

*На правах рукописи*

**Фролов Сергей Алексеевич**



**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ  
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ  
СИСТЕМ ПРИВОДОВ ШТАНГОВЫХ СКВАЖИННЫХ  
НАСОСНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ДОБЫЧИ НЕФТИ**

*Специальность 2.4.2. Электротехнические  
комплексы и системы*

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

Санкт-Петербург – 2025

Диссертация выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, доцент

*Шишлянников Дмитрий Игоревич*

**Официальные оппоненты:**

*Хакимьянов Марат Ильгизович*

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», кафедра электротехники и электрооборудования предприятий, заведующий кафедрой;

*Шевырёв Юрий Вадимович*

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», кафедра энергетики и энергоэффективности горной промышленности, профессор.

**Ведущая организация** – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург.

Защита диссертации состоится **24 апреля 2025 г. в 14:00** на заседании диссертационного совета ГУ.6 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171а**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru). Автореферат разослан 24 февраля 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



УСТИНОВ  
Денис Анатольевич

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

В настоящее время, как в России, так и за рубежом для добычи нефти широко применяются штанговые скважинные насосные установки (УШСН). Область применения УШСН включает малодебитные скважины и скважины осложненного фонда, рентабельная эксплуатация которых во многом определяется энергоэффективностью функционирования систем приводов насосных установок.

Одним из перспективных типов систем приводов УШСН является электрогидравлический привод (ЭГП). Он характеризуется возможностью регулирования рабочих параметров в широких диапазонах, мобильностью, малой металлоемкостью, простотой монтажа, наличием информативных систем телеметрии. Другим решением, направленным на расширение области применения УШСН, является использование в системах приводов вентильных электродвигателей (ВД) с роторами на постоянных магнитах.

Широкое применение перспективных систем приводов УШСН сдерживается высокой стоимостью оборудования, сложностью в обслуживании и ремонте, высокими удельными затратами энергии на подъем скважинной жидкости и меньшей наработкой по сравнению с традиционными электромеханическими приводами (ЭМП) – балансирными станками-качалками (СК).

Устранение перечисленных недостатков при создании систем приводов УШСН нового технического уровня может быть осуществлено на основе результатов исследований их работы в реальных условиях эксплуатации. Исследование нагруженности и сравнительная оценка энергопотребления при работе электротехнических систем приводов УШСН с целью обоснования технических решений, направленных на повышение энергоэффективности функционирования УШСН при скважинной добыче нефти, представляет теоретический и практический интерес и является актуальной научной задачей.

Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2023-0005) в рамках НИР по теме «Фундаментальные основы рациональной разработки трудноизвлекаемых нефтяных запасов на

основе создания цифровых двойников объектов нефтегазового комплекса».

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

Значительный вклад в решение вопросов, связанных с исследованием процессов функционирования электротехнических систем приводов нефтепромыслового оборудования и обоснованием решений по повышению энергоэффективности и надёжности его работы, внесли Б. Н. Абрамович, И. Ю. Быков, Б. Ю. Васильев, М. Я. Гинзбург, Ю. Л. Жуковский, А. М. Зюзев, В. Н. Ивановский, В. С. Каштанов, А. Г. Молчанов, Г. В. Молчанов, А. Н. Назарычев, А. М. Пирвердян, А. А. Сабиров, Н. Н. Софьина, Ю. А. Сычев, Ш. Ф. Тахаутдинов, К. Р. Уразаков, О. И. Усачев, М. И. Хакимьянов, Ю. В. Шевырёв, Я. Э. Шклярский и др. Несмотря на значительный объем публикаций в отечественной и зарубежной технической литературе практически отсутствуют данные об оценке энергоэффективности функционирования электрогидравлических приводов УШСН и систем приводов УШСН с ВД.

**Объект исследования** – электротехнические системы приводов УШСН.

**Предмет исследования** – процесс функционирования электротехнических систем приводов УШСН.

**Идея работы.** Повышение энергоэффективности функционирования систем приводов УШСН достигается посредством использования силовых передач, двигателей и станций управления, обеспечивающих регулирование режимных параметров работы штанговых скважинных насосных установок в широких диапазонах.

**Цель работы.** Повышение энергоэффективности функционирования систем приводов УШСН при скважинной добыче нефти.

#### **Задачи исследования**

1. Анализ структурных особенностей электротехнических систем приводов УШСН, режимов и условий их работы.

2. Теоретические исследования процесса формирования нагрузок на приводы УШСН.

3. Разработка методики сравнительной оценки энергоэффективности функционирования электротехнических систем приводов УШСН в условиях нефтяных промыслов.

4. Экспериментальные исследования процесса формирования нагрузок и энергопотребления при функционировании систем приводов УШСН.

5. Обоснование технических решений повышения энергоэффективности функционирования электротехнических систем приводов УШСН при скважинной добыче нефти.

#### **Научная новизна**

1. Теоретически установлено, что использование приводов УШСН с широкими диапазонами регулирования параметров позволяет обеспечить рациональные режимы работы скважинного оборудования, что при прочих равных условиях, в сравнении с традиционными электромеханическими приводами – балансирными СК с асинхронными электродвигателями, обуславливает уменьшение пиковых нагрузок в точке подвеса колонны насосных штанг и повышает производительность скважинного насоса.

2. Впервые разработана методика и выполнена сравнительная оценка эффективности функционирования электромеханических и электрогидравлических приводов УШСН в условиях нефтяных промыслов по критерию удельных затрат энергии на добычу скважинной жидкости. Экспериментально доказано, что серийно выпускаемые ЭГП УШСН с пневматическим и электродинамическим типами уравнивания характеризуются низкой энергоэффективностью, то есть высокими удельными затратами энергии на добычу скважинной жидкости, превышающими базовые удельные затраты энергии, полученными при оснащении испытываемых УШСН традиционными балансирными СК, на 13,4...121,9 %.

3. Доказано, что повышение эффективности функционирования УШСН по критерию удельных затрат энергии на добычу скважинной жидкости до 13 % возможно посредством использования систем приводов, оснащенных вентильными двигателями с роторами на постоянных магнитах.

#### **Соответствие паспорту заявленной специальности**

Содержание диссертационной работы соответствует паспорту специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы по п. 3 «Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разра-

ботка алгоритмов эффективного управления» и п. 4 «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях, диагностика электротехнических комплексов».

#### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Теоретическая значимость работы заключается в установлении особенностей влияния конструкции и режимов работы систем приводов УШСН на величину и характер изменения нагрузок на элементы систем приводов, производительность и энергоэффективность функционирования УШСН по критерию удельных затрат энергии на добычу скважинной жидкости.

Практическая значимость работы заключается в обосновании технических решений по повышению энергоэффективности функционирования электротехнических систем приводов УШСН при скважинной добыче нефти. Разработанные методики контроля нагруженности и энергоэффективности функционирования ЭГП УШСН использованы сотрудниками ООО «НСХ АЗИЯ ДРИЛЛИНГ» при совершенствовании приборов мониторинга параметров работы нефтепромыслового оборудования.

Результаты работы применяются ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» при обучении студентов по направлению подготовки 130400.65 «Горное дело», специализации «Электрификация и автоматизация горного производства».

#### **Методология и методы исследований**

Методология исследований заключалась в анализе и обобщении результатов ранее опубликованных исследований по повышению энергоэффективности функционирования систем приводов УШСН, выполнении расчетов, проведении экспериментальных исследований по оценке нагруженности и энергоэффективности функционирования систем приводов УШСН в условиях нефтяных промыслов.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Установлено, что серийно выпускаемые отечественными предприятиями ЭГП УШСН с пневматическим и электродинамическим типами уравновешивания характеризуются низкой энергоэф-

фективностью, то есть высокими удельными затратами энергии на добычу скважинной жидкости, превышающими базовые удельные затраты энергии, полученными при оснащении испытываемых УШСН традиционными балансирными СК, на 13,4...121,9 %.

2. Применение систем ЭГП УШСН, функционирующих в соответствии с разработанными схемами и алгоритмом управления, обеспечивает снижение динамических нагрузок на элементы приводов и уменьшение влияния работы привода на качество электроэнергии в сети нефтяного промысла посредством аккумулирования и использования рекуперированной электроэнергии для работы вспомогательных и периферийных устройств УШСН.

3. Повышение эффективности функционирования ЭМП УШСН – балансирных СК, по критерию удельных затрат энергии на добычу скважинной жидкости до 13 % возможно посредством использования в системах привода вентильных двигателей с роторами на постоянных магнитах и интеллектуальных станций управления, а также обеспечения жесткой кинематической связи между приводным вентильным двигателем и механической передачей.

#### **Степень достоверности результатов**

Достоверность результатов работы обеспечивалась применением широко апробированных, а также оригинальных методик экспериментальных исследований, осуществленных с использованием оборудования, прошедшего государственную поверку. Результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса формирования нагрузок и оценки энергоэффективности функционирования приводов УШСН согласуются с общепризнанными представлениями о закономерностях работы приводов нефтепромыслового оборудования. Относительная погрешность экспериментальных данных не превышает 5 %.

#### **Апробация результатов**

Основные положения работы, результаты теоретических и экспериментальных исследований докладывались на конференциях: всероссийская конференция «Проблемы разработки углеводородных и рудных полезных ископаемых» (г. Пермь, 2019, 2020 гг.), международная научно-практическая конференция «Горная и нефтяная электромеханика» (г. Пермь, 2021, 2024 г.), международная науч-

но-техническая конференция «Чтения памяти В. Р. Кубачека» (г. Екатеринбург, 2020, 2021, 2022, 2024 гг.), международный симпозиум им. академика М. А. Усова студентов и молодых ученых (г. Томск, 2021 гг.), онлайн-форум ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «Инновации для повышения эффективности сопровождения нефтегазовых активов» (г. Москва, 2024).

**Личный вклад автора** заключается в анализе научной литературы по теме исследования; постановке цели и задач диссертационного исследования; получении исходных данных и разработке методики экспериментальных исследований. Алгоритм функционирования ЭГП УШСН, варианты конструктивного исполнения ЭГП разработаны при непосредственном участии автора. Организация внедрения результатов диссертационной работы осуществлена в равной степени с соавторами.

#### **Публикации**

Результаты диссертации в достаточной степени освещены в 5 печатных работах, в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук на соискание ученой степени доктора наук; в 1 статье – в издании, входящем в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент на изобретение.

#### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав с выводами по каждой из них, заключения, трёх приложений, общим объемом 153 страницы печатного текста, содержит 8 таблиц и 64 рисунка, список литературы из 114 наименований.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, положения, выносимые на защиту, показаны научная новизна и практическая ценность результатов работы.

**В первой главе** обобщены сведения о конструкции и области применения установок для скважинной добычи нефти. Установлено, что при эксплуатации малодобитных и осложненных нефтяных скважин рациональным является применение установок штанговых скважинных



насосов (УШСН). Рассмотрены структура и конструктивные особенности электротехнических систем приводов УШСН.

**Во второй главе** выполнен анализ кинематических параметров электромеханических (ЭМП) и электрогидравлических (ЭГП) приводов УШСН. Проведены теоретические исследования процесса формирования нагрузок на элементы систем электроприводов УШСН с гидравлической и механической силовыми передачами. Описаны подходы к оценке энергоэффективности при функционировании УШСН. Разработана математическая модель в программной среде *MathCAD* и выполнен расчет кинематических и силовых параметров работы ЭГП и ЭМП УШСН применительно к исходным данным, приведенным в Таблице 1.

Показано, что движение ТПКШ УШСН, оснащенной традиционным ЭМП, характеризуется практически непрерывным изменением ускорений и скоростей. При отсутствии или незначительной величине дезаксиала преобразующей передачи балансирного СК, подъем и опускание полированного штока осуществляются за равные промежутки времени (рисунок 1, а, поз II). При работе ЭГП циклограмма движения ТПКШ задаётся искусственно, посредством регулирования параметров работы силовой гидропередачи. При этом достаточно просто реализовать, например, медленный подъем штока (и соединенного с ним посредством колонны штанг плунжера скважинного насоса) и быстрое опускание (см. рисунок 1, а, поз I). Таким образом, время рабочего цикла на подъем и опускание ТПКШ остаётся неизменным, а условия заполнения скважинного насоса улучшаются, что обуславливает повышение производительности УШСН до 3...5 %. Характерная особенность ЭГП УШСН – функции, описывающие зависимость скорости и ускорения ТПКШ от ее положения или времени, не являются непрерывными как у ЭМП (см. рисунок 1, б). На характерных временных промежутках работы ЭГП заданы разные законы изменения движения ТПКШ (I-VIII на рисунке 1) и рассчитаны нагрузки в ТПКШ (рисунок 2).

Показано, что сравнительную оценку энергоэффективности функционирования различных типов систем приводов УШСН рационально осуществлять экспериментально, применительно к условиям одной скважины, с одним и тем же глубинно-насосным оборудованием. При этом за базовую величину удельных затрат энергии на подъем скважинной жидкости  $H_{н.б}$  следует принять значение, полученное при

работе УШСН, оснащенной традиционным ЭМП – балансирным СК с асинхронным электродвигателем. Соотнесение базовой величины  $H_{и.б}$  с величиной удельных затрат энергии на добычу скважинной жидкости  $H_{и.ис}$ , полученной при оснащении УШСН испытываемым приводом, определяет разность  $\Delta$  (%) удельных энергозатрат в соответствии с (1):

$$\Delta = |H_{и.ис} - H_{и.б}| \cdot H_{и.б}^{-1} \cdot 100\%. \quad (1)$$

Таким образом, реализуется количественная оценка энергоэффективности работы испытываемого привода УШСН.

**В третьей главе** приведена методика, описан порядок проведения и выполнен анализ результатов экспериментальных исследований по оценке силовых параметров и энергетических показателей работы систем ЭГП УШСН. Экспериментальные исследования выполнены в условиях нефтяных промыслов и совместно со специалистами компании ООО «ЛУКОЙЛ-Пермь». Исследования выполнялись при участии сотрудников компании ООО «НПП «РОС» (г. Пермь). Экспериментально доказано, что выпускаемые отечественными предприятиями ЭГП УШСН с пневматическим и электродинамическим типами уравнивания характеризуются низкой энергоэффективностью, то есть высокими удельными затратами энергии на добычу скважинной жидкости, превышающими базовые удельные затраты энергии, полученными при оснащении испытываемых УШСН традиционными ЭМП, на 13,4...121,9 %.

**В четвертой главе** на основании результатов теоретических и экспериментальных исследований обоснованы способы увеличения наработки и повышения энергоэффективности функционирования ЭГП УШСН. Доказано, что применение систем ЭГП УШСН, функционирующих в соответствии с разработанными схемами и алгоритмом управления, обеспечивает снижение динамических нагрузок на элементы приводов и уменьшение влияния работы привода на качество электроэнергии в сети нефтяного промысла посредством аккумуляирования и использования рекуперированной электроэнергии для работы вспомогательных и периферийных устройств УШСН.

**В пятой главе** приведена методика, описан порядок проведения и выполнен анализ результатов экспериментальных исследований по оценке энергоэффективности функционирования ЭМП УШСН с вентильным электродвигателем (ВД). Доказано, что использования в системах привода вентильных двигателей с роторами на постоянных

магнитах и интеллектуальных станций управления, а также обеспечения жесткой кинематической связи между приводным вентильным двигателем и механической передачей позволяет повысить эффективность функционирования ЭМП УШСН – балансирных СК, по критерию удельных затрат энергии на добычу скважинной жидкости до 13 %.

**В заключении** обобщены результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований.

Основные результаты диссертации отражены в следующих защищаемых положениях.

**1. Установлено, что серийно выпускаемые отечественными предприятиями ЭГП УШСН с пневматическим и электродинамическим типами уравнивания характеризуются низкой энергоэффективностью, то есть высокими удельными затратами энергии на добычу скважинной жидкости, превышающими базовые удельные затраты энергии, полученными при оснащении испытываемых УШСН традиционными балансирными СК, на 13,4...121,9 %.**

С целью оценки энергоэффективности функционирования приводов УШСН различных типов автором выполнены экспериментальные исследования в условиях нефтяных промыслов.

Исследования выполнялись с использованием программно-регистрирующих комплексов «АКД-СК», предназначенных для мониторинга приводов УШСН по энергетическим параметрам работы электродвигателей. Комплекс выпускается серийно, сертифицирован как средство измерения. «АКД-СК» осуществляет непрерывную регистрацию ваттметрограмм приводных электродвигателей УШСН. В состав оборудования комплекса «АКД-СК» (рисунок 3, а) входят контроллер с блоком световой индикации, датчик мощности, коммутационный блок и отметчик магнитного типа. Схема подключения комплекса «АКД-СК» в станции управления УШСН приведена на рисунке 3, б. Датчик мощности устанавливается на один из фазовых проводов, идущий с выхода магнитного пускателя. Фиксация нижнего (верхнего) положения ТПКШ осуществляется посредством использования отметчиков магнитного типа. Комплекс «АКД-СК» реализует измерения с частотой 0,5 кГц. Первичная обработка данных осуществляется про-

граммным обеспечением прибора, при выполнении измерений определяются:

– эффективные значения тока  $I_{\text{эф}}$  (А) и напряжения  $U_{\text{эф}}$  (В) рассчитываются по формулам (2) и (3):

$$I_{\text{эф}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{m=1}^n i_m^2}; \quad (2) \quad U_{\text{эф}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{m=1}^n u_m^2}, \quad (3)$$

где  $i_m$  – мгновенное значение тока в  $m$ -й момент времени, А;  $n$  – количество измерений за фиксированный интервал времени  $\Delta T$ ;  $u_m$  – мгновенное значение фазного напряжения в  $m$ -й момент времени, В.

Активные  $P_a$  (кВт) и полные  $S_w$  (кВА) мощности электродвигателя УШСН рассчитываются в соответствии с (4) и (5):

$$P_a = \frac{3}{n} \sum_{m=1}^n u_m i_m; \quad (4) \quad S_w = 3 I_{\text{эф}} U_{\text{эф}}. \quad (5)$$

Коэффициент мощности определяется выражением (6):

$$\lambda = P_a / S_w. \quad (6)$$

Для определения дебита скважин использовались автоматизированные групповые замерные установки АГЗУ-120М-4,0.

Исследования по оценке нагруженности и определению энергетических параметров работы приводов УШСН выполнялись на скважинах, осложненных асфальтосмолопарафиновыми отложениями (АСПО), с использованием ЭМП – балансирных СК-8, и наиболее распространенных серийно выпускаемых типов ЭГП – с пневматическим уравновешиванием НПК-10-8-6 и электродинамическим уравновешиванием ГПШСН 80-3,5 «Гейзер» (рисунок 4).

Исследования выполнялись в два этапа. Сначала замеры проводились на скважине, оборудованной УШСН с ЭМП типа СК-8. Затем СК-8 заменялся ЭГП и выполнялся тот же объем испытаний, что позволяло корректно выполнить сравнительную оценку энергоэффективности функционирования систем приводов УШСН. Среднесуточные удельные затраты энергии на добычу скважинной жидкости  $H_{w.i}$  при работе УШСН рассчитывались по формуле (7):

$$H_{w.i} = \Sigma W_{\text{сут.i}} / Q_{\text{ф.i}}, \quad (7)$$

где  $H_{w,i}$  – удельные затраты энергии на добычу скважинной жидкости за  $i$ -е сутки работы, кВт·ч/м<sup>3</sup>;  $\Sigma W_{\text{сут},i}$  – затраты энергии на работу УШСН за  $i$ -е сутки, кВт·ч;  $Q_{\text{ф},i}$  – производительность УШСН за  $i$ -е сутки, м<sup>3</sup>/сут.

Величина удельных энергозатрат  $H_{w,\text{ср}}$  на добычу скважинной жидкости при работе УШСН за период  $t$  рассчитывалась по формуле (8)

$$H_w = \sum_{i=1}^t H_{w,i} / t, \quad (8)$$

где  $H_w$  – средняя величина удельных энергозатрат на добычу скважинной жидкости при работе УШСН за контролируемый период, кВт·ч/м<sup>3</sup>;  $t$  – длительность контролируемого периода, сут.

На рисунке 5 представлена ваттметрограмма электродвигателя балансирующего станка-качалки СК-8. Отметчик показывает верхнее положение головки балансира (нижнее положение кривошипа).

Сравнительная оценка энергоэффективности функционирования систем приводов УШСН осуществлялась в соответствии с формулой (1), где за базовую величину  $H_{w,б}$  принималась средняя величина удельных энергозатрат на добычу скважинной жидкости при работе УШСН с балансирующим СК, а в качестве  $H_{w,\text{ис}}$  – величина удельных энергозатрат на добычу жидкости при работе испытываемого привода.

Испытания ЭМП и ЭГП УШСН с пневматическим уравниванием гидropередачи проводились на скважине «109б» Обливского месторождения. Определялись удельные энергозатраты на добычу скважинной жидкости при использовании ЭМП типа СК-8 и ЭГП типа НПК-10-8-6.

УШСН, оснащенная приводом типа НПК-10-8-6, эксплуатировалась со следующими параметрами: глубина подвески насоса –  $L = 1534,9$  м; длина хода штока  $S_0 = 2,5$  м; число двойных ходов  $n = 5$  мин<sup>-1</sup>. Удельные затраты энергии на подъем скважинной жидкости составили  $H_{w,\text{ис}} = 28,4$  кВт·ч/м<sup>3</sup>, что более чем вдвое выше (увеличение на 121,9%), чем при использовании ЭМП типа СК-8 (Таблица 2, А).

Анализ ваттметрограмм ЭГП УШСН с пневматическим уравниванием передачи показал, что в заданных условиях максимальное значение мощности при подъеме ТПКШ составляет  $P_{\text{дв}} = 12,1$  кВт, а при опускании штока –  $P_{\text{дв}} = 4,8$  кВт (рисунок 6). По мере движения ТПКШ вверх нагруженность приводного двигателя увеличивается, так как расходуется энергия, запасенная гидропневмоаккумулятором. Недостаточный объем последнего обуславливает наличие выраженных пи-

ков в сигнале активной мощности электродвигателя испытываемого ЭГП УШСН. Существенное влияние на процесс формирования нагрузок оказывает наличие АСПО в скважине: в сигнале мощности наличествуют характерные локальные пики.

В ходе испытаний, с целью снижения удельных энергозатрат на добычу нефти была выполнена замена скважинного насоса: длина хода штока увеличена до  $S_0 = 5,0$  м, число двойных ходов  $n = 1,8$  мин<sup>-1</sup>. При этом отмечено незначительное снижение удельных затрат энергии на добычу скважинной жидкости ( $H_{w.ис} = 23,6$  кВт·ч/м<sup>3</sup>). По сравнению с базовой величиной, удельные затраты энергии на добычу скважинной жидкости увеличены на 84,4 %. Высокие удельные энергозатраты и неравномерность нагрузок при работе ЭГП НПК-10-8-6 объясняются несовершенством выбранных способов управления и уравнивания гидropередачи. Энергии, запасаемой пневмоаккумулятором при опускании колонны штанг, объективно недостаточно для существенного уменьшения мощности при подъеме скважинной жидкости.

Испытания ЭГП с электродинамическим уравниванием передачи ГПШСН 80-3,5 «Гейзер» проводились на скважине «404» Сосновского месторождения. УШСН, оснащенная испытываемым ЭГП, эксплуатировалась со следующими параметрами: глубина подвески насоса –  $L = 1560,1$  м; длина хода штока  $S_0 = 2,5$  м; число двойных ходов  $n = 5$  мин<sup>-1</sup> (Таблица 2, Б). На графике мощности (рисунок 7) приводного двигателя ГПШСН 80-3,5 «Гейзер», можно выделить участки рабочего и обратного хода штока силового гидроцилиндра.

Удельные затраты энергии на подъем скважинной жидкости составили  $H_{w.ср.ис} = 12,76$  кВт·ч/м<sup>3</sup>, что выше значений удельных энергозатрат, полученных с использованием ЭМП СК-8 на  $\Delta = 13,4$  %.

**2. Применение систем ЭГП УШСН, функционирующих в соответствии с разработанными схемами и алгоритмом управления, обеспечивает снижение динамических нагрузок на элементы приводов и уменьшение влияния работы привода на качество электроэнергии в сети нефтяного промысла посредством аккумуляирования и использования рекуперированной электроэнергии для работы вспомогательных и периферийных устройств УШСН.**

Анализ данных экспериментальных исследований процесса работы ЭГП с электродинамическим уравниванием показал, что при

рабочем ходе штока силового гидроцилиндра электродвигатель работает с номинальной нагрузкой, коэффициент мощности составляет  $\lambda = 0,85$ . При обратном ходе штока приводной электродвигатель работает в генераторном режиме. В промышленную сеть рекуперируется 25...29 % энергии от потребленной приводом. С точки зрения анализа нагрузок обследуемый ЭГП «Гейзер» следует рассматривать как неуравновешенный: мотор-насос гидропередачи и электродвигатель подвергаются воздействию динамических нагрузок (ударов), что обуславливает ускоренный расход ресурса элементов привода (см. рисунок 7).

Устранение динамических нагрузок, действующих на приводные валы электродвигателя и мотор-насоса маслостанции ЭГП, возможно посредством замены мотор-насоса на две необратимые объемные гидравлические машины: мотор и насос. При этом гидромотор соединяется с отдельным генератором и может иметь меньший рабочий объем по сравнению с насосом. Принципиальная схема разработанного автором ЭГП УШСН представлена на рисунке 8. ЭГП УШСН содержит силовой гидроцилиндр (ГЦ) 1, который обеспечивает возвратно-поступательное движение колонны насосных штанг и, тем самым, работу скважинного штангового насоса. Гидрораспределитель 2 с электромагнитным управлением осуществляет смену направления потока рабочей жидкости в гидравлической системе привода в конце хода колонны штанг вверх и вниз. Приводной электродвигатель 4 кинематически связан с насосом 3. Гидромотор 6 соединен с генератором 12. Интеллектуальная система управления 5 (ИСУ), которая включает в себя частотный преобразователь (ЧП), управляет электродвигателем 4 и подает напряжение на обмотку возбуждения генератора 12. Также ИСУ управляет работой гидрораспределителя 2. В состав предлагаемого ЭГП УШСН входят предохранительные клапаны 7 и 10, маслобак 8, фильтр 9, обратный клапан 11. Поршневая полость силового ГЦ 1 соединена с дренажным трубопроводом 13. Положение штока ГЦ 1 контролируется датчиками 14 и 15.

Разработанный ЭГП УШСН функционирует следующим образом. С помощью ИСУ 5 осуществляют пуск электродвигателя 4, в результате чего начинает работать насос 3. Рабочая жидкость всасывается насосом 3 из маслобака 8, проходя через обратный клапан 11, после чего нагнетается в штоковую полость силового ГЦ 1 по направлению, заданным гидрораспределителем 2 в первом положении (1). Таким обра-

зом, под действием давления рабочей жидкости на поршень ГЦ 1 обеспечивается подъем штока и колонны штанг. В конце хода колонны штанг вверх по сигналу датчика 14 ИСУ 5 осуществляет переключение гидрораспределителя 2 во второе положение (II), в результате чего напорный трубопровод насоса 3 сообщается с маслобаком 8, а входной трубопровод гидромотора 6 – с штоковой полостью силового ГЦ 1. При этом насос 3 работает в режиме холостого хода. На обмотку возбуждения генератора 13 подается напряжение от ИСУ 5. Движение рабочей жидкости на вход гидромотора 6 осуществляется в результате ее вытеснения из штоковой полости силового ГЦ 1 при перемещении поршня, вызванного передаваемым через шток усилием веса КШ в скважинной жидкости. Крутящий момент от гидромотора 6 сообщается валу генератора 12, в результате чего возникшая ЭДС на обмотках статора генератора 12 обеспечивает передачу электрической энергии на аккумулятор. В конце хода колонны штанг вниз ИСУ 5 по сигналу датчика 15 переключает гидрораспределитель 2 обратно в первое положение (I), а далее цикл работы ЭГП УШСН повторяется. Таким образом, минимизируется вероятность возникновения динамических нагрузок (ударов), как на валах гидромашин 3 и 6, так и на валах электродвигателя 4 и генератора 12.

Автором разработана структурная схема подключения электропотребителей и периферийных устройств ЭГП УШСН (рисунок 9), которая позволяет накапливать и использовать аккумулярованную электрическую энергию для обеспечения работы периферийных устройств и вспомогательных электропотребителей в составе ЭГП УШСН.

При подъеме колонны штанг вверх и втягивании штока силового ГЦ, питающее напряжение от электросети принимается частотным преобразователем и после подается с заданными параметрами на обмотки электродвигателя насоса маслостанции ЭГП М1. За счет изменения в ЧП параметров питающего напряжения осуществляется регулирование скорости вращения ротора электродвигателя М1 и, соответственно, производительности насоса ЭГП УШСН, что обеспечивает регулирование частоты ходов ТПКШ и плунжера насоса.

При ходе колонны штанг вниз рабочая жидкость вытесняется из штоковой полости силового ГЦ и подается под давлением в гидромотор,



который обеспечивает вращение ротора генератора Г1. При срабатывании датчика обратного хода силового ГЦ соответствующее реле К1 активирует систему управления возбуждением генератора Г1, которая регулирует ток в цепи обмотки возбуждения пропорционально скорости вращения вала гидромотора. Электрический двигатель насоса М1 в это время работает на заданных оборотах в режиме холостого хода. Вырабатываемая генератором Г1 электрическая энергия подается на аккумулятор и после преобразования в инверторе расходуется по мере необходимости вспомогательными электропотребителями и периферийными устройствами в составе ЭГП УШСН, например, двигателями М2 и М3 вентиляторов теплообменника рабочей жидкости. Энергию аккумулятора можно расходовать на работу таких периферийных устройств УШСН как: штанговращатель (М4), локальный нагреватель, установка для дозирования реагента в скважину и др. Для повышения энергоэффективности работы привода двигатель М1 может быть выполнен вентильным, с ротором на постоянных магнитах.

**3. Повышение эффективности функционирования ЭМП УШСН – балансирных СК, по критерию удельных затрат энергии на добычу скважинной жидкости до 13 % возможно посредством использования в системах привода вентильных двигателей с роторами на постоянных магнитах и интеллектуальных станций управления, а также обеспечения жесткой кинематической связи между приводным вентильным двигателем и механической передачей.**

Традиционные балансирные СК имеют ограниченные возможности по автоматизации и регулированию режимных параметров работы, что существенно снижает энергоэффективность их использования. Одним из путей совершенствования систем приводов УШСН является использование ВД с возбуждением от постоянных магнитов. Сравнительные испытания ЭМП – балансирных СК, оснащенных вентильным двигателем ВДПМ-СК-22В и асинхронным электродвигателем 4АМИ200М6У3/22/980 с клиноременной передачей, выполнены на скважине «1001» Западного месторождения (глубина подвески насоса –  $L = 1470,3$  м). Испытания проводились в два этапа с использованием станции управления «Danfoss» VLT SALT, станка-качалки СКДР-8-3 с редуктором ЦЗНШ-450-40. На первом этапе ЭМП оборудовался ВД, осуществлялась настройка станции управления, устанавливались заданные технические

параметры работы УШСН. Методикой исследования предусматривалось проведение ежедневных замеров энергопотребления и дебита скважины, регистрация ваттметрограмм (рисунок 10). На втором этапе осуществлялся демонтаж ВД и установка на СК шкивов клиноременной передачи и асинхронного двигателя. Программа испытаний повторялась в полном объеме с идентичными параметрами работы УШСН. Результаты испытаний показали снижение удельных энергозатрат на добычу скважинной жидкости при использовании УШСН с ВД на 13 % (Таблица 3).

Исключение из кинематической цепи ЭМП клиноременной передачи и применение интеллектуальных станций управления типа *VLT SALT* обеспечивает возможность регулирования параметров работы УШСН в широких диапазонах с высокими быстродействием и точностью. Увеличение времени подъема ТПКШ и снижение времени на опускание колонны штанг в рамках каждого цикла работы СК, обусловило повышение производительности скважинного насоса. Однако, наряду с указанными достоинствами, следует отметить и недостатки, выявленные в ходе опытно-промышленных испытаний ВД: значительная стоимость интеллектуальной станции управления типа *VLT SALT* и ВД; сложность настройки станции управления.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертационной работе на основании выполненных автором исследований решена актуальная задача повышения энергоэффективности функционирования электротехнических систем приводов штанговых скважинных насосных установок для добычи нефти.

Основные результаты работы заключаются в следующем.

1. Выполнен анализ конструктивных особенностей, режимов работы и условий функционирования систем ЭМП и ЭГП УШСН.

2. Теоретически и экспериментально исследован процесс формирования нагрузок на элементы УШСН. Характер изменения нагрузок, действующих на элементы УШСН, оборудованных ЭГП с различными типами уравновешивания, существенно отличается от нагруженности узлов УШСН с ЭМП типа балансирный СК. Эти отличия непосредственно связаны с иным законом движения ТПКШ, а причины, определяющие отличия закона движения и усилий, взаимосвязаны.

3. Разработана методика сравнительной оценки энергоэффективности функционирования ЭМП и ЭГП УШСН в условиях нефтяных промыслов.

4. Экспериментально определены удельные затраты энергии на добычу скважинной жидкости при работе систем ЭМП и ЭПП УШСН. Доказано, что испытываемые ЭПП УШСН с пневматическим уравниванием гидродатчи характеризуются низкой энергоэффективностью. Удельные затраты энергии на добычу скважинной жидкости увеличиваются по сравнению с использованием балансирных СК на 84,4...121,9%.

5. Доказано, что испытываемые ЭПП УШСН с электродинамическим уравниванием гидродатчи характеризуется энергопотреблением до 13,4 % выше по сравнению с балансирными ЭМП. В сеть нефтепромысла рекуперируется 25...29 % электроэнергии от потребляемой приводом.

6. Повышение эффективности функционирования ЭПП УШСН с электродинамическим уравниванием гидродатчи, минимизация вредного высших гармоник сигналов напряжения на потребители в промышленных сетях обеспечивается посредством аккумулирования и использования генерируемой электроэнергии для работы вспомогательных и периферийных устройств УШСН согласно разработанной схеме и алгоритму функционирования привода.

7. Доказано, что оснащение систем ЭМП УШСН вентильными двигателями и интеллектуальными станциями управления, обеспечение жесткой кинематической связи ВД и механической передачи, определяет повышение энергоэффективности функционирования УШСН до 13 %.

8. Результаты диссертации используются в ООО «НСХ Азия Дрилинг» (г. Пермь) при разработке методологии и совершенствования оборудования для контроля параметров систем приводов УШСН; применяются в учебном процессе в ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» при обучении студентов по направлению подготовки 130400.65 «Горное дело», специализации «Электрификация и автоматизация горного производства».

9. Перспективным направлением развития темы исследования является разработка алгоритмов регулирования режимных параметров систем приводов УШСН с вентильными двигателями.

#### **СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Публикации в изданиях из Перечня ВАК:*

1. Фролов, С. А. Повышение энергоэффективности электроприводов штанговых насосных установок малодебитных скважин / С. А.

**Фролов, Д. И. Шишлянников** // Промышленная энергетика. – 2024. – № 6 – С. 14–21.

2. Фролов, С.А. Совершенствование электрогидравлического привода установок штанговых скважинных насосов/ **С. А. Фролов, Д.И. Шишлянников** // Известия вузов. Электромеханика. – 2024. – Т. 67. № 3 – С. 83-91.

*Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus:*

3. Шишлянников, Д. И. Оценка энергоэффективности функционирования и увеличение наработки гидравлических приводов установок штанговых скважинных насосов в осложненных условиях эксплуатации / Д. И. Шишлянников, В. Ю. Зверев, А. Г. Звонарёва, **С. А. Фролов**, А. А. Иванченко // Записки горного института. – 2023. – Т. 261. – С. 349–362.

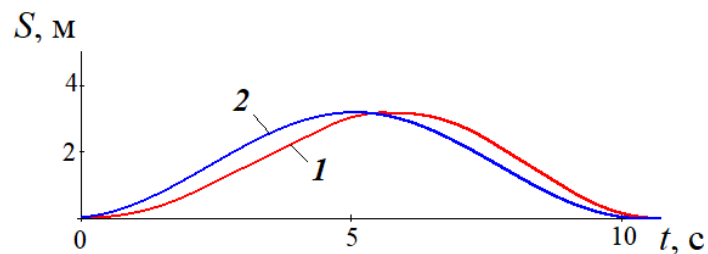
*Публикации в прочих изданиях:*

4. Софьина, Н. Н. Определение технического состояния элементов установок штанговых скважинных насосов по результатам ватт-метрографирования / Н. Н. Софьина, Д. И. Шишлянников, **С. А. Фролов**, С. Н. Кривощёков // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2020.– № 3 (117). – С. 21–26.

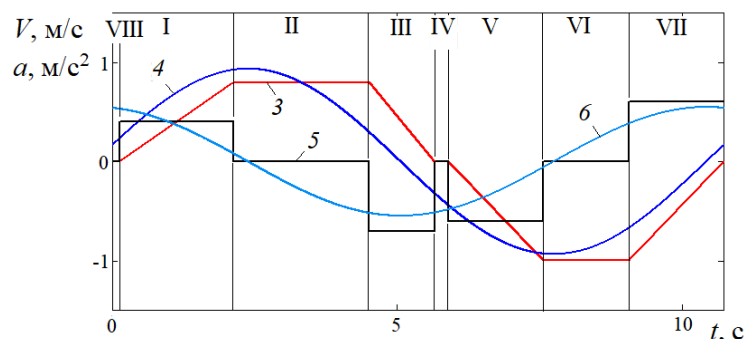
5. Шишлянников, Д. И. Совершенствование технологии монтажа гидравлических приводов штанговых скважинных насосных установок / Д. И. Шишлянников, В. Ю. Зверев, **С. А. Фролов**, М. М. Тяктев // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2019. – № 10. – С. 44–49.

*Патенты:*

6. Патент 2805902 Российская Федерация, МПК E21B 43/00 (2006.01), F04B 47/04 (2006.01). Гидропривод штанговой скважинной насосной установки: № 2024102124; заявлено 29.01.2024; опубликовано 02.09.2024 / Д. И. Шишлянников, В. К. Картавцев, **С. А. Фролов**, А. А. Иванченко, Д. И. Дремина; заявитель ПНИПУ. Бюл. № 25. – 10 с.



a)



б)

Рисунок 1 – Пример циклограмм движения точки подвеса колонны насосных штанг УШСН с ЭГП и балансирным ЭМП ( $S = 3$  м;  $n = 5,7$  мин<sup>-1</sup>): а – перемещение; б – скорость и ускорение; 1, 3, 5 – изменение перемещения, скорости и ускорения ТПКШ ЭГП УШСН соответственно; 2, 4, 6 – изменение перемещения, скорости и ускорения ТПКШ балансирного ЭМП соответственно; I – ускоренное движение ТПКШ (разгон вверх); II – движение ТПКШ вверх при  $V \rightarrow \text{const}$ ; III – замедление ТПКШ (движение вверх); IV, VIII – паузы при переключении гидрораспределителя; V – ускоренное движение ТПКШ вниз; VI – движение ТПКШ вниз при  $V \rightarrow \text{const}$ ; VII – замедление ТПКШ (движение вниз)

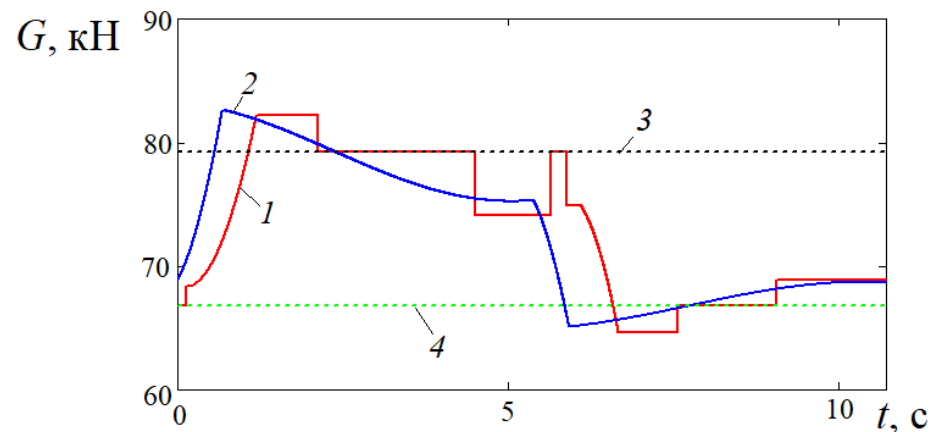
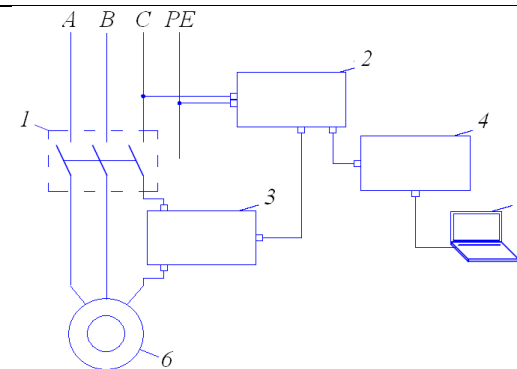


Рисунок 2 – Изменение нагрузок в точке подвеса колонны насосных штанг: 1 – ЭГП УШСН; 2 – ЭМП УШСН; 3 – статическая нагрузка, создаваемая весом колонны насосных штанг и столба жидкости при движении ТПКШ вверх; 4 – статическая нагрузка, создаваемая весом колонны насосных штанг при движении ТПКШ вниз



a)



б)

Рисунок 3 – Программно-регистрирующий комплекс «АКД-СК» производства ООО «НПП «РОС»: а – общий вид комплекса; б – схема подключения комплекса; 1 – магнитный пускатель электродвигателя; 2 – контроллер АКД-СК; 3 – датчик мощности; 4 – блок коммутации и настройки; 5 – персональный компьютер; 6 – электродвигатель СК

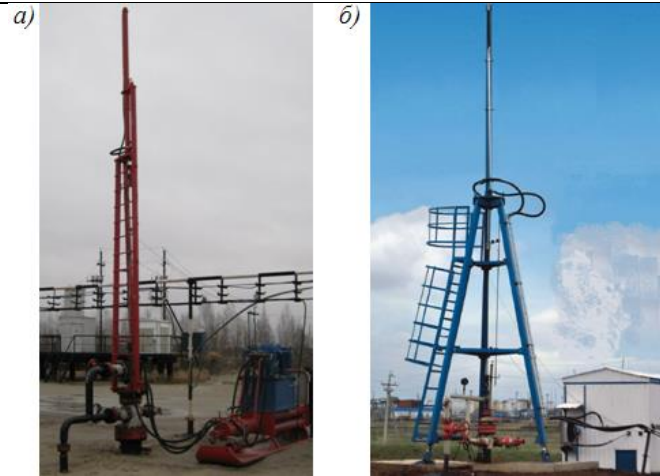


Рисунок 4 – Общий вид приводов НПК-10-8-6 (а) и ГПШСН 80-3,5 «Гейзер» (б)

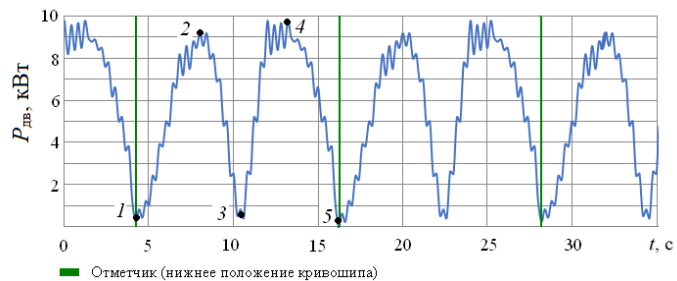


Рисунок 5 – Ваттметрограмма двигателя уравновешенного балансирного СК-8: нижнее (1, 5), горизонтальное (2,4) и верхнее (3) положение кривошипа

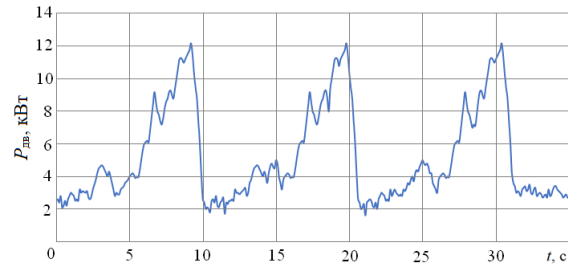


Рисунок 6 – Ваттметрограмма двигателя НПК10-8-6 с пневматическим уравниванием

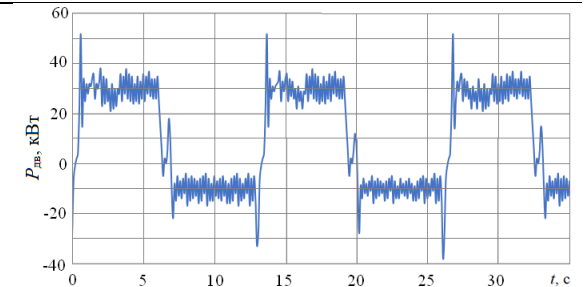


Рисунок 7 – Ваттметрограмма двигателя ГПШСН 80-3,5 «Гейзер» с электродинамическим уравниванием

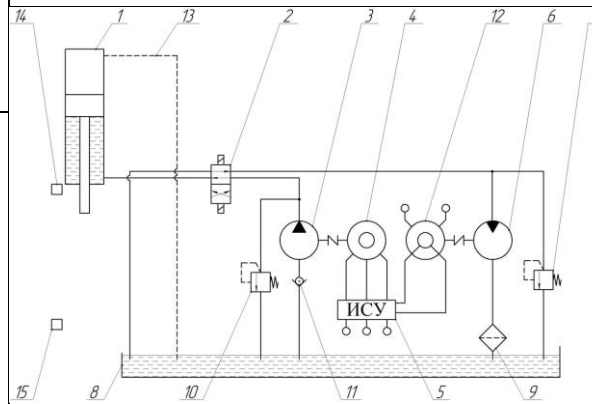


Рисунок 8 – Принципиальная схема усовершенствованного ЭГП УШСН: 1 – гидроцилиндр; 2 – гидрораспределитель; 3 – насос; 4 – электродвигатель; 5 – система управления; 6 – гидронасос; 7 – клапан предохранительный; 8 – маслобак; 9 – фильтр; 10 – клапан редукционный; 11 – клапан обратный; 12 – генератор; 13 – дренажный трубопровод; 14, 15 – датчики положения

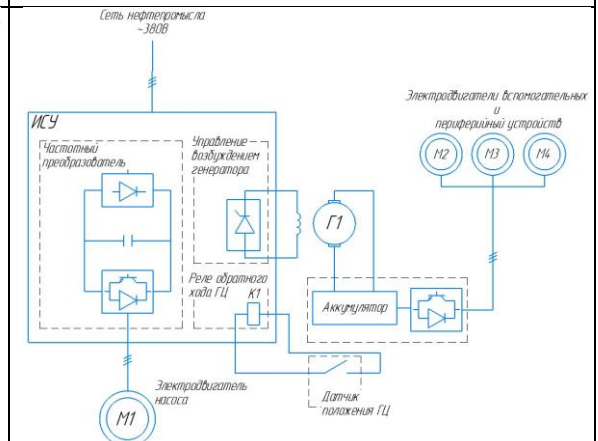


Рисунок 9 – Структурная схема подключения потребителей, входящих в состав ЭГП УШСН с электродинамическим уравниванием

Таблица 1 – Характеристики моделируемой системы «УШСН-скважина»

Параметр	Ед. изм.	Значение
Длина хода штока	м	3,16
Частота качаний	мин <sup>-1</sup>	5,6
Глубина подвески насоса	м	1500
Заглубление насоса под динамический уровень	м	500
Плотность скважинной жидкости	кг/м <sup>3</sup>	970
Диаметр насосных штанг	мм	29
Внутренний диаметр НКТ	мм	59
Диаметр плунжера скважинного насоса	мм	50

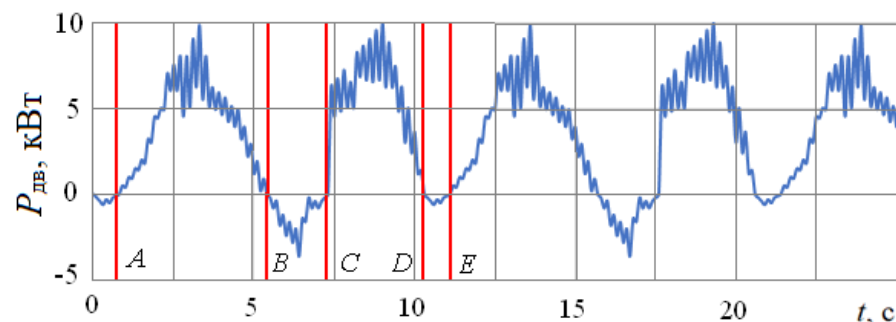


Рисунок 10 – Ваттметрограмма ВДПМ-СК-22В при работе ЭМП УШСН: *AB* – подъем штока; *BC* и *DE* – переходные процессы в крайних положениях ТПКШ; *CD* – опускание штока

Таблица 2 – Результаты испытаний ЭГП УШСН

Тип привода	А		Б		
	СК-8	НПК10-8-6	СК-8	ГПШСН 80-3,5 «Гейзер»	
Применяемые двигатели	22 кВт, 970 мин <sup>-1</sup>	15 кВт, 1480 мин <sup>-1</sup>	22 кВт, 970 мин <sup>-1</sup>	37 кВт, 1480 мин <sup>-1</sup>	
Параметры эксплуатации	$S_0 = 2,5$ м $n = 5$ мин <sup>-1</sup>	$S_0 = 5,0$ м $n = 1,8$ мин <sup>-1</sup>	$S_0 = 2,5$ м; $n = 5$ мин <sup>-1</sup>		
Время замеров, сут	9	7	42	6	5
Среднесуточное потребление электроэнергии, кВт·ч/сут	123,8	294,0	228,6	117,0	128,9
Среднесуточный дебит жидкости, м <sup>3</sup> /сут	9,7	10,35	9,7	10,4	10,1
Удельные затраты энергии, кВт·ч/м <sup>3</sup>	12,8	28,4	23,6	11,25	12,76
Увеличение удельных затрат энергии $\Delta$ , %	–	121,9	84,4	–	13,4

А – НПК-10-8-6; Б – ГПШСН 80-3,5 «Гейзер»

Таблица 3 – Результаты сравнительных испытаний ЭМП, оснащенного асинхронным и вентильным двигателями

Месторождение, скважина	Западное, «1001»	
Привод УШСН	станок-качалка СКДР-8-3	
Тип двигателя	4АМИ200М6У3	ВДПМ-СК-22В
Длина хода штока, м	3	3
Число двойных ходов штока, мин <sup>-1</sup>	5,6	5,6
Длительность замеров, суток	12	14
Сут. потребление энергии, кВт·ч/сут	148,5	132,1
Среднесуточный дебит $Q_{\phi}$ , м <sup>3</sup> /сут	27,5	28,1
Удельное потребление энергии, кВт·ч/м <sup>3</sup>	5,4	4,7
Снижение удельных затрат энергии $\Delta$ , %	–	12,96