Таблица 2.2 – Результаты расчетов потенциала снижения потребляемой мощности в результате уравнивания установок скважинных штанговых насосов

Номер скважины	P_{ef} , кВт	Коэффициент неуровненности k	P'_{ef} , кВт	Снижение потребляемой мощности, %
1	5,54	0,065	5,29	4,76
2	7,27	-0,12	5,59	23,08
3	6,01	-0,06	5,78	3,85
4	6,81	-0,085	5,77	15,25
5	2,93	0,14	2,55	13,04
6	9,62	0,05	9,62	0,00
7	8,92	0,085	8,11	9,09
8	7,62	-0,075	6,87	9,91
9	6,41	-0,11	5,05	21,26
10	18,44	-0,06	17,74	3,85

Как видно из таблицы 2.2, если произвести балансировку проанализированных скважин, то потребляемая их электроприводами мощность снизится на (5 – 20) %. Таким образом, балансировка установок ШГН способна существенно снизить потребление электроэнергии скважинных насосных установок при сохранении объемов добычи на прежнем уровне.

На основании проведенного исследования могут быть сделаны следующие выводы:

1. Ваттметрирование является эффективным методом контроля состояния наземного оборудования и степени сбалансированности установок ШГН.

2. Анализ ваттметрограмм скважин действующего фонда месторождений Западной Сибири показал, что только 2% установок ШГН могут считаться сбалансированными (имеющими коэффициент неуравновешенности от минус 0,05 до +0,05). При этом 35% скважинных насосных установок имеют коэффициент неуравновешенности менее минус 0,5 или более +0,5.

3. Если произвести балансировку установок ШГН всех рассмотренных скважин, то потребление ими электроэнергии снизится более чем в 2 раза. Это позволяет считать балансировку установок ШГН одним из наиболее эффективных энергосберегающих мероприятий для нефтедобывающих предприятий.

4. Сбалансированность или уравновешенность установок скважинных штанговых насосов может оцениваться по значениям тока, активной мощности, потребляемой за полупериоды электроэнергии, либо по скорости или времени движения точки подвеса штанг.

5. Недостаточная сбалансированность установок скважинных штанговых насосов вызывает не только перерасход электроэнергии, но также приводит к работе электродвигателя в недогруженном режиме с низкими значениями коэффициента мощности и коэффициента полезного действия.

2.3 Разработка модели для получения расчетной динамограммы из массива измеренных данных ваттметрограммы

Для предотвращения аварийных ситуаций, вызванных неисправностью внутрискважинного и наземного оборудования, необходим постоянный контроль состояния нефтедобывающего оборудования. Также необходимо диагностирование состояния оборудования. Наиболее эффективными методами диагностирования оборудования скважин с штанговыми глубинными насосами являются анализ форм кривых ваттметрограмм и

динамограмм. Данные методы называются ваттметрирование и динамометрирование соответственно.

Форма динамограммы соответствует зависимости изменения нагрузки на полированный шток от его перемещения за цикл качания. По ваттметрограмме происходит процесс контроля и диагностирования наземного оборудования, в том числе и электропривода ШГН.

Ваттметрограммы и динамограммы между собой связаны сложными нелинейными соотношениями, для анализа которых требуется информация о значительном количестве параметров скважины и насосного оборудования.

В данном параграфе предложена методика получения динамограммы из массива ваттметрограммы и составлена модель данных действий в пакете моделирования MatLab Simulink.

В первую очередь необходимо рассмотреть кинематическую схему станка-качалки, представленную на рисунке 2.13.

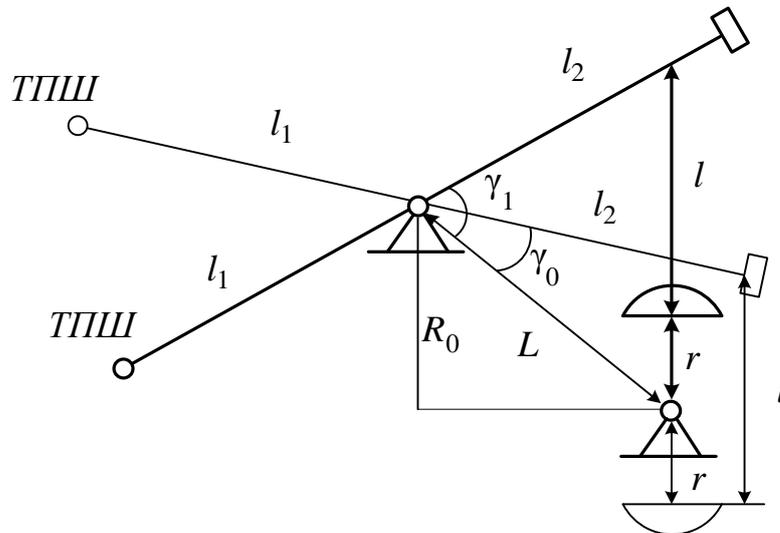


Рисунок 2.13 – Кинематическая схема станка-качалки при комбинированном уравновешивании

Для определения углов наклона линии шатун-кривошип к полюсной линии воспользуемся следующими формулами [97]:

$$\gamma_1 = \arccos \frac{1 + \left(\frac{l_2}{R_0}\right)^2 - \left(\frac{l+r}{R_0}\right)^2}{2 \cdot \frac{l_2}{R_0}}; \quad (2.16)$$

$$\gamma_0 = \arccos \frac{1 + \left(\frac{l_2}{R_0}\right)^2 - \left(\frac{l-r}{R_0}\right)^2}{2 \cdot \frac{l_2}{R_0}}, \quad (2.17)$$

где b_k – длина заднего плеча балансира;

P_0 – расстояние до полюса;

r – длина кривошипа.

Угол размаха балансира вычисляется по формуле:

$$\delta_{\max} = \gamma_1 - \gamma_0. \quad (2.18)$$

Модель определения углов наклона линии шатун-кривошип к полюсной линии и угла размаха балансира представлена на рисунке 2.14.

Длину хода точки подвеса штанг (ТПШ) можно вычислить по формуле [33]:

$$S_0 = a_k \cdot \delta_{\max}, \quad (2.19)$$

где a_k – длина переднего плеча балансира.

Принимаем, что ТПШ совершает периодические во времени возвратно-поступательные перемещения по гармоническому закону [33]:

$$S(t) = \frac{S_0}{2} \cdot (1 - \cos(2\pi\omega t)), \quad (2.20)$$

где ω – частота колебаний.

Тогда скорость и ускорение перемещения точки подвеса штанг будут описываться следующими выражениями:

$$v(t) = \frac{\omega \cdot S_0}{2} \cdot \sin(2\pi\omega t); \quad (2.21)$$

$$a(t) = \frac{\omega^2 \cdot S_0}{2} \cdot \cos(2\pi\omega t). \quad (2.22)$$

На рисунке 2.15 представлена модель вычисления перемещения, скорости и ускорения ТПШ, основанная на выражениях (2.20) – (2.22)

Потребляемая ЭД мощность находится по следующей формуле [24]:

$$P(t) = P_{\text{ХХ}} + \frac{\omega_{\text{ЭД}}}{\eta_{\text{ЭД}} \cdot \eta_{\text{пер.}} \cdot n_{\text{ред.}} \cdot n_{\text{КП}}} \cdot M_{\text{кр.}}(t), \quad (2.23)$$

где $P_{\text{ХХ}}$ – мощность холостого хода;

$\omega_{\text{ЭД}}$ – угловая скорость ротора ЭД;

$\eta_{\text{ЭД}}$ – коэффициент полезного действия ЭД;

$\eta_{\text{пер.}}$ – коэффициент полезного действия передаточного механизма;

$n_{\text{ред.}}$ – передаточное число редуктора;

$n_{\text{КП}}$ – передаточное число клиноременной передачи.

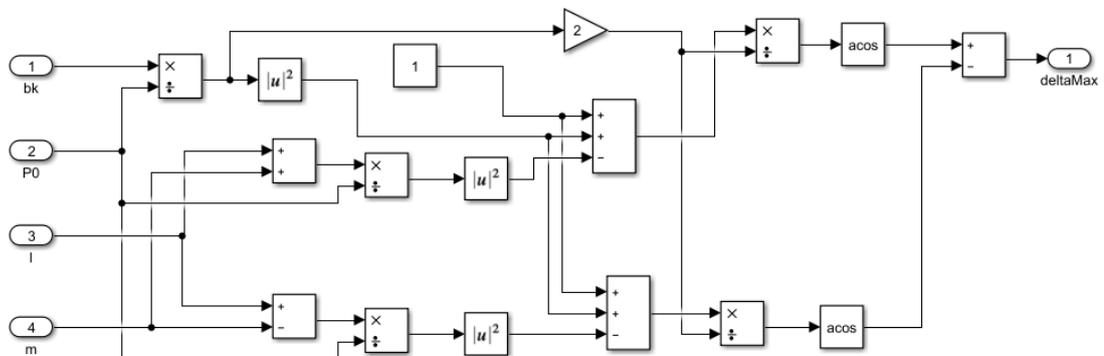


Рисунок 2.14 – Модель вычисления угла размаха балансира

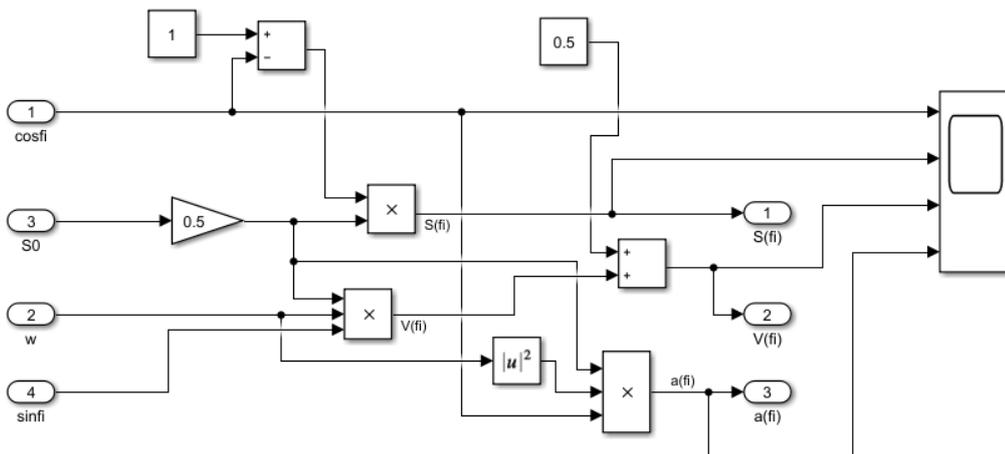


Рисунок 2.15 – Модель вычисления перемещения,
скорости и ускорения ТПШ

Угловая скорость ротора ЭД равна:

$$\omega_{\text{ЭД}} = \omega \cdot n_{\text{ред.}} \cdot n_{\text{КП}}. \quad (2.24)$$

Момент на кривошипном валу редуктора вычисляется по формуле:

$$M_{\text{кр.}}(t) = T(t) \cdot r, \quad (2.25)$$

где $T(t)$ – касательное усилие на валу ЭД.

Величина касательного усилия на вал ЭД описывается следующим выражением [24]:

$$T(t) = \frac{a_k}{b_k} \cdot P_{\text{ТПШ}}(t) \cdot v(t) \cdot \frac{1}{\omega^2} - Q \cdot \frac{L_{\delta}}{b_k} \cdot \left(\cos\left(\frac{\delta_{\text{max}}}{2} - \delta\right) - \frac{L_{\delta}}{b_k} \cdot \frac{a(t)}{g} \right) - \frac{R}{r} \cdot Q_R \cdot \sin(2\pi\omega t), \quad (2.26)$$

где Q – вес сборки балансира;

Q_R – вес противовеса;

R – плечо противовеса;

L – расстояние от центра тяжести сборки балансира до оси вращения.

Подставив выражения (2.24) – (2.26) в выражение (2.23), получим:

$$P(t) = \frac{l_1}{l_2 \cdot \eta_{\text{ЭД}} \cdot \eta_{\text{пер.}}} \cdot P_{\text{ТПШ}}(t) \cdot v(t) - G_{\delta} \cdot \frac{L \cdot \omega \cdot l_{\delta,2}}{l_2 \cdot \eta_{\text{ЭД}} \cdot \eta_{\text{пер.}}} \cdot \left(\cos\left(\frac{\delta_{\text{max}}}{2} - \delta\right) - \frac{L \cdot a(t)}{l_2 \cdot g} \right) - \frac{\omega \cdot l_{\delta,2}}{\eta_{\text{ЭД}} \cdot \eta_{\text{пер.}}} \cdot G_{\delta,2} \cdot \sin(2\pi\omega t) + P_{\text{ХХ}}. \quad (2.27)$$

Расстояние от центра тяжести сборки балансира до оси вращения может быть найдено методом эквивалентного момента балансиров. Для этого необходимо учитывать вес балансира и вес балансирного противовеса:

$$Q = G + Q_{\delta}, \quad (2.28)$$

где G – вес балансира;

Q_{δ} – вес балансирного противовеса.

Расстояние от центра тяжести сборки балансира до оси вращения вычисляется по формуле [97]:

$$L_{\delta} = \frac{G \cdot (b_k - a_k) + 2 \cdot Q_{\delta} \cdot L}{2 \cdot (Q_{\delta} + G)}. \quad (2.29)$$

Мощность ЭД, затрачиваемая при движении противовеса, вычисляется по формуле:

$$P_R(t) = \frac{\omega \cdot l_{6.2}}{\eta_{\text{ЭД}} \cdot \eta_{\text{пер}}} \cdot G_{6.2} \cdot \sin(2\pi\omega t). \quad (2.30)$$

Мощность ЭД, затрачиваемая при движении сборки балансира, вычисляется по формуле:

$$P_{\delta}(t) = \frac{G_{6.} \cdot L \cdot \omega \cdot l_{6.2}}{l_2 \cdot \eta_{\text{ЭД}} \cdot \eta_{\text{пер}}} \cdot \left(\cos\left(\frac{\delta_{\text{max}}}{2} - \frac{S(t)}{l_1}\right) - \frac{L \cdot a(t)}{l_2 \cdot g} \right). \quad (2.31)$$

На рисунке 2.16 представлена модель, которая позволяет вычислить мощности ЭД, затрачиваемые на движение противовеса и сборки балансира.

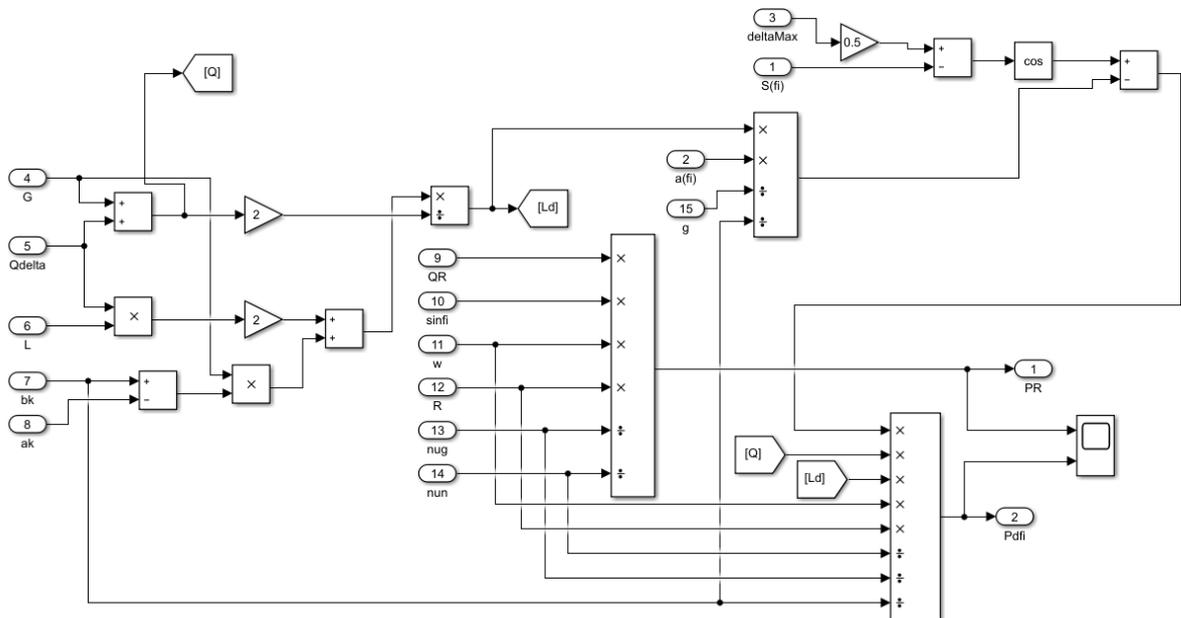


Рисунок 2.16 – Модель вычисления мощности ЭД, затрачиваемой при движении противовеса и сборки балансира

Преобразовав выражение (2.27) относительно $P_{\text{ТПШ}}(t)$ и подставив в него выражения (2.29) – (2.31), получим:

$$P_{\text{ТПШ}}(t) = \frac{P(t) - P_{\text{XX}} + P_{\delta}(t) + P_R(t)}{\frac{l_1}{l_2 \cdot \eta_{\text{ЭД}} \cdot \eta_{\text{пер}}} \cdot v(t)}. \quad (2.32)$$

Выражение (2.32) показывает связь между усилием нагрузки на полированный штوك от мощности, затрачиваемой электродвигателем в период цикла качания. Данное выражение позволяет сделать пересчет ваттметрограммы в динамограмму с учетом всех необходимых параметров скважины и ее оборудования.

Итоговая модель для преобразования ваттметрограммы в динамограмму представлена на рисунке 2.17.

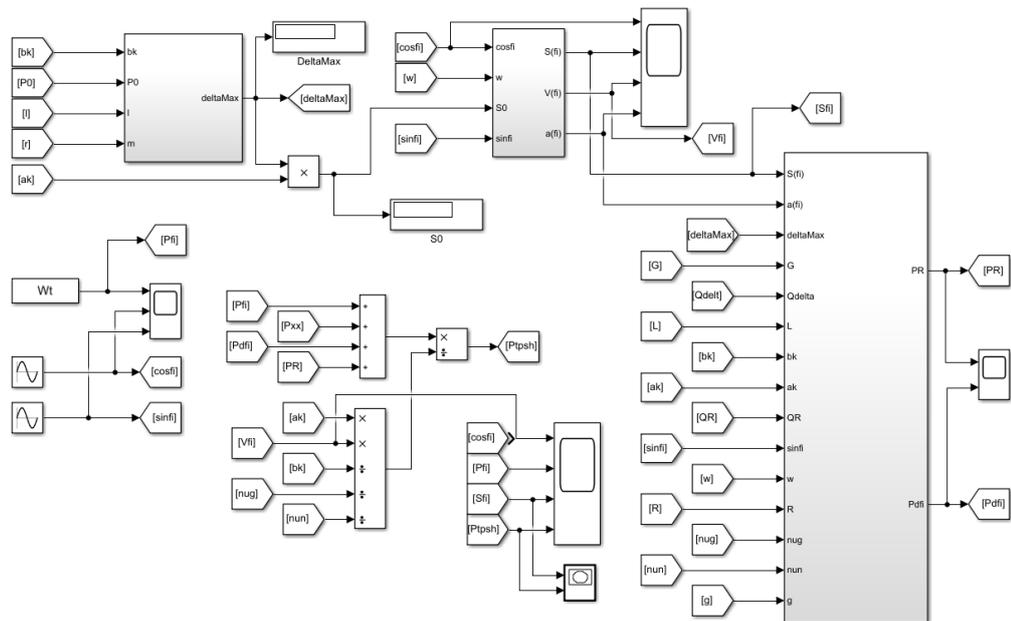


Рисунок 2.17 – MatLab-модель преобразования ваттметрограммы в динамограмму

На рисунке 2.18 представлена исходная ваттметрограмма. Данные для ваттметрограммы задаются с помощью блока From Workspace. Исходными данными были показания мощностей с эксплуатируемой скважины. Также для сравнения расчетных результатов с экспериментальными была запрошена динамограмма той же скважины за соответствующий цикл качания.

Результатом моделирования является динамограмма, полученная блоком XY Graf. На рисунке 2.19 представлена динамограмма, полученная по результатам моделирования.

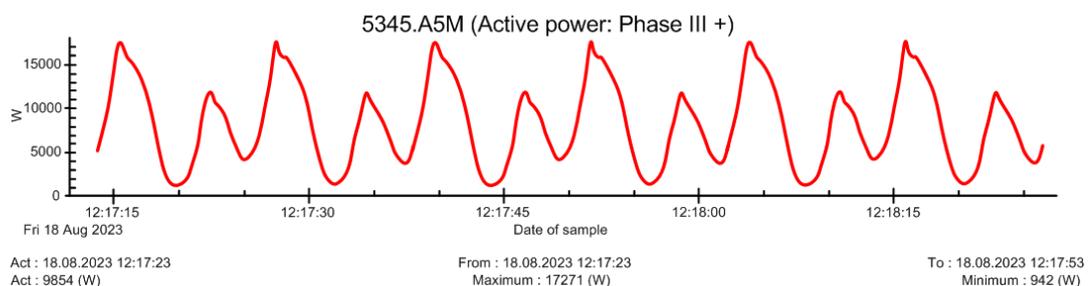


Рисунок 2.18 – Исходная ваттметрограмма

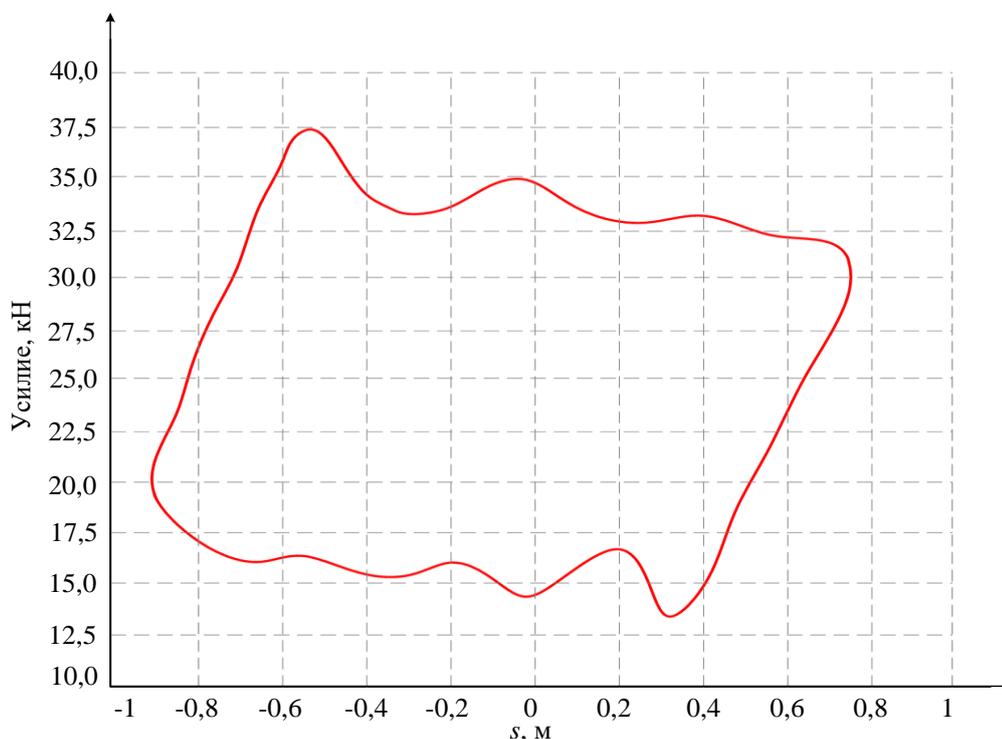


Рисунок 2.19 – Динамограмма, полученная по результатам моделирования

Полученная в ходе моделирования динамограмма сравнивались с измеренной динамограммой эксплуатируемой скважины, при этом погрешность не превысила 5 %. Из чего можно сделать вывод, что данная модель составлена корректно и может быть использована для пересчета ваттметрограмм в динамограммы.

2.4 Разработка и исследование компьютерной модели «ШГН – станок качалка» с учетом влияния изменения параметров балансирующего уравновешивающего контргруза на выходные параметры

Для того, чтобы имитировать влияние изменения параметров балансирующего уравновешивающего контргруза на выходные параметры УШГН, необходимо получить математическое описание усилий, действующих на головку балансира, которые напрямую зависят от переменных нагрузок на полированный шток.

В процессе эксплуатации УШГН (рисунок 2.20) на полированный шток действует динамическая нагрузка. Рассмотрим математическую модель штангового глубинного насоса, которую можно представить волновым уравнением продольных упругих колебаний стержня [66]:

$$\rho_s \cdot S_r \cdot \frac{d^2 u}{dt^2} = E \cdot S_r \cdot \frac{d^2 u}{dx^2} + f,$$

где $u(x,t)$ – перемещение фиксированной точки колонны штанг,

t – время;

E – модуль Юнга материала штанг;

ρ_s – плотность материала штанг;

x – Лагранжева координата по длине колонны штанг;

S_r – площадь поперечного сечения штанг;

f – удельная на единицу массы штанги внешняя сила.

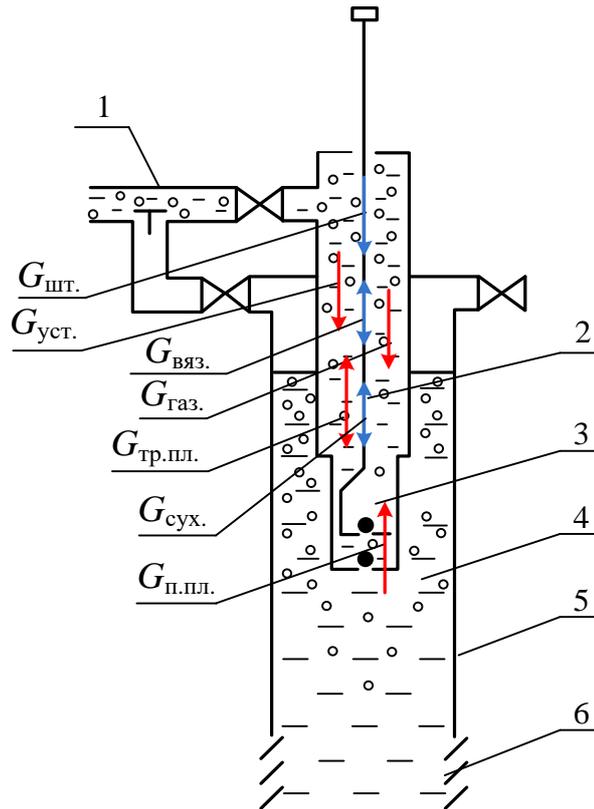


Рисунок 2.20 – Схема сил, действующих в ШГН в процессе работы

1 – выкидная линия, 2 – колонна насосных штанг, 3 – плунжерный насос, 4 – затрубное пространство, 5 – обсадная колонна, 6 – перфорационные отверстия

Модель, представленная на рисунке 2.21, учитывает влияние сил, действующих на штанги и на плунжер.

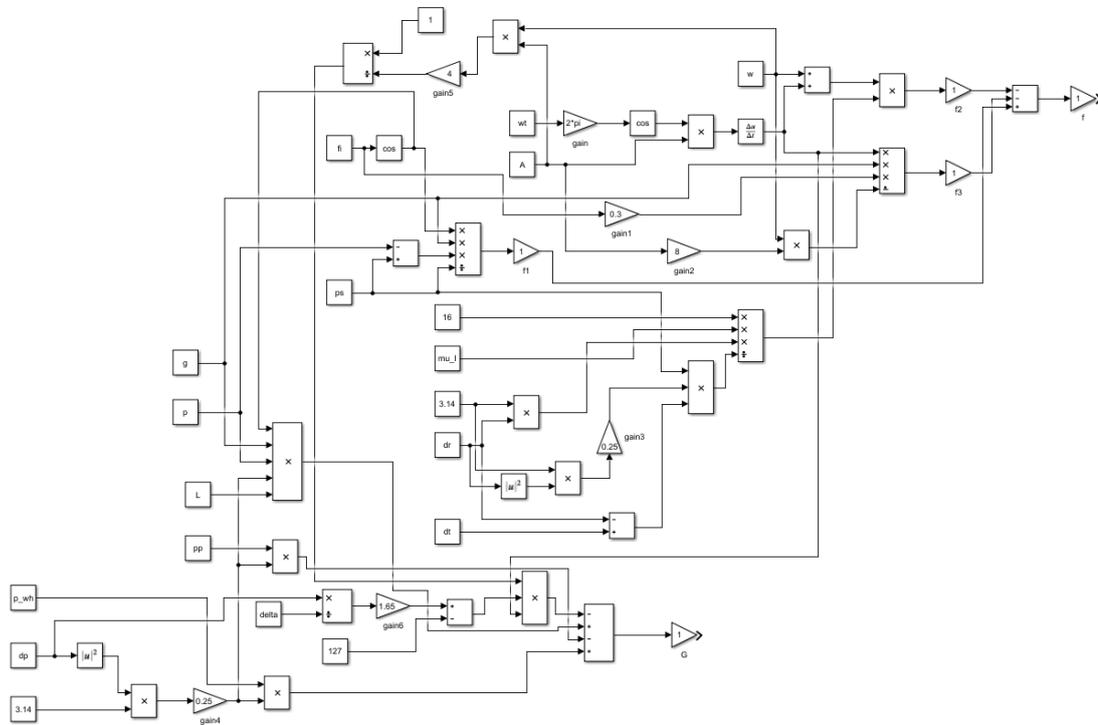


Рисунок 2.21 – Имитационная модель штангового глубинного насоса

На плунжер действуют: сила устьевого давления $G_{уст.}$, сила тяжести газожидкостной смеси $G_{газ.}$, сила трения в плунжерной паре $G_{тр.пл.}$ и сила давления жидкости в подплунжерном пространстве $G_{п.пл.}$. При этом $G_{уст.}$ и $G_{газ.}$ постоянные и всегда направлены вниз. Сила давления жидкости в подплунжерном пространстве $G_{п.пл.}$ переменна и направлена вверх. Сила трения в плунжерной паре $G_{тр.пл.}$ переменная и направлена противоположно движению плунжера.

На колонну штанг действуют: сила тяжести насосных штанг в жидкости $G_{шт.}$, сила вязкого трения $G_{вяз.}$ и сила сухого трения $G_{сух.}$. При этом $G_{вяз.}$ и $G_{сух.}$ переменны и направлены противоположно движению штанг, а сила тяжести насосных штанг $G_{шт.}$ постоянна и направлена вниз.

Сила устьевого давления находится из выражения [41]:

$$G_{уст.} = p_{уст.} \cdot \frac{\pi \cdot d_{пл.}^2}{4},$$

где $p_{уст.}$ – давление на устье;

$d_{пл.}$ – диаметр плунжера.

Силу тяжести насосных штанг в жидкости можно вычислить [41]:

$$G_{ум.} = (\rho_s - \rho) \cdot g \cdot \cos \varphi \cdot \frac{\pi \cdot d_{ум.}^2}{4} \cdot L,$$

где L – длина штанговой колонны;

$d_{шт.}$ – диаметр насосных штанг;

ρ – средняя плотность газожидкостной смеси;

φ – угол наклона скважины к вертикали.

Сила тяжести газожидкостной смеси находится по выражению [41]:

$$G_{газ.} = \rho \cdot g \cdot \cos \varphi \cdot \frac{\pi \cdot d_{пл.}^2}{4} \cdot L.$$

Сила вязкого трения [39]:

$$G_{вяз.} = -\frac{16 \cdot \mu_l \cdot \pi \cdot d_{ум.}}{d_t - d_{ум.}} \cdot \int_0^L \left(\frac{du}{dt} + \omega \right) dx,$$

где μ_l – коэффициент динамической вязкости жидкости;

d_t – диаметр НКТ;

ω – скорость газожидкостного потока в трубах.

Сила сухого трения находится из выражения [41]:

$$G_{сух.} = -\frac{1}{8 \cdot A \cdot \omega} \cdot \mu_{fr} \cdot \varphi \cdot \rho_s \cdot g \cdot \frac{\pi \cdot d_{ум.}^2}{4} \cdot \int_0^L \frac{du}{dt} dx,$$

где μ_{fr} – коэффициент трения штанг о трубы.

Сила трения в плунжерной среде [41]:

$$G_{мп.пл.} = -\frac{1}{4 \cdot A \cdot \omega} \cdot \left(1,65 \cdot \frac{d_{пл.}}{\delta} - 127 \right) \cdot \frac{du(L,t)}{dt},$$

где δ – зазор между плунжером и цилиндром.

Сила давления жидкости в подплунжерном пространстве вычисляется из выражения [41]:

$$G_{н.пл.} = -p_{н.пл.} \cdot \frac{\pi \cdot d_{н.пл.}^2}{4},$$

где $p_{н.пл.}$ – давление в подплунжерном пространстве, которое определяется с учетом уравнения сохранения массы газожидкостной смеси для несжимаемой жидкости и совершенного газа.

За основу математической модели станка-качалки взяты выражения, представленные в подразделе 2.3.

На рисунке 2.22 представлена кинематическая схема станка-качалки с комбинированным уравновешиванием.

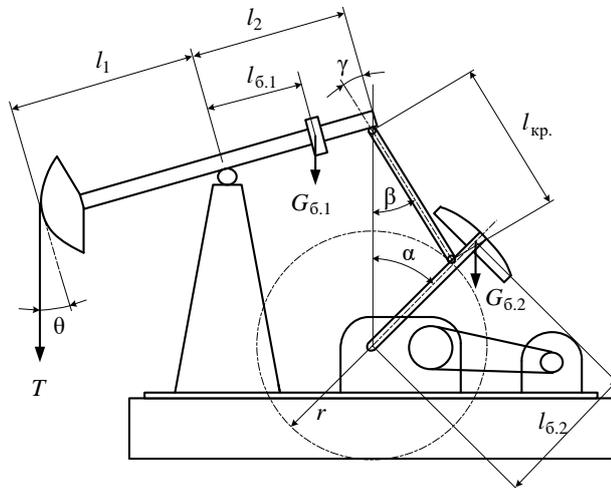


Рисунок 2.22 – Кинематическая схема станка-качалки с комбинированным уравновешиванием

Расчет усилий в шатуне базируется на уравнении моментов сил относительно оси вращения балансира [74]:

$$(T \cdot l_1 - G_{6.1} \cdot l_{6.1}) \cdot \cos \theta - T_{кр.} \cdot l_2 \cdot \cos \gamma = 0.$$

где T – нагрузка на головку балансира;

T_p – усилие в шатуне кривошипно-шатунного механизма;

l_1 – длина переднего плеча балансира;

l_2 – длина заднего плеча балансира;

l_b – длина плеча контргруза;

G_b – вес контргруза.

Момент на кривошипном валу находится по выражению [74]:

$$M_c = \left(T_{кр.} \cdot \sin(\alpha + \beta) - G_{6,2} \cdot \frac{R_{6,2}}{r} \cdot \sin(\alpha) \right) \cdot r.$$

где R_c – радиус кривошипа;

G_c – вес кривошипного уравновешивающего контргруза.

Полученная компьютерная модель «ШГН – станок качалка» позволяет имитировать влияние изменения параметров балансирного уравновешивающего контргруза на выходные параметры УШГН. Результаты моделирования представлены в таблице 2.3 и на рисунках 2.23 и 2.24.

Таблица 2.3 – Результаты моделирования балансировки УШГН

Время t, c	Момент на кривошипе $M, кН·м$				
	$k = 0,23$	$k = 0,11$	$k = 0,02$	$k = - 0,12$	$k = - 0,25$
0	11,1	10,4	10,3	10,5	10,9
1	37,2	30,1	24,6	23,5	21,7
2	34,8	33,2	29,3	26,0	24,8
3	22,1	20,0	18,3	14,4	15,1
4	1,8	2,9	2,9	4,4	7,0
5	3,9	5,1	5,9	8,6	10,9
6	26,0	29,1	31,5	34,2	38,7
7	50,3	18,5	21,5	19,4	21,2
8	7,1	4,9	3,8	2,5	1,1
9	24,2	20,2	17,5	17,3	14,8
10	37,3	34,5	31,2	29,4	26,5
11	28,0	25,1	23,2	21,5	19,3
12	8,1	6,2	6,0	8,1	11,5
13	2,5	2,4	2,6	4,8	6,4
14	13,2	16,4	20,1	14,3	28,8
15	23,4	24,5	27,0	28,7	33,2
16	10,3	10,4	9,8	9,7	9,9

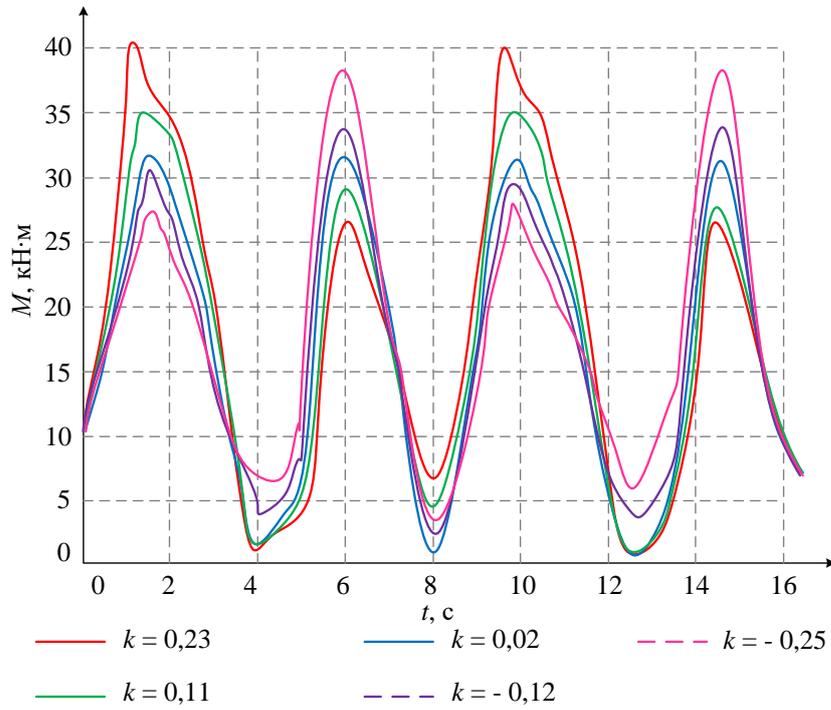


Рисунок 2.23 – Момент на кривошипе при различных коэффициентах неуровнешенности

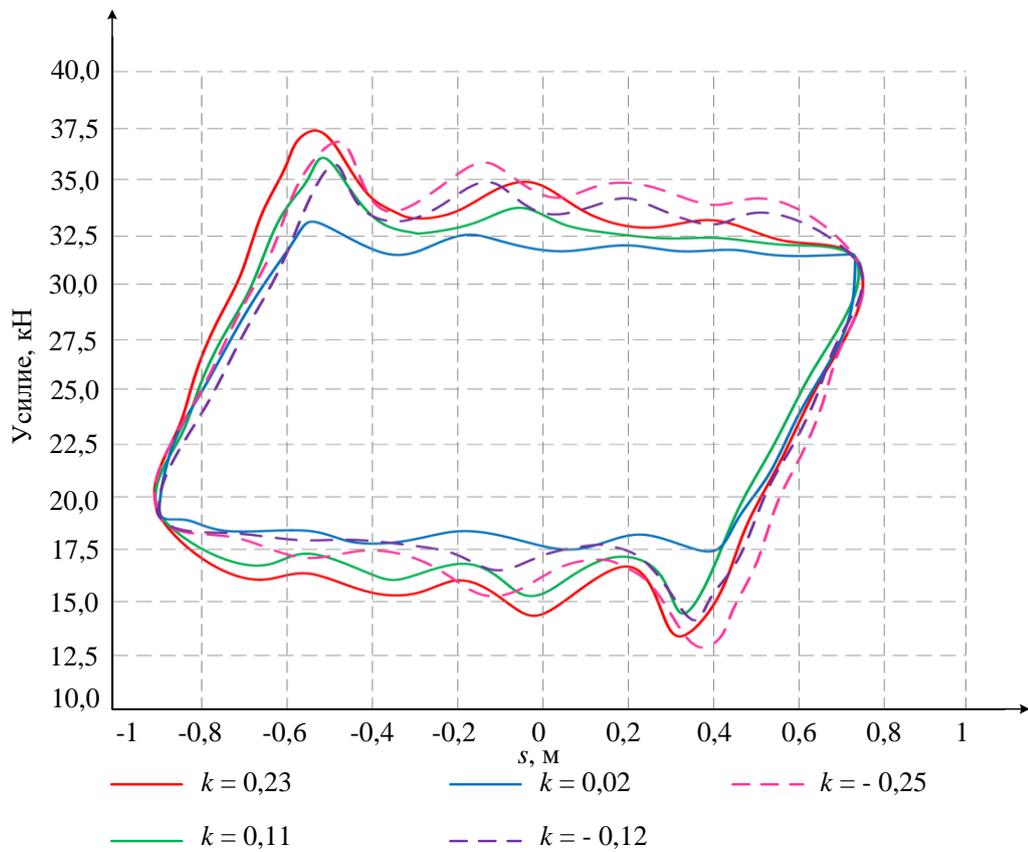


Рисунок 2.24 – Расчетные динамограммы при различных коэффициентах неуровнешенности

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

Выводы по главе 2:

1. Анализ ваттметрограмм скважин действующего фонда месторождений Западной Сибири показал, что только 2% установок ШГН могут считаться сбалансированными (имеющими коэффициент неуровненности от минус 0,05 до +0,05). При этом 35% скважинных насосных установок имеют коэффициент неуровненности менее минус 0,5 или более +0,5.

2. Как показали проведенные исследования, балансировка рассмотренной группы из 10 скважин, эксплуатируемых установками ШГН, снизит потребление ими электроэнергии более чем в 2 раза. Это позволяет считать балансировку установок ШГН одним из наиболее эффективных энергосберегающих мероприятий для нефтедобывающих предприятий.

3. Сбалансированность или уравнированность установок скважинных штанговых насосов может оцениваться по значениям тока, активной мощности, потребляемой за полупериоды электроэнергии, либо по скорости или времени движения точки подвеса штанг. Однако наиболее целесообразно производить балансировку по измеренным ваттметрограммам, так как ваттметрограмму достаточно просто измерить, датчики ваттметрирования очень надежны, а обработка массива данных может быть осуществлена прямо в скважинном контроллере, имеющем небольшую вычислительную мощность.

4. Недостаточная сбалансированность установок скважинных штанговых насосов вызывает не только перерасход электроэнергии, но также

приводит к работе электродвигателя в недогруженном режиме с низкими значениями коэффициента мощности и коэффициента полезного действия.

5. Полученная компьютерная модель «ШГН – станок качалка» позволяет имитировать влияние изменения параметров балансирующего контргруза на выходные параметры УШГН. Разработанная модель может быть использована при отладке интеллектуальных станций управления с функцией автоматического уравнивания балансирующих грузов.

6. Полученные в ходе моделирования динамограммы сравнивались с измеренными динамограммами эксплуатируемых скважин. Расчетные динамограммы отличались от измеренных не более чем на 5 %. Из чего можно сделать вывод, что данная модель составлена корректно и может быть использована для пересчета ваттметрограмм в динамограммы.

Глава 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕНТИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ УСТАНОВКИ ШГН

3.1 Разработка усовершенствованной методики расчета параметров вентильного двигателя для привода УШГН

Предлагаемое решение представляет собой привод без клиноременной передачи для установок штанговых насосов, состоящий из вентильного двигателя, ротор которого соединен с первичным валом редуктора, а статор крепится к его корпусу (рисунок 3.1). Для повышения качества управления ВД в состав системы электропривода вводятся датчик положения кривошипа и датчик положения ротора ВД, что позволяет увеличить эффективность работы электропривода.

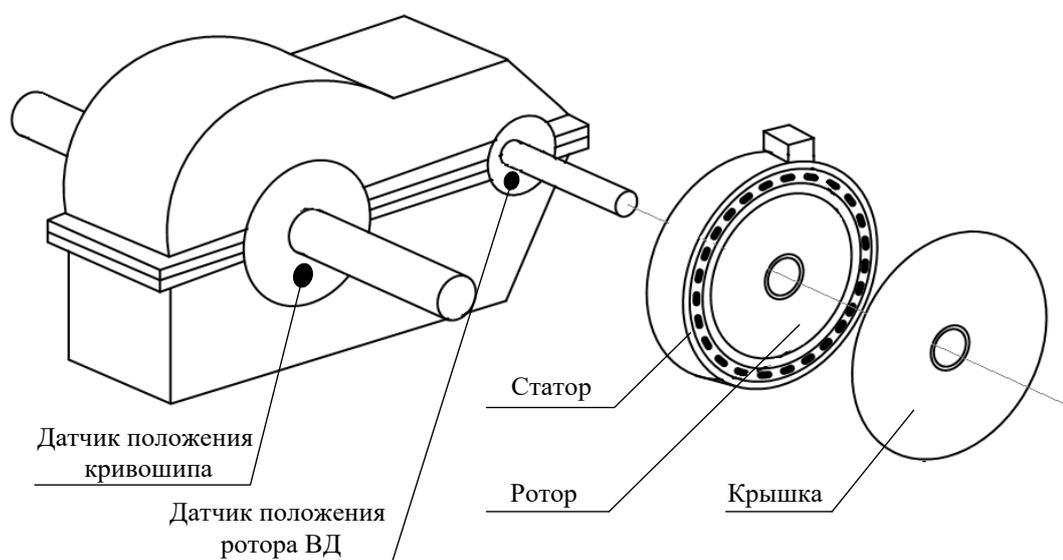


Рисунок 3.1 – Вентильный двигатель для УШГН

Предлагается рассмотреть возможный эффект при замене асинхронного двигателя на вентильный двигатель. В качестве исследуемого объекта берется УШГН, оборудованная асинхронным двигателем марки 5A225M6, технические параметры которого представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Паспортные данные АД марки 5A225M6

Наименование и обозначение	Значение
Номинальная мощность $P_{\text{ном.}}$, кВт	37
Номинальное напряжение $U_{\text{ном.}}$, В	380
Номинальный ток $I_{\text{ном.}}$, А	73,1
Номинальная частота вращения $n_{\text{ном.}}$, об/мин	980
Номинальный момент, Н·м	360
Кратность максимального момента $M_{\text{max}}/M_{\text{ном.}}$, о.е.	2,5
Коэффициент мощности $\cos \varphi$, о.е.	0,84
Коэффициент полезного действия η , о.е.	0,915

При исключении клиноременной передачи, когда ВД устанавливается на редуктор станка-качалки, следует учитывать более высокую кратковременную перегрузочную способность. Руководствуясь техническими условиями, для вентильного двигателя кратность максимального момента допускается не менее пятикратной от длительно допустимого момента или номинального $M_{\text{ном.}}$.

Таким образом, при замене АД, вентильный двигатель должен обеспечивать длительно допустимый момент $M = 180 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Расчет параметров вентильного двигателя проводится по методике, описанной в [48], при этом учитываются характеристики приводного механизма и конструктивные особенности ВД

Диаметр расточки статора ВД [16]:

$$D_i = \sqrt{\frac{2 \cdot M_{\text{ном.}}}{\pi \cdot a_{\delta} \cdot k_B \cdot k_{\text{об.}} \cdot A \cdot l_{\delta} \cdot B_{\text{дном.}}}}, \quad (3.1)$$

где $M_{\text{ном.}}$ – номинальный момент ЭД;

a_{δ} – коэффициент полюсного перекрытия;

k_B – коэффициент формы поля;

$k_{\text{об.}}$ – обмоточный коэффициент;

A – электромагнитная нагрузка;

l_{δ} – активная длина магнитопровода;

$B_{\text{ном.}}$ – максимальная индукция магнитного поля в воздушном зазоре при номинальной нагрузке.

Электродвижущая сила фазы обмотки статора ВД описывается выражением [16]:

$$E_{1\phi.} = 4 \cdot k_B \cdot k_{\text{об.}} \cdot w_1 \cdot \frac{p \cdot n_2}{60} \cdot B_{\delta 0} \cdot l_{\delta} \cdot \frac{a_{\delta} \cdot \pi \cdot D_{\text{н.2}}}{2 \cdot p}, \quad (3.2)$$

где w_1 – число последовательных витков в фазе обмотки;

p – число пар полюсов;

$B_{\delta 0}$ – магнитная индукция в воздушном зазоре в режиме ХХ,

$D_{\text{н.2}}$ – наружный диаметр ротора магнита.

Полезная мощность на валу вентильного двигателя [48]:

$$P_2 = \frac{\eta \cdot \cos \varphi \cdot m}{k_E} \cdot E_{1\phi.} \cdot I_{1\phi.}, \quad (3.3)$$

где k_E – отношение ЭДС обмотки статора к номинальному фазному напряжению;

m – количество фаз ЭД;

η – КПД ЭД;

$\cos \varphi$ – коэффициент мощности ЭД;

$I_{1\phi.}$ – ток фазы статора ЭД.

Учитывая, что момент на валу ЭД прямо пропорционален мощности на валу, из выражений (3.2) и (3.3) следует, что данные параметры также пропорциональны току в обмотке статора, количеству витков в обмотке и индукции магнитного поля в воздушном зазоре.

На рисунке 3.2 показана энергетическая диаграмма вентильного двигателя.

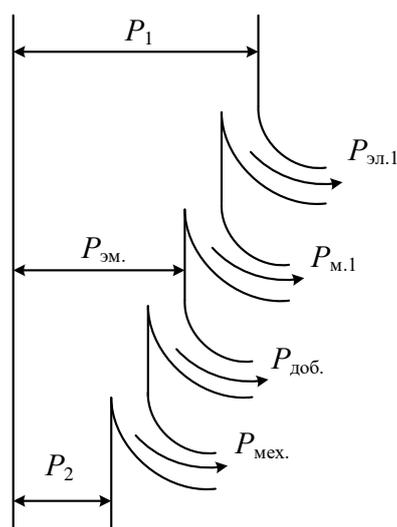


Рисунок 3.2 – Энергетическая диаграмма ВД

Электрические потери в обмотке статора определяются по формуле [48]:

$$P_{эл.} = m \cdot I_{1\phi}^2 \cdot r_1 \cdot 10^{-3}, \quad (3.4)$$

где r_1 – активное сопротивление фазы обмотки статора;

Магнитные потери в зубцах статора описываются выражением [48]:

$$P_{z1} = 1,7 \cdot p_{1/50} \cdot B_{z1}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{z1} \cdot 10^{-3}, \quad (3.5)$$

где $p_{1/50}$ – удельные потери для стали при $B = 1$ Тл и $f = 50$ Гц,

B_{z1} – индукция в сечении зубца;

m_{z1} – масса зубцов статора;

f – частота питающей сети.

Магнитные потери в ярме сердечника статора могут быть найдены выражением [48]:

$$P_{a1} = 1,3 \cdot p_{1/50} \cdot B_{a1}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{a1} \cdot 10^{-3}, \quad (3.6)$$

где B_{a1} – индукция в ярме статора;

m_{a1} – масса ярма статора.

Добавочные потери при нагрузке находятся по формуле [48]:

$$P_{доб.} = 0,005 \cdot P_{ном.} \cdot 10^{-3}. \quad (3.7)$$

Потери в подшипниках описываются по формуле [48]:

$$P_{\text{трн.}} = k_m \cdot F_{\text{трн.}} \cdot \omega, \quad (3.8)$$

где k_m – коэффициент трения;

$F_{\text{трн.}}$ – нормальная сила реакции в подшипнике;

ω – частота вращения.

Потери на трение вращающихся частей о воздух могут быть определены выражением [48]:

$$P_{\text{трв.}} = C_{\text{трв.}} \cdot \pi \cdot D_{\text{н.2}} \cdot \omega^3 \cdot l_1, \quad (3.9)$$

где l_1 – длина поверхности трения;

$C_{\text{трв.}}$ – плотность среды.

Механические потери складываются из потерь в подшипниках и потерь на трение вращающихся частиц о воздух:

$$P_{\text{мех.}} = P_{\text{трн.}} + P_{\text{трв.}}. \quad (3.10)$$

Полные потери в электрической машине определяются выражением:

$$\sum P = P_{\text{эл.}} + P_{z1} + P_{a1} + P_{\text{доб.}} + P_{\text{мех.}}. \quad (3.11)$$

Коэффициент полезного действия электродвигателя может быть найден по формуле:

$$\eta_{\text{эд}} = 1 - \frac{\sum P}{P_{\text{ном.}}} \quad (3.12)$$

Чтобы выбрать IGBT-транзистор с подходящими параметрами, считается максимальный прямой ток, протекающий через силовые ключи, по формуле [53]:

$$I_m = \sqrt{2} \cdot I_{\phi}. \quad (3.13)$$

Потери в преобразователе частоты могут быть определены выражением [53]:

$$P_{\text{ПЧ}} = I_{\phi} \cdot \left(2 \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot U_{CE}}{\pi} + \frac{\sqrt{2} \cdot U_d}{\pi} \cdot (t_{\text{вкл.}} + t_{\text{выкл.}}) \cdot f_k \right) \cdot 10^{-3}, \quad (3.14)$$

где U_d – напряжение на входе АИН ШИМ;

f_k – несущая частота ШИМ;

U_{CE} – падение напряжения на включенном IGBT-транзисторе;

$t_{\text{вкл.}}$ – время задержки включения IGBT-транзистора;

$t_{\text{выкл.}}$ – время задержки выключения IGBT-транзистора.

Потребляемая от преобразователя частоты активная мощность вычисляется по формуле:

$$P_1 = \frac{P_{\text{ном.}}}{\eta_{\text{ЭД}}}. \quad (3.15)$$

КПД преобразователя частоты находится с использованием выражения:

$$\eta_{\text{ПЧ}} = \frac{P_1}{P_1 + P_{\text{ПЧ}}}. \quad (3.16)$$

КПД электропривода может быть найдено по следующему выражению:

$$\eta = \eta_{\text{ЭД}} \cdot \eta_{\text{ПЧ}}. \quad (3.17)$$

Мощность, потребляемая электроприводом от сети, находится по формуле:

$$S = \frac{P_{\text{ном.}}}{\eta \cdot \cos\varphi}. \quad (3.18)$$

Рабочие характеристики вентильного двигателя, полученные по результатам проектирования, представлены на рисунке 3.3.

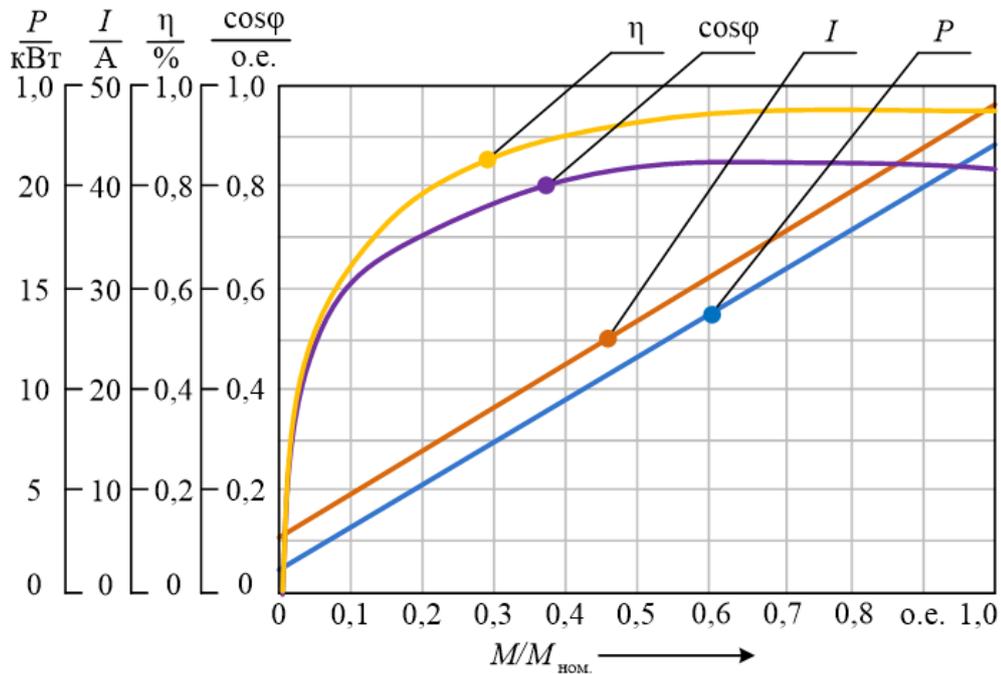


Рисунок 3.3 – Рабочие характеристики вентильного двигателя

Полученные по результатам расчетов параметры ВД представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Расчетные параметры вентильного двигателя

Наименование и обозначение	Значение
Номинальная мощность $P_{\text{ном.}}$, кВт	22
Номинальное напряжение $U_{\text{ном.}}$, В	380
Номинальная частота вращения $n_{\text{ном.}}$, об/мин	500
Номинальный момент, Н·м	470
Коэффициент мощности $\cos \varphi$, о.е.	0,84
Коэффициент полезного действия η , о.е.	0,95

По результатам расчетов получается, что для поддержания заданного рабочего момента, с учетом характеристик приводного механизма, и обеспечения кратковременного пятикратного пускового момента мощность вентильного двигателя может на 40 % быть меньше, чем мощность асинхронного двигателя.

Предлагается проанализировать возможный эффект снижения мощности приводного электродвигателя при различном количестве пар полюсов (разных скоростях вращения). На рисунке 3.4 представлены результаты расчетов.

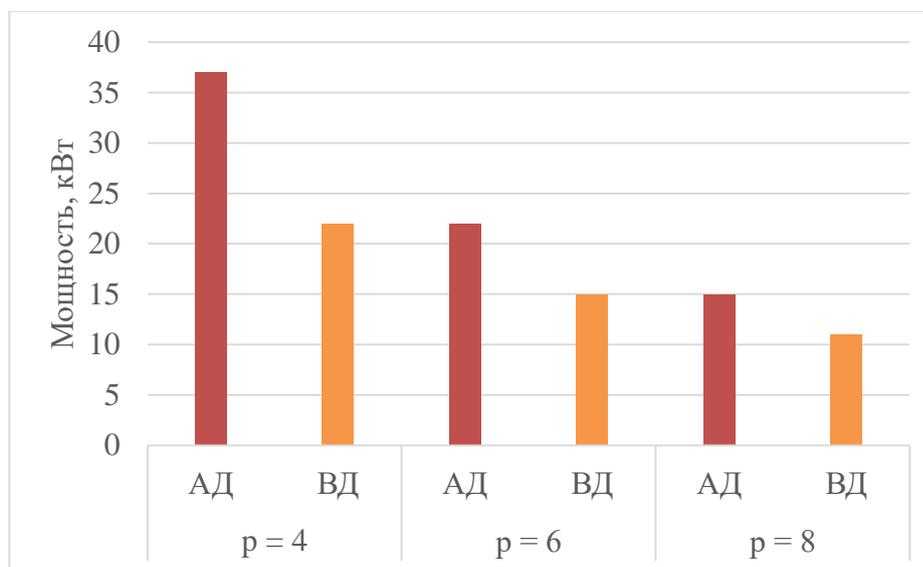


Рисунок 3.4 – Мощности вентильного и асинхронного двигателей

Исходя из вышеизложенных данных, можно сделать вывод, что использование вентильных электродвигателей вместо асинхронных в приводах станков-качалок, которые оснащены преобразователями частоты для управления скоростью качаний, является целесообразным. Это должно привести к снижению потребления электроэнергии электроприводом станка-качалки примерно на (20 – 40) %.

Предложенная выше методика проектирования электропривода УШГН на базе вентильного двигателя, блок-схема алгоритма которой представлен на рисунке 3.5, учитывает характеристики приводного механизма УШГН и конструктивные особенности ВД. Алгоритм реализован программным кодом в среде Матлаб.



Рисунок 3.5 – Блок-схема алгоритма проектирования электроприводов УШГН на базе вентильного электропривода

3.2 Построение компьютерной модели вентильного электропривода установки штангового глубинного насоса

Для моделирования ВД во вращающейся ортогональной системе координат применяется математическое описание СДПМ в осях d, q [48]:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_d \cdot R + \frac{d\psi_d}{dt} - \psi_q \cdot \frac{d\theta}{dt} = U_d = U_m \cos(\gamma - \theta) \\ i_q \cdot R + \frac{d\psi_q}{dt} + \psi_d \cdot \frac{d\theta}{dt} = U_q = U_m \sin(\gamma - \theta) \\ \psi_d = L \cdot i_d + \psi_m. \\ \psi_q = L \cdot i_q \\ M_{\text{эл.}} = \frac{M}{p} = (\psi_d \cdot i_q - \psi_q \cdot i_d) = \psi_m \cdot i_q \end{array} \right. , \quad (3.19)$$

где R – активное сопротивление одной фазы в эквивалентном представлении двигателя;

L – индуктивность одной фазы;

U_m – амплитудное значение напряжения одной;

i_d – ток по продольной оси;

ψ_d – потокосцепление по продольной оси;

i_q – ток по поперечной оси;

ψ_q – потокосцепление по поперечной оси;

ψ_m – потокосцепление постоянного магнита;

M – момент на валу ротора с учетом числа пар полюсов p двигателя;

p – число пар полюсов;

θ – угол поворота вала;

γ – начальная уставка датчика положения ротора.

Преобразуем систему уравнений (3.19) в следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d} \cdot (U_d - R \cdot i_d + \omega \cdot L_q \cdot i_q); \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q} \cdot (U_q - R \cdot i_q + \omega \cdot L_d \cdot i_d - \omega \cdot \Psi_m); \\ M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\Psi_m \cdot i_q + (L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q); \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (M - M_c - \beta \cdot \omega). \end{cases} \quad (3.20)$$

На рисунке 3.6 представлена структурная схема вентильного двигателя, построенная на основании системы уравнений (3.20).

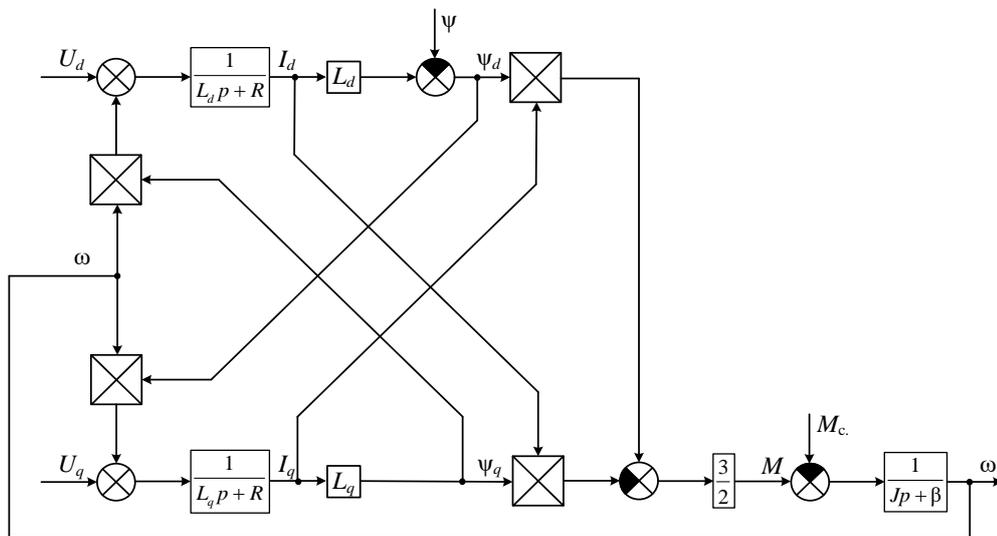


Рисунок 3.6 – Структурная схема ВД

На рисунке 3.7 представлена компьютерная аналитическая модель вентильного двигателя, построенная в программном обеспечении MatLab Simulink.

Для преобразования задаваемого напряжения статора в импульсы управления ключами АИН с помощью метода векторной ШИМ используется векторный модулятор. При моделировании модулятора в программном обеспечении MatLab Simulink каждый этап работы выполнен в отдельной подсистеме.

Определение модуля и фазы вектора напряжения происходит с помощью подсистемы определения параметров вектора эквивалентного напряжения (рисунок 3.8).

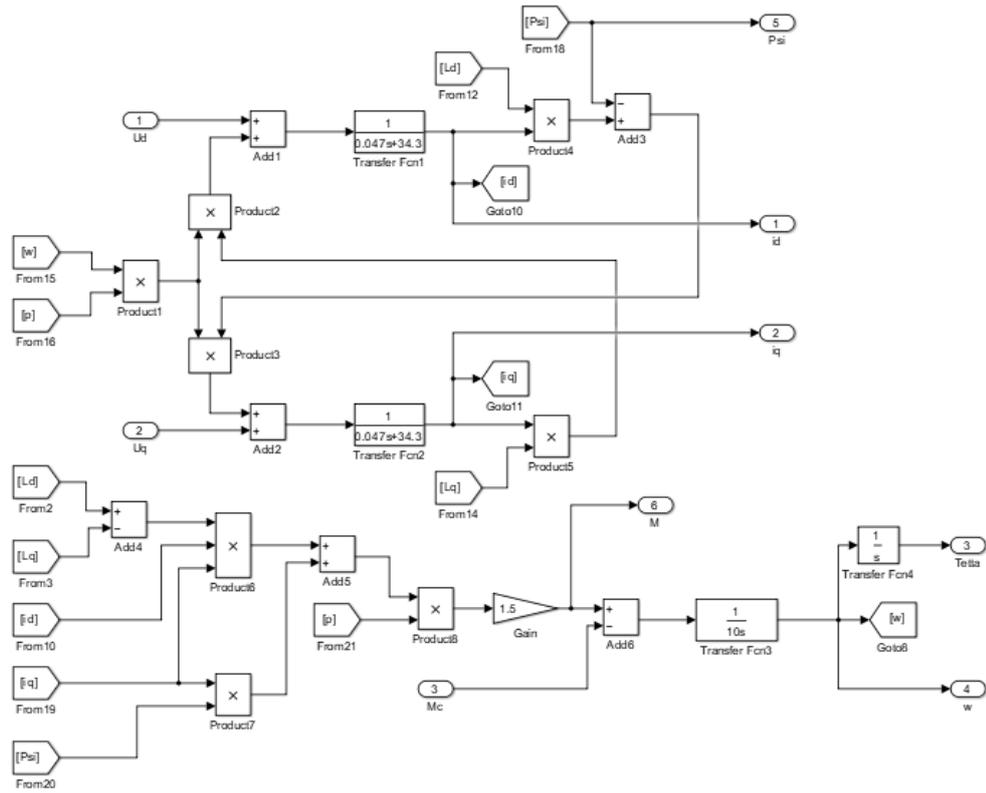


Рисунок 3.7 – Компьютерная аналитическая модель ВД

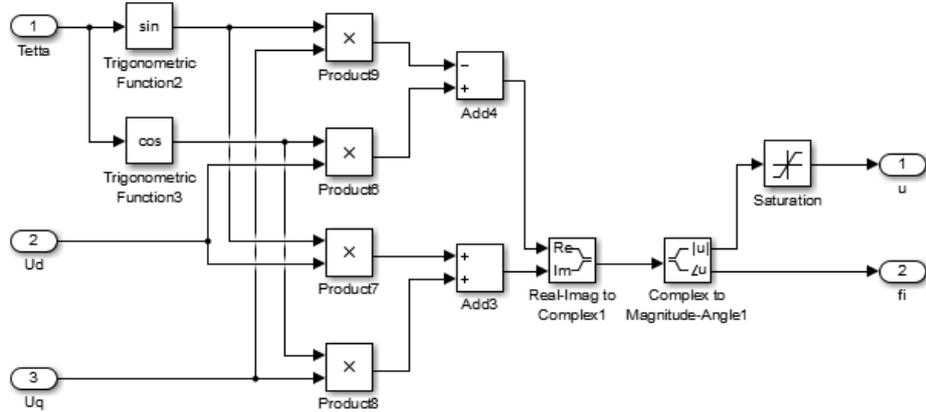


Рисунок 3.8 – Определение параметров вектора эквивалентного напряжения

Подсистема определения сектора (рисунок 3.9) позволяет определить в каком из секторов окружности находится заданный вектор напряжения.

Входное значение фазы вектора напряжения сравнивается со значениями границ секторов, и, в зависимости от результата сравнения, на выход подается номер сектора.

Для расчета продолжительностей включения базовых векторов необходимо знать угол поворота вектора напряжения относительно границ сектора. На рисунке 3.10 представлена модель определения угла поворота относительно сектора.

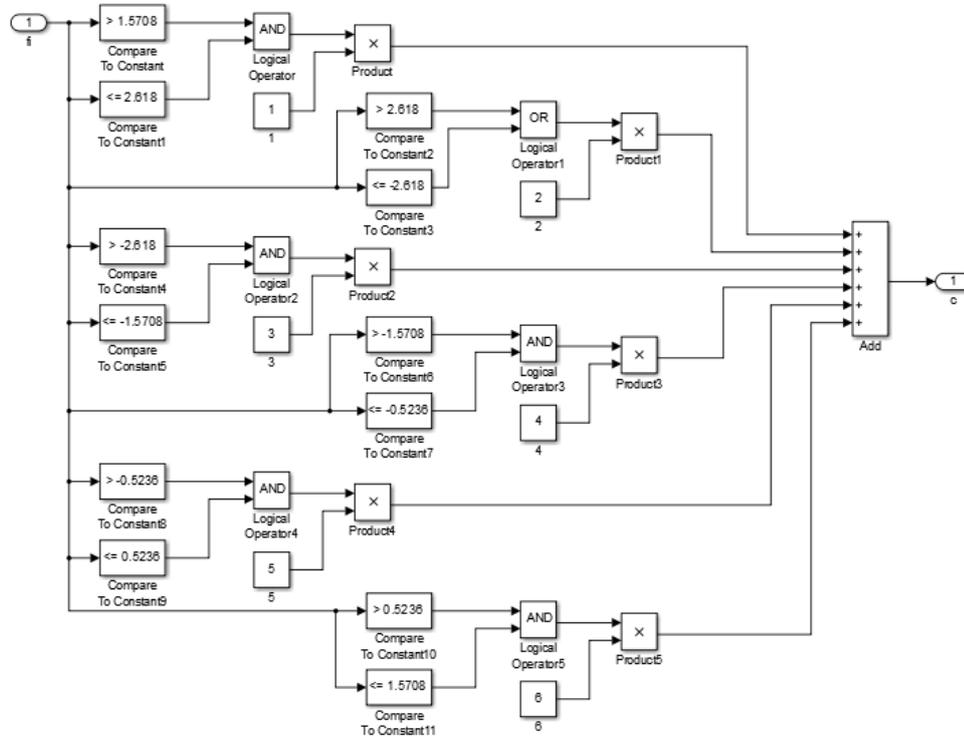


Рисунок 3.9 – Подсистема определения сектора

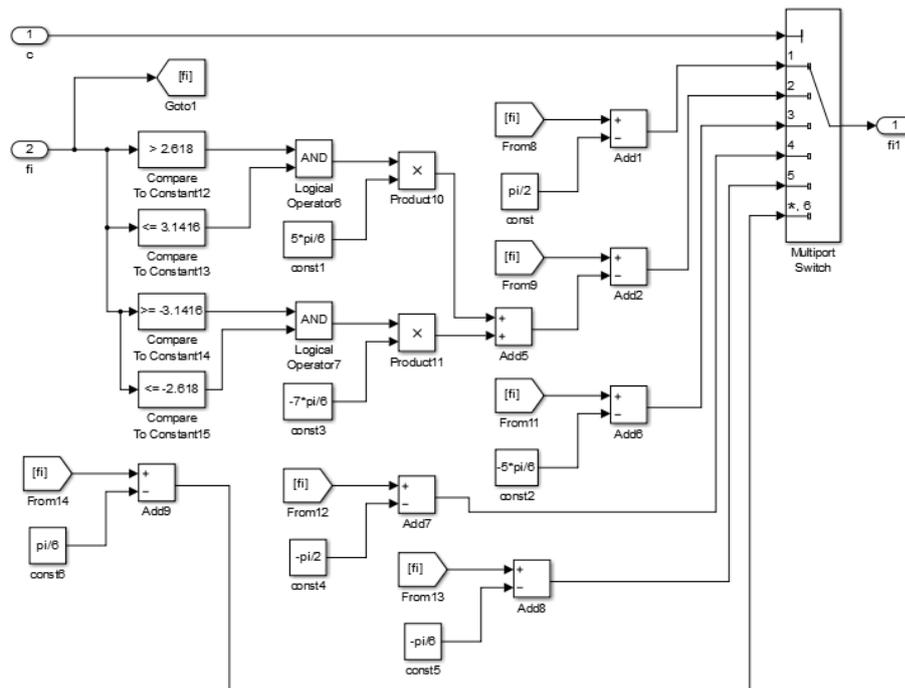


Рисунок 3.10 – Подсистема определения угла поворота относительно сектора

Пересчет производится вычитанием из значения фазы вектора напряжения определенного числа, равного левой границе сектора.

Модель расчета продолжительностей включения базовых векторов представлена на рисунке 3.11. Входными параметрами являются модуль вектора напряжения и фаза внутри сектора, в котором расположен вектор. Выходными параметрами являются значения продолжительностей включения базовых векторов.

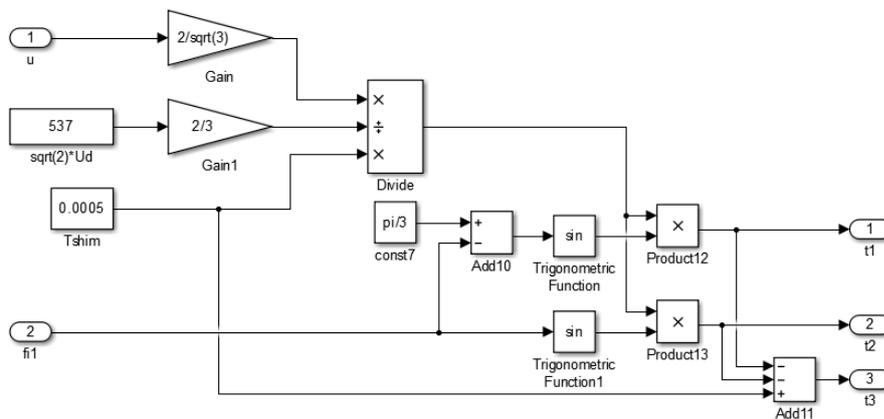


Рисунок 3.11 – Модель расчета продолжительностей включения базовых векторов

Для управления ключами автономного инвертора напряжения с помощью алгоритма векторной ШИМ необходимо реализовать сигналы управления. На рисунке 3.12 представлена модель получения импульсных сигналов управления.

Импульсные сигналы вырабатываются путем сравнения пилообразной развертки с уровнями, определяющими длительности сигналов. Инверсные сигналы вырабатываются с помощью использования логического оператора NOT.

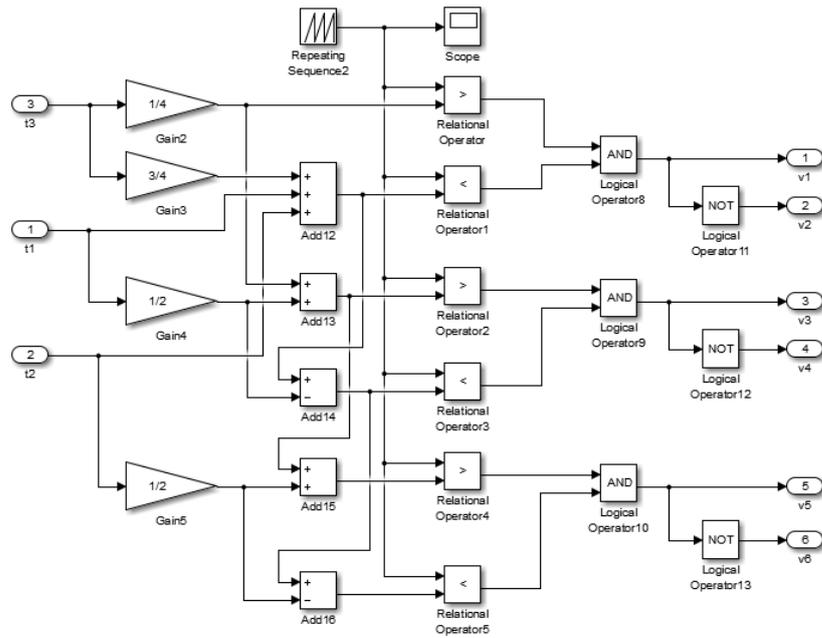


Рисунок 3.12 – Модель получения импульсных сигналов управления

На рисунке 3.13 показана модель подачи импульсных сигналов на АИН. На ключи четной группы подаются инверсные сигналы, таким образом, чтобы в каждый момент был замкнут только один ключ, относящийся к одной фазе нагрузки.

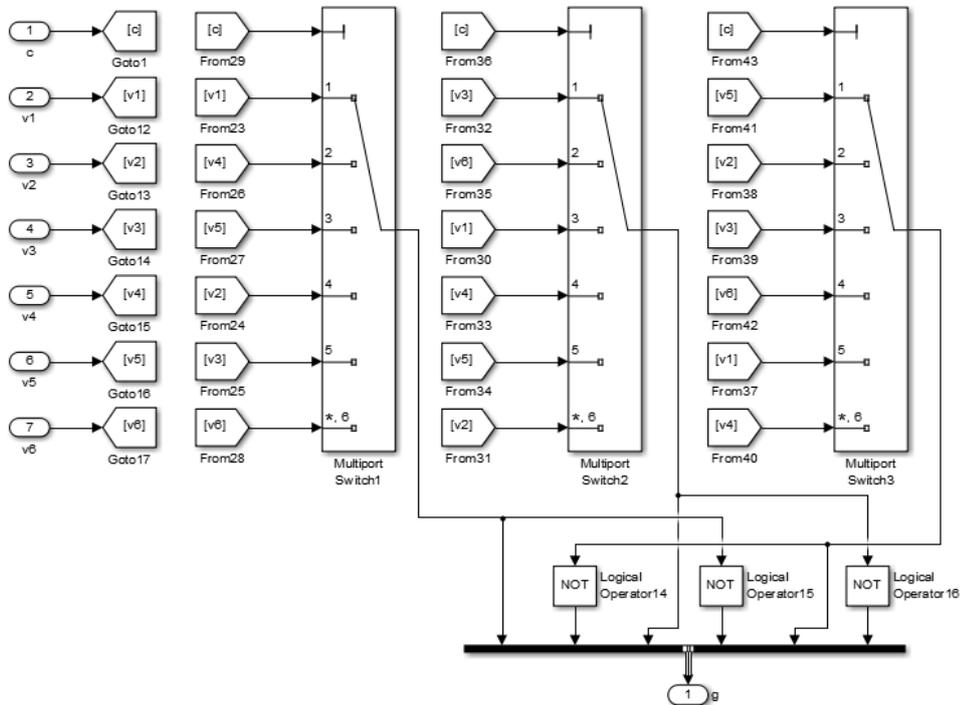


Рисунок 3.13 – Модель распределения сигналов управления

На рисунке 3.14 представлены графики выходного напряжения АИН.

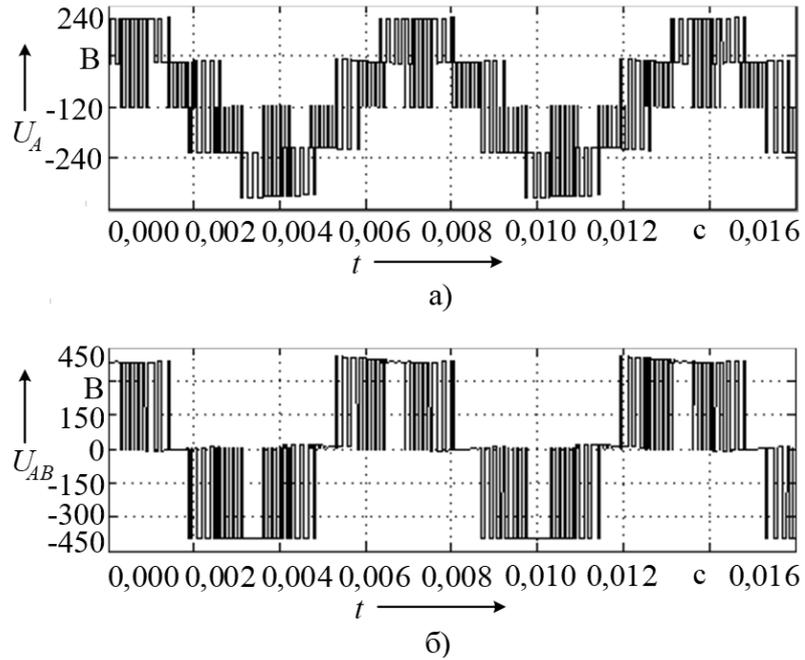


Рисунок 3.14 – Графики выходного напряжения АИН

а) фазное напряжение u_A ; б) линейное напряжение u_{AB}

Преобразование фазных напряжений статора ВД из естественной трехфазной системы координат в ортогональную синхронную систему координат проводится подсистемой, представленной на рисунке 3.15.

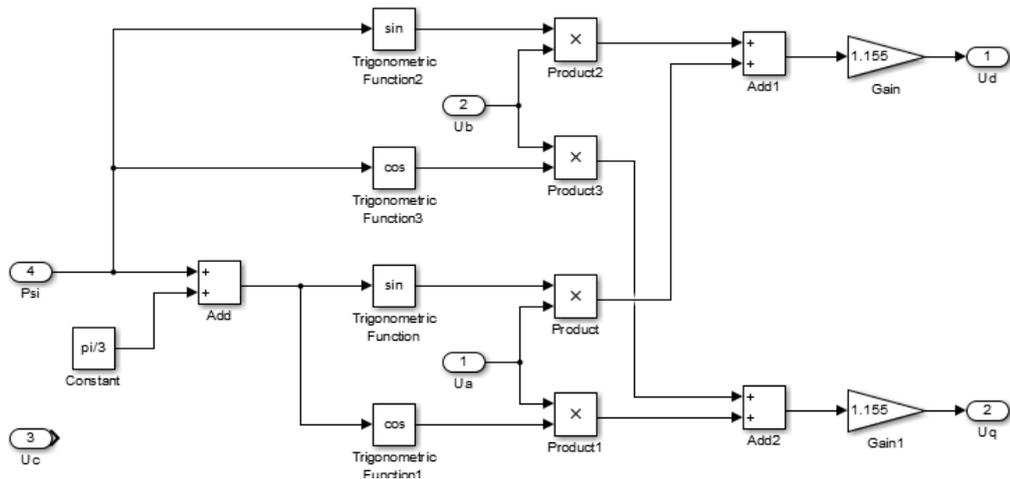


Рисунок 3.15 – Подсистема преобразователя $ABC - dq$

На рисунке 3.16 представлен блок компенсации перекрестных связей.

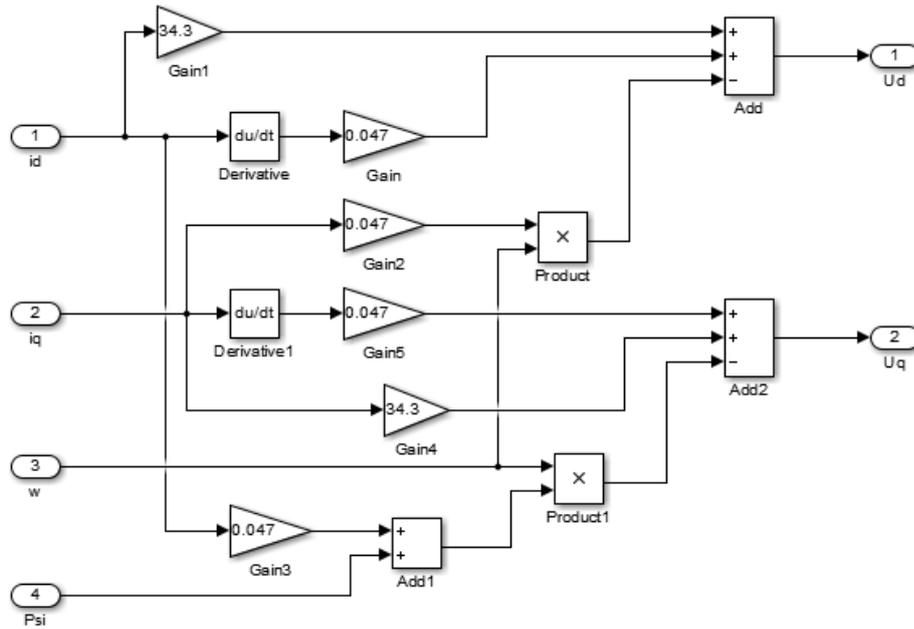


Рисунок 3.16 – Блок компенсации перекрестных связей

Модель вентильного электропривода штангового глубинного насоса представлена на рисунке 3.17.

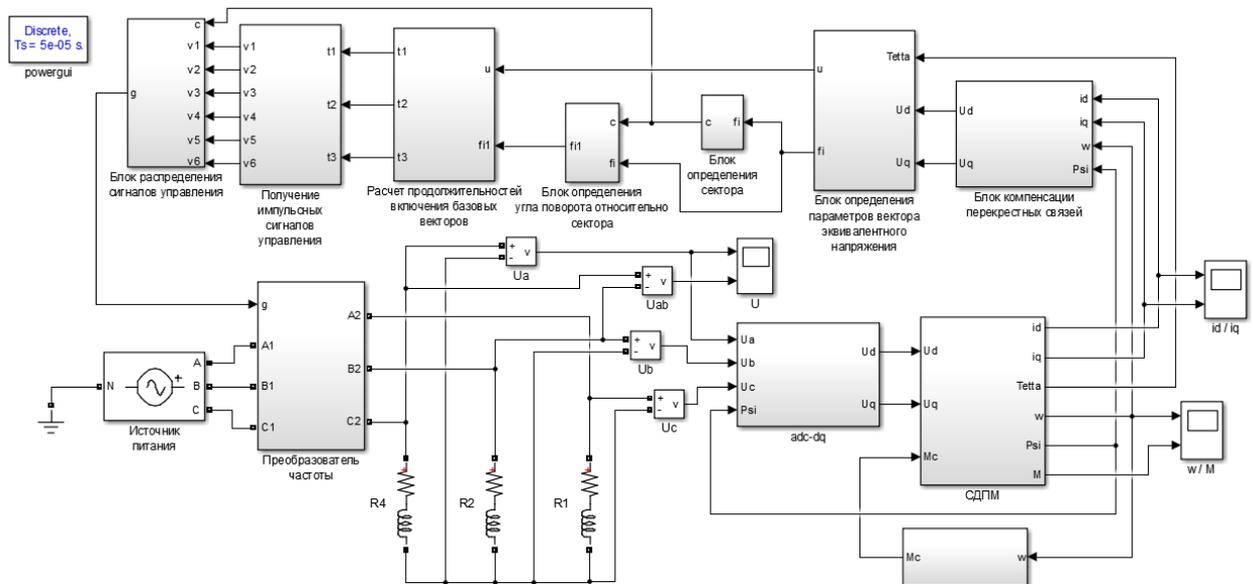


Рисунок 3.17 – Модель электропривода ШГН с вентильным двигателем

Представленная модель вентильного электропривода УШГН имеет особенность в том, что использует информацию с датчика положения ротора

двигателя и датчика положения точки подвеса штанг, что позволяет улучшить параметры системы.

В результате моделирования ВД были получены осциллограммы переходных процессов угловой скорости вращения ротора и электромагнитного момента (рисунок 3.18).

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

- модель вентильного электропривода ШГН, представленная на рисунке 3.17, позволяет исследовать переходные процессы различных параметров вентильного двигателя.

Таким образом, использование моделей электропривода в программном обеспечении MatLab Simulink позволяет проверить правильность расчетов и может помочь в принятии множества проектных решений, которые помогут избежать осложнений при эксплуатации данного оборудования.

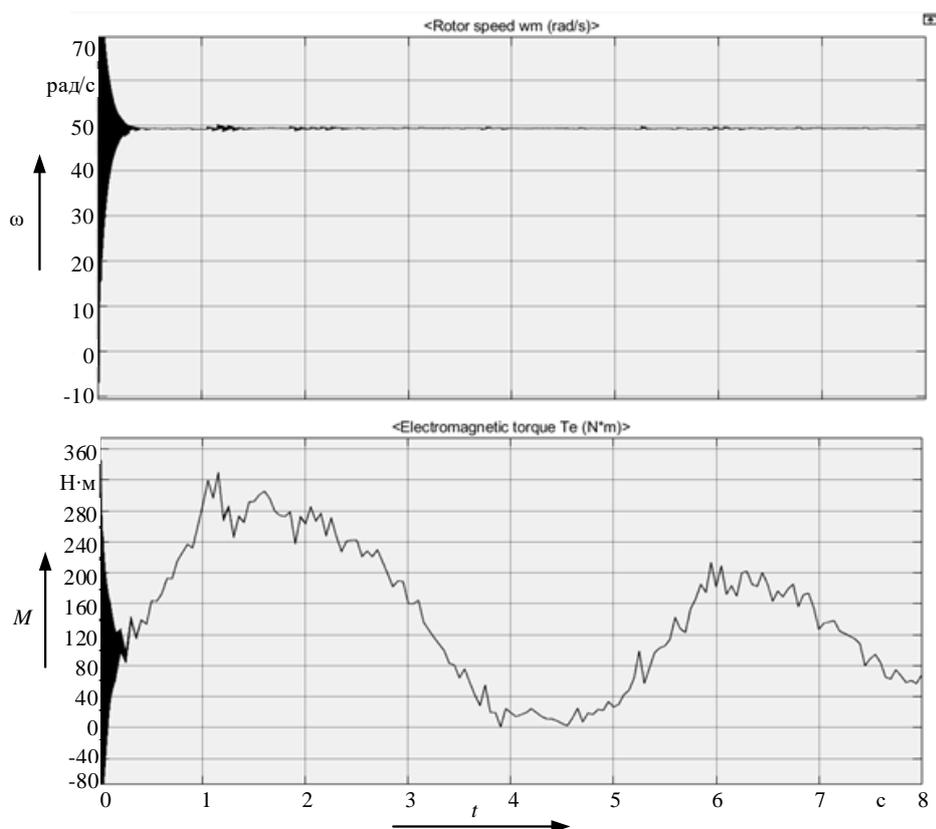


Рисунок 3.18 – Зависимости скорости, момента от времени системы ПЧ-ВД

Выводы по главе 3:

1. Разработана методика проектирования электроприводов УШГН на базе вентильных электродвигателей, отличающаяся возможностью имитации режима с циклически изменяющейся нагрузкой.
2. Представленная структура вентильного электропривода УШГН имеет особенность в том, что использует информацию с датчика положения ротора двигателя и датчика положения точки подвеса штанг, что позволяет улучшить качество процессов регулирования системы.
3. 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.

Глава 4. ПОВЫШЕНИЕ АВТОНОМНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УСТАНОВОК ШГН В УСЛОВИЯХ РАСПОЛОЖЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В УДАЛЕННЫХ ТРУДНОДОСТУПНЫХ РАЙОНАХ

4.1 Определение потенциала использования возобновляемой энергетики Орьбашского месторождения

Система возобновляемых источников ЭЭ, исследуемая в диссертации, обеспечивает гибридную генерацию и резервирование. Система содержит два типа возобновляемых источников энергии: солнечный фотоэлектрический и ветровой, одного накопителя (аккумуляторная батарея).

Схема подключения ветряных генераторов и солнечных батарей для питания электропривода ШГН показана на рисунке 4.1. Ветряные генераторы и солнечные батареи подключаются к контроллеру, вырабатываемая электроэнергия запасается в аккумуляторных батареях. Постоянный ток преобразуется в переменный с помощью инвертора. Энергия ветряных генераторов и солнечных батарей используется одновременно с энергией электрической сети. Данное решение позволяет снизить нагрузку на электрическую сеть.

Энергия ветряных генераторов и солнечных батарей может использоваться для сглаживания графика нагрузки (рисунок 4.2). Постоянный характер нагрузки улучшает условия работы электрической сети. Постоянная часть мощности берется из электрической сети. В тоже время переменная часть мощности потребляется от возобновляемых источников. В связи с тем, что солнечная батарея не может вырабатывать энергию ночью, так как генерация энергии солнечными панелями возможна только в светлое время суток, а ветрогенератор может отдавать энергию в любое время суток, но в зависимости от погодных условий, то совместное использование

ветрогенератора и солнечной батареи позволяет получать энергию практически всегда.

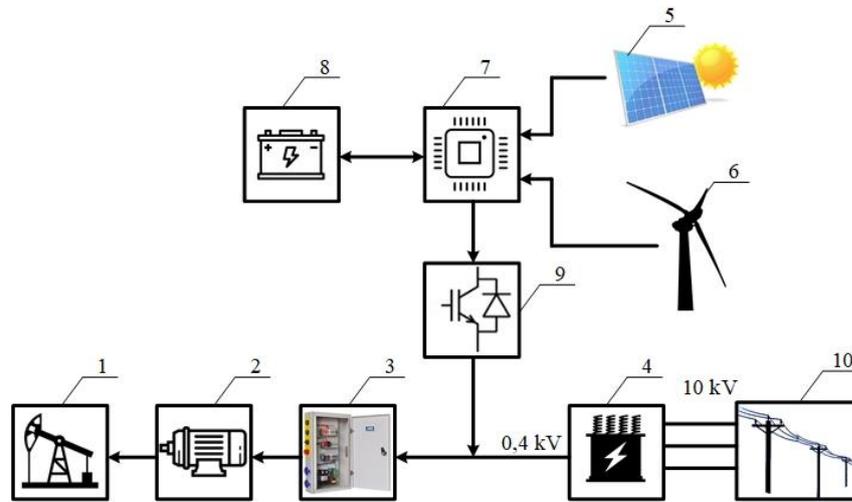


Рисунок 4.1 – Схема подключения ветряных генераторов и солнечных батарей для питания электропривода ШГН

1 – установка ШГН, 2 – электродвигатель, 3 – станция управления, 4 – трансформатор 10/0,4 кВ, 5 – солнечная батарея, 6 – ветрогенератор, 7 – контроллер, 8 – аккумуляторная батарея, 9 – инвертор, 10 – электрическая сеть

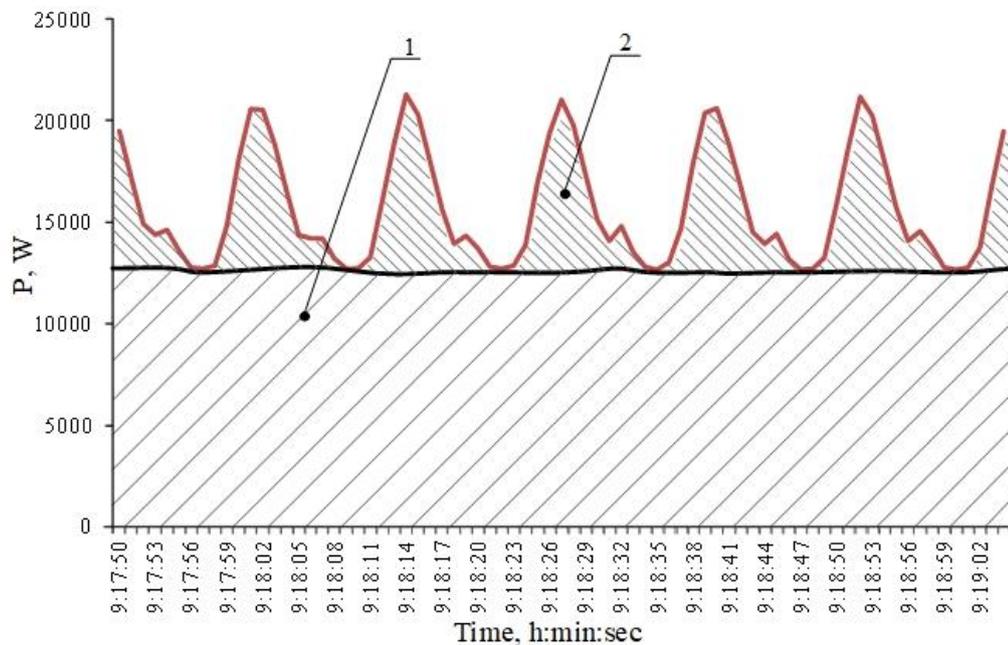


Рисунок 4.2 – График нагрузки электропривода ШГН

1 – постоянная часть мощности; 2 – переменная часть мощности

В схеме подключения ветряного генератора и солнечной батареи (рисунок 4.1) происходит преобразование постоянного тока в переменный с помощью инвертора. Если используется частотно-регулируемый электропривод, то схема имеет звено постоянного тока. Постоянный ток может подаваться с контроллера в звено постоянного тока напрямую (рисунок 4.3). Такое решение повышает КПД системы приблизительно на 10 %.

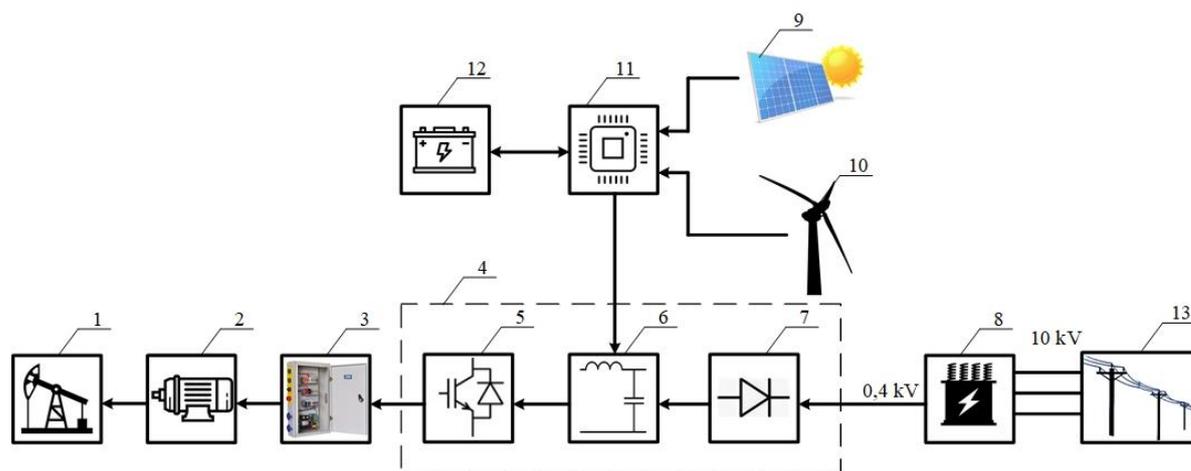


Рисунок 4.3 – Схема подключения ветряного генератора и солнечной батареи

к звену постоянного тока частотно-регулируемого электропривода

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 – солнечная батарея; 10 – ветрогенератор; 11 – контроллер; 12 – аккумуляторная батарея; 13 – электрическая сеть

В качестве исследуемого местоположения УШГН выбирается Орьбашское месторождение, расположенное в Калтасинском районе Республики Башкортостан. Исходные данные для исследований взяты с действующей скважины.

Среднемесячные данные о солнечной инсоляции были взяты, согласно данным, гидрометцентра Российской Федерации, карте инсоляции регионов России и представлены на рисунке 4.4.

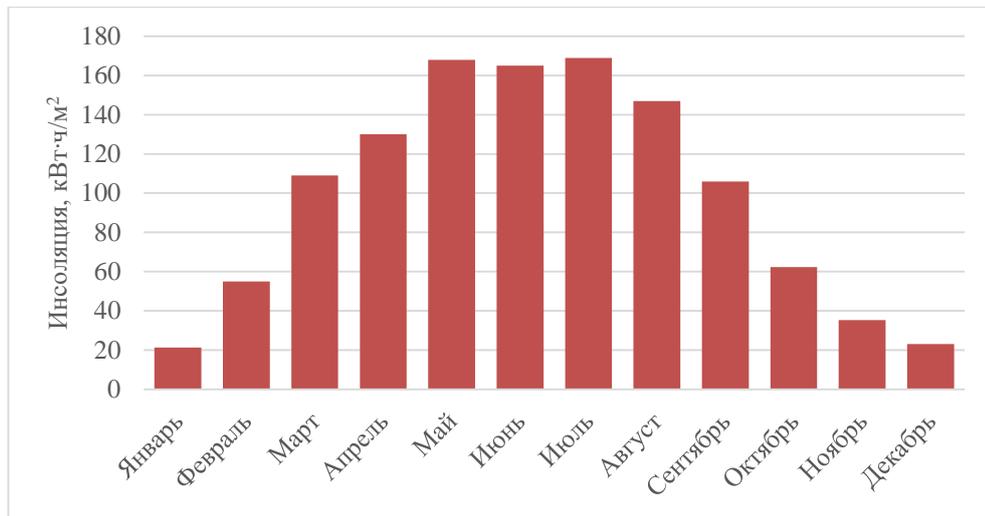


Рисунок 4.4 – Данные о среднемесячной солнечной инсоляции в Калтасинском районе

Как показано в таблице 4.1, Республика Башкортостан имеет самые высокие значения солнечной инсоляции в летние месяцы, при этом среднегодовая солнечная инсоляция составляет $100 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ в месяц.

Данные о ресурсах ветра по Республике Башкортостан были взяты, согласно данным, гидрометцентра Российской Федерации и карты скоростей ветра регионов России. Градации ветра по скорости и по направлению представлены в таблицах 4.2 и 4.3 соответственно. В таблице 4.2 за 100 % принята сумма показаний скорости ветра за месяц.

Таблица 4.1 – Месячная солнечная инсоляция в Калтасинском районе

Месяц	Инсоляция, кВт·ч/м ²	Месяц	Инсоляция, кВт·ч/м ²
Январь	21,2	Июль	169,0
Февраль	55,0	Август	147,0
Март	109,0	Сентябрь	106,0
Апрель	130,0	Октябрь	62,3
Май	168,0	Ноябрь	35,2
Июнь	165,0	Декабрь	23,0

Из данных, приведенных в таблицах 4.2 и 4.3, а также на рисунке 4.5, можно сделать вывод, что средняя скорость ветра в Калтасинском районе

достаточна для выработки электроэнергии. Следовательно, вполне оправдано рассматривать ветер как один из основных источников энергии для электроснабжения установки штангового глубинного насоса.

Таблица 4.2 – Градация ветра по скорости в Калтасинском районе, в процентах

Месяц	Градация ветра, %						
	0	1	2	3	4	5	6
Скорость ветра, м/с							
Январь	11,5	14,1	20,8	25,5	19,3	5,2	4,2
Февраль	5,3	15,0	28,9	35,8	12,8	1,1	1,1
Март	2,9	20,0	21,9	24,8	17,1	8,1	5,2
Апрель	9,7	16,2	25,9	28,7	13,0	2,8	2,3
Май	11,3	27,7	32,5	21,2	4,8	2,6	0,0
Июнь	11,0	26,4	30,8	19,8	7,9	3,5	0,4
Июль	19,3	28,8	32,6	14,2	3,9	0,9	0,4
Август	15,0	22,3	34,3	21,0	4,7	1,3	1,3
Сентябрь	8,5	31,0	40,4	15,5	3,3	0,9	0,5
Октябрь	4,0	20,9	38,7	24,0	7,6	4,4	0,4
Ноябрь	5,3	12,7	31,7	32,8	13,2	2,6	0,6
Декабрь	4,6	16,8	18,8	19,8	14,7	14,7	13,7

Таблица 4.3 – Градация ветра в Калтасинском районе по направлению

Месяц	Направление, °	Месяц	Направление, °
Январь	184	Июль	121
Февраль	209	Август	137
Март	217	Сентябрь	242
Апрель	187	Октябрь	224
Май	142	Ноябрь	229
Июнь	170	Декабрь	192

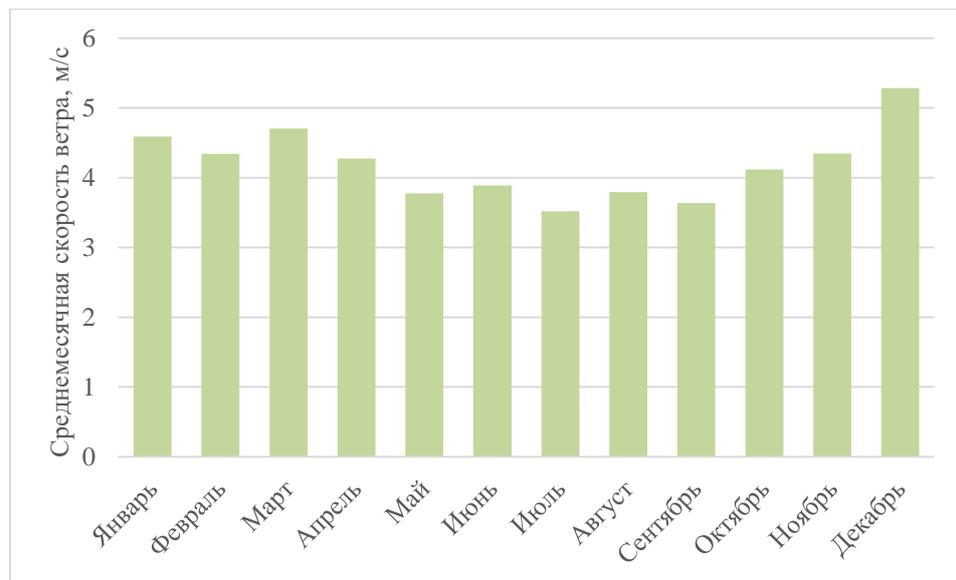


Рисунок 4.5 – График среднемесячной скорости ветра в Калтасинском районе

4.2 Особенности электрической нагрузки при снабжении нефтяной скважины. Анализ профиля исследуемой нагрузки УШГН

В качестве исследований будут рассмотрены два сценария эксплуатации скважины: периодический и непрерывный.

Сценарий 1 соответствует периодическому режиму эксплуатации, при котором электропривод каждые сутки работает 12 часов и 12 часов простаивает. Электродвигатель включается в 7 часов утра на 12 часов и отключается в 19 часов.

Сценарий 2 соответствует непрерывной эксплуатации скважины.

При непрерывной эксплуатации электродвигатель работает непрерывно. Ожидается, что затраты на требуемую систему накопления энергии будут оправданы дополнительным объемом производства, который станет возможным благодаря непрерывной работе.

Оценка требуемой мощности начинается с проектирования системы механизированной добычи нефти установкой штангового глубинного насоса. Подбор режима эксплуатации начинается с выбора диаметра плунжера, длины хода штока и количества качаний в минуту, после чего проводится параметрическая оптимизация режима эксплуатации с точки зрения

минимизации удельных затрат электроэнергии на добычу. При необходимости выполняются действия по уравниванию УШГН (согласно Главы 2). Параметры, выбранные в результате оптимизации, впоследствии используются для определения нагрузки электропривода УШГН.

4.3 Разработка методики расчета и подбора оборудования гибридной ветросолнечной электростанции для УШГН

Предлагаемый программный комплекс является инструментом, который может использоваться для проектирования системы электроснабжения УШГН с использованием ВИЭ. На основе выбранного географического местоположения (долготы и широты) в программном комплексе обновляются данные о солнечной энергии, ветре и температуре. Рассчитывается поток энергии между компонентами и, учитывая изменчивость погодных условий и профиля нагрузки, оценивается стоимость установки и эксплуатации системы в течение срока службы. Моделирование предполагает, что при заданных условиях поток энергии между компонентами системы рассчитывается для каждого временного интервала, чтобы найти баланс, обеспечивающий непрерывную и согласованную работу. Оптимизация подразумевает определение конфигурации с наилучшим сочетанием возобновляемых ресурсов, которая удовлетворяет требованиям к нагрузке круглый год при наименьших затратах. Поскольку используется накопитель, а источники для исследования выбираются полностью возобновляемые, в качестве стратегии распределения электроэнергии используется циклическая зарядка, при которой производящий источник работает на номинальной мощности или близкой к ней, при этом любая выработанная избыточная электроэнергия накапливается в аккумуляторной батарее. Аккумуляторная батарея служит резервным источником питания для нагрузки ночью или в пасмурные дни при отсутствии ветра. В программном комплексе возможные решения ранжируются в порядке увеличения чистых текущих затрат, но технически

любая система с наименьшей неудовлетворенной нагрузкой считается наиболее надежной и, следовательно, наиболее осуществимым решением среди доступных альтернатив.

Алгоритм методики расчета ветросолнечной установки для УШГН представлен на рисунке 4.6.

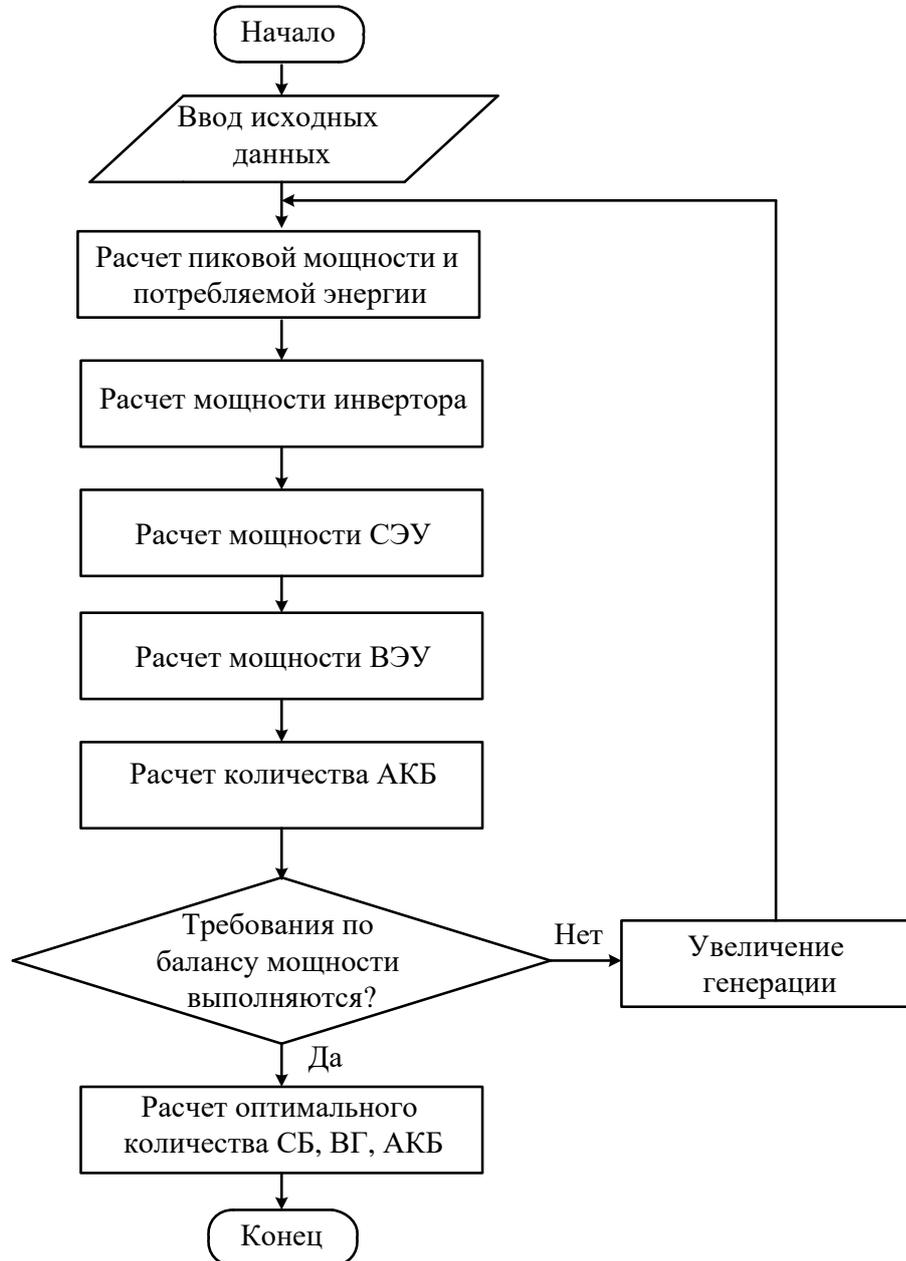


Рисунок 4.6 – Блок-схема методики расчета ветросолнечной установки

В первую очередь определяются значения пиковой мощности и потребляемой электроэнергии. Потребление электроэнергии для отдельной группы электроприборов (Вт·ч) рассчитывается по формуле:

$$W_{сутi} = P_{устi} \cdot N_i \cdot (T_{yi} + T_{ди} + T_{ви} + T_{ни}), \quad (4.1)$$

где $P_{устi}$ – установленная мощность i -ого электроприбора;

N_i – количество электроприборов;

$T_{yi}, T_{ди}, T_{ви}, T_{ни}$ – время использования i -ого электроприбора, утром, днем, вечером и ночью.

Суммарное суточное энергопотребление объекта рассчитывается как сумма суточной электроэнергии каждой группы электроприборов:

$$W_{sum.сут} = \sum W_{сутi}. \quad (4.2)$$

Суммарная установленная мощность рассчитывается как сумма мощностей электропотребителей:

$$P_{sum.сут} = \sum P_{устi}. \quad (4.3)$$

Рекомендуемая мощность инвертора принимается равной суммарной установленной мощности, округлённой в большую сторону:

$$P_{инв.рек.} = P_{sum.сут}. \quad (4.4)$$

Суммарная энергия, потребляемая нагрузкой, рассчитывается по формуле:

$$W_{нагр.2} = W_{sum.сут.} \cdot 1,1. \quad (4.5)$$

Для получения максимальной мощности фотоэлектрической солнечной электростанции плоскость солнечных панелей важно ориентировать на Солнце. Чтобы поглощать максимальное количество солнечной энергии, плоскость солнечного коллектора должна быть всегда перпендикулярна солнечным лучам.

Количество энергии, сгенерированное одним солнечным модулем в месяц [26]:

$$W = \frac{k \cdot P \cdot E}{I_0}, \quad (4.6)$$

где k – поправочный коэффициент для периода;

P – пиковая мощность солнечной панели;

E – Солнечная инсоляция за выбранный период времени,

I_0 – интенсивность солнечной инсоляции.

При этом интенсивность солнечной инсоляции, при которой тестируются панели, принимается равной $I_0 = 1000 \text{ Вт/м}^2$.

Количество необходимых солнечных панелей находится как отношение энергии, потребляемой нагрузкой за год, к значению суммарной годовой энергии, сгенерированной солнечным модулем:

$$N_{\text{СБ}} = \frac{W_{\text{год}}}{W_{\text{СБ.год}}}. \quad (4.7)$$

Для расчета числа аккумуляторных батарей рассматриваются характерные сутки каждого месяца и рассчитывается избыток и дефицит энергии.

Количество СБ для каждого месяца рассчитывается как отношение энергии, потребляемой нагрузкой за месяц, к объему энергии, производимым одним солнечным модулем в этот же месяц:

$$N_{\text{СБ.мес}} = \frac{W_{\text{мес.}}}{W_{\text{СБ.мес.}}}. \quad (4.8)$$

Избыток и дефицит энергии в месяц рассчитывается по формуле:

$$W_{\text{рез.}} = (N_{\text{СБ}} - N_{\text{СБ.мес}}) \cdot W_{\text{СБ.мес}}, \quad (4.9)$$

если получившееся значение отрицательное, то наблюдается дефицит энергии.

Если положительное – избыток энергии.

Далее для расчета количества АКБ рассматриваются периоды с избытком энергии. Определяется средняя продолжительность дня и ночи рассматриваемых месяцев.

Число АКБ, соединенных последовательно, округляется в большую сторону:

$$s_{\text{АКБ.посл.}} = U_{\text{инв.вх.}} / U_{\text{АКБ.ном.}}, \quad (4.10)$$

где $U_{\text{АКБ.ном.}}$ – номинальное напряжение АКБ, В.

Емкость одного блока аккумуляторной батареи рассчитывается по формуле [26]:

$$E_{\text{АКБ}} = \frac{s_{\text{АКБ.посл.}} \cdot U_{\text{АКБ.ном.}} \cdot C_{\text{АКБ.ном.}} \cdot c_{\text{АКБ}}}{1000 \cdot k_{\text{АКБ}}}, \quad (4.11)$$

где $C_{\text{АКБ.ном.}}$ – номинальная емкость АКБ;

$k_{\text{АКБ}}$ – коэффициент потерь на разряд-заряд;

$c_{\text{АКБ}}$ – глубина разряда для АКБ.

Количество аккумуляторных батарей, соединенных параллельно, равно максимальному значению из рассчитанных вариантов количество АКБ для каждого месяца:

$$S_{\text{АКБ.пар.}} = \frac{P_{\text{sum.сут.}} \cdot t_{\text{ВИЭ}}}{E_{\text{АКБ}}}, \quad (4.12)$$

где $t_{\text{ВИЭ}}$ – время, в течение которого энергия берется от ВИЭ.

Итоговое количество аккумуляторных батарей по формуле:

$$N_{\text{АКБ}} = S_{\text{АКБ.посл.}} \cdot S_{\text{АКБ.пар.}} \quad (4.13)$$

Мощность ветроустановки рассчитывается в зависимости от типа ветрогенератора. Мощность горизонтально-осевого ветрогенератора находится по следующей формуле [37]:

$$P_{\text{мгн.ВЭУ}} = \pi \cdot v^3 / (8 \cdot h^3 \cdot k_{\text{шерх.}}) \cdot \rho \cdot k_{\text{ВЭУ}} \cdot k_{\text{устр.}} \cdot N_{\text{ВЭУ}} \cdot D^2 \cdot h^3 \cdot k_{\text{шерх.}}, \quad (4.14)$$

где v – скорость ветра;

h – высота установки;

D – диаметр ветроколеса;

$k_{\text{шерх.}}$ – коэффициент шероховатости поверхности;

ρ – плотность воздуха;

$k_{\text{ВЭУ}}$ – КПД ВЭУ;

$k_{\text{устр.}}$ – КПД сопутствующих устройств;

$N_{\text{ВЭУ}}$ – количество установок.

Мгновенная мощность вертикально-осевого ветрогенератора находится по формуле [37]:

$$P_{\text{мгн.ВЭУ}} = v^3 / (2 \cdot h^{3k_{\text{шерх.}}}) \cdot \rho \cdot k_{\text{ВЭУ}} \cdot k_{\text{устр.}} \cdot N_{\text{ВЭУ}} \cdot D \cdot H \cdot (h + H/2)^{3k_{\text{шерх.}}}, \quad (4.15)$$

где H – высота ветроколеса.

Энергия, генерируемая ветроэнергетической установкой за сутки, вычисляется по формуле:

$$W_{\text{ВЭУ.сут.}} = P_{\text{мгн.ВЭУ}} \cdot 24. \quad (4.16)$$

После определения количества потребляемых и генерируемых электроустановками мощностей необходимо проверить условие выполнения энергетического баланса.

Вычисляется генерация энергии ветряными электростанциями в сутки с потерей 20%:

$$W_{ВЭУ.реал.} = W_{ВЭУ.сут.} / 1,2. \quad (4.17)$$

Вычисляется генерация энергии солнечными электростанциями в сутки с потерей 20%:

$$W_{СЭУ.реал.} = W_{СБ.sum} / 1,2. \quad (4.18)$$

Потребление электроэнергии в сутки с запасом 20%:

$$W_{потр.реал.} = W_{sum.сут.} \cdot 1,2. \quad (4.19)$$

Энергетический баланс:

$$W_{итого} = (W_{ВЭУ.реал.} + W_{СЭУ.реал.}) - W_{потр.реал.} \quad (4.20)$$

Если энергетический баланс получается отрицательным, то необходимо снизить энергопотребление или увеличить генерацию.

Чтобы найти наиболее выгодный вариант с технической и экономической точек зрения применяется графический метод решения однокритериальных задач.

Необходимо определить количество солнечных панелей и ветрогенераторов при минимальных финансовых затратах. В условиях задачи сформулирована цель – добиться минимальных финансовых затрат, т.е. критерием являются суммарные затраты на закупку оборудования для электростанций на основе ВИЭ. Целевая функция будет иметь следующий вид:

$$Z = z_{СБ} \cdot N_{СБ} + z_{ВГ} \cdot N_{ВГ} \rightarrow \min. \quad (4.21)$$

Параметры электростанции ограничены. Ограничение по мощности, генерируемой электростанцией:

$$P_{СБ} \cdot N_{СБ} + P_{ВГ} \cdot N_{ВГ} \geq P_{сут.}; \quad (4.22)$$

ограничение по неудовлетворенной мощности:

$$P_{АКБ.СБ} \cdot N_{СБ} + P_{АКБ.ВГ} \cdot N_{ВГ} \leq P_{сут.}; \quad (4.23)$$

ограничение по стоимости аккумуляторных батарей:

$$z_{\text{АКБ}} \cdot (k_1 \cdot N_{\text{СБ}} + k_2 \cdot N_{\text{ВГ}}) \leq Z_{\text{АКБ.max}}; \quad (4.24)$$

неотрицательность количества солнечных панелей и ветрогенераторов:

$$N_{\text{СБ}} \geq 0; \quad (4.25)$$

$$N_{\text{ВГ}} \geq 0. \quad (4.26)$$

Математическая модель задачи имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} Z = z_{\text{СБ}} \cdot N_{\text{СБ}} + z_{\text{ВГ}} \cdot N_{\text{ВГ}} \rightarrow \min; \\ P_{\text{СБ}} \cdot N_{\text{СБ}} + P_{\text{ВГ}} \cdot N_{\text{ВГ}} \geq P_{\text{сут.}}; \\ P_{\text{АКБ.СБ}} \cdot N_{\text{СБ}} + P_{\text{АКБ.ВГ}} \cdot N_{\text{ВГ}} \leq P_{\text{сут.}}; \\ z_{\text{АКБ}} \cdot (k_1 \cdot N_{\text{СБ}} + k_2 \cdot N_{\text{ВГ}}) \leq Z_{\text{АКБ.max}}; \\ N_{\text{СБ}} \geq 0; \\ N_{\text{ВГ}} \geq 0. \end{array} \right. \quad (4.27)$$

Решение задачи графическим методом представлено на рисунке 4.7.

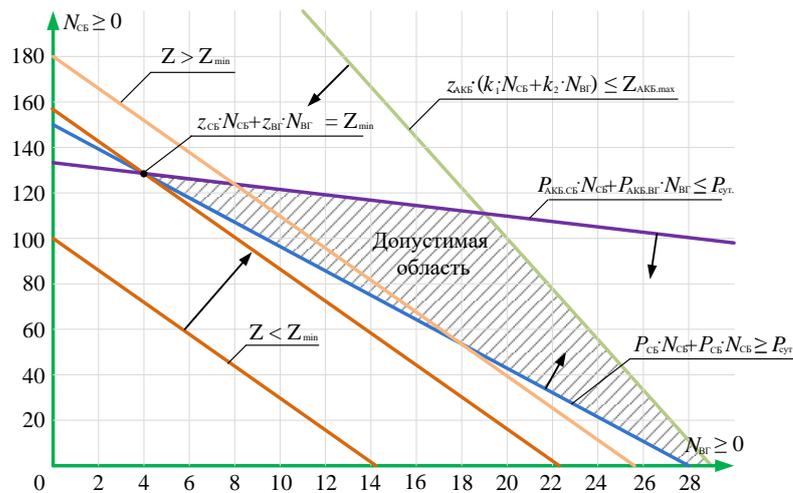


Рисунок 4.7 – Графическое решение задачи

Данная задача была решена для непрерывного режима работы насоса, потребление энергии приводным электродвигателем которого составляет 192 кВт·ч/сут. при средней нагрузке 8 кВт. Допустимая область была ограничена следующими условиями: мощность, генерируемая электростанцией, должна удовлетворять потребляемой мощности УШГН; необходимо минимизировать общую неудовлетворенную нагрузку; затраты на закупку АКБ должны быть сведены к минимуму.

4.4 Результаты исследований эффективности применения гибридной ветросолнечной энергетической установки при электроснабжении УШГН

В режиме непрерывной эксплуатации потребление энергии приводным электродвигателем УШГН на скважине Орьбашского месторождения составляет 192,0 кВт·ч/сут. при средней мощности 8,0 кВт. Спроектированная система состоит из солнечных панелей (SilaSolar PERC 10BB, 550 Вт), аккумуляторов глубокого цикла (Vektore Energy GPL, 12 В, 200 А·ч), системы инверторов (SILA-P, 8 кВт) и ветрогенераторов (Exmork, 3 кВт), технические параметры которых представлены в таблицах ниже. Также электропривод УШГН потребляет реактивную мощность, которая в среднем составляет 20 кВАр, что в свою очередь требует установки компенсатора реактивной мощности (КРМ-0,4-25-12,5).

Таблица 4.4 – Паспортные данные солнечной панели SilaSolar PERC 10BB

Параметр, ед. измерения	Значение
Мощность, Вт	550
Напряжение без нагрузки, В	50,1
Рабочее напряжение, В	42,1
Рабочий ток, А	13,2
КПД, %	21,3
Стоимость, тыс. руб.	22,192

Таблица 4.5 – Паспортные данные аккумуляторной батареи Vektore Energy GPL

Параметр, ед. измерения	Значение
Емкость, А·ч	200
Номинальное напряжение, В	12
Максимальный разрядный ток, А	1600
Максимальный зарядный ток, А	3
КПД, %	21,3
Стоимость, тыс. руб.	47,134

Таблица 4.6 – Паспортные данные системы инверторов SILA-P

Параметр, ед. измерения	Значение
Мощность, Вт	8000
Входное напряжение, В	48
Выходное напряжение, В	220
Пиковая мощность, Вт	16000
КПД, %	90,0
Стоимость, тыс. руб.	98,584

Таблица 4.7 – Паспортные данные ветрогенератора Exmork

Параметр, ед. измерения	Значение
Тип	Горизонтальный
Мощность, Вт	3000
Номинальное напряжение АКБ, В	48
Мощность при 12 м/с, Вт	3500
Мощность при 9 м/с, Вт	2300
Мощность при 5 м/с, Вт	500
Начало вращения при скорости ветра, м/с	2,5
Диаметр ротора, м	4
Стоимость, тыс. руб.	152,0

Решения, полученные в результате моделирования, в которых наблюдались нехватка мощности, минимальная доля возобновляемых источников энергии, неудовлетворенная нагрузка, считаются неэффективными.

4.4.1 Сценарий 1: Периодическая эксплуатация УШГН

С точки зрения периодической суточной нагрузки насоса потребление энергии приводным электродвигателем составляет 96,0 кВт·ч/сут. при средней нагрузке 8,0 кВт. В таблице 4.8 представлены результаты моделирования.

Таблица 4.8 – Результаты моделирования для сценария 1

Параметры	СЭУ	СЭУ+ВЭУ	ВЭУ
Количество солнечных панелей, шт.	76	72	0
Количество ветрогенераторов, шт.	0	1	14
Количество аккумуляторов, шт.	60	52	56
Стоимость электростанции, тыс. руб.	4752	4416	5008
Эксплуатационные расходы, тыс. руб./год	260	290	370

4.4.1.1. Солнечная электрическая установка и АКБ

Этот тип системы включает в себя солнечный фотоэлектрический генератор, состоящий из 76 солнечных панелей, 60 аккумуляторных батарей и системного инвертора мощностью 8 кВт. Аккумуляторная батарея является доминирующим компонентом затрат в системах этого типа, на ее долю приходится 63,1 % от общей стоимости системы. Стоимость электростанции такого типа будет составлять 4752 тыс. руб., а эксплуатационные расходы – 260 тыс. руб. в год. Диаграмма вырабатываемой этим типом системы электроэнергии представлена на рисунке 4.8.

Данная система вырабатывает 41,8 МВт·ч/год электроэнергии, из которых 34,8 МВт·ч/год потребляется электродвигателем переменного тока, а 16,7 % от общего объема выработки (7,0 МВт·ч/год) составляет избыточная электроэнергия. Доля возобновляемой энергии составляет 100% при 0,8 МВт·ч/год неудовлетворенной электрической нагрузки. Системный накопитель имеет полезную номинальную емкость 118 кВт·ч и 49,1 часа автономной работы, что эквивалентно почти двум дням резервного включения. В системах этого типа солнечный фотоэлектрический генератор является единственным источником энергии, а батарея служит резервным источником ночью, в пасмурные дни или и в том, и в другом случае, по мере необходимости.

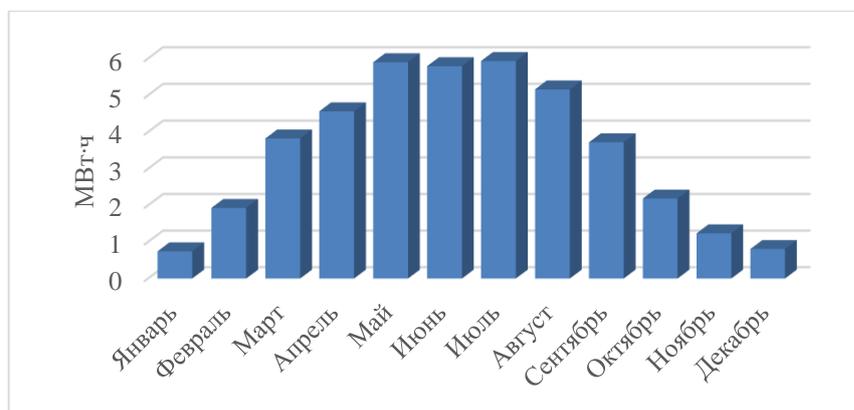


Рисунок 4.8 – Ежемесячное производство электроэнергии СЭС
для сценария 1

4.4.1.2. Гибридная электростанция и АКБ

Этот тип системы состоит из солнечного фотоэлектрического генератора, состоящего из 72 солнечных панелей, 1 ветрогенератора, 52 аккумуляторных батарей и системного преобразователя мощностью 8 кВт. Стоимость электростанции такого типа будет составлять 4416 тыс. руб., а эксплуатационные расходы – 290 тыс. руб. в год. Диаграмма вырабатываемой этим типом системы электроэнергии показана на рисунке 4.9. Стоит отметить, что затраты на покупку ветрогенератора составляют всего 3 % от стоимости всех затрат, его доля составляет 2,99 МВт·ч/год (7 %) к общему объему электроэнергии за год. Следовательно, с точки зрения соотношения затрат и выгод применение гибридной электростанции оправдано.

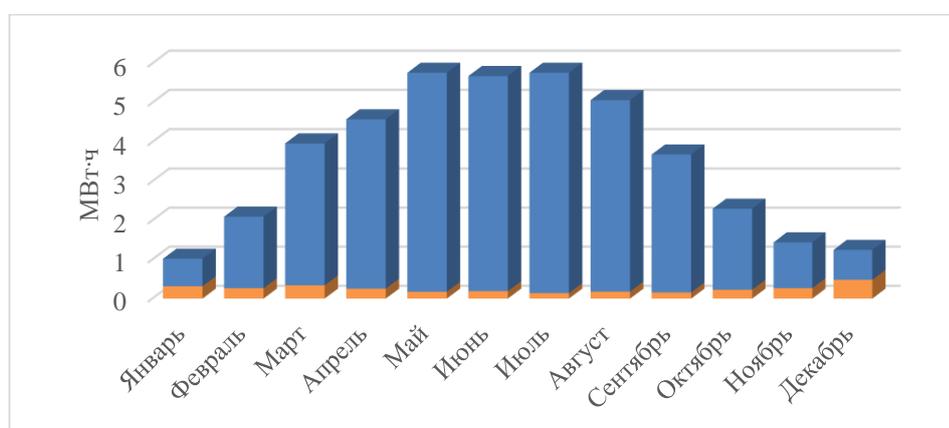


Рисунок 4.9 – Ежемесячное производство электроэнергии гибридной электростанцией для сценария 1:

синий – солнечная ЭС, оранжевый – ветросолнечная ЭС

Эта система вырабатывает 42,6 МВт·ч/год электроэнергии, из которых 34,8 МВт·ч/год потребляется электродвигателем переменного тока, и 18,3 % от общего объема выработки (7,8 МВт·ч/год) составляет избыточная электроэнергия, доступная для зарядки аккумулятора. Доля возобновляемой энергии составляет 100% при 0,4 МВт·ч/год неудовлетворенной электрической нагрузки. Полезная номинальная емкость аккумуляторной системы составляет 110 кВт·ч, а время автономной работы составляет 45,9 часа, что эквивалентно более чем одному дню резервирования. Когда скорость ветра ниже предельной или номинальной скорости, ночью или в пасмурные дни, избыточная выработанная электрическая энергия, сохраняемая в системе аккумуляторных батарей, становится доступной для питания приводного электродвигателя.

4.4.1.3. Ветрогенератор и АКБ

Этот тип системы включает в себя 14 ветрогенераторов, 56 блоков аккумуляторных батарей и системный преобразователь мощностью 8 кВт. В системах этого типа ветер является единственным источником энергии, как показано на рисунке 4.10, причем только на ветрогенераторы приходится около 42,5 % от общей стоимости системы. Стоимость электростанции такого типа будет составлять 5008 тыс. руб., а эксплуатационные расходы – 370 тыс. руб. в год.

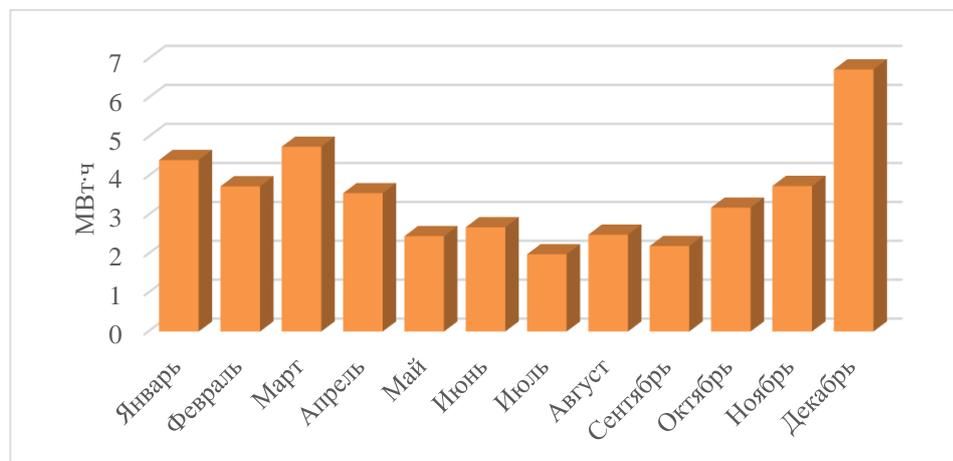


Рисунок 4.10 – Ежемесячное производство электроэнергии ветроэлектростанцией для сценария 1

Эта система вырабатывает 41,9 МВт·ч/год электроэнергии, из которых 34,8 МВт·ч/год потребляется электродвигателем переменного тока, а 16,9 % от общего объема выработки (7,1 МВт·ч/год) составляет избыточная электроэнергия, которая используется для зарядки аккумулятора. Доля возобновляемой энергии составляет 100% при 1,4 МВт·ч/год неудовлетворенной электрической нагрузки. Система имеет полезную номинальную мощность 147 кВт·ч и обеспечивает 61,3 часа автономной работы. Ветрогенератор является единственным источником энергии в данной конфигурации. Когда скорость ветра становится ниже номинальной, аккумуляторная система разряжается, выделяя накопленную энергию для механизированного подъема нефти.

4.4.2 Сценарий 2: Непрерывная эксплуатация УШГН

Результаты моделирования для возможных конфигураций непрерывной работы УШГН приведены в таблице 4.9. При непрерывной работе насоса потребление энергии приводным электродвигателем составляет 192 кВт·ч/сут. при средней нагрузке 8 кВт.

Таблица 4.9 – Результаты моделирования для сценария 2

Параметры	СЭУ	СЭУ+ВЭУ	ВЭУ
Количество солнечных панелей, шт.	151	129	0
Количество ветрогенераторов, шт.	0	4	28
Количество аккумуляторов, шт.	84	72	76
Стоимость электростанции, тыс. руб.	7602	7126	8136
Эксплуатационные расходы, тыс. руб./год	515	500	620

4.4.2.1. Солнечная электрическая установка и АКБ

Электростанция данного типа включает в себя солнечный фотоэлектрический генератор, состоящий из 151 солнечной панели, 84 батареи для аккумулялирования энергии и системный преобразователь мощностью 8 кВт. Как и в системе, представленной в подпункте 4.5.1.1,

аккумуляторные батареи являются доминирующим компонентом затрат в системе этого типа, на их долю приходится 55,2 % от общей стоимости системы. Стоимость электростанции такого типа будет составлять 7602 тыс. руб., а эксплуатационные расходы – 515 тыс. руб. в год. График ежемесячной генерации электроэнергии показан на рисунке 4.11.

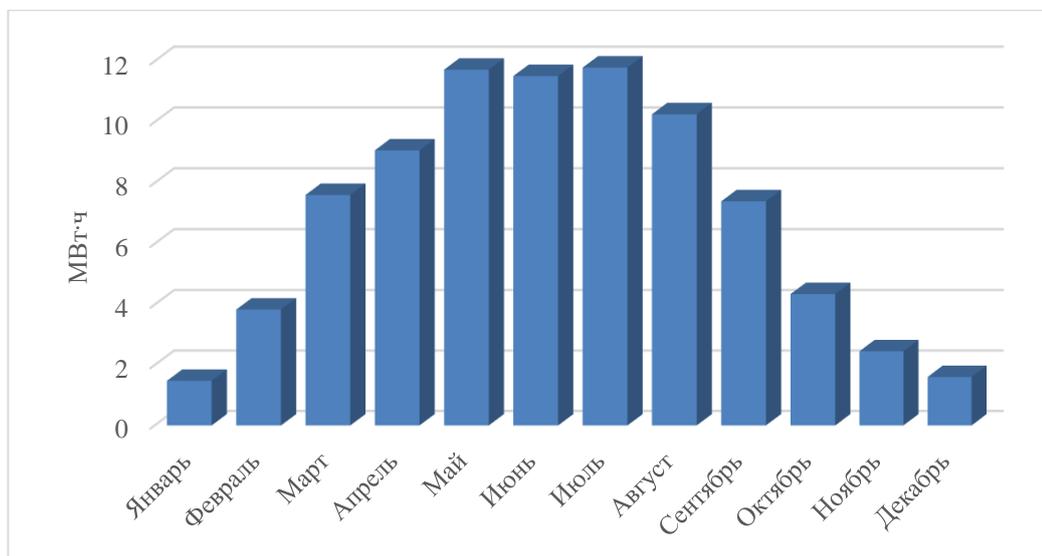


Рисунок 4.11 – Ежемесячная генерация электроэнергии СЭС для сценария 2

Эта система вырабатывает 83,1 МВт·ч/год электроэнергии, из которых 69,6 МВт·ч/год потребляется электродвигателем переменного тока, 16,2 % от общего объема выработки (13,5 МВт·ч/год) приходится на избыточную электроэнергию. Доля возобновляемой энергии составляет 100% при 1,2 МВт·ч/год неудовлетворенной электрической нагрузки. Полезная номинальная емкость аккумуляторной системы составляет 235 кВт·ч, а время автономной работы составляет 52,9 часа, что эквивалентно примерно 2 дням резервирования. В системах этого типа солнечный фотоэлектрический генератор является единственным источником энергии, а аккумулятор служит резервным в ночное время или в пасмурные дни по мере необходимости.

4.4.2.2. Гибридная электростанция и АКБ

Этот тип системы состоит из солнечного фотоэлектрического генератора, состоящего из 129 солнечных панелей, 4 ветрогенераторов, 72 аккумуляторных батарей и системного преобразователя мощностью 8 кВт. Аккумуляторные батареи являются доминирующим компонентом затрат, на долю которых приходится около 50,5 % от общей стоимости системы. Стоимость электростанции такого типа будет составлять 7126 тыс. руб., а эксплуатационные расходы – 500 тыс. руб. в год. График ежемесячного производства электроэнергии показан на рисунке 4.12.

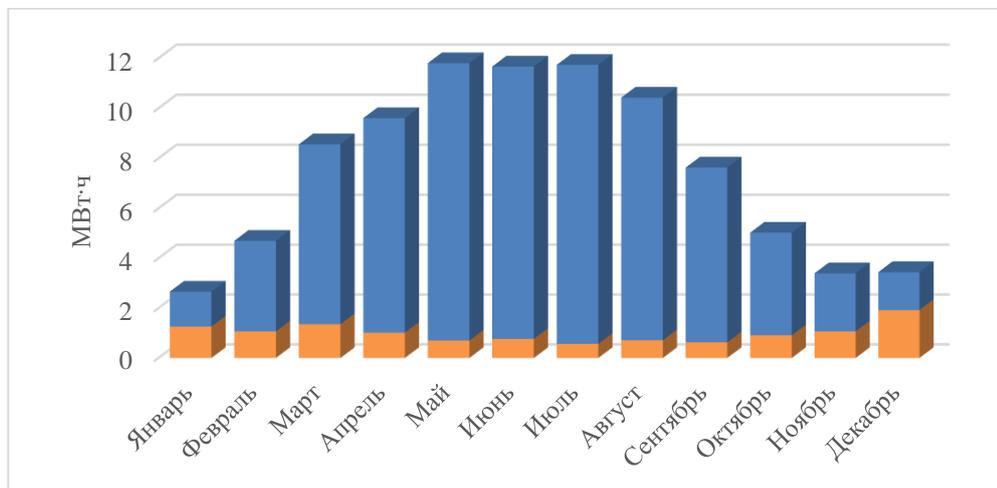


Рисунок 4.12 – Ежемесячное производство электроэнергии гибридной электростанцией для сценария 2

синий – солнечная ЭС, оранжевый – ветросолнечная ЭС

Эта система вырабатывает 90,7 МВт·ч/год электроэнергии, из которых 69,6 МВт·ч/год потребляется электродвигателем переменного тока, 23,2 % от общего объема выработки (21,1 МВт·ч/год) приходится на избыточную электроэнергию, доступной для зарядки аккумуляторных батарей. Доля возобновляемой энергии составляет 100% при 0,2 МВт·ч/год неудовлетворенной электрической нагрузки (неудовлетворенная нагрузка практически отсутствует). Полезная номинальная емкость аккумуляторной системы составляет 191 кВт·ч, а время автономной работы – 49,8 часа, что

эквивалентно 2 суткам работы УШГН. Влияние изменчивости погодных условий уменьшается, поскольку наличие двух источников выработки электроэнергии гарантирует, что неудовлетворенная нагрузка и накопление мощности сведены к минимуму по сравнению с установкой, состоящей только из солнечных панелей.

4.4.2.3. Ветрогенератор и АКБ

Этот тип системы включает в себя 28 ветрогенераторов, 76 аккумуляторных батарей и системный преобразователь мощностью 8 кВт. В системах этого типа ветер является единственным источником энергии, причем только на ветрогенераторы приходится около 52,3 % от общей стоимости системы. Стоимость электростанции такого типа будет составлять 8136 тыс. руб., а эксплуатационные расходы – 620 тыс. руб. в год. График ежемесячной генерации электроэнергии показан на рисунке 4.13.

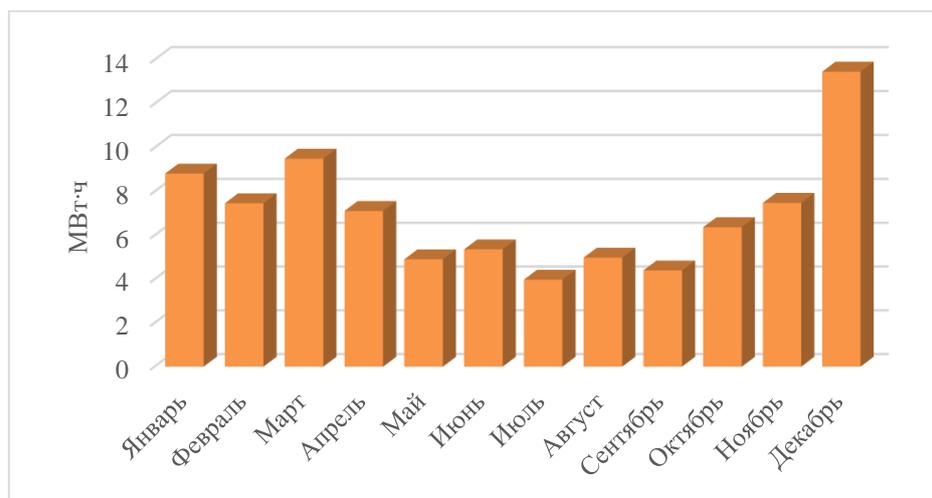


Рисунок 4.13 – Ежемесячное производство электроэнергии ветроэлектростанцией для сценария 2

Эта система вырабатывает 83,8 МВт·ч/год электроэнергии, из которых 69,6 МВт·ч/год потребляется электродвигателем переменного тока, 16,9 % от общего объема выработки (14,2 МВт·ч/год) приходится на избыточную электроэнергию, доступную для зарядки аккумуляторных батарей. Доля возобновляемой энергии составляет 100% при 1,5 МВт·ч/год неудовлетворенной электрической нагрузки. Система хранения энергии из аккумуляторных батарей имеет полезную номинальную емкость 215 кВт·ч и

обеспечивает 52,1 часа автономной работы. Для этого типа систем ветрогенератор является основным источником энергии, в то время как аккумуляторная система накапливает энергию для добычи нефти, когда скорость ветра ниже минимальной скорости, при которой начинает вращаться ветрогенератор.

Существует несколько условий, которые могут повлиять на решение о выборе типа системы в качестве оптимального. Несколько факторов могут сыграть значительную роль в определении оптимального типа системы. Необходимо учитывать особенности условий добычи нефти, уровень удаленности, наличие дополнительных нагрузок, наличие поблизости ЛЭП и доступность дизельного топлива, природного газа или попутного нефтяного газа для питания генератора внутреннего сгорания. Также важно отметить, что неудовлетворенная нагрузка является конечным критерием при выборе между двумя одинаково выполнимыми конфигурациями, а не только стоимость системы.

Представим полученные результаты на диаграммах (рисунок 4.14). В рассмотренных вариантах питание осуществлялось от возобновляемых источников электроэнергии со следующими конфигурациями:

- СЭУ, периодический режим эксплуатации скважины, электростанция включает в себя только солнечные панели и аккумуляторные батареи;
- СЭУ и ВЭУ, периодический режим эксплуатации скважины, электростанция включает в себя солнечные панели, ветрогенераторы и АКБ;
- ВЭУ, периодический режим эксплуатации скважины, электростанция включает в себя только ветрогенераторы и АКБ;
- СЭУ, непрерывный режим эксплуатации скважины, электростанция включает в себя только солнечные панели и АКБ;
- СЭУ и ВЭУ, непрерывный режим эксплуатации скважины, электростанция включает в себя солнечные панели, ветрогенераторы и АКБ;
- ВЭУ, непрерывный режим эксплуатации скважины, электростанция включает в себя только ветрогенераторы и АКБ.



Рисунок 4.14 – Сравнение ключевых показателей установок на основе ВИЭ

Из рисунка 4.14 можно сделать следующий вывод:

- соотношение времени работы электропривода насоса и времени простоя в периодическом режиме эксплуатации скважины не влияет на то, какой тип конфигурации станет оптимальным, так как гибридная электростанция на основе солнечных элементов и ветрогенераторов оказалась наименее затратной, независимо от режима эксплуатации;

- такие параметры, как общая генерация, избыточная электроэнергия, неиспользованная электроэнергия и накопленная электроэнергия растут с увеличением ежедневных часов работы УШГН для всех случаев периодической эксплуатации;

- Гибридное производство электроэнергии при постоянной эксплуатации скважины способствует повышению уровня избыточной генерации энергии и снижению объема неудовлетворенной нагрузки по сравнению с эксплуатацией, проводимой с переменной периодичностью.;

- гибридная выработка электроэнергии в случае непрерывного режима эксплуатации скважины минимизирует затраты на закупку оборудования при увеличении общей выработки ЭЭ и ее избытка, в то время как непрерывный режим добычи нефти минимизирует неудовлетворенную нагрузку и накопление энергии.

На рисунках 4.15 и 4.16 представлены графики количественных составляющих электростанции, показывающие зависимость количества солнечных фотоэлектрических панелей от принятых ранее критериев выбора. График на рисунке 4.16 показывает зависимость общей приведенной стоимости электростанции к изменениям средней скорости ветра и среднесуточной солнечной инсоляции.

Как правило, стоимость системы для непрерывного режима работы значительно выше, чем у системы для периодического режима, но следует принимать во внимание не только стоимость системы, но и общую неудовлетворенную нагрузку. Вариант гибридной электростанции для непрерывного режима добычи нефти будет наиболее надежным и,

следовательно, наиболее предпочтительным. С технической и экономической точек зрения использование гибридной электростанции особенно оправдано для скважин с большим дебитом, где простои в добыче повлекут значительные убытки из-за недополученной нефти.

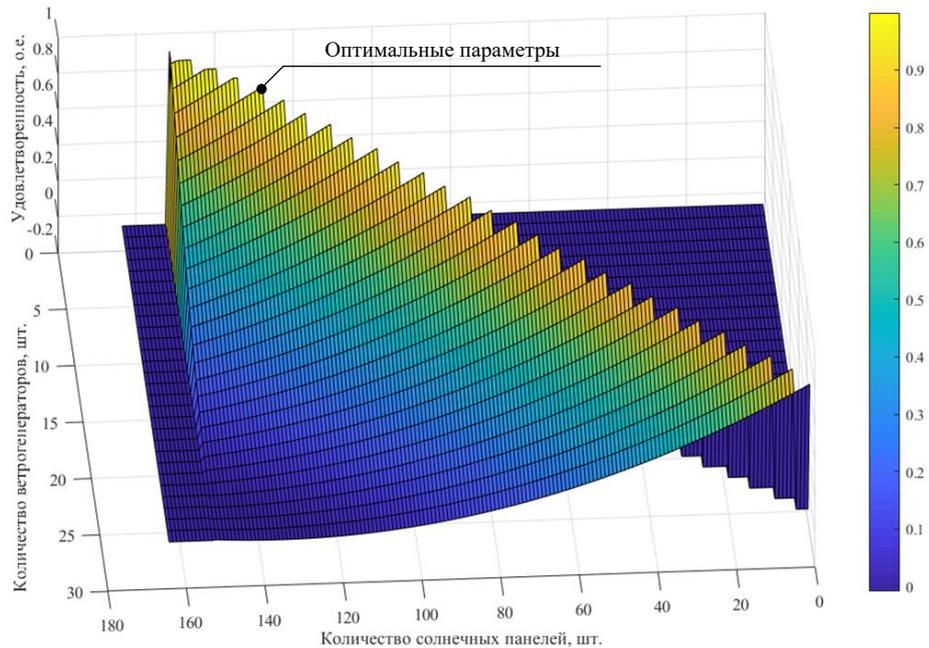


Рисунок 4.15 – График количественных составляющих электростанции

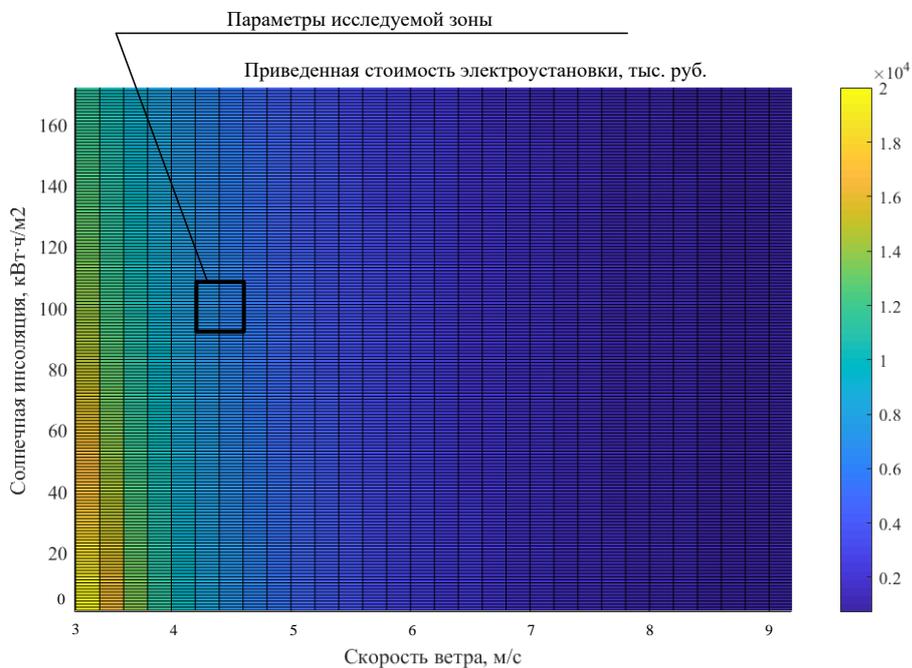


Рисунок 4.16 – Поверхностный график, показывающий зависимость общей приведенной стоимости к изменениям средней скорости ветра и среднесуточной солнечной инсоляции

4.5 Разработка и исследование имитационной модели ветросолнечной энергетической установки для электроснабжения скважины, эксплуатируемой установкой ШГН

Для исследования процессов в ветросолнечной энергетической установке (ВСЭУ) методом имитационного моделирования была построена компьютерная модель.

Моделирование ВСЭУ проводится в среде Matlab Simulink. Имитационная модель состоит из следующих подсистем:

- модель системы фотоэлектрического преобразователя;
- модель ветроэнергетической установки;
- модель системы аккумулирования энергии.

За основу имитационной модели ветросолнечной энергетической установки берется схема подключения ВСЭУ, представленная на рисунке 4.17 [102].

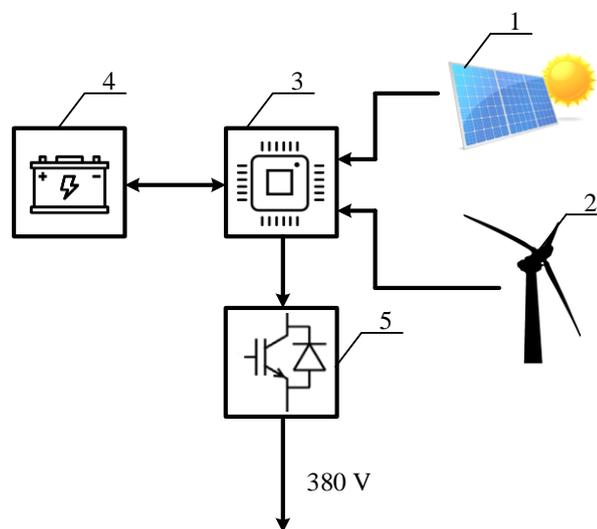


Рисунок 4.17 – Схема подключения ВСЭУ

Фотоэлектрическая *PV*-система состоит из солнечных батарей, которые производят электричество путем прямого преобразования солнечной энергии в электричество. Фотоэлементы работают по принципу фотоэлектрического

эффекта: солнечный свет состоит из фотонов, каждый из которых содержит разное количество энергии (в зависимости от длины волны). Когда фотон проходит через *PV*-элемент, его энергия передается электрону, который теперь имеет достаточно энергии, чтобы сойти со своей прежней орбиты. Это движение электронов порождает ток, таким образом преобразовывается солнечный свет в электрическую энергию.

Модель системы фотоэлектрического преобразователя представлена на рисунке 4.18. Данная модель состоит из следующих элементов: фотоэлектрическая солнечная батарея, *RLC*-фильтр, инвертор.

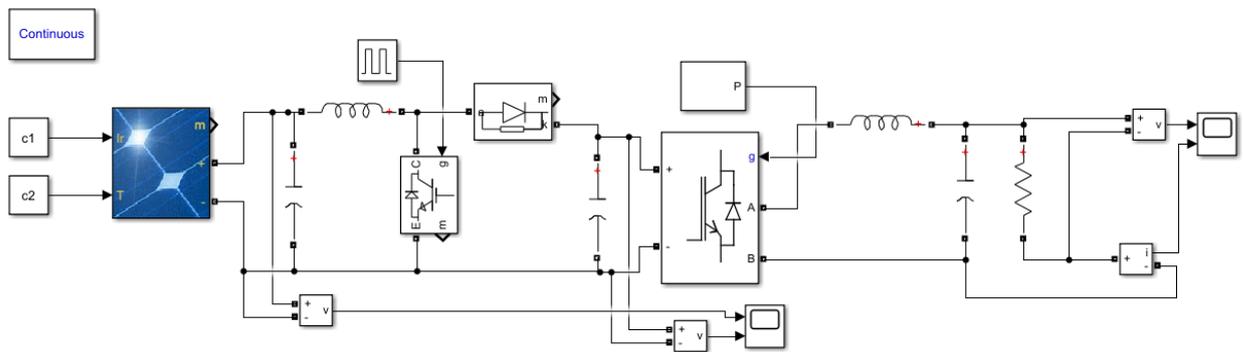


Рисунок 4.18 – Модель системы фотоэлектрического преобразователя

Важнейшей характеристикой солнечной батареи во время эксплуатации являются вольтамперные характеристики. Результаты моделирования представлены на рисунках 4.19 – 4.20.

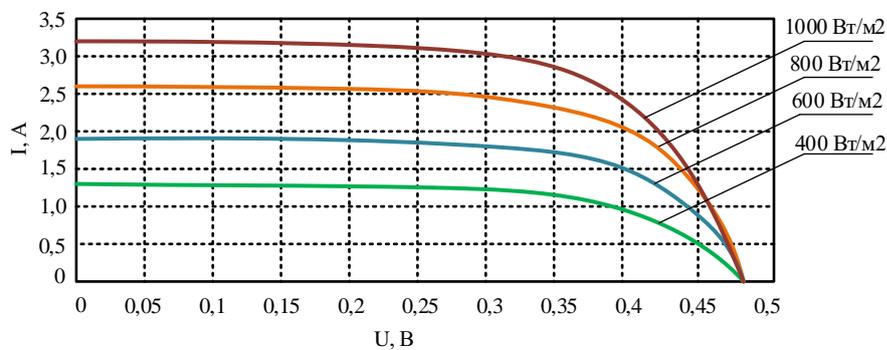


Рисунок 4.19 – Вольтамперная характеристика системы фотоэлектрического преобразователя при различных значениях интенсивности солнечного излучения и при постоянной температуре окружающей среды

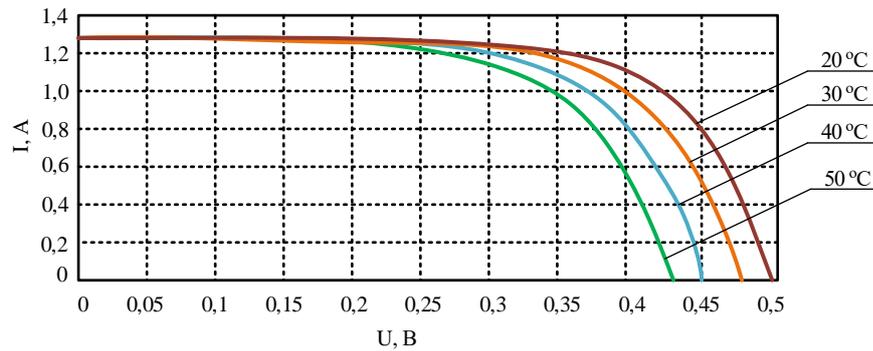


Рисунок 4.20 – Вольтамперная характеристика системы фотоэлектрического преобразователя при постоянных значениях интенсивности солнечного излучения и при различной температуре окружающей среды

Модель ветроэнергетической установки представлена на рисунке 4.21. Данная модель состоит из следующих элементов: блок ветрогенератора, выпрямитель, фильтр и активная нагрузка.

Основной блок данной модели – это Wind Turbine Induction Generator (WTIG). Обмотка статора соединяется непосредственно с сетью, ротор управляется ветряным двигателем. Мощность, полученная ветряным двигателем, преобразована в электроэнергию генератором и передается в сеть обмоткой статора. Пропорционально-интегральный (ПИ) контроллер используется для управления углом наклона лопастей, чтобы ограничить выходную электрическую мощность до номинальной механической мощности. Угол наклона поддерживается постоянным на уровне 0 градусов, когда измеренная выходная электрическая мощность ниже номинального значения. Когда электрическая мощность превышает свое номинальное значение, ПИ-регулятор увеличивает угол наклона, чтобы вернуть мощность к ее номинальному значению.

Результаты моделирования представлены на рисунке 4.22.

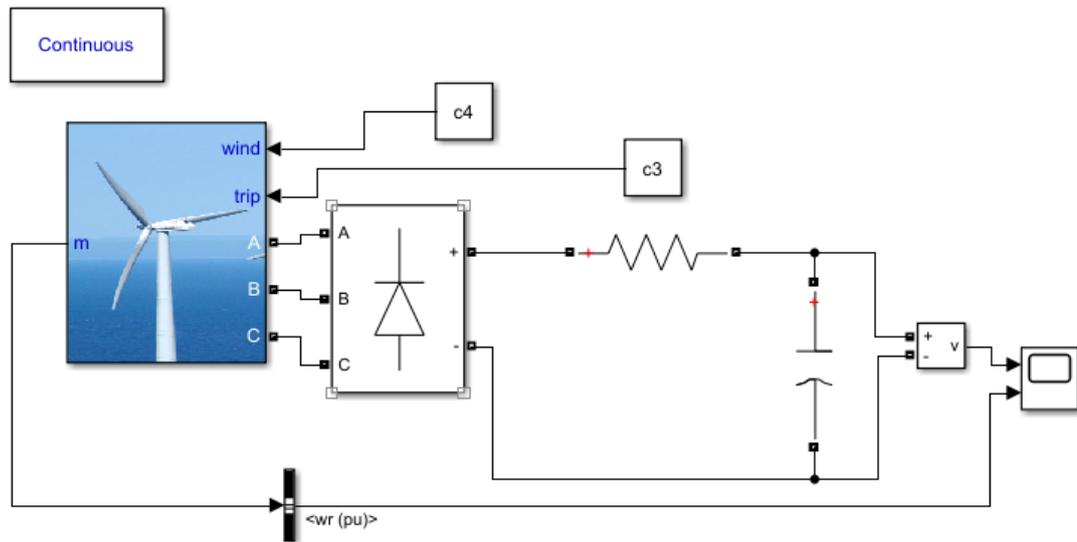


Рисунок 4.21 – Модель ветроэнергетической установки

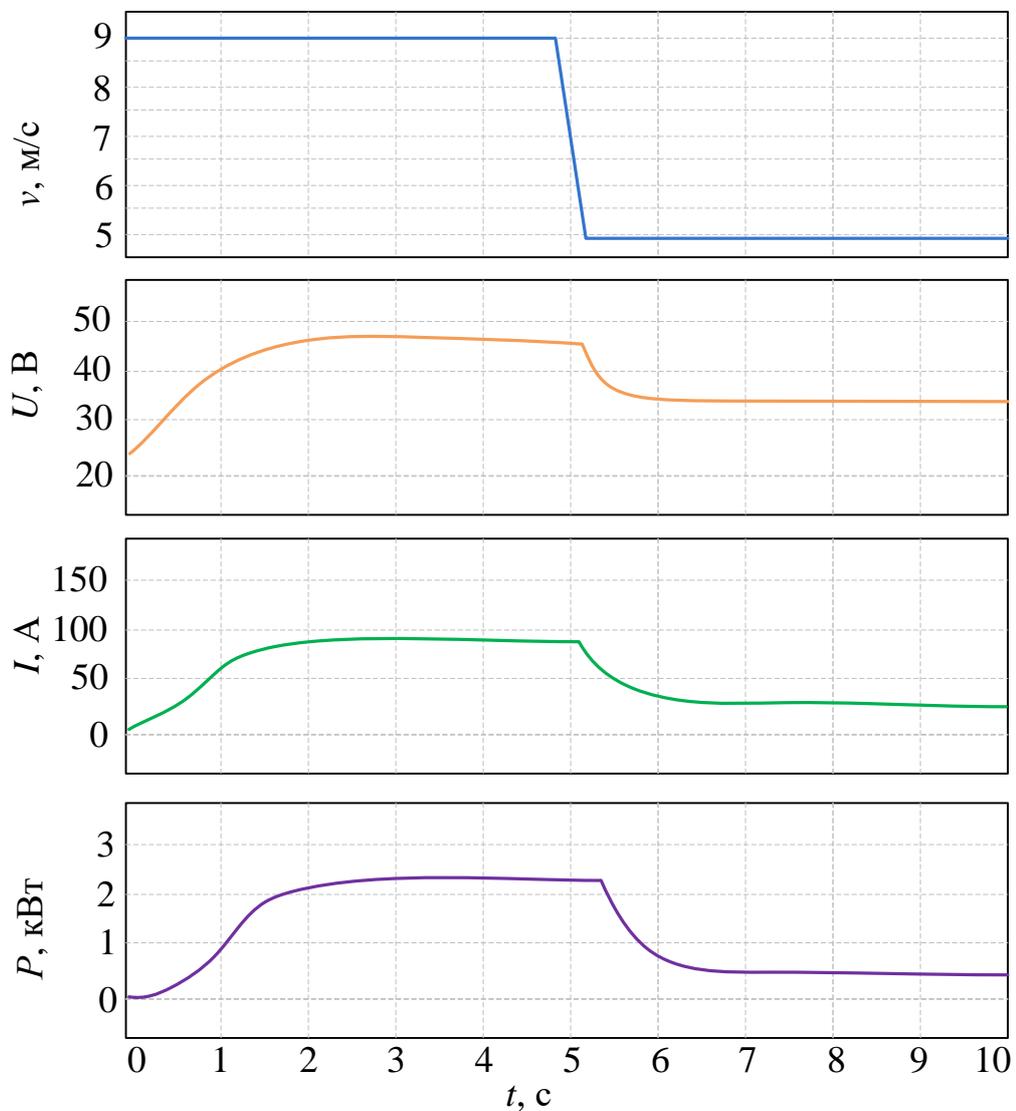


Рисунок 4.22 – Влияние ступенчатого изменения скорости ветра на напряжение, ток и полезную мощность ветроэнергетической установки

Модель системы аккумулирования энергии представлена на рисунке 4.23. Данная модель состоит из блока аккумуляторной батареи, двунаправленного блока постоянного тока (БПТ) и схемы контроля БПТ.

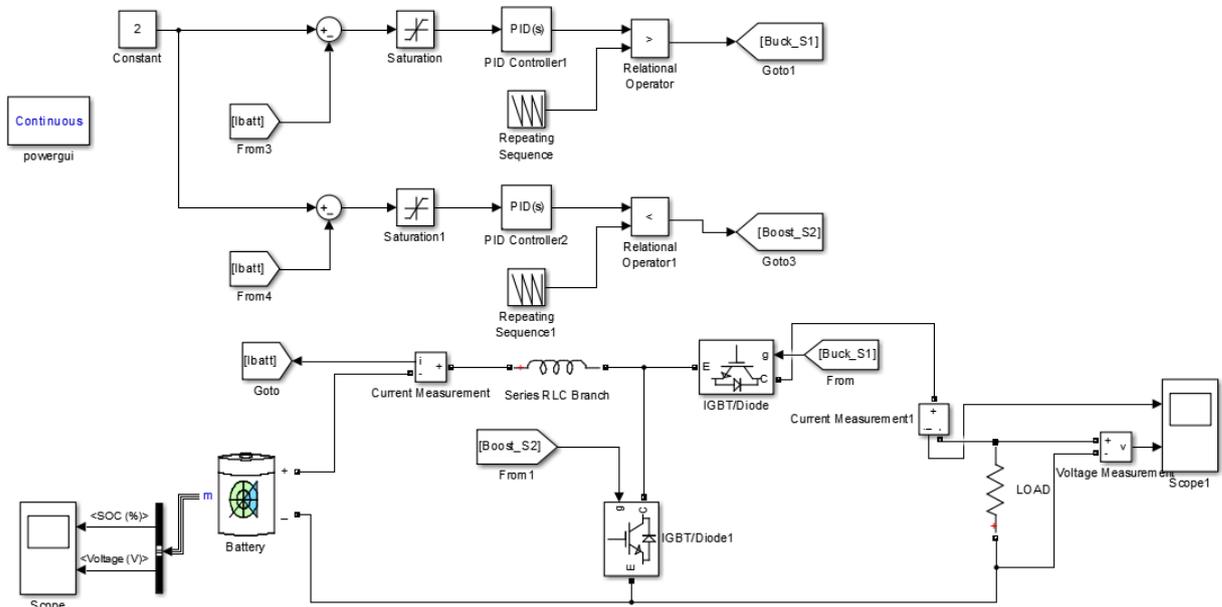


Рисунок 4.23 – Модель системы аккумулирования энергии

Блок Battery реализует общую динамическую модель, которая представляет самые широко используемые типы аккумуляторных батарей. Двунаправленный блок постоянного тока используется с целью передачи энергии от фотоэлектрической панели потребителю энергии в течение времени, когда скорость ветра и уровень солнечной радиации достаточны, чтобы удовлетворить нагрузку, когда напряжение на шине постоянного тока низкое.

Объединив модели системы фотоэлектрического преобразователя, ветроэнергетической установки и системы аккумулирования энергии, получаем модель ветросолнечной энергетической установки, представленную на рисунке 4.24.

В математическом пакете Simulink Matlab были сгенерированы имитационные модели всех основных составляющих ветросолнечной энергетической установки. Были получены осциллограммы вольтамперных

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

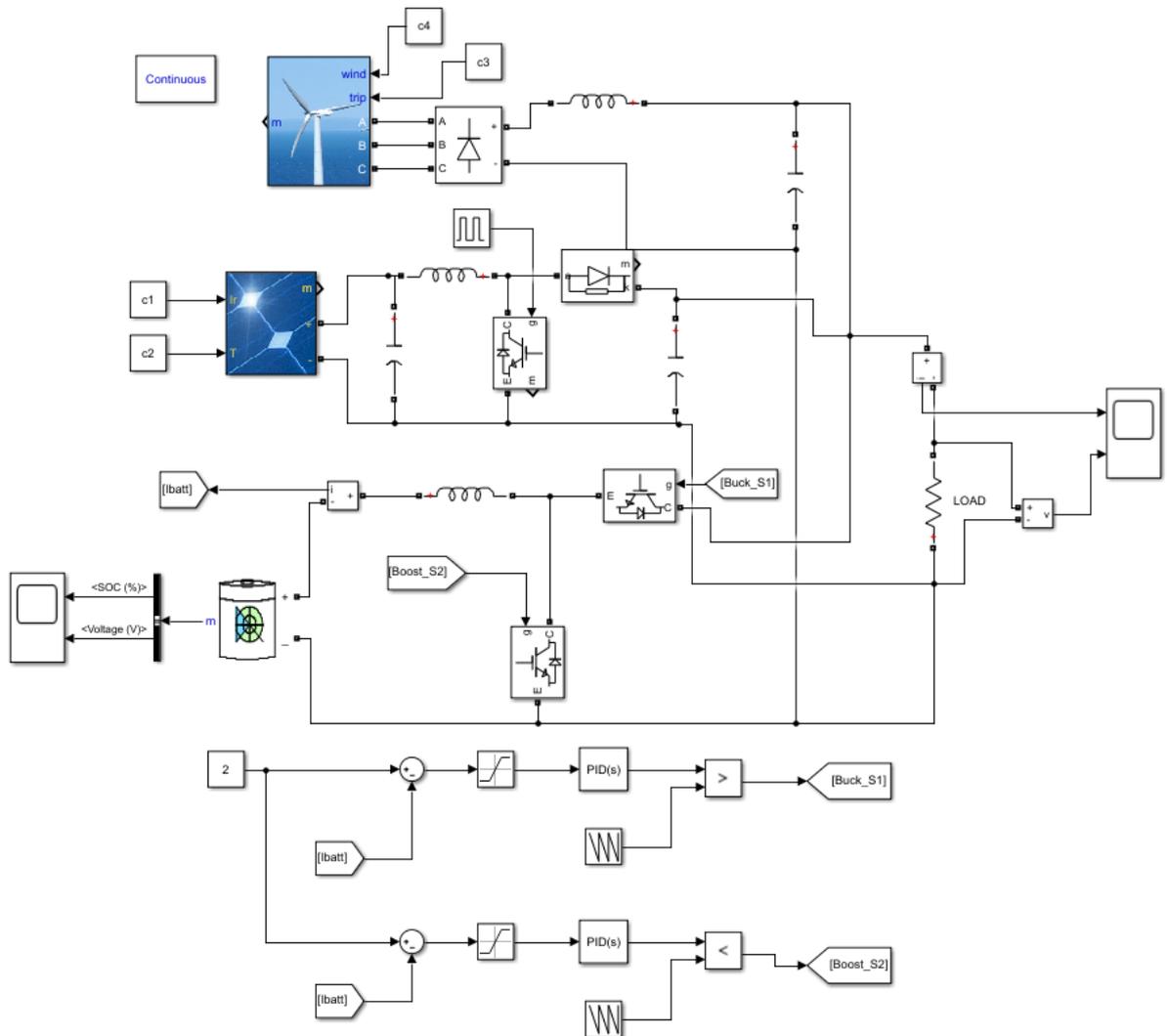


Рисунок 4.24 – Модель ветросолнечной энергетической установки

Разработанная модель ветросолнечной энергетической установки может быть использована при проектировании энергетических установок на базе возобновляемых источников энергии для электроснабжения удаленных скважин.

Выводы по главе 4:

1. Автором предложена методика подбора элементов ветросолнечной электростанции для питания скважин, эксплуатируемых УШГН, позволяющая выбрать оптимальную конфигурацию электростанции для различных режимов эксплуатации скважин.

2. Установлено, что гибридная выработка электроэнергии в случае непрерывной эксплуатации скважины приводит к более высокому уровню избыточной электроэнергии и меньшему количеству неудовлетворенной нагрузки по сравнению с периодическим режимом эксплуатации; а также минимизирует затраты на закупку оборудования при увеличении общей выработки ЭЭ и ее избытка, в то время как непрерывная добыча нефти минимизирует неудовлетворенную нагрузку и накопление мощности.

3. В результате моделирования доказано, что вариант гибридной электростанции для непрерывной добычи нефти будет наиболее надежным и, следовательно, наиболее предпочтительным. С технической и экономической точек зрения использование гибридной электростанции особенно оправдано для скважин с большим дебитом, где простои в добыче повлекут значительные убытки из-за недополученной нефти.

ГЛАВА 5. Результаты лабораторных и практических испытаний предложенных технических решений

5.1 Разработка интеллектуальной станции управления скважиной, эксплуатируемой установкой ШГН

Функциональность и надежность автоматических систем контроля и управления электротехническими комплексами УШГН являются важными факторами эффективной эксплуатации нефтедобывающих скважин. Это обуславливается сложными условиями эксплуатации оборудования и жесткими ценовыми рамками (необходимо обеспечить конкурентоспособность и рентабельность предлагаемых разработок).

Анализ величины и характера изменений внешних нагрузок, определяемых путем измерения мощностей, потребляемых электродвигателями УШГН, является одним из наиболее перспективных методов приборного контроля и оценки технического состояния штанговых насосных установок.

Предложенные модели использованы при разработке станции управления электроприводом УШГН в рамках НИР «Автоматизированная система управления оптимизацией добычи нефти» по договору № Р582/2022п от 30.06.2022 между АО «ИК «Квантор» и УГНТУ.

Структура разработанного скважинного контроллера показана на рисунке 5.1.

Элементная база ИСУ и скважинного контроллера должна обеспечивать работу в широком диапазоне температур – от минус 40 до +50 °С, так как нефтепромыслы могут находиться в местах с очень суровым климатом. Часто ИСУ оснащаются системами вентиляции для предотвращения перегрева элементов летом и системами электроподогрева для работы в зимних условиях [79].

Контроллер ИСУ выполнен на базе цифрового сигнального процессора (DSP) OMAPL137DZKBA3 фирмы Texas Instruments [99]. В целях импортозамещения можно использовать процессор 1867BM7T фирмы АО НИИЭТ [45]. В панели управления используется плёночная клавиатура с интегрированными кнопками и элементами индикации. Индикация режимов работы осуществляется с помощью светодиодов. Для считывания архивов используется USB-порт, для подключения датчиков и удаленного управления – порты RS-485, CAN и Ethernet. Для подключения мобильных устройств и беспроводных датчиков используются преобразователи интерфейсов Bluetooth и Wi-Fi.

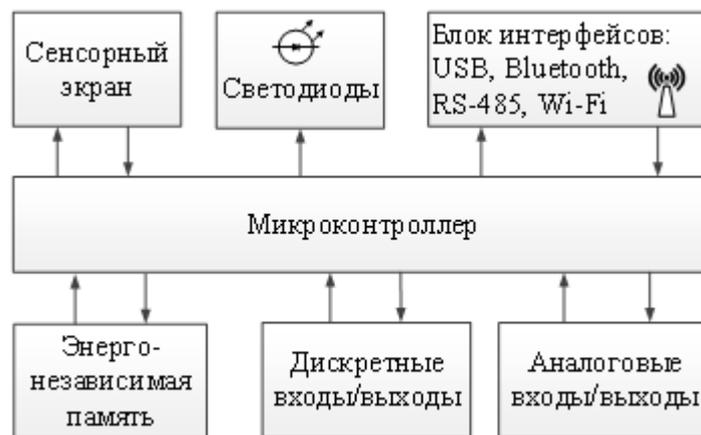


Рисунок 5.1 – Структурная схема скважинного контроллера станции управления

Визуализация и обработка ваттметрограмм осуществляются с помощью разработанного специализированного программного обеспечения, поставляемого в комплекте со станцией управления.

Блок-схема алгоритма работы контроллера ИСУ показана на рисунке 5.2.

После включения питания производится загрузка данных о скважине и об установленном нефтедобывающем оборудовании, наземном и погружном, значениях нормативного удельного расхода электроэнергии установки ШГН. Далее производится опрос датчиков технологических параметров, датчиков динамометрирования и ваттметрирования. Если сигналы с датчиков

показывают аварийный режим работы установки, то производится подача команды на останов электропривода. Аварийными режимами работы являются обрыв штанг, обрыв клиноременной передачи, отсутствие давления на устье, срыв подачи и другие [60].

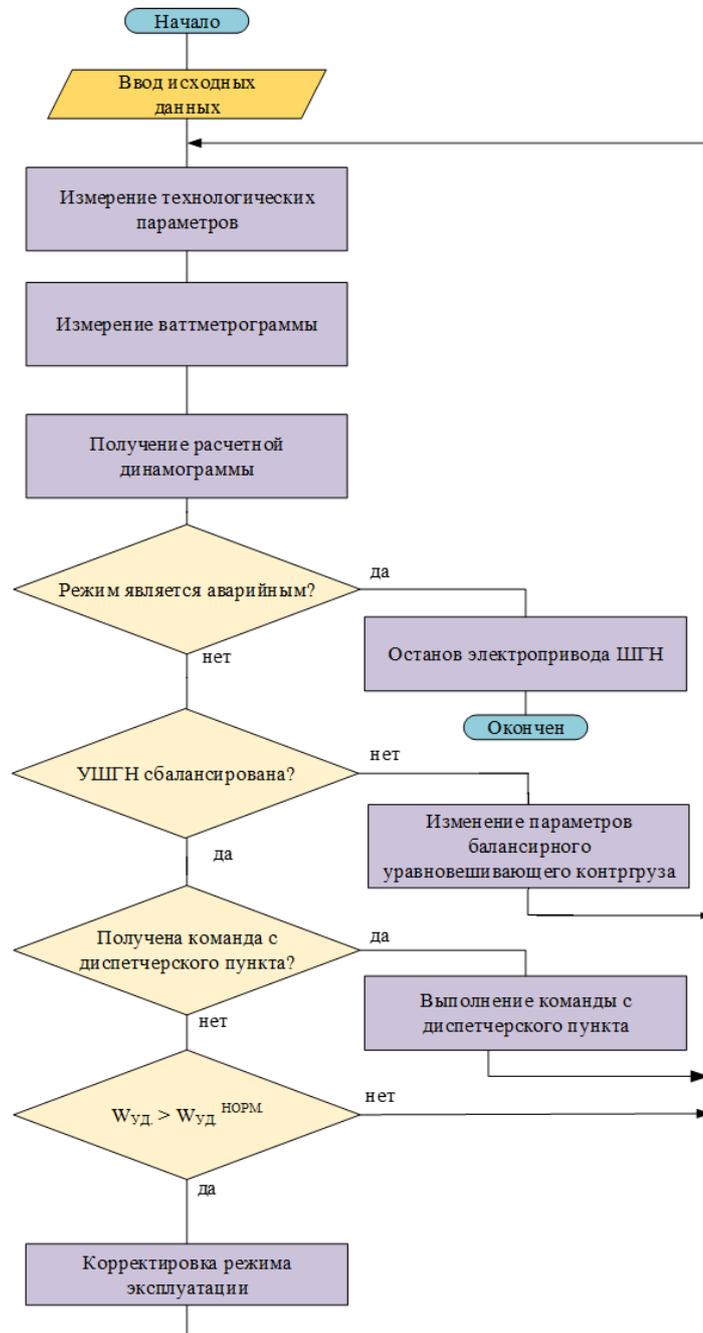


Рисунок 5.2 – Блок-схема работы контроллера ИСУ

В случае поступления команды с диспетчерского пункта производится ее выполнение. Далее производится расчет удельного расхода электроэнергии $W_{уд}$. Если удельный расход электроэнергии превышает нормативное для

данной скважины значение $W_{уд.}^{НОРМ.}$, то производится корректировка режима эксплуатации.

Разработанная «ИК «Квантор» при непосредственном участии автора станция управления показана на рисунке 5.3.



Рисунок 5.3 – Станция управления электроприводом УШГН

На рисунке 5.4 показана зависимость удельного расхода электроэнергии от частоты качаний и длины хода установки ШГН. Видно, что наиболее экономичными являются режимы с максимальной длиной хода штока (3,0 м) и низкой частотой качаний (2 мин⁻¹).

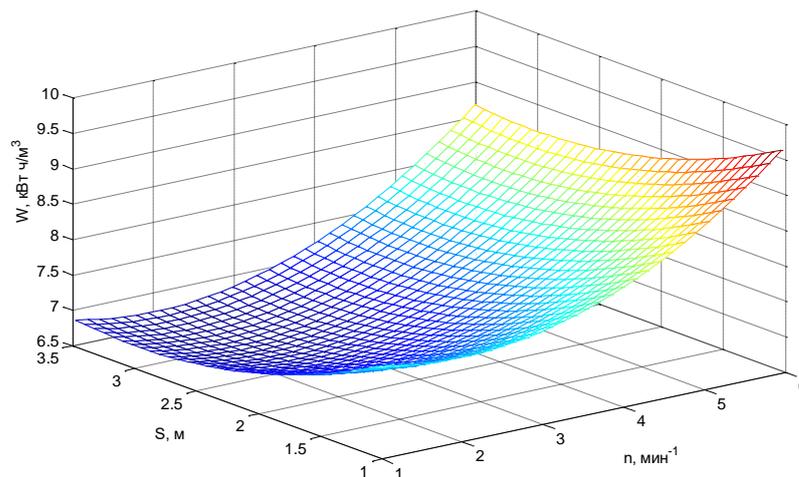


Рисунок 5.4 – Функция удельного энергопотребления установки ШГН реальной скважины с двумя входными параметрами – длиной хода и частотой качаний

5.2 Экономия электроэнергии при механизированной добыче нефти на скважинах действующего фонда, эксплуатируемых установками ШГН

Для практической проверки основных положений модели энергопотребления электротехнического комплекса установки ШГН, приведенной в главе 2, от «ИК «Квантор» был запрошен ряд практических ваттметрограмм с действующих нефтяных скважин.

На рисунке 5.5 представлена ваттметрограмма с коэффициентом неуравновешенности $k = 0,74$. Недостаточная величина встречного крутящего момента, создаваемого на несбалансированном балочном узле кривошипно-шатунными нагрузками при опускании колонны скважинных насосных штанг, приводит к переходу приводного ЭД в генераторный режим, а ход штока насоса сопровождается повышенными нагрузками на редуктор. Следствием этих процессов является увеличение мощности приводного ЭД и удельных энергозатрат на подъем пластовой жидкости.

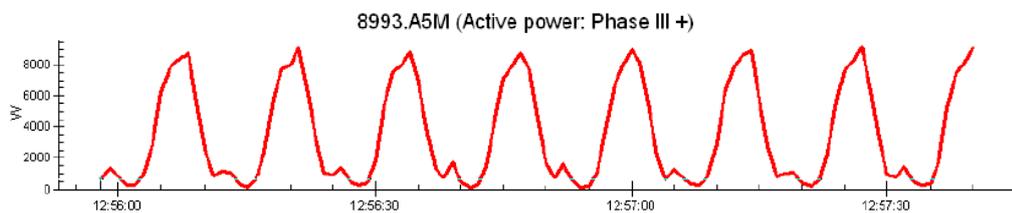


Рисунок 5.5 – Ваттметрограмма с коэффициентом неуравновешенности $k = 0,74$

На рисунке 5.6 представлена ваттметрограмма скважины, по данным которой проводились исследования в главе 2.

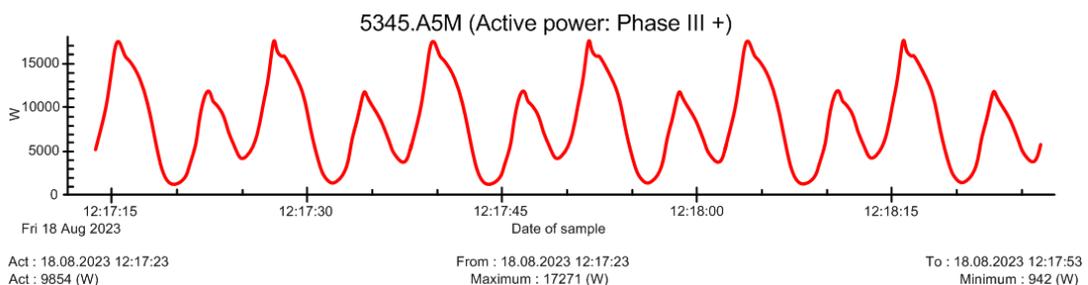


Рисунок 5.6 – Исходная ваттметрограмма

На данной скважине проведены сравнительные испытания УШГН с установленной станцией управления до балансировки противовесов установки и после. Испытания проводились в два этапа. На первом этапе насосная установка была оснащена станцией управления «ИК «Квантор» и установлены заданные технические параметры штанговой насосной установки. Методология исследования включала непрерывные измерения энергопотребления и дебита скважины. На втором этапе была произведена балансировка УШГН. Программа испытаний была повторена в полном объеме при идентичном режиме работы штанговой насосной установки.

Ваттметрограмма полностью сбалансированной УШГН представлена на рисунке 5.7. Каждый полный цикл хода штока скважинного насоса включает два полупериода с отчетливыми пиками, которые соответствуют горизонтальному положению кривошипа. В соответствии с действующими нормами, разница в максимальных значениях мощности, потребляемой приводным электродвигателем УШГН во время опускания и подъема штока, должна оставаться в пределах 10%. Это значение соответствует ранее упомянутой ваттметрограмме.

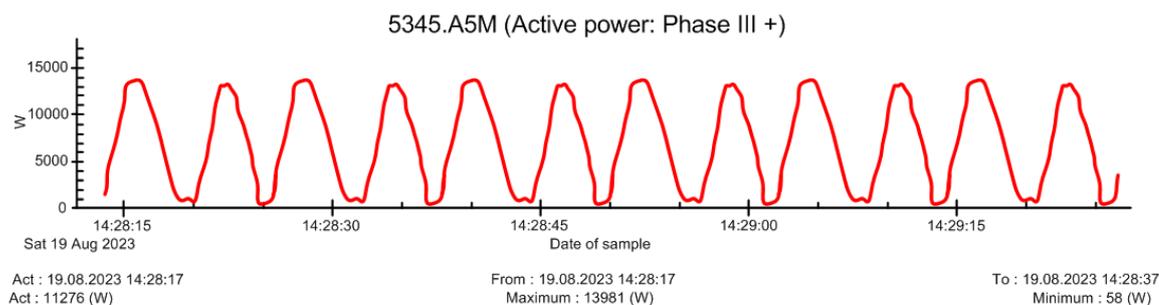


Рисунок 5.7 – Ваттметрограмма после уравнивания

Графическая интерпретация результатов сравнения приведена на рисунках 5.8 и 5.9. Как видно из графиков, погрешность расчета составила (10 – 15) %, что можно считать достаточно хорошим результатом с учетом погрешностей средств измерения станции управления.

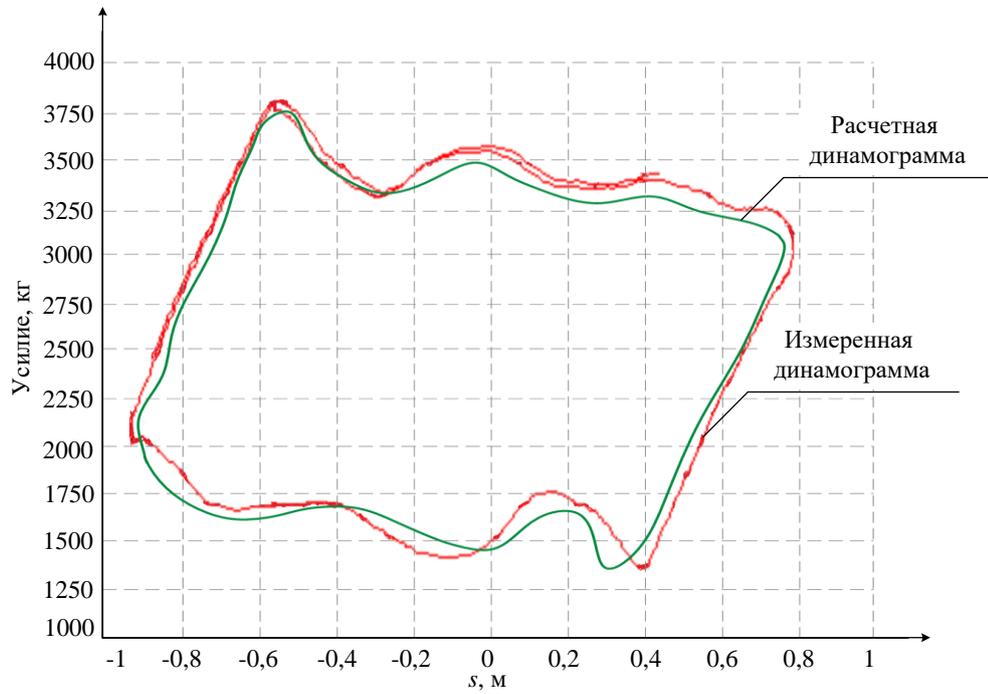


Рисунок 5.8 – Расчетная и измеренная динамограммы УШГН до балансировки

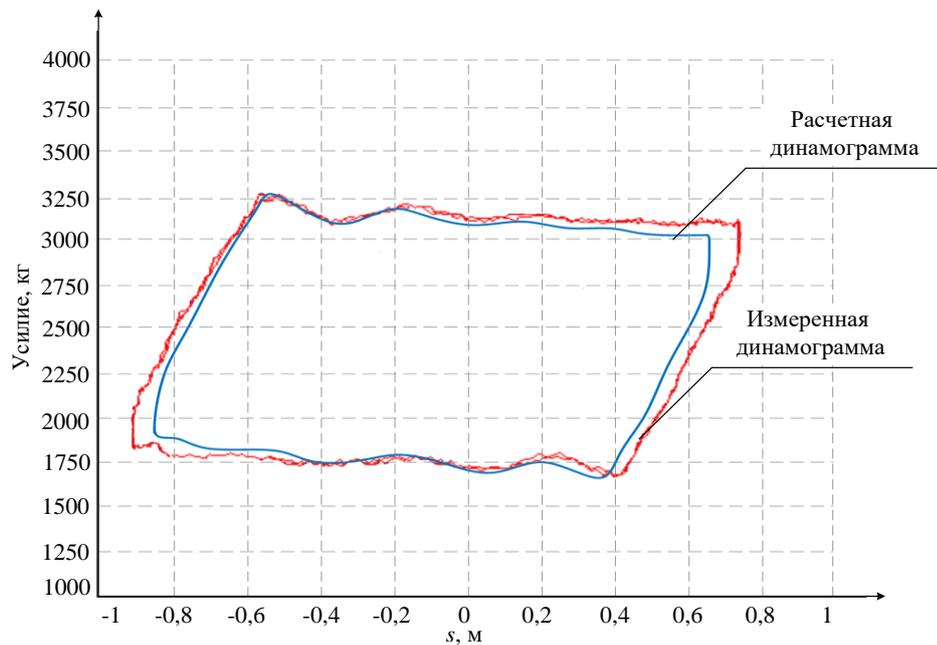


Рисунок 5.9 – Расчетная и измеренная динамограммы сбалансированной установки ШГН

Таким образом можно сделать следующие выводы:

- интеллектуальная станция управления осуществляет функции диагностики нефтедобывающего оборудования в реальном времени: дефекты

погружного оборудования определяются на основе анализа динамограмм, а дефекты наземного оборудования – на основе анализа ваттметрограмм;

- разработанная модель «ШГН – станок качалка» с имитацией влияния изменения параметров балансирного уравнивающего контргруза на выходные параметры УШГН позволяет отладить алгоритмы ИСУ с функцией автоматической балансировки УШГН. Погрешность вычислений по модели не превышает (10 – 15) %.

5.3 Испытания вентильного двигателя при циклически изменяющихся нагрузках на лабораторном стенде, имитирующем работу УШГН

С целью экспериментальной проверки разработанных решений по использованию ВД для привода ШГН был использован экспериментальный электромеханический стенд, содержащий ВД и машину постоянного тока.

Экспериментальный электромеханический стенд состоит из электрической машины постоянного тока типа ПЛ-072 и вентильного двигателя типа ЕСМА-С10604ЕС с соединенными валами. В качестве объекта управления используется ВД. Имитация работы штангового насоса реализована путем регулирования напряжения в цепи якоря генератора постоянного тока (ГПТ) модулем тиристорного преобразователя. Фотография экспериментальной установки показана на рисунке 5.10. В отличие от асинхронных, вентильные электродвигатели требуют наличия специализированной системы управления для своей работы. Этот контрольный механизм отвечает за подачу напряжения на статора, основываясь на положении ротора. Это необходимо для создания электромагнитного поля, которое может притягивать магнитные полюса ротора, заставляя его поворачиваться на нужный угол. При соблюдении условий ортогональности между потоками статора и ротора возможно поддержание наибольшего вращающего момента движущей силы, несмотря на изменения в частоте вращения. Это предотвращает выход ротора из

синхронизации и позволяет синхронной машине функционировать с максимальной эффективностью. Схема подключения ГПТ и ВД в испытательной установке представлена на рисунке 5.11.

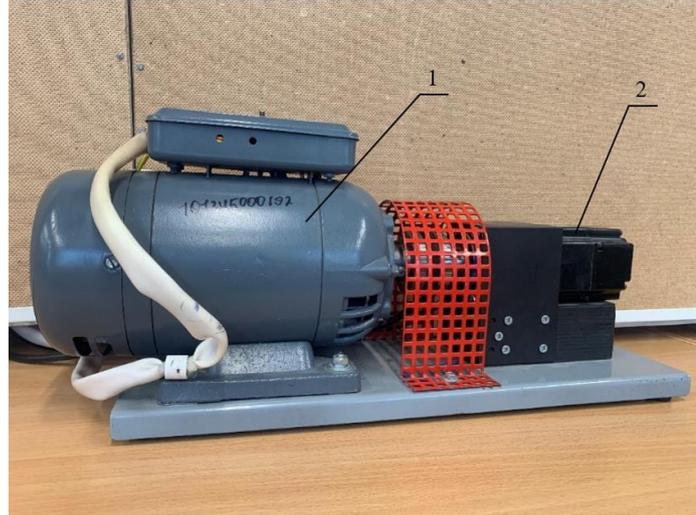


Рисунок 5.10 – Фотография экспериментального стенда

1 – ГПТ, имитирующий нагрузку УШГН; 2 – вентильный электродвигатель

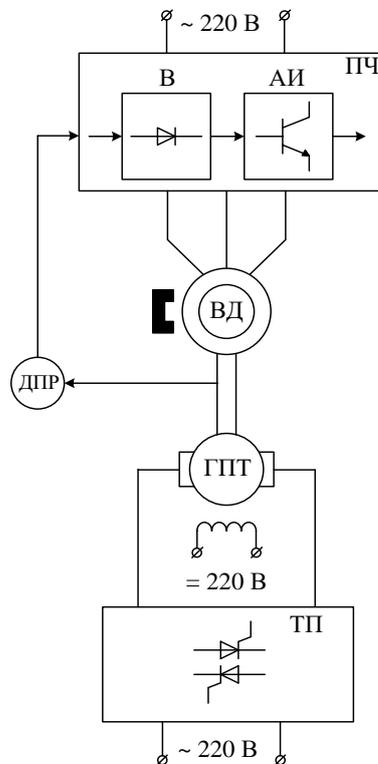


Рисунок 5.11 – Схема подключения ГПТ и ВД в испытательной установке

В – выпрямитель; АИ – автономный инвертор; ПЧ – преобразователь частоты;

ДПР – датчик положения ротора; ТП – тиристорный преобразователь

В процессе испытаний были воспроизведены и проанализированы разные режимы работы оборудования, которые наиболее критичны во время реальной эксплуатации:

- 1) режим резкого увеличения и снижения нагрузки;
- 2) режим резкого подъема напряжения в питающей сети.

Для анализа использовались зарегистрированные показатели, такие как частота вращения, токи на фазах, эффективность двигателя, момент сопротивления и входное напряжение на преобразователе частоты. Цикл работы УШГН отличается двумя четко выраженными периодами: увеличением и снижением нагрузки. Когда головка балансира поднимается, энергия тратится на подъем штанговой колонны и жидкости в насосно-компрессорных трубах, а при опускании – на возврат уравнивающих грузов. На рисунке 5.12 представлены графики момента, создаваемого ГПТ, имитирующим цикл работы УШГН, и частоты вращения вала.

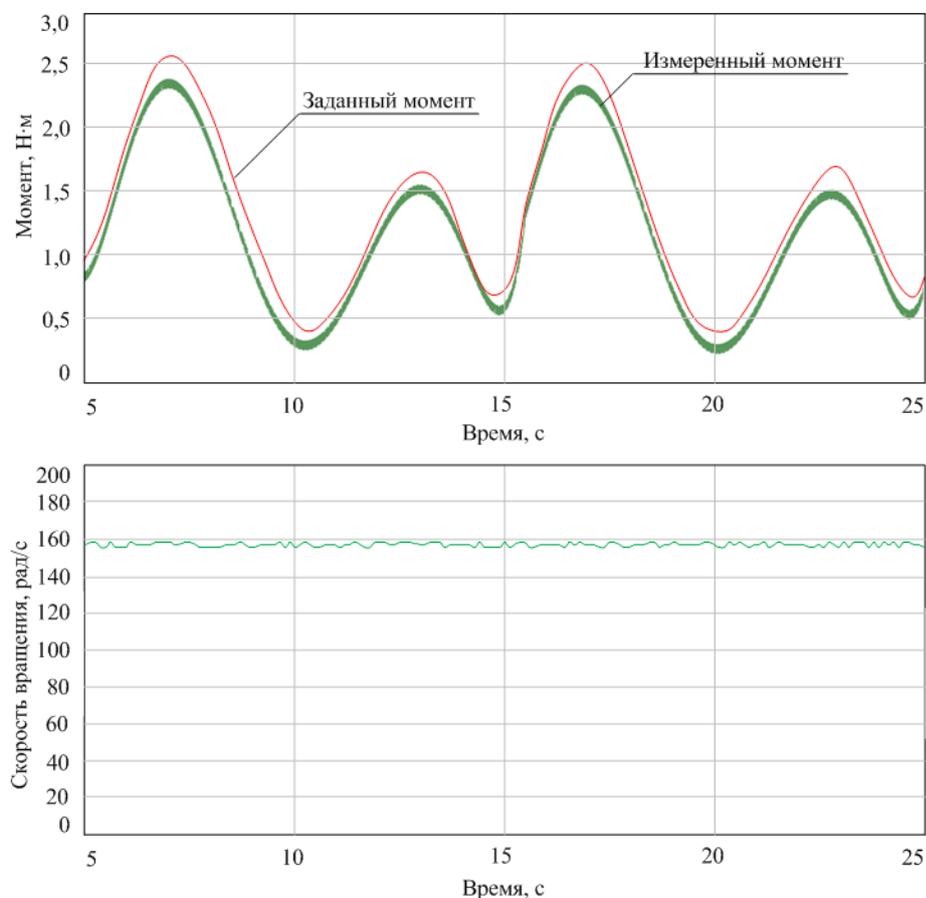


Рисунок 5.12 – Осциллограммы нагрузочного момента и частоты вращения

Крутящий момент на валу ГПТ, измеренный в ходе эксперимента, практически совпадает с задаваемым крутящим моментом, что, в свою очередь, свидетельствует о корректности имитации режимов работы УШГН.

На рисунке 5.13 представлены осциллограммы активной мощности на входе преобразователя частоты и на валу электродвигателя, соответствующие рабочему режиму. Значения мощности на входе преобразователя частоты больше, чем механическая мощность, из-за потерь в ПЧ и ВД (электрические потери в меди статора и механические потери).

Во время испытаний на устойчивость к циклическим изменениям момента нагрузки было установлено, что привод работал стабильно на протяжении всего эксперимента, поскольку колебания оборотов были минимальными. Этот режим нагрузки был выбран для того, чтобы смоделировать реальные условия эксплуатации.

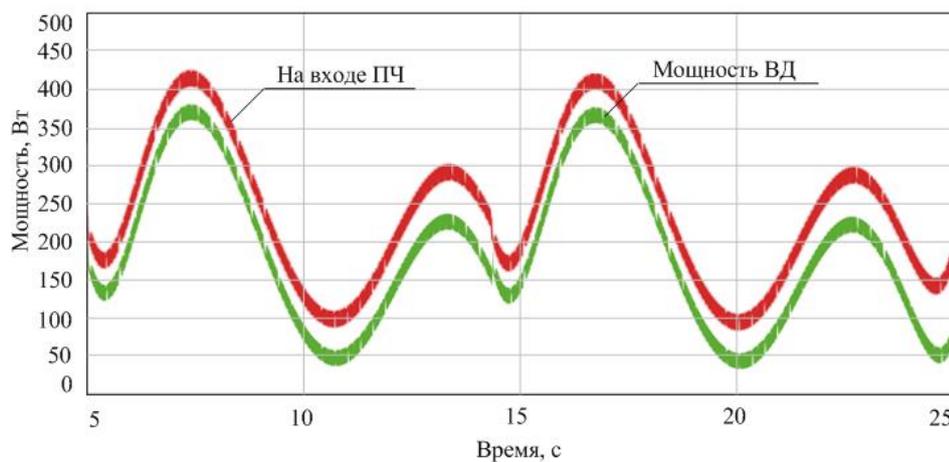


Рисунок 5.13 – Осциллограмма изменения активной мощности

Была проведена проверка системы на реакцию на одномоментный скачок напряжения в питающей сети. Однако вместо изменения напряжения от номинального значения $U_{ном.}$ до $1,2 \cdot U_{ном.}$ проводился переход $0,8 \cdot U_{ном.}$ до $U_{ном.}$, что объясняется возможностями испытательного оборудования. Подобная модификация допустима, так как сохраняется природа переходного процесса. На рисунке 5.14 представлены осциллограммы переходных процессов при скачках напряжения в сети. По данным осциллограммам можно

сделать следующий вывод: при скачкообразных изменениях напряжения провалы токов и частоты вращения практически отсутствуют, что также показывает устойчивость вентильного двигателя в данном режиме работы.

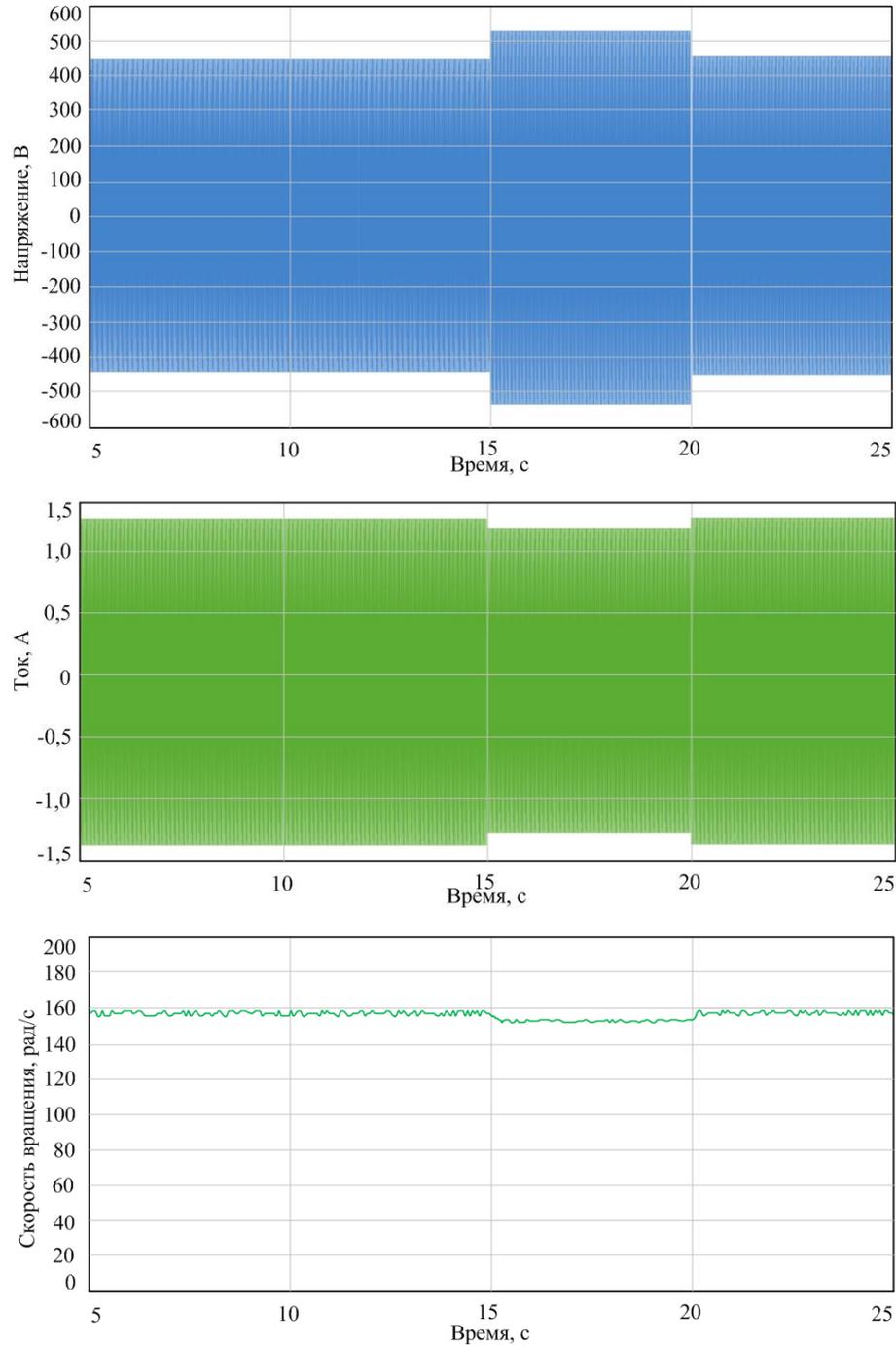


Рисунок 5.14 – Осциллограммы переходных процессов при скачках напряжения сети

Таким образом, проведенные эксперименты подтвердили целесообразность использования ВД в качестве приводов УШГН. В среднем КПД установки ШГН, оборудованной АД, составляет 40 %. Правильно подобранный ВД позволяет повысить КПД установки ШГН до 50 %, учитывая, что КПД вентильного двигателя $\eta_{ВД}$ равен (0,91 – 0,94) %, и его применение позволяет отказаться от клиноременной передачи.

5.4 Определение экономической эффективности мероприятий по повышению степени уравновешенности УШГН

Для обоснования необходимости доуравновешивания штанговых глубинных насосов нужно провести анализ их экономической эффективности.

Расходы на реализацию можно рассматривать как разницу между стоимостью системы управления с функцией автоматического балансирования УШГН и традиционной системой управления, установленной на УШГН. При этом можно считать, что затраты на транспортировку, монтаж и эксплуатацию, включая приобретение вспомогательных материалов, ремонты, техническое обслуживание и амортизацию, останутся на том же уровне.

Экономическая эффективность доуравновешивания УШГН будет проявляться через снижение потребляемой энергии за счет повышения коэффициента полезного действия электродвигателя.

Произведем оценку затрат на реализацию проекта и его экономической эффективности для 50 скважин одного из месторождений Западной Сибири.

Стоимость станции управления с преобразователем частоты без автоматической балансировки УШГН составляет 400 тыс. руб. ($K_{СУ1} = 400$ тыс. руб.).

Стоимость станции управления с преобразователем частоты и с автоматической балансировкой УШГН составляет 500 тыс. руб. ($K_{СУ2} = 500$ тыс. руб.).

Затраты на реализацию проекта для одной скважины составят:

$$K = K_{\text{СУ}2} - K_{\text{СУ}1};$$

$$K = 500 - 400 = 100 \text{ тыс. руб.}$$

Затраты на реализацию проекта для 50 скважин месторождения Западной Сибири составят:

$$K_{50} = K \cdot 50;$$

$$K_{50} = 100 \cdot 50 = 5000 \text{ тыс. руб.}$$

Анализ ваттметрограмм скважин действующего фонда месторождений Западной Сибири показал, что только 2% установок ШГН могут считаться сбалансированными (имеющими коэффициент неуравновешенности от минус 0,05 до +0,05). При этом 35% скважинных насосных установок имеют коэффициент неуравновешенности менее минус 0,5 или более +0,5. Расчет потенциала снижения потребляемой мощности и стоимости сэкономленной энергии проводился по данным, представленным в таблице 2.2.

Экономия электроэнергии за год для одной скважины:

$$\Delta W = (P_{ef} - P'_{ef}) \cdot T,$$

где P_{ef} – мощность, потребляемая ЭД УШГН до уравнивания;

P'_{ef} – мощность, потребляемая ЭД УШГН по уравниванию;

T – наработка за 1 год (8760 ч).

$$\Delta W = (5,54 - 5,29) \cdot 8760 = 2190 \text{ кВт}\cdot\text{ч.}$$

Полученная стоимость сэкономленной электроэнергии за год при тарифе за 1 кВт·ч электроэнергии для предприятий 6,20 руб. составляет:

$$C_{\text{эк.}} = \Delta W \cdot \text{Ц},$$

где Ц – стоимость электроэнергии.

$$C_{\text{эк.}} = 2190 \cdot 6,20 = 13,6 \text{ тыс. руб.}$$

Экстраполируя вышеуказанный расчет на 50 скважин, и учитывая, что снижение потребляемой мощности при доуравнивании УШГН варьируется в диапазоне (4 – 20) %, получаем что итоговая экономия составляет $C_{\text{эк.}50} \approx 2000$ тыс. руб. Срок окупаемости составляет 2 года 6 месяцев.

5.5 Экономическая эффективность использования ветросолнечной электростанции для электроснабжения УШГН

Для обоснования целесообразности повышения уровня автономности электроснабжения установок штанговых глубинных насосов путем применения возобновляемых источников энергии требуется произвести расчет экономической эффективности.

Затраты на реализацию можно представить, как стоимость электростанции на основе ВИЭ с эксплуатационными расходами. Стоимость гибридной ветросолнечной электростанции была рассчитана в главе 4 и составляет $K_{\text{ВИЭ}} = 7126$ тыс. руб., эксплуатационные расходы $K_{\text{эксп.}} = 500$ тыс. руб. в год.

Аварийный простой УШГН, как показывает статистика, в среднем составляет $t_{\text{пр.}} = 150$ часов в год. Учитывая, что наработка за 1 год составляет 8760 часов, аварийный простой УШГН будет составлять 1,7 %.

Производительность УШГН, для которой предполагается применение ВИЭ, в среднем составляет $Q = 12$ т/сут. Произведем расчет для стоимости 1 т неподготовленной нефти $C_{\text{н.}} = 23$ тыс. руб.

Экономическая эффективность применения ВИЭ на установках штанговых глубинных насосов будет обусловлена минимизацией времени простоя УШГН из-за аварий в электрических сетях.

Стоимость убытков за время аварийного простоя одной УШГН:

$$\Delta C_{\text{уб.}} = Q \cdot C_{\text{н.}} \cdot t_{\text{пр.}} / 24;$$

$$\Delta C_{\text{уб.}} = 12 \cdot 23 \cdot 105 / 24 = 1725 \text{ тыс. руб.}$$

Составим уравнение для вычисления срока окупаемости:

$$K_{\text{ВИЭ}} + K_{\text{эксп.}} \cdot x \leq \Delta C_{\text{уб.}},$$

где x – срок окупаемости.

Решив данное уравнение, получаем, что:

$$x \geq 5,82 \text{ лет.}$$

В результате получаем, что экономический эффект от использования автономного источника питания на базе ветросолнечной электростанции составил 1725 тыс. руб. в год, при этом срок окупаемости электростанции составляет менее 6 лет.

Выводы по главе 5:

1. 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.

2. Разработанная модель «УШГН – станок качалка» с имитацией влияния изменения параметров балансирующего уравновешивающего контргруза на выходные параметры УШГН, позволяет отладить программное обеспечение интеллектуальной станции управления с функцией автоматической балансировки УШГН. Погрешность вычислений по модели не превышает (10 – 15) %.

3. В ходе испытаний вентильного электропривода были воспроизведены и оценены различные режимы работы, наиболее важные в реальной эксплуатации: режимы нарастания момента нагрузки и сброса момента нагрузки, а также режим нарастания (скачка) напряжения питающей сети. Лабораторные испытания показали устойчивость вентильного электропривода к этим возмущениям.

4. При проверках на устойчивость к циклическим изменениям нагрузочного момента установлено, что устойчивая работа привода наблюдалась на протяжении всего опыта, так как колебания частоты вращения были незначительные.

5. При скачкообразных изменениях напряжения провалы токов и частоты вращения практически отсутствуют, что также показывает устойчивость вентильного двигателя в данном режиме работы.

6. Экономический эффект от доуравновешивания балансировочных грузов УШГН составил для одной скважины 13,6 тыс. руб. в год, для месторождения, содержащего 50 скважин, 2000 тыс. руб.

7. Экономический эффект от использования автономного источника питания на базе ветросолнечной электростанции 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 балансирующего уравновешивающего 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.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

- АД – асинхронный двигатель;
- АИН – автономный инвертор напряжения;
- АКБ – аккумуляторная батарея;
- АСУ – автоматическая система управления;
- ВГ – ветрогенератор;
- ВД – вентильный двигатель;
- ВИЭ – возобновляемый источник электроэнергии;
- ВСЭУ – ветросолнечная электроустановка;
- ВЭУ – ветряная электроустановка;
- ИСУ – интеллектуальная система управления;
- КЗ – короткое замыкание;
- КП – клиноременная передача;
- КПД – коэффициент полезного действия;
- НКТ – насосно-компрессорные трубы;
- НИР – научно-исследовательская работа;
- НШ – насосная штанга;
- ПЧ – преобразователь частоты;
- СБ – солнечная батарея;
- СК – станок-качалка;
- СУ – система управления;
- СЭС – солнечная электростанция;
- СЭУ – солнечная электроустановка;
- ТПШ – точка положения штанг;

УШГН – установка штангового глубинного насоса;

ХХ – холостой ход;

ЧРП – частотно-регулируемый привод;

ШГН – штанговый глубинный насос;

ШИМ – широтно-импульсная модуляция;

ЭД – электродвигатель;

ЭЭ – электрическая энергия;

вн. – внутренний;

вых. – выходная;

вяз. – вязкий;

газ. – газожидкостный;

гидр. – гидравлическая;

давл. – давление;

доб. – добавочный;

з. – загрузка;

к. – коммутация;

кр. – кривошип;

л. – лобовый;

м. – магнит;

мгн. – мгновенный;

мес. – месяц;

мех. – механический;

нас. – насос;

ном. – номинальный;

об. – обмотка;

п. – паз;
п.пл. – подплунжерный;
пл. – плунжер;
пов. – поверхностный;
под. – подъем;
реал. – реальный;
ред. – редуктор;
рек. – рекомендованный;
сист. – система;
сут. – суточный;
сух. – сухой;
тр. – трение;
уд. – удельный;
уст. – устьевой;
устр. – устройство;
ф. – фаза;
шерх. – шероховатость;
э.м. – электромагнитный;
эк. – экономия;
эксп. – эксплуатация;
эл. – электрический.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Altivar 1100. Руководство пользователя. Schneider Electric Systems Co., Ltd., 2009. – 209 с.
2. Caicedo, Sergio Arturo, and Suhail Dayana Carma. "The piston tubing rod performance curve: a new and useful concept for sucker-rod pumping analysis." Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, October 2009.
3. Chunyou Zhang, Liang Wang, Hong Li. Experiments and Simulation on a Late-Model Wind-Motor Hybrid Pumping Unit // *Energies*, 2020, № 13, 994, pp 285-304.
4. Dave M. et al., (2017) Performance evaluations of the different sucker rod artificial lift systems." Paper presented at the SPE Symposium: Production Enhancement and Cost Optimisation, Kuala Lumpur, Malaysia, November 2017.
5. El-Yamany M., Abdellatif S., Ghali H. Online Sucker-Rod Pumping with Photovoltaic Driven System Sizing Tool for Oil and Gas Industrial Sector / Artificial Intelligence and Online Engineering. October 2022. pp. 174-185.
6. Gizatullin F. A. Energy efficiency of well electric submersible pumps for oil production / F. A. Gizatullin, M. I. Khakimyanov, I. N. Shafikov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – IOP Publishing, 2019. – Vol. 537. – №. 6. – P. 062006.
7. Jennings, James W., "The design of sucker rod pump systems." Paper presented at the SPE Centennial Symposium at New Mexico Tech, Socorro, New Mexico, October 1989.
8. Khakimyanov, M.I., Shafikov, I.N., Khusainov, F.F. Control of Sucker Rod Pumps Energy Consumption // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. Omsk State Technical University. Russia, Omsk, May 21–23, 2015.
9. Khakimyanov, M.I, Shafikov, I.N., Khusainov, F.F., Semisynov, R.A., Bezryadnova, E.A. "Monitoring of sucker-rod pump units as a result of the analysis

wattmeter cards", *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, Volume 803, Number 1. 6 p.

10. McCafferty, J.F., "Importance of compression ratio calculations in designing sucker rod pump installations." Paper presented at the SPE Production Operations Symposium, Oklahoma City, Oklahoma, March 1993.

11. Podio AL et al (2003) Laboratory-instrumented sucker-rod pump. *SPE Prod Fac* 18:104–113.

12. Poythress M., Rowlan O., Gates G. Solar Powered Rod Pumping System, Where Bigger is Not Better / *Soutwestern Petroleum Short Course*. 2007. pp. 1-14.

13. Xu, J. and Hu, Y. "A method for designing and predicting the sucker rod string in deviated pumping wells." Paper presented at the SPE Eastern Regional Meeting, Pittsburgh, Pennsylvania, November 1993.

14. Алиев, Т.А. Ways to Increase the Efficiency of Sucker Rod Pump Units in Oil Production / Т. А. Алиев, Г. А. Гулуев, А. Г. Рзаев, Я.Г. Алиев, М.Х. Резван, А.Н. Яшин // *Journal of Engineering Research and Sciences*. - 2022. - Vol. 1, № 3.

15. Арбузов, В.Н. Эксплуатация нефтяных и газовых скважин. Часть 1: учебное пособие / В.Н. Арбузов; Томский политехнический университет.- Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 200 с.

16. Афанасьева, А.А. Повышение эффективности электропривода станка-качалки нефти / А.А. Афанасьева, В.А. Нестерин, В.С. Генин, А.Н. Матюнин, Р.А. Романов // *Электротехника*.– № 8.– 2018.– С. 24-28.

17. Байков, И.Р., Смородов, Е.А., Ахмадуллин, К.Р. Методы анализа надежности и эффективности систем добычи и транспорта углеводородного сырья. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. – 275 с.

18. Беспалов, В.Я., Мощинский, Ю.А., Петров, А.П. Математическая модель асинхронного двигателя в обобщенной ортогональной системе координат // *Электричество*. – 2002. – № 8. – С. 33 – 39.

19. Богачук, Ю.Ф., Готвиг, К.Л., Савастын, М.Ю. Кратковременная эксплуатация скважины с понижением частоты // *Техника и технология*. – 2009. – №. 2. – С. 68-71.

20. Богачук, Ю.Ф. Интеллектуальная система управления электроцентробежными насосами для нефтяных скважин (ИНТЭС) // Нефть. Газ. Новации. 2011. – №11. – С. 51-53.

21. Бодылев, А.С. Алгоритмы станций управления электроприводами скважинных насосов / А. С. Бодылев, А. Н. Яшин, М. И. Хакимьянов // Энергетические и электротехнические системы : междунар. сб. науч. тр., г. Магнитогорск / МГТУ им. Г. И. Носова. - Магнитогорск, 2022. - Вып. 9. - С. 75-81.

22. Бодылев, А.С. О методах контроля режимов работы электроприводов скважинных нефтедобывающих насосов / А.С. Бодылев, А.Н. Яшин, А.А. Конев, М.И. Хакимьянов // Завалишинские чтения'23 : сб. докл. XVII Междунар. конф. по электромеханике и робототехнике. Санкт-Петербург, 2023. С. 164-169.

23. Буровой портал. Технология бурения скважин. Текущий ремонт скважин: [электронный ресурс]. URL: <http://www.drillings.ru/tek-rem-skv?razdel=1&object=7> (дата обращения 25.11.2023).

24. В. Балабанов, А. Ли, Н. Мартынова, И. Худаев, Х. Абдулмажидов, Куйчиев О.Р. / Теория и методика расчета параметров строительных-мелиоративных машин / Учебное пособие. –Т.: 2020. –171 с.

25. Вентильные электродвигатели с постоянными магнитами для привода станка-качалки: [электронный ресурс]. URL: <https://lukoil-eru.ru/product/pumping-unit> (дата обращения 25.01.2024).

26. Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К., Солнечная энергетика: Учебное пособие для вузов / Под ред. В.И. Виссарионова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008 – 320 с.

27. ВРД 39-1.10-052-2001. Методические указания по выбору и применению асинхронного частотно-регулируемого электропривода мощностью до 500 кВт. Введ. 22.11.2001.

28. Ганджа, С.А. Оптимальное проектирование вентильных электрических машин с аксиальным магнитным потоком / С. А. Ганджа // Вопросы электромеханики. - 2012. - Т. 126. - С. 9-12.

29. Ганджа, С.А. Разработка методики анализа вентильного двигателя постоянного тока с когтеобразными полюсами большой мощности, предназначенного для привода пильгерстана по производству бесшовных труб / С. А. Ганджа, Б.И. Косимов, Д.С. Аминов // Вестник пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. - 2019. - № 32. - С. 38-57.

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

31. Гильманов, Э.А. Разработка моделей элементов ветросолнечной электростанции в среде Matlab Simulink = On the possibility of using a multifunctional integrated electromagnetic component as part of hybrid filter compensating devices / Э. А. Гильманов, А. Н. Яшин, М. И. Хакимьянов // Завалишинские чтения'22 : сб. докл. XVII Междунар. конф. по электромеханике и робототехнике. Санкт-Петербург, 12-14 апреля 2022 / СПб ГУАП. - Санкт-Петербург, 2022. - С. 120-125.

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

33. Говорков, Д.А., Курлаев, Г.Н. Технология анализа режимов эксплуатации скважины с электронасосом в условиях реального времени //Вестник кибернетики. – 2011. – №. 10. – С. 22-26.

34. Городнов А.Г. Модель электротехнического комплекса с автономной системой электроснабжения установок механизированной добычи нефти / А.Г. Городнов // Сборник статей Международной научно-практической

конференции «Технологическое развитие: тенденции, проблемы и перспективы».— Стерлитамак: АМИ, 2020. – С. 8-10.

35. ГОСТ Р 51387-99. Энергосбережение. Введ. 01.07.2000.

36. ГОСТ Р 51749-2001. Энергосбережение. Энергопотребляющее оборудование общепромышленного применения. Введ. 01.01.2002. – Группа E01, E02.

37. Дайчман, Р. А. Расчет ветро-солнечной установки малой мощности / Р. А. Дайчман. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2016. — № 10 (114). — С. 169-173.

38. Ефимов, Е. Повышение энергоэффективности добычи // Нефтегазовая вертикаль. – 2011. – №21. – С. 53-56.

39. Ивановский, В.Н., Дарищев, В.И., Сабиров, А.А. и др. Скважинные насосные установки для добычи нефти.- М.: ГУП Изд-во «Нефть и Газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2002. – 824 с.

40. Ивановский, В. Н. Энергетика добычи нефти: основные направления оптимизации энергопотребления // Инженерная практика. 2011. – №. 6. – С. 18-26.

41. Исмагилов С.Ф. Совершенствование контроля работы штанговых насосных установок при эксплуатации скважин с направленным профилем ствола / дис. ... канд. техн. наук : 25.00.17 / Исмагилов Салават Фаритович – Уфа, 2018. – 114 с.

42. Калимуллина Р.М. Прогнозирование изменения сопротивления изоляции кабельных линий по эксплуатационным данным / Р.М. Калимуллина, Л.И. Гимадеева // Международный научный журнал «Инновационная наука».– 2016.– № 1.– С. 51-52.

43. Карандаев, А. С. и др. Анализ надежности оборудования тепловой электростанции при внедрении преобразователей частоты // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2009. – № 34 (167). – С. 16 – 22.

44. Колесова, С.Б. Снижение влияния свободного газа на работу насосного оборудования / С.Б. Колесова, А.М. Насыров, М.Б. Полозов // Экспозиция. Нефть. Газ. Октябрь, 2018. № 6 (66). С. 48-50.

45. Компания АО «НИИЭТ»: [электронный ресурс]. URL: <https://niiet.ru/> (дата обращения 25.11.2023).

46. Компания «НОВОМЕТ»: [электронный ресурс]. URL: <http://www.novomet.ru> (дата обращения 25.11.2023).

47. Контактная станция управления "НЭК-01М": [электронный ресурс]. URL: <http://www.zaonek.ru/files/nek-01m.pdf> (дата обращения 25.11.2023)

48. Копылов, И.П. Проектирование электрических машин : учебник для вузов / И.П. Копылов.– 4-е изд., перераб. и доп.– Москва : Издательство Юрайт, 2019.– 828 с.– (Высшее образование).– Текст : непосредственный.

49. Корабельником, М.И. Оптимизация режимов работы скважин установками электроцентробежных насосов на современном этапе добычи / М.И. Корабельников // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2017. Т. 17, № 1. С. 29-33.

50. Костенко, М.П., Пиотровский, Л.М. Электрические машины. Часть 2. М. - Л.: Госэнергоиздат, 1965. - 648 с.

51. Кудрявцев, А.В. и др. Высокоскоростная скважинная телеметрия //Перспективы развития информационных технологий. – 2011. – №. 3-2. – С. 20-24.

52. Латыпов, Б.М. Совершенствование системы контроля состояния скважинной штанговой глубинной насосной установки на основе нейросетевых технологий / Б.М. Латыпов, В.И. Гумерова // Нефтегазовое дело. Т. 20, № 6. С. 155-164.

53. Лукутин Б. В., Обухов С. Г. Силовые преобразователи в электроснабжении: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 144 с.

54. Меньшов, Б.Г., Ершов, М.С., Яризов, А.Д. Электротехнические установки и комплексы в нефтегазовой промышленности: Учеб. для вузов.- М.: ОАО «Издательство «Недра», 2000. – 487 с.

55. Мищенко, И.Т. Скважинная добыча нефти: Учебное пособие для вузов.- М.: ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. – 816 с.

56. Мордвинов, А.А. Оборудование скважин, эксплуатируемых штанговыми скважинными насосами : метод. указания / А. А. Мордвинов, О. А. Миклина, О. М. Корохонько. – Ухта : УГТУ, 2013. – 40 с.

57. Образовательный ресурс по гидравлике, гидро- и пневмо приводу. Лекция 4. Гидравлические сопротивления: [электронный ресурс]. URL: <http://gidravl.narod.ru/gidrosopr.html> (дата обращения 25.11.2023).

58. Павленко, В., Гинзбург, М. Обоснование диапазона регулирования частот вращения приводов на основе вентильных электродвигателей //Нефтесервис. – 2006. – №. 5. – С. 43-48.

59. Павленко, В., Климов, В., Климов, И. Сравнительный анализ электромагнитных процессов в структурах электроприводов нефтедобывающей промышленности //Силовая электроника. – 2010. – №. 26. – С. 30-35.

60. Патент РФ на изобретение № 2289191: Устройство для управления преобразователем частоты с многоуровневым инвертором напряжения и способ управления таким преобразователем / Смирнов Д.П., Львов М.Л., Бородин А.А. // 10.12.2006 г.

61. Патент РФ на изобретение № 2411629: Многоуровневый транзисторный преобразователь частоты для управления электродвигателем переменного тока / Шепелин В.Ф., Донской Н.В., Селивестров Н.В., Визгина Е.И. // 10.02.2011 г.

62. Патент РФ на изобретение № 2548015: Способ самодиагностики высоковольтного преобразователя частоты / Хакимьянов М.И., Шабанов В.А., Шафиков И.Н. // 10.04.2015 г.

63. Пачин, М.Г. Разработка интеллектуальной станции управления для установок штанговых глубинных насосов = Development of an intelligent control station for rod pumps / М. Г. Пачин, А. Н. Яшин, А. С. Бодылев, М. И. Хакимьянов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. - 2022. - Т. 333, № 3. - С. 68-75.

64. Пластовая энергия, температура и давление в скважине. Режимы эксплуатации залежей: [электронный ресурс]. URL: <http://www.neftyanik-school.ru/studentam/uchebnye-kursy/course/8/28> (дата обращения 25.11.2023).

65. Р 50-605-89-94. Энергосбережение. Порядок установления показателей энергопотребления и энергосбережения в документации на продукцию и процессы. Введ. 01.01.1995.

66. Попов, А.Л. О соответствии теоретических моделей продольных колебаний стержня экспериментальным данным / А.Л. попов, С.А. Садовский // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. – 2021. – Т. 8 (66). – Вып. 2. – С. 270 – 281.

67. РД 153-39-007-96. Регламент составления проектных технологических документов на разработку нефтяных и газонефтяных месторождений. – Взамен РД 39-0147035-207-86. Введ. 31.01.1997.

68. Рзаев А.Г., Резван М.Г., Хакимьянов М.И., Шафиков И.Н. Современное состояние автоматизации установок механизированной добычи нефти на территории СНГ // Известия НАНА, серия физико-технических и математических наук, том XXXIII, №6, 2013, –С. 177-187.

69. Сагдатуллин, А.М. Анализ энергоемкости и потребления электроэнергии по технологическим процессам в нефтегазовой отрасли //Всероссийская научная конференция молодых ученых и студентов «Актуальные проблемы геологии нефти и газа Сибири», посвященная 80-летию академика А.Э. Конторовича. – ИНГГ СО РАН, Новосибирск, 2014. – С. 304-307.

70. Сахаров, М.В. Методика проектирования обращенного двигателя с постоянными магнитами привода лебедки / М. В. Сахаров, В.Н. Караулов // Вестник ИГЭУ. - 2019. – Вып. 2 - С. 51-58.

71. Снегирев, Д.А. Асинхронный электродвигатель для частотно-регулируемого электропривода турбомеханизмов: Дис. канд. техн. наук: 05.09.01 / ВГТУ.- Воронеж, 2006.- 143 с.

72. Станции управления серии "НЭК -02М, 03М" со встроенным частотным преобразователем: [электронный ресурс]. URL: <http://www.zaonek.ru/files/nek-02-03-m.pdf>_(дата обращения 25.11.2023)/

73. Типовые решения интеллектуальной технологии комплексного мониторинга и адаптивного управления механизированным фондом скважин «ARTLIFTCONTROL™»: [электронный ресурс]. URL: <https://crossgroup.su/solutions/oil/alc.html>.

74. Уразаков, К.Р. Метод расчета динамических нагрузок и энергопотребления штанговой установки с системой автоматического уравнивания / К.Р.Уразаков, В.А.Молчанова, П.М.Тугунов // Записки Горного института. - 2020. - Т. 246. - С. 640-649.

75. Уразаков, К.Р. Совершенная работа как показатель надежности УСШН / К.Р. Уразаков, П.М. Тугунов // Роль математики в становлении специалиста. Материалы Межд. Науч-методической конф. УГНТУ. 2018. С. 173-176.

76. Феофилактов, С.В. Системы погружной телеметрии для «жестких» условий эксплуатации //Инженерная практика. – 2013. – №. 10. – С. 8-11.

77. Хакимьянов, М.И., Гузеев, Б.В. Анализ использования частотно-регулируемого электропривода в нефтегазовой промышленности по результатам патентного поиска // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2011. – № 4. – С. 30-41.

78. Хакимьянов, М.И., Ковшов, В.Д., Чикишев, А.М., Максимов, Н.С., Почуев, А.И. Контроллеры автоматизации установок штанговых глубинных

насосов // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. 2007. – № 1. – С. 44-56.

79. Хакимьянов, М.И. Оптимизация режимов работы электроприводов в нефтедобывающей промышленности: монография. – Уфа: РИЦ УГНТУ, 2013. – 77 с.

80. Хакимьянов М.И. Повышение энергоэффективности и оптимизация режимов работы электроприводов в нефтедобывающей промышленности / дис. ... д-р техн. наук : 2.4.2 / Хакимьянов Марат Ильгизович – Уфа, 2018. – 211 с.

81. Хакимьянов М.И. Современные станции управления скважинными штанговыми глубиннонасосными установками // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. – 2014. – Т.12. № 1. – С. 78-85.

82. Хакимьянов, М.И., Пачин, М.Г. Анализ динамограмм в контроллерах систем автоматизации штанговых глубиннонасосных установок // Датчики и системы. 2011. – № 9. – С. 38-40.

83. Хакимьянов, М.И., Пачин, М.Г. Методика обработки динамограмм в информационно-измерительных системах управления штанговыми глубинными насосами // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2012. – Т. 16. № 6 (51). – С. 32-36.

84. Хакимьянов, М.И., Пачин, М.Г. Мониторинг состояния штанговых глубиннонасосных установок по результатам анализа ваттметрограмм // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2011. – № 5. – С. 26-36.

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

86. Хакимьянов, М.И. Повышение энергетической эффективности скважинных насосов механизированной добычи нефти // Энергетик. 2016. – № 5. – С. 36-38.

87. Хакимьянов, М.И., Светлакова, С.В., Гузеев, Б.В., Соловьев, Я.Ю., Музалев, И.В. Сравнительный анализ возможностей отечественных и импортных систем автоматизации скважин, эксплуатируемых ШГН // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2008. – № 2. – С. 16-26.

88. Хакимьянов, М.И., Светлакова, С.В., Шафиков, И.Н. Диагностирование состояния штанговых глубинных насосов методом анализа плунжерных динамограмм // Проблемы автоматизации технологических процессов добычи, транспорта и переработки нефти и газа: материалы Всероссийской научно-практической интернет-конференции / редкол.: А.П. Веревкин, Н.А. Ишинбаев.- Уфа: Изд-во УГНТУ, 2013. – С. 44-48.

89. Хакимьянов, М.И. Системы управления электроприводами скважинных насосов: монография. - Уфа: РИЦ УГНТУ, 2014. - 114 с.

90. Хакимьянов, М.И. Удельный расход электроэнергии при механизированной добыче нефти штанговыми глубиннонасосными установками // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2014. – Т. 18. № 2 (63). – С. 54-60.

91. Хакимьянов, М.И., Хусаинов, Ф.Ф., Шафиков, И.Н. Зависимость энергопотребления штанговых глубинных насосов от технологических параметров скважин // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2015. – №1. – С.533-563.

92. Хакимьянов, М.И., Хусаинов, Ф.Ф., Шафиков, И.Н. Проблемы повышения энергетических характеристик электроприводов скважинных штанговых насосов // Электротехнические системы и комплексы. 2017. – № 2 (35). – С. 35–40.

93. Хакимьянов, М.И., Шафиков, И.Н., Зарипов, И.М. Анализ структуры потребления электроэнергии нефтегазодобывающими предприятиями // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сборник научных трудов I Международной (IV Всероссийской) научно-технической конференции / редкол.: В.А. Шабанов и др.– Уфа: Изд-во УГНТУ, 2013. – С. 284-288.

94. Чичеров Л.Г. Нефтепромысловые машины и механизмы. Учебное пособие для вузов. – М.: Недра, 1983.– 312 с.

95. Шафиков, И.Н., Хакимьянов, М.И. Дистанционный контроль параметров скважин газового промысла // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: межвузовский сборник научных трудов / отв. ред. В.А. Шабанов; редкол.: С.Г. Конесев, М.И. Хакимьянов, П.А. Хлюпин, Р.Т. Хазиева.– Уфа: Изд-во УГНТУ, 2015. – С. 245-250.

96. Шершнева, А., Радевич, А. Станции управления насосами нефтедобычи - интеллект нарастает [электронный ресурс] URL: <http://www.electronmash.ru/stancii-upravleniya-nasosami-neftedobychi> (дата обращения 25.11.2023)

97. Шубин, Н.П. Графический метод определения угла наклона в шатунно-кривошипном механизме и применение метода к расчету маховиков / Н.П. Шубин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 1928. - № 919. – С. 1-10.

98. Эйвазова З.Э. анализ показателей работоспособности скважинных штанговых насосных установок / З.Э. Эйвазова, Т.Э. Фараджов // Структурная надежность. Теория и практика. Т. 18. № 3. 2018. С. 22 – 26.

99. Эффективная система управления в области энергосбережения и повышения энергоэффективности на предприятии ТЭК [Электронный ресурс] URL: <http://www.docme.ru/doc/979344/prezentaciya-k-zayavke-na-konkurs-enes> (дата обращения 25.11.2023)

100. Якуцени, В.П., Петрова, Ю.Э., Суханов, А. А. Динамика доли относительного содержания трудноизвлекаемых запасов нефти в общем балансе // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2007. – Т. 2. – С. 30-41.

101. Яшин, А.Н. Investigation of the Frequency-Controlled Electric Drive of the Gas Air Cooling Units / А. Н. Яшин, М. И. Хакимьянов // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon) : 23-25 September 2022, Magnitogorsk, Russian Federation. - 2022.

102. 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.

103. Яшин, А.Н. Smart Well Concept in Oil Production / А. Н. Яшин, А. А. Конев, М. И. Хакимьянов // Smart Innovation, Systems and Technologies : Proceedings of 16th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings" (ER(ZR) 2021), St. Petersburg, Russia, 14–17 April 2021. - 2022. - Vol. 232. - P. 403-414.

104. 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.

105. 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.

106. Яшин, А.Н. Лабораторная установка для исследования применения возобновляемых источников энергии / А. Н. Яшин, А. С. Бодылев, Р. Т. Хазиева, М. И. Хакимьянов // Материалы 73-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ : в 2-х т. / УГНТУ. - Уфа, 2022. - Т. 1. - С. 450-451.

107. 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.

108. Яшин, А.Н. Моделирование механических характеристик асинхронного двигателя в пакете Matlab Simulink / А. Н. Яшин, Э. А.

Гильманов, М. И. Хакимьянов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. - 2021. - Т. 17, № 2. - С. 67-75.

109. Яшин, А.Н. Моделирование электропривода газоперекачивающего агрегата на базе вентильного двигателя // Modern Science.– № 6-2.– 2020.– С. 333-339.

110. Яшин, А.Н. Конструктивные решения и характеристики линейных электроприводов для эксплуатации нефтяных скважин / А. Н. Яшин, М. И. Хакимьянов // Инженерное образование в контексте будущих промышленных революций – СИНЕРГИЯ-2020 : сб. науч. ст. междунар. сетевой науч.-практ. конф. по инженерному образованию / КНИТУ, УГНТУ. - Уфа, 2020. - С. 111-119.

111. Яшин, А.Н. Основные требования к линейным погружным электроприводам для эксплуатации нефтяных скважин / А. Н. Яшин, М. И. Хакимьянов // Материалы 72-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ : в 2-х т. - Уфа, 2021. - Т. 1. - С. 543.

112. 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.

113. Яшин, А.Н. Уравновешенность установок скважинных штанговых насосов на основе анализа ваттметрограмм = Balance of sucker rod pump units based on analysis of wattmetrograms / А. Н. Яшин, М. И. Хакимьянов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. - 2021. - Т. 332, № 8. - С. 36-44.

Свидетельства о регистрации результатов интеллектуальной деятельности

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ
НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ
№ 229611

Бездатчиковая интеллектуальная станция управления скважиной

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Уфимский государственный нефтяной технический университет" (RU)*

Авторы: *Хакимьянов Марат Ильгизович (RU), Яшин Антон Николаевич (RU)*

Заявка № **2024109959**
Приоритет полезной модели **11 апреля 2024 г.**
Дата государственной регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации **16 октября 2024 г.**
Срок действия исключительного права на полезную модель истекает **11 апреля 2034 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Zubov



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024618777

Расчет параметров ветро-солнечной электростанции для установок штанговых глубинных насосов

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (RU)*

Авторы: *Яшин Антон Николаевич (RU), Хакимьянов Марат Ильгизович (RU)*



Заявка № 2024617824

Дата поступления 11 апреля 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 17 апреля 2024 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024666412

**Расчет динамограммы установки штангового
глубинного насоса из массива ваттметрограммы**

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Уфимский государственный нефтяной технический
университет» (RU)**

Авторы: **Яшин Антон Николаевич (RU), Хакимьянов Марат
Ильгизович (RU)**

Заявка № 2024665423

Дата поступления 02 июля 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 12 июля 2024 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

Исходный текст программы расчета гибридной ветросолнечной подстанции
для установки штангового глубинного насоса

```

%Расчет пиковой мощности и потребляемой энергии:
%Потребление электроэнергии ВТ*ч:
i=input('Введите количество электроприборов ');
a=0; Psut=0; while i>0; a=a+1;
disp(['Введите параметры ' num2str(a) '-го электроприбора']); i=i-1;
Pusti=input('Введите установленную мощность электроприбора, Вт ');
Tui=input('Введите время использования электроприбора утром ');
Tdi=input('Введите время использования электроприбора днем ');
Tvi=input('Введите время использования электроприбора вечером ');
Tni=input('Введите время использования электроприбора ночью ');
%Суммарное суточное энергопотребление объекта:
Esut=Pusti*(Tui+Tdi+Tvi+Tni);
% Суммарная установленная мощность:
Psut=Psut+Pusti; end;
disp(['Суммарное суточное потребление = ' num2str(Esut) ' Вт*ч']);
disp(['Суммарная установленная мощность = ' num2str(Psut) ' Вт']);
%Расчет мощности инвертора:
%Общее потребление нагрузки, Вт*ч:
Eobsh=Esut*1.1;
%Рекомендуемая мощность инвертора, суммарная установленная мощность, округленная
в большую сторону, Вт:
Pinv=ceil(Psut);
disp(['Рекомендуемая мощность инвертора ' num2str(Pinv) ' Вт']);
Uinv=input('Введите входное напряжение инвертора, В ');
%Общее количество энергии, используемое нагрузкой, А*ч/сут;
En1=Eobsh/Uinv/24;
%Суммарная энергия, потребляемая нагрузкой, Вт*ч/сут:
En2=Esut*1.1/24;
%Расчет солнечной электроустановки:
Emes=Esut*30/1000; Egod=Emes*12; B=ones(1,12); i=1;
while i<13; B(1,i)=input(['Введите инсоляцию ' num2str(i) '-го месяца, кВт*ч/м2 ']); i=i+1;
end;
%Суммарное месячное энергопотребление кВт*ч:
A=ones(1,12); i=1;
%Объем энергии, производимый одним солнечным модулем (ср.год) кВт*ч/год:
Psbmax=input('Введите пиковую мощность фотоэлектрического модуля в точке
максимальной мощности, Вт ');
ksb=input('Введите поправочный коэффициент (для периода) для расчета объема энергии
СБ ');
while i<13; A(1,i)=ksb*Psbmax*B(1,i)/1000; i=i+1; end;
Rsum=0; i=1; while i<13; Rsum=Rsum+A(1,i); i=i+1; end;
Nsb=Egod/Rsum; Nsb=ceil(Nsb);
disp(['Количество СЭУ = ' num2str(Nsb) ' шт.']);
PsbSut=Rsum/12/30;
disp(['Суточная мощность СЭУ = ' num2str(PsbSut) ' кВт*ч']);
%Расчет количества аккумуляторных батарей (для СБ):
C=ones(1,12); i=1; while i<13; C(1,i)=Emes/A(1,i); C(1,i)=ceil(C(1,i)); i=i+1; end;

```

```

D=ones(1,12); i=1; while i<13; D(1,i)=(Nsb-C(1,i))*A(1,i)/31; i=i+1; end;
Cakbn=input('Введите номинальную емкость АКБ, А*ч ');
Uakbn=input('Введите номинальное напряжение АКБ, В ');
%Число АКБ, соединенных последовательно, округляется в большую сторону, шт.:
s2=Uinv/Uakbn; s2=ceil(s2);
b=input('Если АКБ кислотные - нажмите 1, если другой тип АКБ - нажмите 0 ');
if b>0; cakb=0.3; else cakb=0.7; end;
%Кислотные АКБ:
if b>0; Iakb1=Cakbn*0.1; kakb=1.2;
else g=input('Введите соответствующую цифру согласно типу АКБ: Стартерные - 1;
Щелочные - 2; Литий-ион-железо-фосфатные - 3; прочие типы - 4 ');
if g<2; Iakb1=Cakbn*0.5; kakb=1.3;
elseif g>1 & g<3; Iakb1=Cakbn*0.2; kakb=1.5;
elseif g>2 & g<4; Iakb1=Cakbn*0.2; kakb=1.03;
elseif g>3 & g<5; Iakb1=Cakbn*0.2; kakb=1.6; end; end;
%Емкость одного блока АКБ:
Eakb=s2*Uakbn*Cakbn* cakb/1000/ kakb; G=ones(1,12); i=1; s1SB=0;
while i<13; if D(1,i)>0;
tn=input(['Введите среднюю продолжительность ночного времени в часах ' num2str(i) '-го
месяца ']);
Nakb1=Psut*tn/1000/Eakb; Nakb1=ceil(Nakb1); G(1,i)=Nakb1; if Nakb1>s1SB; s1SB=Nakb1;
end;
else G(1,i)=0; end; i=i+1; end; NakbSB=s1SB*s2; Iakb= Iakb1* s1SB;
disp(['Количество АКБ для СБ = ' num2str(NakbSB) ' шт.']);
disp(['Оптимальный ток заряда АКБ = ' num2str(Iakb) ' А']);
%Мощность заряда, Вт:
Pakbz=Iakb*Uinv;
disp(['Мощность заряда АКБ = ' num2str(Pakbz) ' Вт']);
%Расчет мощности ветроустановки:
b=input('Если тип ВЭУ горизонтально-осевой - нажмите 1, если тип ВЭУ вертикально-
осевой - нажмите 0 ');
v=input('Введите скорость ветра, м/с ');
h=input('Введите высоту установки, м ');
ksh=input('Введите коэффициент шероховатости поверхности, м ');
p=input('Введите плотность воздуха, кг/м3 ');
kpd=input('Введите КПД ВЭУ, о.е. ');
kustr=input('Введите КПД сопутствующих устройств, о.е. ');
D=input('Введите диаметр ветроколеса, м ');
if b>0;
% Мгновенная мощность горизонтально-осевой ВЭУ;
Pvetr=pi*v^3/(8*h^(3*ksh))*p*kpd*kustr*D^2*h^(3*ksh); else
Hv=input('Введите высоту ветроколеса, м ');
% Мгновенная мощность вертикально-осевой ВЭУ;
Pvetr=v^3/(8*h^(3*ksh))*p*kpd*kustr*D*Hv*(h+Hv/2)^(3*ksh); end;
disp(['Мгновенная мощность ветроустановки = ' num2str(Pvetr) ' Вт']);
%Энергия ВЭУ (Мощность ветроустановки за сутки), Вт*ч/сут.:
PvetrSut=Pvetr*24;
disp(['Мощность ветроустановки за сутки = ' num2str(PvetrSut) ' Вт*ч/сут.']);
%Количество ВЭУ:
Nv=Esut/PvetrSut; Nv=ceil(Nv);
disp(['Количество ВЭУ = ' num2str(Nv) ' шт.']);
%Расчет количества аккумуляторных батарей (для ВЭУ):

```

```

tvetr=input(['Введите количество времени перекрытия АКБ в часах для ВЭУ ']);
s1Vetr=Psut*tvetr/1000/Eakb*0.5; s1Vetr=ceil(s1Vetr);
NakbVetr= s1Vetr*s2;
disp(['Количество АКБ для СБ = ' num2str(NakbVetr) ' шт.']);
%Оптимальный ток заряда АКБ, А:
IakbVetr= Iakb/s1SB*s1Vetr;
%Мощность заряда, Вт:
PakbzVetr=IakbVetr*Uinv;
disp(['Оптимальный ток заряда АКБ = ' num2str(IakbVetr) ' А']);
%Мощность заряда, Вт:
Pakbz=Iakb*Uinv;
disp(['Мощность заряда АКБ = ' num2str(PakbzVetr) ' Вт']);
if NakbSB>NakbVetr; Nakb=NakbSB; Iakb=Iakb; Pakb=Pakbz;
else Nakb=NakbVetr; Iakb=IakbVetr; Pakb=PakbzVetr; end;
%Расчет оптимального количества солнечных панелей и ветрогенераторов для гибридной
подстанции:
PvetrSut=PvetrSut/1000;
zSB =input(['Введите стоимость одного солнечного блока, тыс. руб. ']);
zV =input(['Введите стоимость одного ветряного генератора, тыс. руб. ']);
zAKB= input(['Введите стоимость одного аккумулятора, тыс. руб. ']);
n=Nv+1; m=Nsb+1; A=ones(n,m); B=A; C=A;
while m>0; while n>0; B(n,m)=(n-1)*PvetrSut+(m-1)*PsbSut; C(n,m)=(m-1)*zSB+(n-1)*zV;
n=n-1; end;
n=Nv+1;m=m-1; end;
m=Nsb+1; PsumSut=Esut/1000; Z=C(n,m);
while m>0; while n>0; if B(n,m)<PsumSut; B(n,m)=0; else B(n,m)=B(n,m); end; n=n-1; end;
n=Nv+1; m=m-1; end; m=Nsb+1;
while m>0; while n>0; if B(n,m)>0 & C(n,m)<Z; NVR=n-1; NSB=m-1; Z=C(n,m); end;
n=n-1; end; n=Nv+1; m=m-1; end;
Z=Z+zAKB*Nakb;
disp('Результаты оптимальной компоновки гибридной ветросолнечной электростанции');
disp(['Количество солнечных панелей = ' num2str(NSB) ' шт.']);
disp(['Количество ветряных генераторов = ' num2str(NVR) ' шт.']);
disp(['Затраты на закупку СБ, ВГ и АКБ = ' num2str(Z) ' тыс. руб.']);

```

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Исходный текст программы получения динамограммы установки штангового
глубинного насоса из массива ваттметрограммы

```

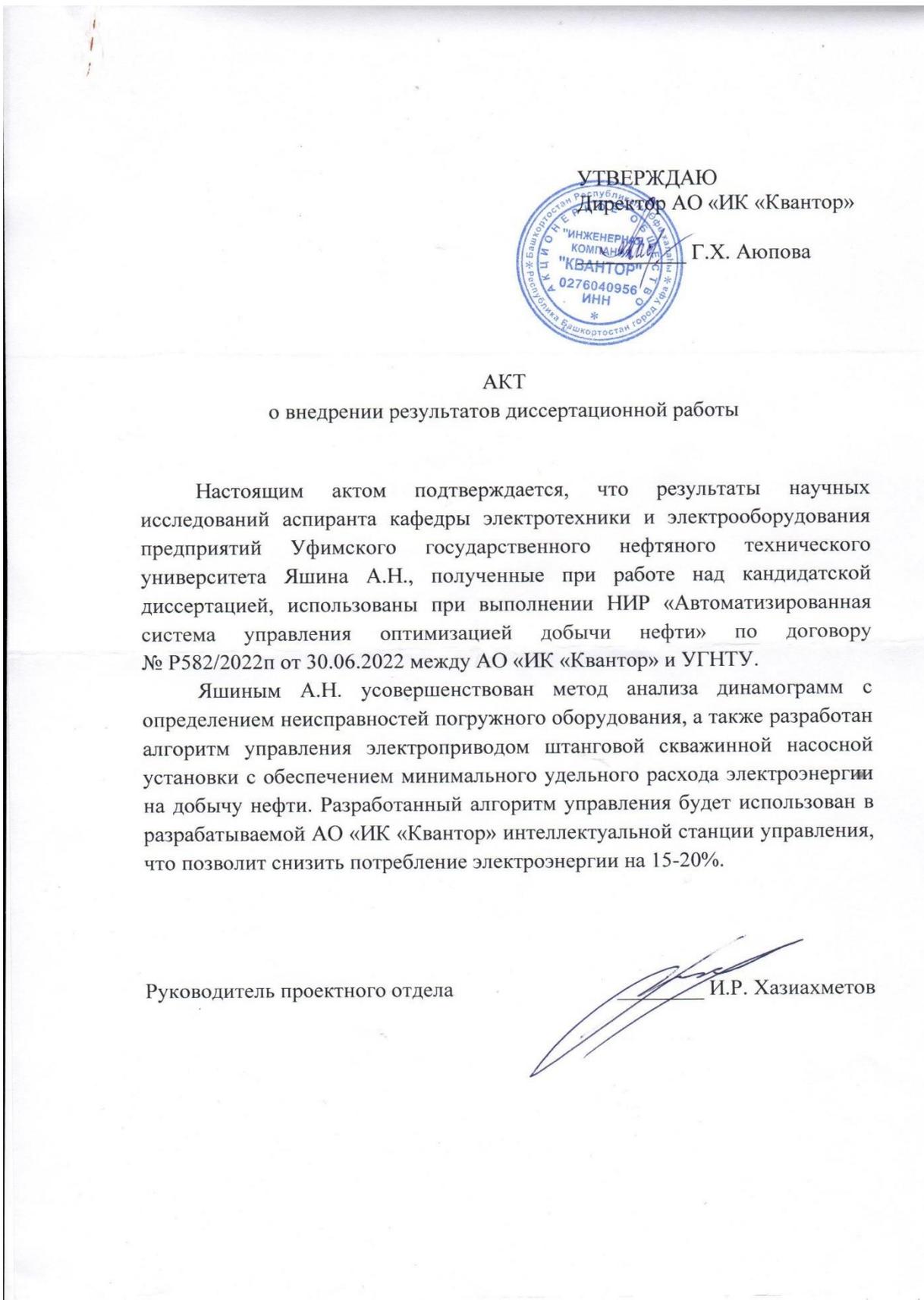
%Ввод исходных данных:
ak=input('Введите длину переднего плеча балансира, м ');
bk=input('Введите длину заднего плеча балансира, м ');
l=input('Введите длину шатуна, м ');
r=input('Введите длину кривошипа, м ');
P0=input('Введите расстояние до полюса, м ');
ng=input('Введите КПД электродвигателя ');
nn=input('Введите КПД передаточного механизма ');
n=input('Введите число качаний балансира, 1/мин ');
R1=input('Введите плечо роторного груза, м ');
QR=input('Введите вес роторного груза, Н ');
Qd=input('Введите вес балансирного груза, Н ');
L=input('Введите плечо балансирного груза, м ');
G=input('Введите вес балансира, Н ');
Pxx=input('Введите мощность холостого хода, Вт ');
%Ускорение свободного падения, Н/кг:
g=9.8;
%Задается исходная ваттметрограмма Ped от fi:
%Введите исходные данные ваттметрограммы в зависимости от угла поворота
кривошипа;
Ped=input('Введите массив мощности потребляемой электродвигателем, Вт ');
grad=input('Введите массив угла отклонения поворота кривошипа, град. ');
fi=grad*pi/180;
%Угловая частота вращения кривошипа, 1/с:
w=pi*n/30;
%Углы наклона линии шатун-кривошип к полюсной линии:
gamma1=acos((1+(bk/P0)^2-((l+r)/P0)^2)/(2*bk/P0));
gamma0=acos((1+(bk/P0)^2-((l-r)/P0)^2)/(2*bk/P0));
%Угол размаха балансира:
dmax=gamma1-gamma0;
%Длина хода точки положения штока:
S0=ak*dmax;
%Перемещение точки положения штока:
S_fi=S0/2*(1-cos(fi));
%Скорость точки положения штока:
V_fi=w*S0/2*sin(fi);
%Ускорение точки положения штока:
a_fi=w^2*S0/2*cos(fi);
%Расстояние от центра тяжести сборки балансира до оси вращения:
Ld=(G*(bk-ak)+2*Qd*L)/(2*(Qd+G));
%Вес сборки балансира:
Q=G+Qd;
%Мощность электродвигателя, затрачиваемая при движении роторного противовеса:
Pr_fi=w*R1/ng/nn*QR*sin(fi);
%Мощность электродвигателя, затрачиваемая при движении сборки балансира:

```

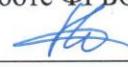
```
Pd_fi=Q*Ld*w*R1/ng/nn/bk*(cos(dmax/2-S_fi/ak)-Ld/bk*a_fi/g);  
%Зависимость усилия в точке положения штанг от угла поворота кривошипа:  
Ptpsh_fi1=(Ped-Pxx+Pd_fi+Pr_fi);  
Ptpsh_fi2=(ak/bk/ng/nn*V_fi);  
Ptpsh_fi=Ptpsh_fi1./Ptpsh_fi2;  
%Построение динамограммы:  
plot(S_fi,Ptpsh_fi);
```

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Материалы, относящиеся к внедрению результатов диссертационной работы



«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебно-методической
работе ФГБОУ ВО «УГНТУ» А.И. Могучев

«23» 10 2024 г.

**АКТ****внедрения результатов диссертационной работы
на соискание ученой степени кандидата технических наук****Яшина Антона Николаевича****«Повышение эффективности электротехнических комплексов установок
штанговых глубинных насосов» в учебный процесс
кафедры «Электротехника и электрооборудования предприятий»**

Мы, нижеподписавшиеся, составили настоящий акт о том, что теоретические и практические результаты диссертации Яшина А.Н., а именно:

– методика проектирования электроприводов УШГН на базе вентильных электродвигателей;

– методика проектирования электротехнического комплекса УШГН с использованием возобновляемых источников энергии;

– модель «ШГН – станок качалка» с имитацией влияния изменения параметров балансирующего уравновешивающего контргруза на выходные параметры УШГН,

используются в учебной и научной деятельности кафедры «Электротехника и электрооборудования предприятий» УГНТУ, при чтении лекций и проведении практических занятий по дисциплине «Перспективные системы регулируемого электропривода» учебного плана направлений 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», при выполнении курсовых и выпускных квалификационных работ, подготовке бакалавров и магистров.

Директор ИТ-института
д-р. техн. наук, профессор

Заведующий кафедрой ЭЭП
д-р. техн. наук, профессор


21.10.2024

З.Х. Павлова


21.10.2024

М.И. Хакимьянов