

На правах рукописи



Манахов Валерий Александрович

МЕТОД И ПРИБОР КОНТРОЛЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЭМУЛЬСИИ
В НЕФТЯНЫХ СКВАЖИНАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ
СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ВАТТМЕТРОГРАММЫ ШТАНГОВОЙ
СКВАЖИННОЙ НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ

2.2.8. – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий,
веществ и природной среды

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2023

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» на кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий»

Научный руководитель: **Цветков Алексей Николаевич**
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

Официальные оппоненты: **Хакимьянов Марат Ильгизович**
доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Электротехника и электрооборудование предприятий» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»,

Сухачев Илья Сергеевич
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Электроэнергетика» ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет»

Ведущая организация: **ГБОУ ВО «Альметьевский государственный нефтяной институт»**

Защита состоится 15 декабря 2023 г. в 16 ч 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.310.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, ауд. Д-224, тел./факс (843) 519-42-20.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, с указанием контактных данных и заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, КГЭУ, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.310.01.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Казанского государственного энергетического университета и на официальном сайте КГЭУ <https://kgeu.ru/Diss/Dissertant/198?idDiss=146>

Автореферат разослан « ___ » _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, д.ф.-м.н.



Калимуллин Рустем Ирекович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Одной из ведущих отраслей промышленности Российской Федерации является нефтегазодобыча. По оценкам экспертов, это 35% от всех доходов Федерального бюджета. От мировых цен на нефть во многом зависит стоимость российского рубля, следовательно, и состояние экономики России в целом. В нашей стране более 38% нефтяных скважин эксплуатируется со штанговыми скважинными насосными установками (ШСНУ). В качестве приводов ШСНУ используют станки-качалки (СК), которые преобразуют вращательное движение вала двигателя в возвратно-поступательное движение штанг, приводящих глубинный насос. Для предотвращения возникновения аварийных ситуаций в процессе добычи, вызванных изменением состояния нефти, необходимо осуществлять непрерывный контроль состояния оборудования ШСНУ. В настоящее время в Республике Татарстан большая часть фонда нефтяных скважин находится в состоянии труднодобываемых.

Ваттметрирование (измерение профиля мощности) позволяет осуществлять контроль и диагностику состояния ШСНУ и добываемой жидкости. Ваттметрограмма отражает мощность, потребляемую электродвигателем во времени, для ШСНУ это, как правило, время одного качания насоса. Достоинствами метода ваттметрирования является простое в установке и обслуживании оборудование, интегрируемое в электрическую часть электропривода, отсутствие необходимости внедрения датчиков в механическую часть, как, например, в случае с динамографированием, возможность интеграции в автоматизированные системы контроля и управления.

Главной задачей любого контроля, как и контроля по параметрам ваттметрограммы, является установление параметров работы оборудования и его элементов, а также выявление неисправностей с целью недопущения возникновения аварий и рационального планирования технического обслуживания, эксплуатации и ремонта для обеспечения требуемой надежности.

В процессе нефтедобычи возникает большое количество факторов, влияющих на работу оборудования. Изменение многих параметров выше критического предела, как правило, приводит к остановке оборудования из-за срабатывания средств защиты.

Одной из наиболее частых причин, приводящих к аварийной остановке процесса добычи, является образование эмульсии в глубинном насосе. Предлагаемый в работе метод спектрального анализа ваттметрограммы позволяет диагностировать состояние добываемой ШСНУ жидкости и избежать незапланированных остановок из-за эмульсии. В настоящее время отсутствуют работы по неразрушающему контролю образования эмульсии путем спектрального анализа массива ваттметрограммы.

Существует несколько методов предотвращения образования эмульсии, в основном связанных с введением вынужденных перерывов в работе станка-качалки в совокупности с максимально возможной скоростью качания, что приводит к снижению объема добычи. Алгоритм диагностирования ШСНУ благодаря применению аппаратно-программного комплекса (АПК) позволит контролировать

состояние оборудования в режиме реального времени и избежать вынужденных простоев за счет правильного выбора скорости работы электродвигателя станка-качалки нефти. Предотвращение образования эмульсии заключается в переходе на пониженную частоту качания с последующим возвратом на заданную по команде АПК системы ваттметрирования. Это в свою очередь позволяет сохранить объемы добычи нефти за счет отсутствия простоев в работе станков-качалок.

Вопросы, связанные с диагностикой ШСНУ по массивам ваттметрограмм, нашли решения в работах коллективов УГНТУ, АГНИ, ТУСУР, НИУ ТПУ, авторов М.И. Хакимьянова, Е.М. Солодкого, С.Л. Сабанова, Д.С. Торгаревой, И.В. Цапко, В.О. Кричке, М.Г. Пачина, И.В. Серебряковой, Д.В. Иванова, Г.С. Абрамова, Т.Г. Даниленко, Е.И. Гольдштейна и других. В большинстве работ ваттметрограмма служит основным параметром для диагностики нефтяного оборудования. Вопрос достижения максимально точной диагностики подземного и надземного нефтяного оборудования изучается достаточно давно, но проблема образования эмульсии и методы ухода от данного явления, основанные на спектральном анализе параметров ваттметрограммы, как показал анализ литературы и патентный анализ, не полностью или недостаточно раскрыты.

Методология и методы исследования

Объект исследования: штанговая скважинная насосная установка.

Предмет исследования: амплитудный спектр сигнала ваттметрограммы штанговой скважинной насосной установки.

Целью диссертационной работы является разработка метода и прибора контроля возникновения эмульсии в нефтяных скважинах с применением метода спектрального анализа параметров ваттметрограммы для обеспечения безаварийной работы ШСНУ.

Для достижения поставленной цели в настоящей диссертационной работе решаются следующие **задачи:**

1) анализ работоспособности ШСНУ в осложненных условиях работы нефтяных скважин, исследование и анализ основных существующих методов диагностики неисправностей ШСНУ;

2) разработка метода контроля образования эмульсии в ШСНУ на основе спектрального анализа ваттметрограммы и алгоритма ухода от аварийной ситуации;

3) разработка программного обеспечения для контроля образования эмульсии в ШСНУ на базе программного обеспечения Matlab;

4) разработка прибора контроля ШСНУ для определения момента возникновения эмульсии;

5) проведение экспериментального исследования метода контроля и алгоритма ухода от образования эмульсии на действующей ШСНУ.

Методы исследования

Для выполнения рассмотренных задач применялись методы теоретической электротехники и электромеханики, методы математического моделирования систем на ЭВМ, спектроскопии, систем автоматизации математических расчетов, а также программируемая электронная платформа с открытым исходным кодом.

Для компьютерного моделирования и анализа использовались программа MATrix LAboratory, которая использует программный язык MatLab, а также

программный язык C++ с фреймворком Wiring. Для подтверждения работоспособности аппаратно-программного комплекса использовались результаты экспериментальных исследований, проведенные на действующей ШСНУ.

На защиту выносятся:

1. Метод контроля штанговой скважинной насосной установки по спектру ваттметрограммы, позволяющий определить возникновение эмульсии нефти в глубинном насосе, и алгоритм, позволяющий устранить её в процессе эксплуатации, не допуская аварийной остановки процесса добычи.

2. Алгоритм и программное обеспечение для получения и обработки спектра ваттметрограммы, позволяющие выявить момент начала образования эмульсии в процессе эксплуатации штанговой скважинной насосной установки.

3. Прибор контроля штанговой скважинной насосной установки с аппаратно-программным комплексом, отличающийся возможностью привязки ваттметрограммы к верхней мертвой точке балансира станка-качалки.

4. Полученные по результатам апробации разработанных метода контроля и алгоритма ухода от эмульсии на реальных нефтяных скважинах значения среднего времени восстановления, среднего времени наработки на отказ и коэффициента готовности ШСНУ показали их увеличение в среднем на 24,34% по сравнению с традиционными алгоритмами управления.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии теории контроля и диагностики ШСНУ по параметрам ваттметрограммы, в том числе с использованием спектрального анализа, что позволяет обеспечить безаварийность работы ШСНУ и повысить объем добываемой нефти. Выявлены и исследованы закономерности изменения форм спектра профиля потребляемой электроприводом ШСНУ активной мощности.

Практическая значимость работы.

1. Разработан экспериментальный образец ваттметрографа для реализации контроля образования эмульсии в ШСНУ.

2. Разработаны программы ЭВМ для реализации метода контроля образования эмульсии на базе аппаратно-программного комплекса.

3. Полученные результаты натурных испытаний показали улучшение среднего времени восстановления, среднего времени наработки на отказ и коэффициента готовности ШСНУ в среднем на 24,34% при образовании эмульсии в насосном оборудовании.

4. Метод определения образования эмульсии в насосе ШСНУ в процессе эксплуатации с применением спектрального анализа и алгоритм ухода от аварийных ситуаций использованы при реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства на тему: «Создание серии электроприводов на базе российских высокоэффективных синхронных двигателей для станков-качалок нефти с применением беспроводных систем передачи данных и адаптивной системой управления для «умных» месторождений» в рамках Государственной программы Российской Федерации «Развитие науки и технологий» на 2013-2020 гг., утвержденной постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218, договор № ДР-936/17 от 26 октября 2017 г. с участием ФГБОУ ВО «КГЭУ» и АО «Чебоксарский электроаппаратный завод».

Достоверность и обоснованность результатов исследования подтверждается корректностью поставленных задач, обоснованностью принятых допущений, корректным применением апробированных математических методов, а также экспериментальным подтверждением основных теоретических выводов при достаточном для инженерной практики совпадении результатов теории и физического эксперимента. Полученные результаты не противоречат известным решениям других исследователей.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем.

1. Впервые разработан метод контроля образования эмульсии в насосном оборудовании ШСНУ на основе спектрального анализа ваттметрограммы и алгоритм ухода от аварийной ситуации.

2. Разработан алгоритм и программное обеспечение для построения и анализа спектров ваттметрограмм с целью обеспечения безаварийности работы ШСНУ.

3. Разработан прибор с АПК для реализации метода контроля образования эмульсии в насосном оборудовании ШСНУ.

Соответствие паспорту специальности

Диссертация соответствует научной специальности 2.2.8. «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды». Научные результаты, полученные в работе, соответствуют пп. 1 «Научное обоснование новых и совершенствование существующих методов, аппаратных средств и технологий контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующее повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды», 3 «Разработка, внедрение, испытания методов и приборов контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующих повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды» и 4 «Разработка методического, математического, программного, технического, приборного обеспечения для систем технического контроля и диагностирования материалов, изделий, веществ и природной среды, экологического мониторинга природных и техногенных объектов, способствующих увеличению эксплуатационного ресурса изделий и повышению экологической безопасности окружающей среды» паспорта специальности.

Внедрение результатов

Полученные теоретические и практические результаты работы использованы:

- в рамках НИОКР «Создание серии электроприводов на базе российских высокоэффективных синхронных двигателей для станков-качалок нефти с применением беспроводных систем передачи данных и адаптивной системой управления для «умных» месторождений» с регистрационным номером НИОКТРАААА-А18-118071290025-2 в рамках Государственной программы Российской Федерации «Развитие науки и технологий» на 2013-2020 годы, утвержденной постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218, договор № ДР-936/17 от 26 октября 2017 года с участием ФГБОУ ВО «КГЭУ» и АО «Чебоксарский электроаппаратный завод».

- в учебном процессе ФГБОУ ВО «КГЭУ» кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» при проведении лабораторных работ в рамках дисциплины «Автоматизация в системах электроснабжения объектов капитального

строительства при разработке структурных схем» подготовки магистров по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Апробация работы. Основные положения и научные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях: "SUSE-2021" (Kazan, Russia, 18-20 February, 2021), XIX Всероссийской конференции-конкурса студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (Санкт-Петербург, 14-16 апреля 2021 г.), V Национальной научно-практической конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод в ТЭК и ЖКХ» (Казань, 9-10 декабря 2019 г.), IV Международной научно-практической конференции «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли» (Альметьевск, 16-18 октября 2019 г.), XVII Всероссийской открытой молодежной научно-практической конференции «Диспетчеризация и управление в электроэнергетике» (Казань, 20-22 октября 2022 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 13 печатных работ в журналах и сборниках, в том числе 2 статьи в изданиях, входящих в Перечень ВАК, 1 статья в издании, индексируемом в международной базе данных SCOPUS, 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. Соискателем построен прибор для ваттметрирования, получены ваттметрограммы скважин с осложненными условиями, разработан метод определения степени образования эмульсии в глубинном насосе ШСНУ на основе спектрального анализа ваттметрограмм, получены основные результаты исследований, которые отражены в статьях и диссертации, под руководством к.т.н., доцента Цветкова Алексея Николаевича.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 84 наименования, и 5 приложений, содержит 165 страниц, 86 рисунков и 8 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, показана степень разработанности, сформулированы цель, решаемые задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методы исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту, обоснованность и достоверность выводов и результатов, апробация, внедрение и структура работы.

В первой главе представлены общие сведения о штанговых скважинных насосных установках, проведен обзор оборудования, входящего в состав ШСНУ, и принцип его работы. Обзор нефтяного фонда скважин показал большую долю использования ШСНУ в России (более 38%) и важность данного метода добычи нефтепродуктов. Проведен анализ отказов оборудования ШСНУ, основными причинами которых стали обрыв штанг, дефекты клапанов и отказ оборудования вследствие появления эмульсии в осложнённых условиях работы нефтяных скважин. Проанализированы условия возникновения эмульсии в нефтяных скважинах и последствия, к которым приводит рост нагрузки на электроприводе ШСНУ при образовании эмульсии. Рассмотрены современные станции управления ШСНУ, которые предназначены для управления станками-качалками (СК).

Выявлены их основные недостатки, в числе которых отсутствие возможности контроля образования эмульсии при возрастании нагрузки на ШСНУ.

Во второй главе представлен разработанный метод контроля возникновения эмульсии в насосном оборудовании штанговых скважинных насосных установок путем спектрального анализа по параметрам ваттметрограммы.

Образование эмульсий начинается при движении нефти к устью скважины и продолжается при дальнейшем движении по промысловым коммуникациям, т.е. эмульсии образуются там, где происходит непрерывное перемешивание нефти и воды. В некоторых месторождениях, где падение пласта идёт полого, нефть как бы плавает на поверхности воды в нижней части нефтяного пласта. В таких случаях количество воды, попадающей в скважину, в большой степени зависит от скорости откачки нефти. Обычно в скважину попадает немного воды, если дебит невелик, уровень жидкости в скважине поддерживается умеренно высоким, и насос находится над кровлей нефтяного пласта. Содержание в нефти воды называется нефтяной эмульсией – это есть механическая смесь нефти и пластовой воды, нерастворимых друг в друге и находящихся в мелкодисперсном состоянии.

Увеличение воды в нефтяной эмульсии до определенного предела (точки инверсии), а именно до перехода из состояния «вода в нефти» в состояние «нефть в воде», приводит к повышению вязкости и устойчивости эмульсии, а, следовательно, и к увеличению энергозатрат на перекачивание продукта.

Метод контроля возникновения эмульсии основан на формировании и обработке ваттметрограмм качания с получением спектрального представления и формировании сигнала о возникновении или отсутствии эмульсии на основе сравнения с эталонным сигналом.

Анализируя ваттметрограммы, можно определить такие параметры, как степень уравновешенности и КПД ШСНУ, диагностировать обрывы ремней и штанг, выявлять удары в кинематике станка качалки.

Обработка ваттметрограммы начинается с построения основного графика (рисунок 1).

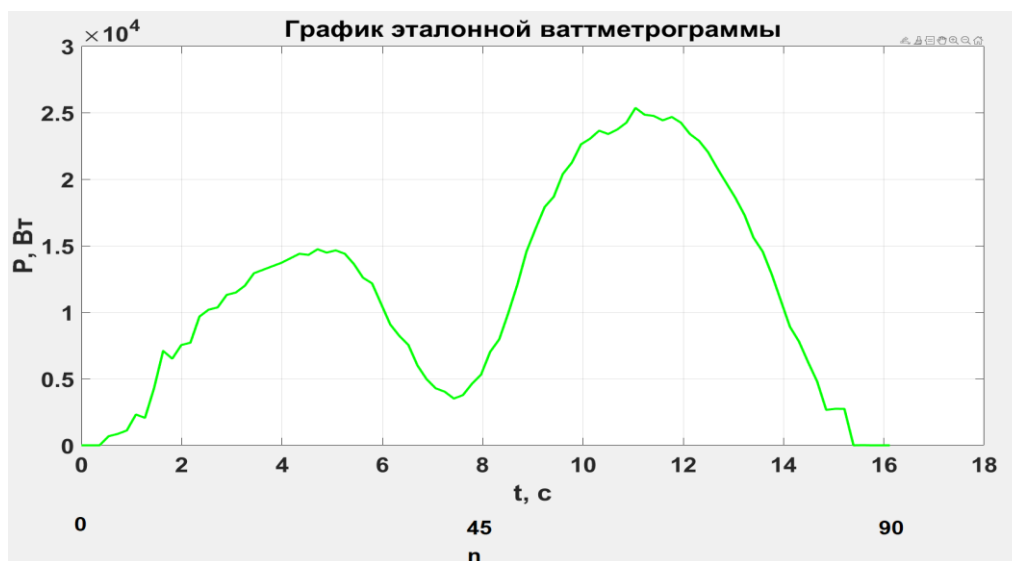


Рисунок 1 – График ваттметрограммы

Далее производится построение спектра ваттметрограммы.

Спектр сигнала существует, если сигнал $S(t)$ можно представить в виде суммы гармонических колебаний, или его еще называют спектральным разложением Фурье.

$$S(t) = A \cos(2\pi ft + \Phi). \quad (1)$$

Аргумент функции $(2\pi ft + \Phi)$, (рад) называется текущей фазой. Колебание полностью определено, если известны три параметра: начальная фаза Φ , амплитуда A , частота f . Начальная фаза может быть любой в интервале $-\pi < \Phi < \pi$. Амплитуда A может быть только положительной величиной. Частота f является физическим параметром и измеряется в герцах

Построение спектра ваттметрограммы иллюстрируется на рисунке 2.



Рисунок 2 – Спектр ваттметрограммы при работе без образования эмульсии

В разработанном методе применяется измерение сигнала за 90 отсчетов на период качания ШСНУ, следовательно, спектр данного сигнала всегда будет состоять из 45 гармонических составляющих, в которой 26-я составляющая отвечает за рост эмульсии.

Для наглядности на рисунке 3 показана 26-я гармоническая составляющая при росте образования эмульсии от нормального (эталонного) состояния ШСНУ до предаварийного состояния в связи с эмульсией.

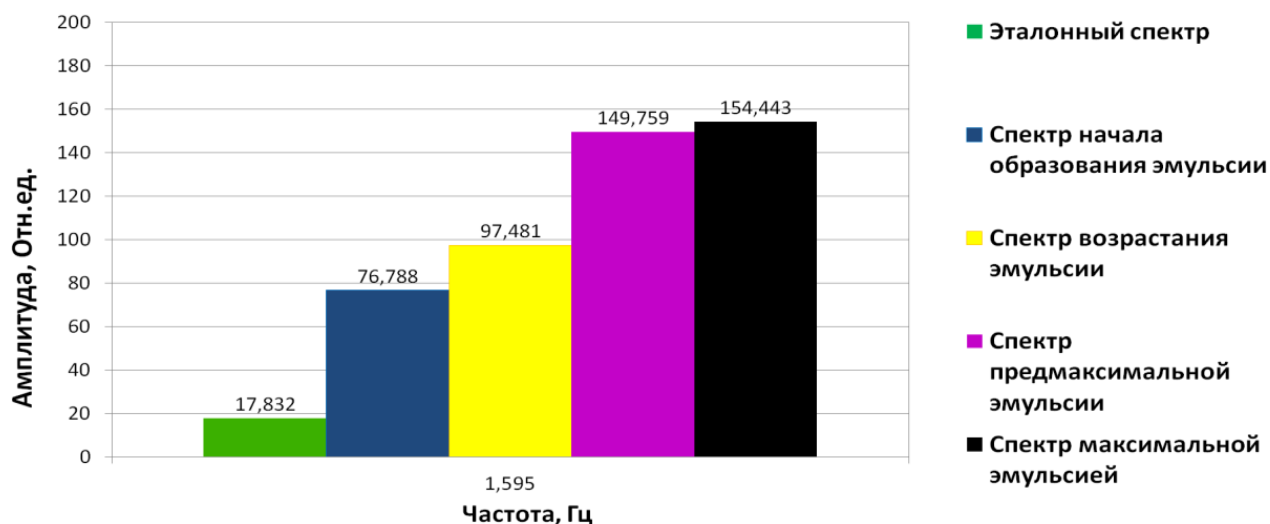


Рисунок 3 – 26-я гармоническая составляющая спектров в процессе образования эмульсии

На основе результатов, полученных в ходе работы, можно привести следующие основные этапы метода контроля образования эмульсии штанговых скважинных насосных установок путем спектрального анализа по параметрам ваттметрограммы:

- Разработанное ПО формирует массив ваттметрограммы и сохраняет в ПК.
- Далее с помощью второго блока, разработанного ПО в программе Matlab, строится и анализируется спектр данной ваттметрограммы.
- Формируется эталон спектра, построенный по средней величине амплитуды 26-й гармоники, полученной из 10 ваттметрограмм, снятых во время нормальной работы.
- Во время работы АПК получает ваттметрограмму каждого качания и соответствующий ей спектр.
- При отклонении амплитуды сигнала спектра ваттметрограммы на частоте, соответствующей росту эмульсии, более чем на 30% от эталона формируется сигнал об обнаружении эмульсии для системы управления скоростью качания верхнего уровня.

В диссертационном исследовании были проведены эксперименты на трех разных скважинах с различным периодом качания с осложненными условиями работы, как в режиме нормальной работы, так и в режиме интенсивного образования эмульсии, в которых подтвердилось, что 26-я гармоника спектра ваттметрограммы отвечает за процесс возникновения эмульсии. Продолжительность экспериментов составляла от трех до 14 суток с возникновением не менее 20 случаев образования эмульсии на каждой скважине.

Эксперименты проводились с мая 2019 г. по сентябрь 2020 г. на ШСНУ типа СКДР6-3-5,3-63-18,5-1500, принадлежащих ОАО «ГРИЦ», в Черемшанском районе республики Татарстан.

Третья глава посвящена разработке прибора контроля образования эмульсии на основе спектрального анализа на базе программного обеспечения Matlab для диагностики ШСНУ. Прибор разработан для реализации метода контроля и диагностики для определения момента образования эмульсии в цилиндре насоса и формирования управляющего воздействия на электропривод ШСНУ с целью недопущения аварийных остановок по перегрузке электропривода. Основным отличием разработанного прибора от аналогичных является возможность настройки количества точек измерения ваттметрограммы на период качания и отсутствие смещения ваттметрограммы относительно верхней мертвой точки балансира ШСНУ.

Прибор построен на основе микропроцессорного устройства, имеющего в своем составе 10-битный АЦП. Для построения ваттметрограмм применены датчики тока и напряжения. Прибор выполнен в виде законченного блока в пластмассовом корпусе со съемной верхней крышкой (рисунок 4).

На рисунке 5 показана блок-схема прибора, подключаемого к сети питания электропривода ШСНУ. Измеренные с помощью датчиков мгновенные значения токов и напряжений поступают на АЦП, который после преобразования передает их в микропроцессорный модуль. Мгновенные значения тока и напряжения преобразуются в действующие, по принципу определения среднеквадратического значения (СКЗ), и определяется значение активной мощности с периодом в 90 точек

на один цикл качания ШСНУ. Накопленный массив в течение следующего периода качания передается в персональный компьютер (ПК), где производится дальнейшая обработка. При поступлении сигнала о положении балансира, находящегося в верхней мертвой точке (ВМТ), выполняется процесс накопления ваттметрограммы очередного качания. Таким образом, стартовые точки всех накопленных прибором ваттметрограмм совпадают с ВМТ, что существенно облегчает их дальнейшую обработку.

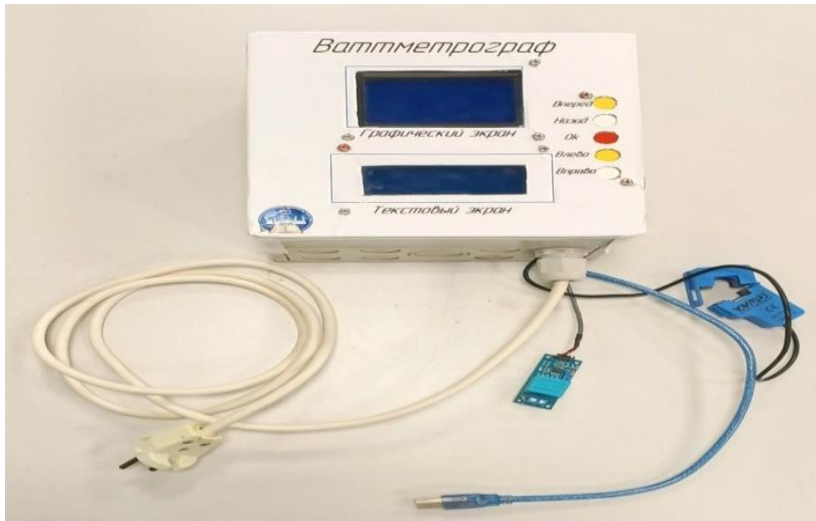


Рисунок 4 – Прибор контроля образования эмульсии

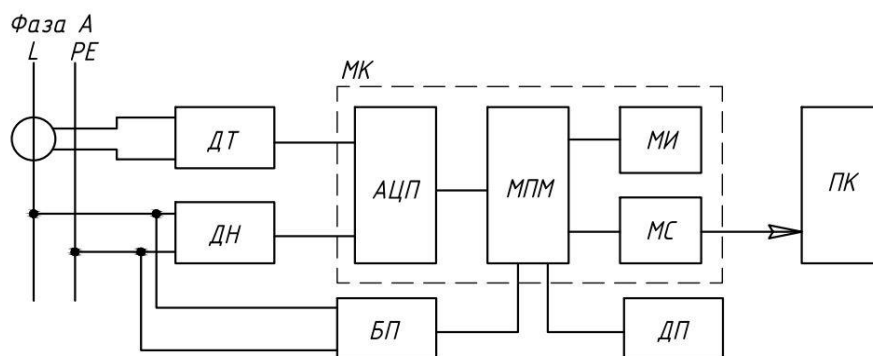


Рисунок 5 – Блок-схема прибора контроля и диагностики ШСНУ: ДТ, ДН – датчики тока и напряжения, БП – блок питания прибора, АЦП – аналогово-цифровой преобразователь, МПК – микропроцессорный модуль, МИ – модуль индикации, МС – модуль связи, МК – микроконтроллер, ДП – датчик положения балансира ШСНУ

В процессе разработки прибора контроля была проведена калибровка датчиков тока и напряжения и проведен метрологический анализ канала измерения.

Метрологический анализ показал, что погрешность вычисления мощности микроконтроллерного устройства не превышает 0,15%. В процессе проведения метрологического анализа использовались такие документы, как ГОСТ 8.009-84, РД-153-34.0-11.201-97, МИ-222-80.

В результате расчета получено СКО погрешностей компонентов ИК, которое составило 1,422%.

Для реализации метода контроля образования эмульсии разработаны программные продукты: «Программа для формирования ваттметрограмм

электрической нагрузки» на языке C++ и «Спектральный анализ массива ваттметрограммы» на языке MATrix LABoratory.

Четвертая глава посвящена апробации разработанных прибора с аппаратно-программным комплексом для контроля образования эмульсии ШСНУ по параметрам ваттметрограммы и алгоритма ухода от аварий на действующих СК.

Целью экспериментального исследования являлось подтверждение теоретических исследований и проверка адекватности, работоспособности и практической пригодности метода контроля образования эмульсии ШСНУ по параметрам ваттметрограммы, в том числе и спектрального анализа по результатам эксперимента, а также проверка работоспособности алгоритма ухода от эмульсии.

Основная цель разработанного метода контроля образования эмульсии – это адаптация алгоритма работы программного обеспечения к любой скважине. Достигается это следующим образом: изначально считается, что алгоритм запускается на исправной ШСНУ без образования эмульсии, при этом после запуска работы производится накопление так называемого эталона, и дальнейшие действия системы направлены на выявление отклонений от эталонных значений.

Эмульсия возникает там, где имеет место интенсивное перемешивание нефти и воды: в стволе скважины, где интенсивность перемешивания увеличивается из-за выделения растворенных в нефти газов, на подвижных частях глубинных насосов, особенно в цилиндре насоса ШСНУ, на штуцерах и запорной арматуре, при турбулентном режиме движения газожидкостного потока в цилиндрах насосов. Обводненность – это главный фактор, определяющий вязкость эмульсии. При увеличении вязкости будут уменьшаться развиваемые насосом напор, подача и КПД. Потребляемая мощность при этом будет увеличиваться вследствие возрастания гидравлического сопротивления проточной полости.

При турбулентном потоке образуются наиболее устойчивые эмульсии. С увеличением частоты качания ШСНУ эмульсия становится более мелкодисперсной, соответственно, её устойчивость повышается, что может привести к отказам и авариям. На основе данного суждения был разработан алгоритм работы программного обеспечения для выявления и ухода от эмульсии на основе эталона, для предотвращения образования эмульсии на начальном этапе добычи (рисунок 6). Применяя данный алгоритм работы, можно избежать перегрузок электропривода станка-качалки нефти, выхода из строя цилиндра насоса и обрыва штанг именно из-за образования эмульсии, а не из-за механических дефектов ШСНУ, и тем самым избежать простоев и добиться максимального уровня добычи нефти.

С 13 октября по 15 декабря 2021 г. были проведены опытно-промышленные испытания электропривода ЭПСН-15 производства АО «ЧЭАЗ» на скважинах НГДУ «Джалильнефть» (СП «Татнефть-Добыча») ПАО «Татнефть» с применением разработанного прибора, метода и алгоритма выявления и ухода от эмульсии. В качестве объектов испытаний были подобраны скважины с интенсивным образованием эмульсии. Получены результаты полевых испытаний, показавшие увеличение времени безаварийной работы электропривода ШСНУ благодаря применению разработанного метода контроля.

На рисунке 7 представлена диаграмма работы ШСНУ, приводимой в движение станцией управления при отключенной системе защиты от образования

эмульсии и алгоритма ухода от нее. Диаграмма приведена с частотой обновления данных в 2 минуты. Данный режим был использован в начале опытно-промышленной эксплуатации станции управления с целью точной настройки защит электропривода от перегрузок. На графике можно увидеть частые всплески амплитуды частоты спектра ваттметрограммы, говорящие об образовании эмульсии, что приводило к перегрузке электропривода и, как следствие, к остановке процесса добычи с последующим перезапуском через 30 минут, а при неудачной попытке запуска, повторно через 60 минут, благодаря наличию системы автоматического повторного включения в составе станции управления СК.

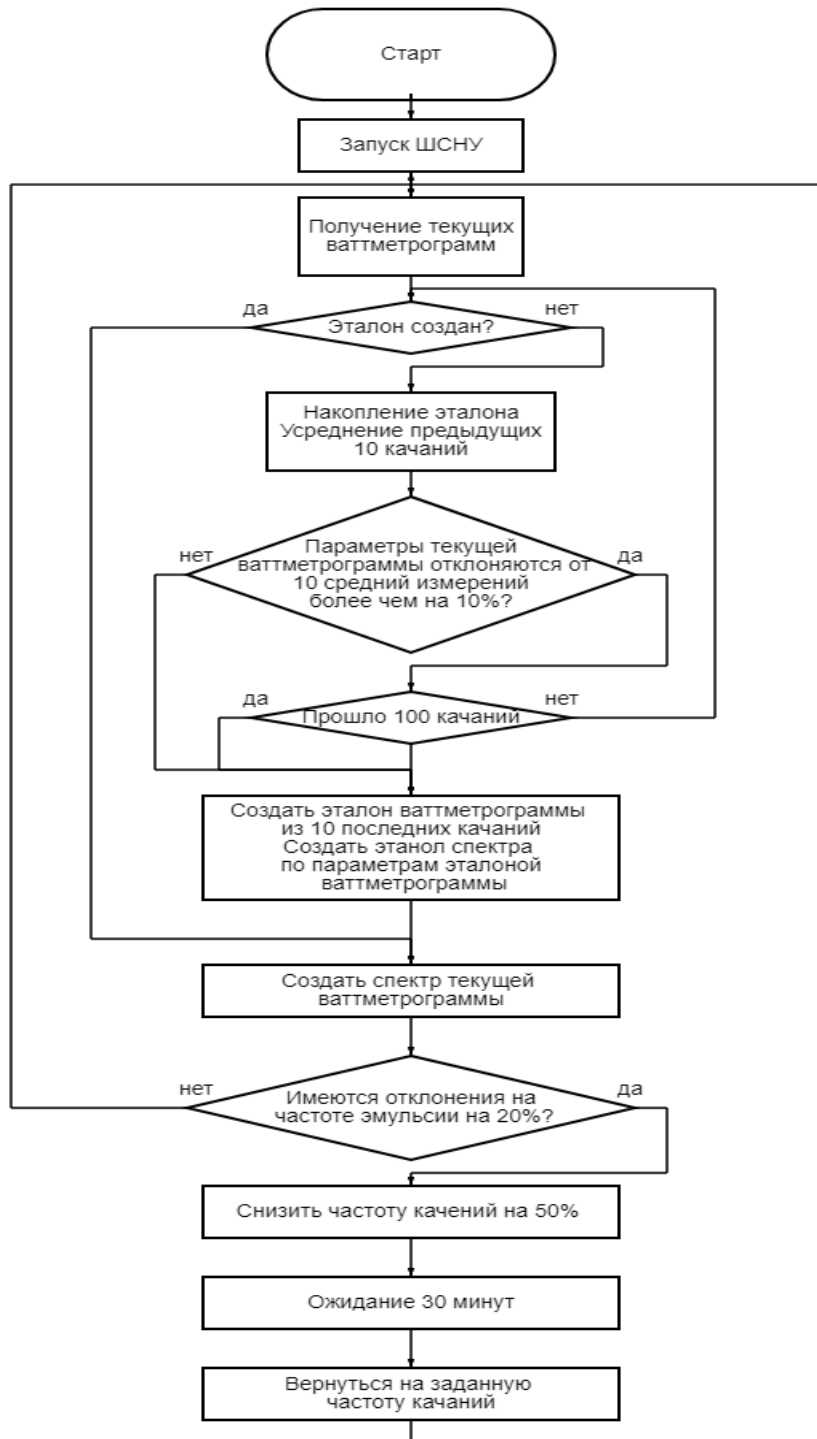


Рисунок 6 – Алгоритм работы АПК

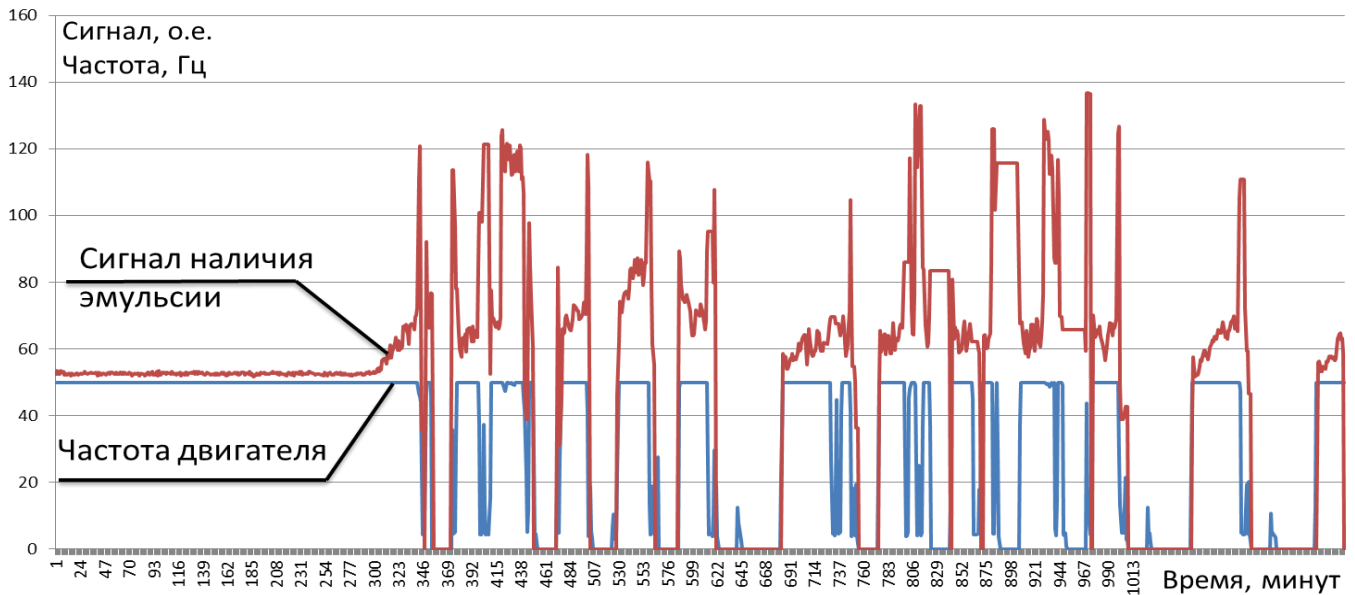


Рисунок 7 – Диаграмма работы ШСНУ с отключенной системой защиты от эмульсии

На рисунке 8 представлена диаграмма работы станции управления ШСНУ с включенной системой защиты от образования эмульсии на основе сигналов, полученных от прибора с АПК с разработанным методом контроля и алгоритмом ухода от аварийных ситуаций. Диаграмма приведена с частотой обновления данных в 2 минуты.

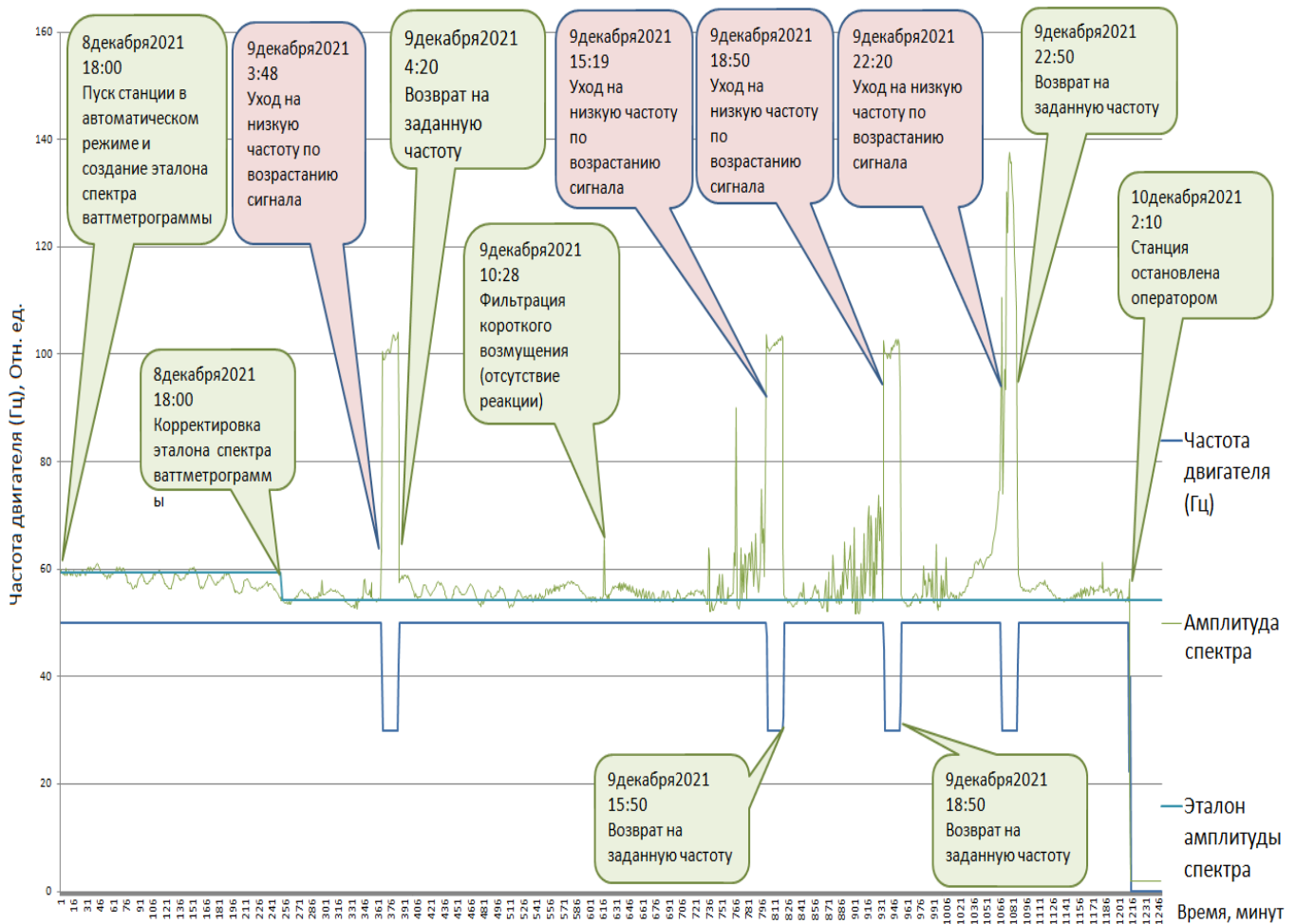


Рисунок 8. Диаграмма работы ШСНУ с включенной системой защиты от эмульсии

При этом можно увидеть график эталонного значения частоты спектра сигнала, созданного при запуске станка-качалки и скорректированного через 3 ч работы при условии уменьшения среднего значения десяти ваттметрограмм на величину более 10%. При дальнейшей эксплуатации ШСНУ разработанный метод и алгоритм ухода четыре раза распознал процесс образования эмульсии и не позволил произойти аварийной остановке благодаря переходу на пониженную с последующим возвратом на заданную частоту качания.

На рисунке 9 показаны частоты электропривода данной ШСНУ, полученные в режимах с отключенной и включенной защитой от эмульсии, совмещенные во времени.

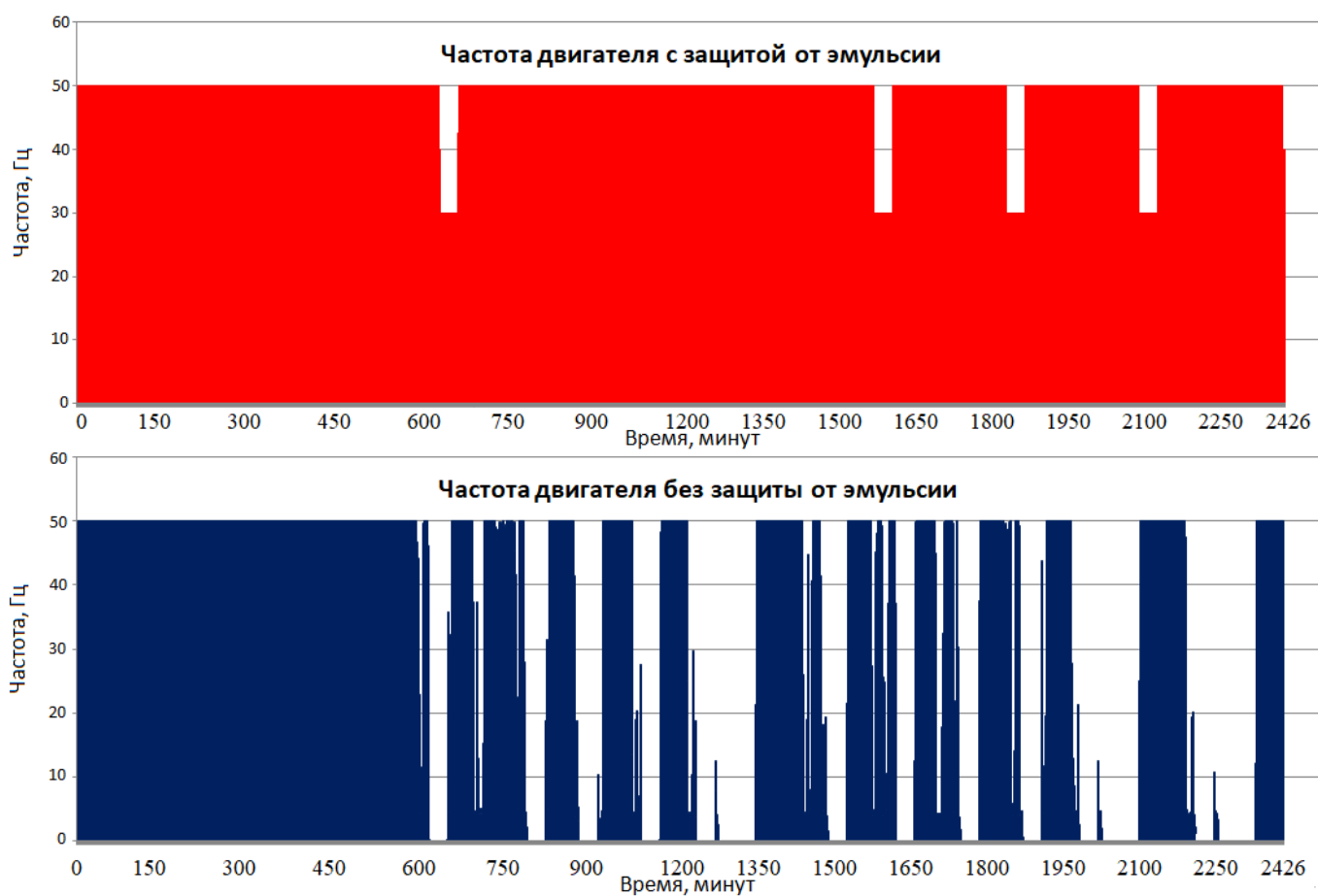


Рисунок 9. Диаграммы частот двигателя с защитой и без защиты от эмульсии

По результатам проведенного эксперимента произведен расчет технического параметра, характеризующего надежность восстанавливаемой технической системы – средней наработки на отказ.

В соответствии с диаграммой «Частота двигателя без защиты от эмульсии» (рисунок 9), суммарное число отказов составляет 14, при времени пребывания системы в работоспособном состоянии, равном 1806 мин., и общем времени работы 2426 мин. В соответствии с диаграммой «Частота двигателя с защитой от эмульсии» произошёл 1 отказ при времени пребывания системы в работоспособном состоянии, равном 2396 мин., и общем времени работы 2426 мин.

Средняя наработка на отказ без защиты от эмульсии составила 129 мин., а с защитой от эмульсии – 2396 мин.

Произведен расчет среднего времени восстановления в связи с возникновением эмульсии. При этом считалось, что временем, затраченным на восстановление, являлось время, необходимое на охлаждение электродвигателя ШСНУ после остановки защитой от перегрузки, после чего система восстанавливала свою работоспособность.

Среднее время восстановления системы без защиты от эмульсии составило 44,29 мин. и 30 мин. для системы с защитой от эмульсии.

Произведен расчет комплексного показателя надежности – коэффициента готовности. Коэффициент готовности без защиты от эмульсии равен 0,7444, с защитой данный коэффициент равен 0,9878.

Тогда разность коэффициентов готовности с защитой от эмульсии и без защиты от эмульсии показала увеличение комплексного показателя надежности – коэффициента готовности на 24,34% благодаря внедрению в систему управления ШСНУ разработанного метода контроля эмульсии с алгоритмом ухода от аварийной ситуации и прибора контроля образования эмульсии.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ работоспособности ШСНУ в осложненных условиях работы нефтяных скважин, исследование и анализ основных существующих методов диагностики неисправностей ШСНУ

2 Разработаны алгоритм и метод контроля образования эмульсии в ШСНУ на основе спектрального анализа ваттметрограммы и ухода от возникновения аварийных ситуаций.

3. Разработано программное обеспечение для контроля образования эмульсии в ШСНУ, на базе программного обеспечения Matlab.

4. Разработан прибор контроля для определения момента образования эмульсии в цилиндре насоса и формирования управляющего воздействия на электропривод ШСНУ с целью недопущения аварийных остановок по перегрузке.

5. Получены результаты полевых испытаний прибора, метода контроля и алгоритма ухода от эмульсии, показавшие повышение характеристики надежности – времени безотказной работы ШСНУ.

Для дальнейшего развития проведенных исследований рекомендуется накопление данных ваттметрограмм и их спектров как при запуске скважин после ремонтов оборудования, так и скважинах, исчерпавших свой ресурс, с целью повышения точности определения степени образования эмульсии в насосном оборудовании. При этом возможным является дополнительно диагностирование этих дефектов по параметрам динамограммы.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статья в рецензируемом научном издании, индексируемом в международной базе данных SCOPUS

1. Manakhov V.A., Tsvetkov A.N. Determination of state of electrical equipment by spectra of wattmetrograms // E3S Web of Conferences. 2021. V. 288. paper № 01042.

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК по группе научных специальностей диссертации:

2. Манахов В.А., Цветков А.Н. Спектральный анализ механических дефектов по параметрам ваттметрограммы штанговых скважинных насосных установок в процессе эксплуатации // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т.24. № 4. С. 50-62 (ВАК К2).

3. Манахов В.А., Цветков А.Н. Определение состояния и функционирования оборудования штанговых скважинных насосных установок в процессе эксплуатации по параметрам ваттметрограммы // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 3. С. 127-139 (ВАК К2).

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

4. Свидетельство №2023611551 Рос. Федерация. Спектральный анализ массива ваттметрограммы / А.Н. Цветков (RU), В.А. Манахов (RU) – заявл. 11.01.2023; опубл. 23.01.2023.

5. Свидетельство №2023613640 Рос. Федерация. Программа управления работой прибора для формирования ваттметрограмм электрической нагрузки / А.Н. Цветков (RU), В.А. Манахов (RU) – заявл. 03.02.2023; опубл. 17.03.2023.

Статьи в рецензируемых научных изданиях РИНЦ

6. Манахов В.А., Цветков А.Н. Диагностика штанговой скважинной насосной установки методом спектрального анализа по параметрам ваттметрограммы // Материалы XVII конференции Всероссийской открытой молодежной научно-практической конференции «Диспетчеризация и управление в электроэнергетике». – Казань: ООО «Издательство Фолиант», 2022. – С. 184-187.

7. Манахов В.А., Басенко В.Р., Цветков А.Н. Диагностирование штанговых скважинных насосных установок по параметрам ваттметрограммы // Материалы XIX всероссийской конференции-конкурса студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования». – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2021. – С. 202-204.

8. Манахов В.А., Цветков А.Н. Использование датчиков на эффекте холла для измерения параметров ваттметрограммы // Материалы докладов XXIV всероссийского аспирантско-магистерского семинара, посвященного Дню энергетика. – Казань: КГЭУ, 2020. – С. 78-80.

9. Манахов В.А., Цветков А.Н. Диагностика состояния нефтяного оборудования по параметрам ваттметрограммы // Материалы докладов VI Национальной научно-практической конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве». – Казань: КГЭУ, 2020. – Т.2. С-63-65.

10. Манахов В.А. Диагностирование штанговых скважинных насосных установок по параметрам динамограммы // Материалы IV Международной научно-практической конференции «Энергия молодежи для нефтегазовой индустрии». – Альметьевск: АГНИ, 2019. – С. 403-407.

11. Манахов В.А., Цветков А.Н. Диагностирование состояния штанговых скважинных насосных установок средствами станции управления ваттметрограммы // Материалы V Национальной научно-практической конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод в ТЭК и ЖКХ». – Казань: КГЭУ, 2019. – Т. 1. С. 210 -213.

12. Манахов В.А. Цветков А.Н // Диагностирование штанговых скважинных насосных установок по параметрам ваттметрограммы Материалы IV Международной научно-практической конференции «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли». – Альметьевск: АГНИ. – 2019. – С. 411-414.

13. Манахов В.А., Цветков А.Н. Обзор оборудования и механизмов штанговых скважинных насосных установок // Материалы докладов всероссийского XXIII аспирантско-магистерского семинара, посвященного Дню энергетика. – Казань: КГЭУ, 2019 – С. 86-88.

Подписано в печать 11.10.2023. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать ризографическая.
Усл. печ. л. 1,25. Тираж 100. Заказ №

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии «Вестфалика» (ИП Колесов В.Н.)
420111, г. Казань, ул. Московская, 22. Тел.: 292-98-92
e-mail: westfalika@inbox.ru
