

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

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

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –к.т.н, доцент
Цветков Алексей Николаевич

Казань 2023

Введение.....	3
1. Состояние проблемы контроля оборудования ШСНУ	11
1.1. Общие сведения о ШСНУ	12
1.2. Обзор нефтяного фонда скважин. Применение ШСНУ	14
1.3. Анализ работоспособности ШСНУ в осложненных условиях работы нефтяных скважин.....	19
1.4. Станция управления ШСНУ	29
1.4.1. Общие сведения	29
1.4.2. Критерии выбора СУ	32
1.4.3. Технические характеристики СУ	33
1.5. Методы контроля ШСНУ	35
1.5.1. Основные методы контроля ШСНУ	35
1.5.2. Контроль ШСНУ по динамограмме.....	41
1.5.3. Контроль ШСНУ по ваттметрограмме	46
1.6. Патентное исследование ШСНУ	49
1.6.1. Общие данные об объекте исследований	49
1.6.2. Анализ результатов поиска патентной документации.....	50
1.7. Выводы.....	56
2. Разработка метода контроля возникновения эмульсии с применением спектрального анализа ваттметрограммы штанговой скважинной насосной установки.....	56
2.1. Основные сведения о построении и анализе спектра	57
2.2. Дискретные сигналы и дискретное преобразование Фурье	63
2.3. Ваттметрирование ШСНУ	65
2.4. Определение неисправностей по ваттметрограммам и их спектрам	67
2.5. Метод контроля возникновения эмульсии с применением спектрального анализа ваттметрограммы	74
2.6. Выводы.....	83
3. Разработка прибора контроля возникновения эмульсии	84
3.1. Аппаратно-программная платформа для ваттметрирования	85
3.2. Измерительные датчики тока и напряжения.....	86
3.2.1. Датчик на основе эффекта Холла.....	86
3.2.2. Трансформаторный датчик тока.....	87

3.2.3. Трансформаторный датчик напряжения.....	90
3.3. Аппаратно-программный комплекс для контроля возникновения эмульсии в ШСНУ.....	92
3.4. Метрологический анализ.....	102
3.4.1. Калибровка датчика тока YHDC SCT-013-000.....	103
3.4.2. Калибровка датчика напряжения ZMPT101B.....	105
3.4.3. Расчет погрешности АЦП микроконтроллерного устройства	106
3.4.4. Расчет погрешности измерительного канала	108
3.5. Алгоритм и программное обеспечение для получения и обработки спектра ваттметрограммы	112
3.6. Выводы.....	119
4. Экспериментальные исследования аппаратно-программным комплексом для контроля возникновения эмульсии в ШСНУ по спектральному анализу ваттметрограммы	121
4.1. Планирование эксперимента.....	121
4.2. Методика проведения эксперимента	122
4.3. Экспериментальная часть.....	123
4.4. Алгоритм работы АПК ухода от аварийной ситуации	133
4.5. Результаты опытной эксплуатации промышленного образца электропривода ШСНУ	136
4.6. Выводы.....	144
Заключение	145
Перечень сокращений.....	148
Список работ автора, отражающих основное содержание диссертации	149
Список литературы	151
Приложение А	161
Приложение Б.....	162
Приложение В.....	163
Приложение Г	164
Приложение Д	165

ВВЕДЕНИЕ

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.

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.

Одним из наиболее частых дефектов, 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 пенообразования. 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 реальном 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 Г. 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 раскрыт.

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.

Методология и 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 следующие положения:

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, позволяющее 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 опробования 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 годы, утвержденными 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 «ЧЭАЗ».

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 п. 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», п. 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 п. 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, утвержденными 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. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих всероссийских и международных конференциях: "SUSE-2021" (Kazan, Russia, 18-20 February, 2021 г.), XIX Всероссийской конференции-конкурсе 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 в 2 статьях в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 статье в издании, индексируемом в международной базе данных SCOPUS, 2 свидетельства на программу 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-х глав, заключения, списка литературы, включающего 84-

наименования и 5 приложений. Содержит 165 страниц, состоит из 86 рисунков и 8 таблиц.

Автор выражает глубокую и искреннюю признательность своему научному руководителю доценту Цветкову Алексею Николаевичу, профессору Ившину Игорю Владимировичу, за их неоценимую помощь при выполнении данной работы.

1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ КОНТРОЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ ШСНУ

1.1. Общие сведения о ШСНУ

Одним из наиболее известных способов эксплуатации скважин является способ с применением штанговых скважинной насосных установок (ШСНУ). Свыше 50 % действующего фонда скважин в мире оснащено именно ШСНУ, причем, имеется тенденция к увеличению абсолютного и относительного их числа [38].

Конструкция ШСНУ (рисунок 1.1) проста и состоит из двух основных частей. Первая часть - станок-качалка, состоящий из привода насоса, который расположен на поверхности земли. Вторая - подземная часть, находящаяся в самой скважине то, что скрыто от наших глаз глубоко под землей и это, как правило, штанги насосно-компрессорные трубы (НКТ) и скважинный погружной насос [39].

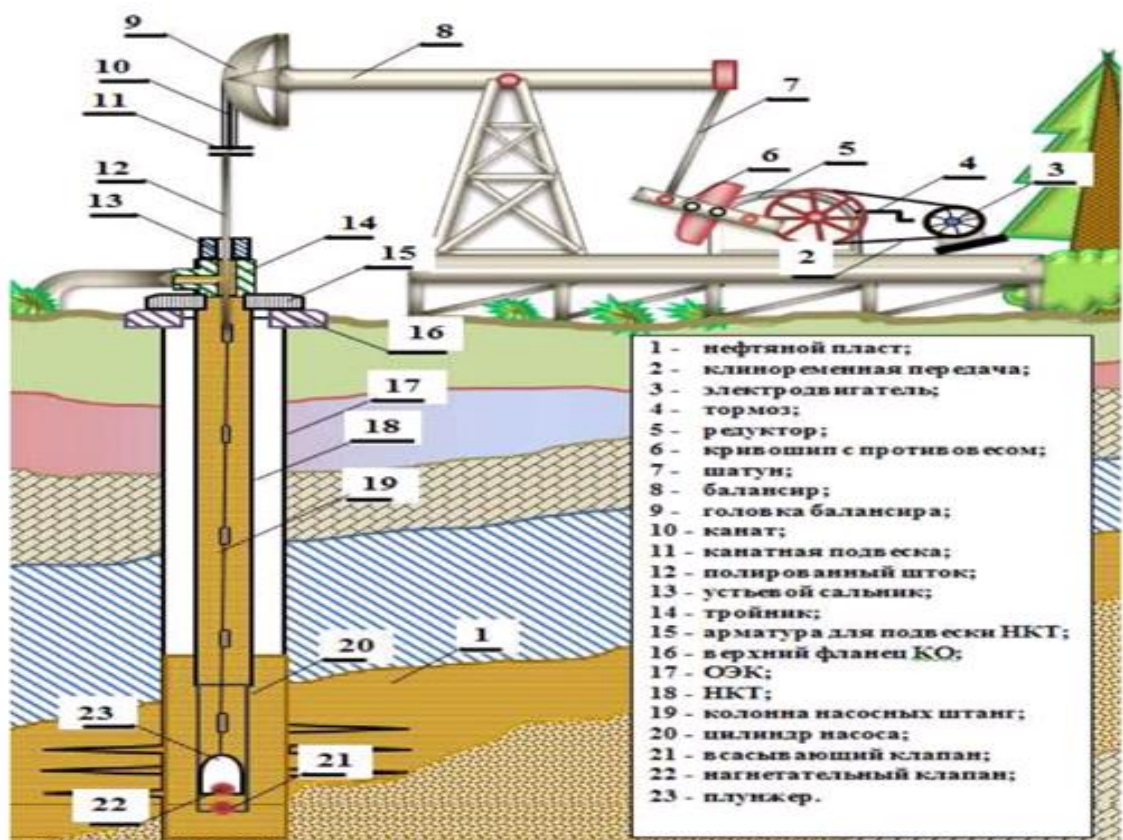


Рисунок 1.1. Конструкция ШСНУ

Надземная часть состоит из электродвигателя привода СК, смонтированного на бетонной плите, редуктора, кривошипа с грузами противовеса и балансира. Электродвигатель качалки передает вращательное движение через редуктор и ременную передачу на кривошип, который преобразует эту энергию из вращательного в возвратно-поступательное движение шатунов и траверсы. В итоге мы получаем попеременное качания балансира, вверх и вниз тем самым обеспечивая поднятие и опускание подземных элементов насоса [80].

Подземная часть - это единая сборная конструкция, которая подвешивается путем скрепления многочисленных насосно-компрессорных труб насосных штанг и штангового насоса, находящегося глубоко под землей на расстоянии от 500 метров до нескольких километров от поверхности земли.

Штанговый скважинный насос включает в себя такие основные элементы как: корпус в виде цилиндра, внутри которого установлен поршень или плунжер, который является вытеснителем [7]. За счет энергии подаваемой приводом посредством штанги, вытеснитель может линейно перемещаться внутри корпуса. Всасывающий обратный клапан, установлен в нижней части насоса, нагнетательный (напорный) обратный клапан, установлен в верхней части насоса (рисунок 1.2. а) [40].

Во время работы установки энергия от двигателя передается через редуктор на кривошипно-шатунный механизм, который преобразует вращательное движение выходного вала редуктора в возвратно-поступательное движение колонны стержней. Плунжер насоса, который связан с колонной, также совершает возвратно-поступательное движение.

Обратные клапаны позволяют жидкости протекать только в одном направлении. При движении поршня вверх и за счет увеличения объема в камере создается разрежение, в результате чего жидкость через всасывающий клапан попадает в полость насоса. (рисунок 1.2. б) Запорный элемент нагнетательного клапана в этот момент прижат к седлу, следовательно, этот клапан закрыт. Во время движения плунжера вниз, объем рабочей камеры уменьшается, давление в

ней возрастает, под действием этого давления всасывающий клапан закрывается, а нагнетательный отрывается (рисунок 1.2. в). Жидкость через нагнетательный клапан начинает поступать в полость над плунжером. При каждом цикле в напорную трубу будет поступать новая порция нефти, которая постепенно будет подниматься вверх (рисунок 1.2. г) [40].

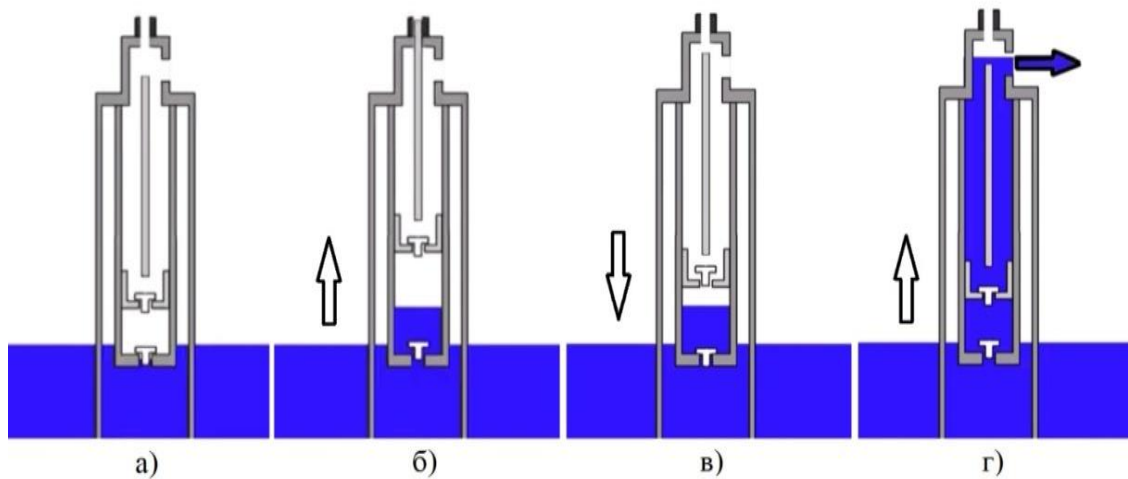


Рисунок. 1.2. Принцип действия штангового насоса

Использование ШСНУ обеспечивает:

- возможность отбора пластовой жидкости от единиц до сотен кубометров в сутки при приемлемых энергозатратах;
- простоту обслуживания и ремонта в полевых условиях;
- низкое влияние (по сравнению с другими способами) на работу ШСНУ, химико-физических свойств жидкости;
- низкие требования к квалификации персонала.

1.2. Обзор нефтяного фонда скважин. Применение ШСНУ

По данным Министерства Энергетики России за 2021 год было добыто 524,05 млн. тонн нефти. Среднесуточная добыча зафиксирована на уровне 10,52 млн баррелей. НК "Роснефть" добыла 170,73 млн тонн (в декабре - 14,24 млн тонн), "ЛУКОЙЛ" - 75,73 млн тонн (6,83 млн тонн), "Сургутнефтегаз" - 55,45 млн тонн (5,07 млн тонн), "Газпром нефть" - 38,57 млн тонн (3,29 млн тонн), "Татнефть" - 27,83 млн тонн (2,44 млн тонн), "Башнефть" - 13,77 млн тонн (1,5

млн тонн), "Славнефть" - 9,85 млн тонн (1 млн тонн), "НОВАТЭК" - 8,05 млн тонн (666,92 тыс. тонн), "РуссНефть" - 6,68 млн тонн (589,75 тыс. тонн) ЦДУ ТЭК по-прежнему учитывает отдельно добычу "Башнефти", несмотря на то, что с 2016 года компания входит в ПАО НК "Роснефть"[48].

Но за последние два года добыча нефти имеет тенденцию к снижению. Согласно данным центрального диспетчерского управления (ЦДУ) топливно-энергетического комплекса (ТЭК) Минэнерго России в 2020 году в среднем на каждую скважину, находящуюся в эксплуатационном фонде нефтедобывающего предприятия (добыча нефти), приходилось 7,84 т нефтяного сырья в сутки. В 2019 году этот показатель составлял 8,61 т нефти в сутки. И именно в 2019 году мы можем наблюдать пиковую добычу нефтяного сырья в 560,2млн.тонн (рисунок 1.3).

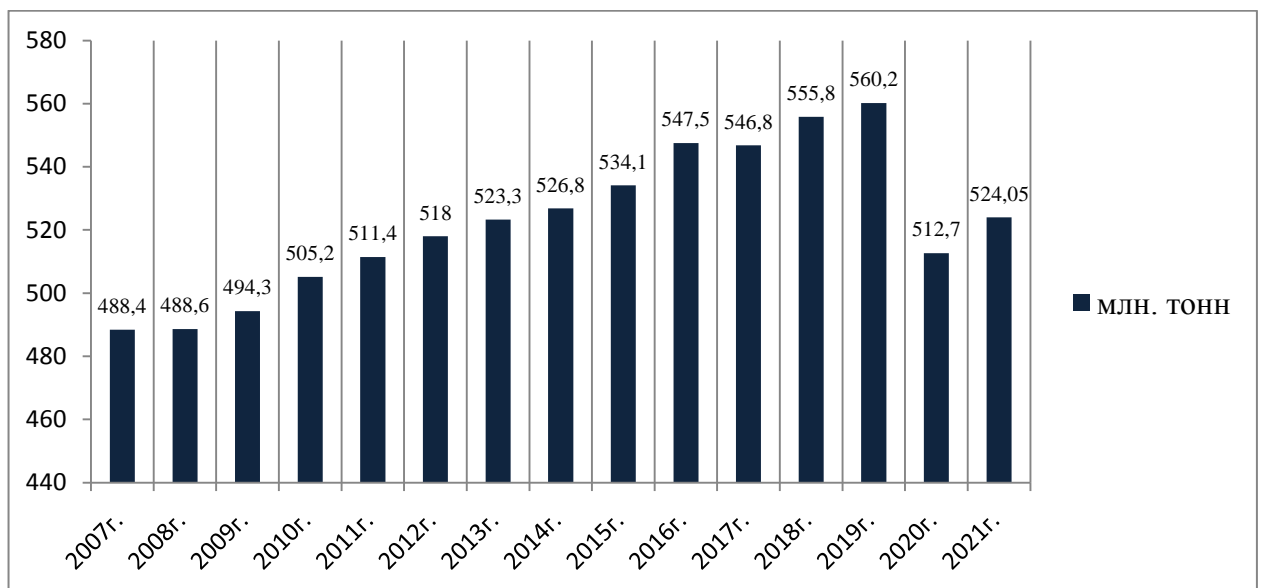


Рисунок 1.3. Добыча нефти в России за последние 15 лет

Уменьшение показателей добычи нефти в 2020 году является в первую очередь с уменьшением спроса из-за ухода многих производств на меньшие обороты или ухода в простой, в связи с пандемией COVID-19, что в свою очередь снизило цены на нефть до исторического минимума. Стоимость нефти марки Brent упала по состоянию на 26 декабря 2019 с 67,88 до 21,83 американских долларов за баррель по состоянию на 23 апреля 2020 года. Также снижение к

добычи нефти в РФ, объясняется участием России во вступившем в силу в мае 2020 года соглашении ОПЕК+, целью которого является сокращение общемировой добычи нефти и конденсата, для поддержания довольно высокой цены на нефтяное сырье. Также не надо забывать о так называемой «зеленой» энергетике, что подразумевает собой отказ от углеводородов как источника энергии, и переход на возобновляемые источники энергии (ВИЭ).

Как считают эксперты «АссоНефти» средний дебит эксплуатационных скважин будет снижаться и дальше, к 2030 году, он может сократиться до 5,4 тонн в сутки. По прогнозу французской компании Total, потребление нефти начнет падать уже в конце текущего десятилетия, а британская BP ожидает сокращения спроса только после 2040 года. За каждым таким прогнозом стоит политика, а она не бывает честной и откровенной. Но стоит отметить «зеленая» энергетика стоит в разы дороже для конечных потребителей, по оценкам экспертов электричество произведенной «зелеными» методами в 6-8 раз дороже, чем производство традиционным способом сжиганием газа. Лидерами по использованию ВИЭ являются такие страны как Германия, Дания, Бельгия, Испания, где такая генерация остается дорогой. Ее стоимость можно по-разному упаковывать - в налоги, в субсидии, в тарифы, но она не становится от этого дешевле. В таблице 1.1 приведены страны Европы по тарифам за электроэнергию и зависимость на киловатт часов на среднюю заработную плату. Россия в данном списке занимает 39 место, с очень достойным показателем кВт·ч на среднюю зарплату.

Сейчас 85% мирового энергобаланса закрывают углеводороды. В развитой Европе - 75%. Это довольно большой процент, ведь нефть это не только топливо, а такие товары народного потребления как резина, спирты, шампуни, духи, игрушки, лекарства, косметические средства, моющие средства, удобрения, масла, пищевые ароматизаторы, ткани и практически вся пластиковая продукция.

В тяжелые времена для Советского Союза, когда была навязана космическая гонка и шла холодная война, государство было в тяжелой экономической ситуации, что вынудило увеличить добычу и экспорт нефтяной продукции, для получения денежных средств. Именно в те времена, как говорят

нефтяники, «снимали сливки» с месторождения и переходили на новое, т.е. извлекалось легкодоступная нефть из скважины, для обеспечения высокого уровня добычи нефти и перевыполнения плана.

Таблица 1.1 Тарифы на электроэнергию для населения в 2021 г.

Место	Страна	кВт·ч на среднюю зарплату	Руб./кВт·ч
1	Германия	8824	27
2	Дания	11242	25,3
3	Бельгия	9064	24,2
4	Ирландия	11180	23,5
5	Испания	7703	20,6
6	Великобритания	13868	20
7	Австрия	12617	19,4
8	Италия	8307	19,3
9	Португалия	5528	19,1
39	Россия	13443	3,6

На сегодняшний день актуальной становится горизонтальная добыча на законсервированных скважинах на небольшой глубине, на которых хорошо справляются штанговые скважинные насосные установки (ШСНУ). На рисунке 1.4 изображены классическая вертикальная и набирающая популярность горизонтальная скважина.

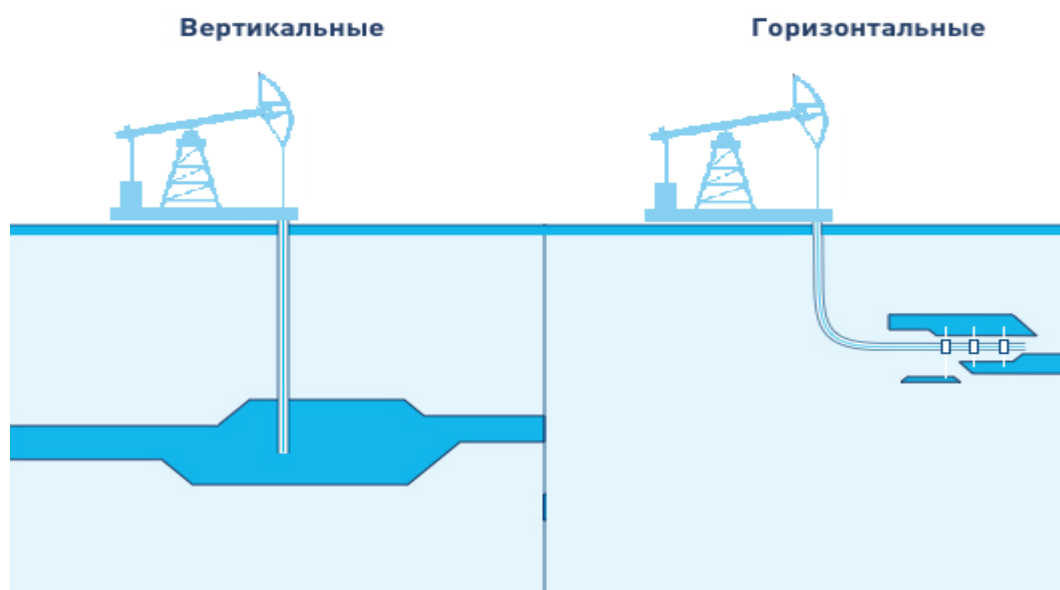


Рисунок 1.4. Вертикальный и горизонтальный тип скважины

По данным «ЦДУ ТЭК» в марте 2021 года в эксплуатационном фонде нефтедобывающих скважин по нефтяной отрасли России насчитывалось 178 659 скважин, что на 1737 ед. (-1%) меньше, чем годом ранее (сравнение с 1 января 2020 года). Из диаграммы, которая изображена на рисунке 1.5 видно, что это 38,1% эксплуатируется штанговыми скважинными насосными установками это почти 68 тыс. скважин, 59,3% фонда скважин эксплуатируется установками электроприводных центробежных насосов, около 2 % составляет фонтанное оборудование, газлифт практически не эксплуатируется [49].

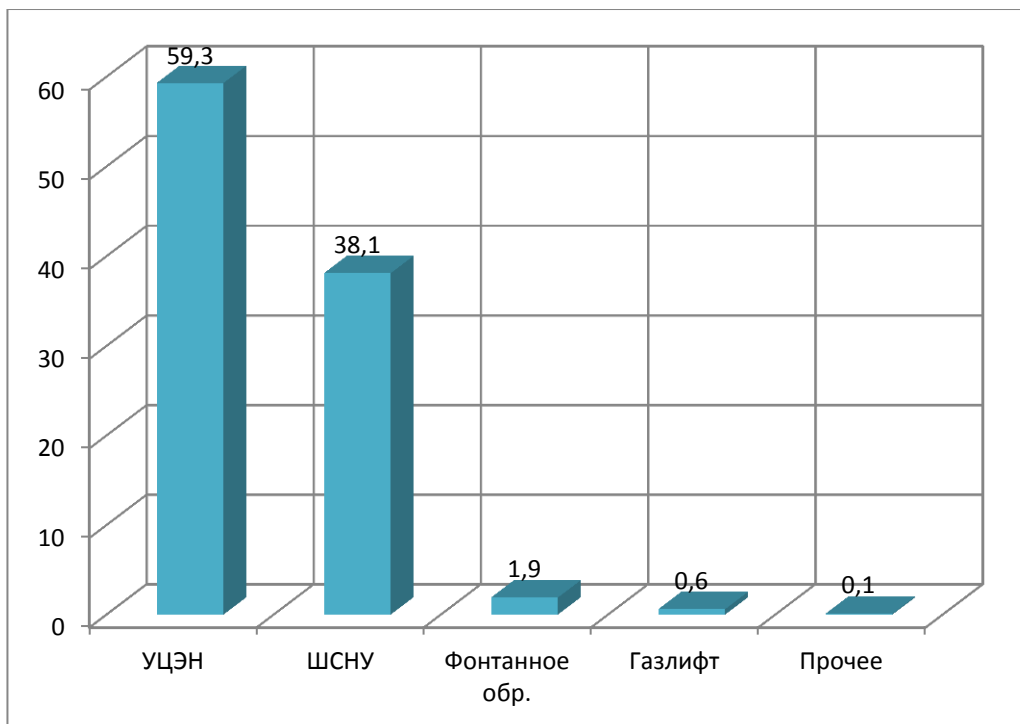


Рисунок 1.5. Диаграмма фонда скважин России

Для сохранения и улучшения нефтедобычи на заданном уровне, а так же для поиска возможностей увеличения производительности работающих ШСНУ чрезвычайно важным является создание современной и надежной системы технического контроля и диагностирования ШСНУ.

1.3. Анализ работоспособности ШСНУ в осложненных условиях работы нефтяных скважин

Добыча нефти ШСНУ на месторождении затруднена из-за специфических термодинамических и физико-химических свойств пластовой жидкости, включающая в себя воду, нефть и газ. А также конструктивные особенности скважин.

Скважинная продукция представляет собой смесь газа, нефти и воды. Вода и нефть при этом образуют эмульсии.

Эмульсией называется дисперсная система, состоящая из 2-х (или нескольких) жидких фаз, т.е. одна жидкость содержится в другой во взвешенном состоянии в виде огромного количества микроскопических капель (глобул).

Основными факторами возникновения и продолжительного существования эмульсии являются:

- разность полярностей жидкостей
- интенсивность смешивания дисперсной и внешней фаз;
- вязкость внешней фазы;
- плотность фаз;
- дисперсность;
- обводненность;
- химический состав дисперсной фазы;
- вид и концентрация эмульгаторов;
- «возраст» эмульсии;
- температура системы.

Образование устойчивых эмульсий увеличивает сроки ремонта скважин из-за трещин в стержнях в блоках ШСНУ, выхода из строя электрической части, перегрузок привода электродвигателя [16]. В целом межремонтный период скважин может упасть в 2 раза и более. Наряду с этим снижается суточная производительность агрегатов из-за неполного заполнения СШН и высоких

растягивающих нагрузок на штанги, а также повышенного гидравлического сопротивления в рабочих органах.

В реальных условиях работы нефтедобывающих предприятий во многих случаях образуются эмульсии с высокой устойчивостью. Это во многом определяет выбор технологии дальнейшей переработки и глубину отделения водной фазы от нефти [8]. Устойчивость нефтяных эмульсий зависит от величины глобул воды (ее дисперсности), плотности и вязкости нефти, содержания в ней легких фракций углеводородов, эмульгаторов и стабилизаторов эмульсии, а также от состава и свойств эмульгированной воды [67]. Зависимость динамической вязкости и диаметра капель в водонефтяной эмульсии от плотности воды представлена на рисунке 1.6.

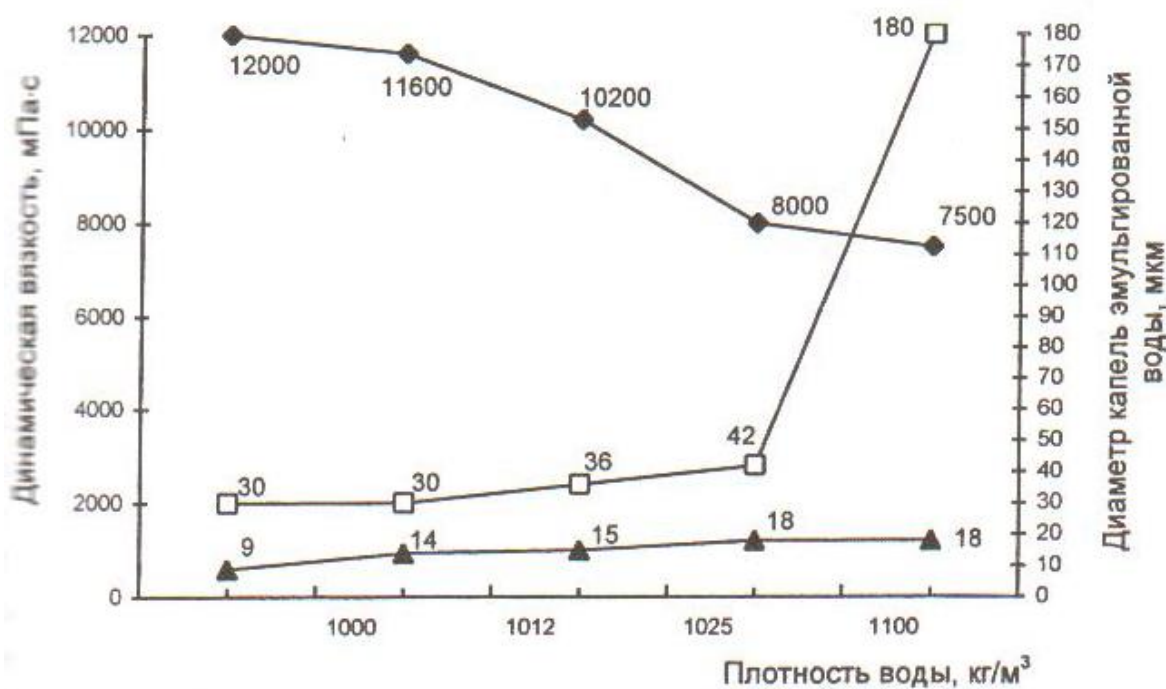


Рисунок 1.6. Зависимость динамической вязкости и диаметра капель в ВНЭ из угленосной нефти от плотности воды. Точки: \blacklozenge - динамическая вязкость, мПа·с, \square - диаметр максимальной капли, мкм; \blacktriangle - диаметр основного числа капель эмульгированной воды.

Природные стабилизаторы эмульсий включают асфальтены, смолы, нафтены и парафины в нефти, которые являются природными поверхностно-активными веществами. К ним относятся также мельчайшие твердые частицы веществ (глины, кварца, солей и др.), взвешенных в продукции скважины. В

зависимости от концентрации дисперсной фазы в эмульсиях, их подразделяют на разбавленные или слабо концентрированные (дисперсной фазы менее 20 процентов), концентрированные (до 74 процентов) и высококонцентрированные (свыше 74 процентов). Разбавленные эмульсии с мелкодисперсной структурой очень устойчивы к разложению.

Устойчивость большинства эмульсий вида "вода в нефти" со временем увеличивается. В процессе старения эмульсии увеличивается эмульгирующий слой на глобулах воды и, следовательно, повышается их механическая прочность. При столкновении эти глобулы не сливаются из-за наличия прочной гидрофобной пленки. Чтобы расплавить глобулы воды, необходимо разрушить эту пленку и заменить ее гидрофильным слоем определенного ПАВ. Старение эмульсий протекает интенсивно лишь в начальный период после их образования, а затем заметно замедляется. Характеристики старения обратной эмульсии зависят от состава и свойств нефти, пластовой воды, условий образования эмульсии (температуры, интенсивности смешения фаз) [45]. Известно, что соленая вода из резервуаров образует с нефтью более стабильные и быстрее стареющие эмульсии, чем пресная вода.

Гидродинамические сопротивления в насосном подъемнике также зависят от характера потока нефтеводяной смеси. Опыт эксплуатации показывает, то что максимальные гидродинамические сопротивления в насосном подъемнике образуются при обводненности 40-80% [43]. Формирование и устойчивость нефтяных эмульсий в основном определяется скоростью перемещения нефтяной смеси, относительной величиной содержания фаз и температурным режимом.

В пластовых условиях нефть и вода находятся в основной массе в неэмульгированном состоянии, т.е. нефть и вода существуют в виде отдельных не смешанных друг с другом фаз. 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.

Эмульсия является термодинамически неравновесным состоянием системы «вода — нефть», самопроизвольно распадающимся на отдельные грубодисперсные фазы. Однако время жизни высокодисперсной эмульсии обычно больше времени ее прохождения через насос и НКТ (насосно-компрессорные трубы).

На величину вязкости существенно влияют дисперсность и особенно обводненность смеси. Обводненность — это главный фактор, определяющий вязкость эмульсии.

Зависимость вязкости от обводнённости при разных температурах представлено на рисунке 1.7.

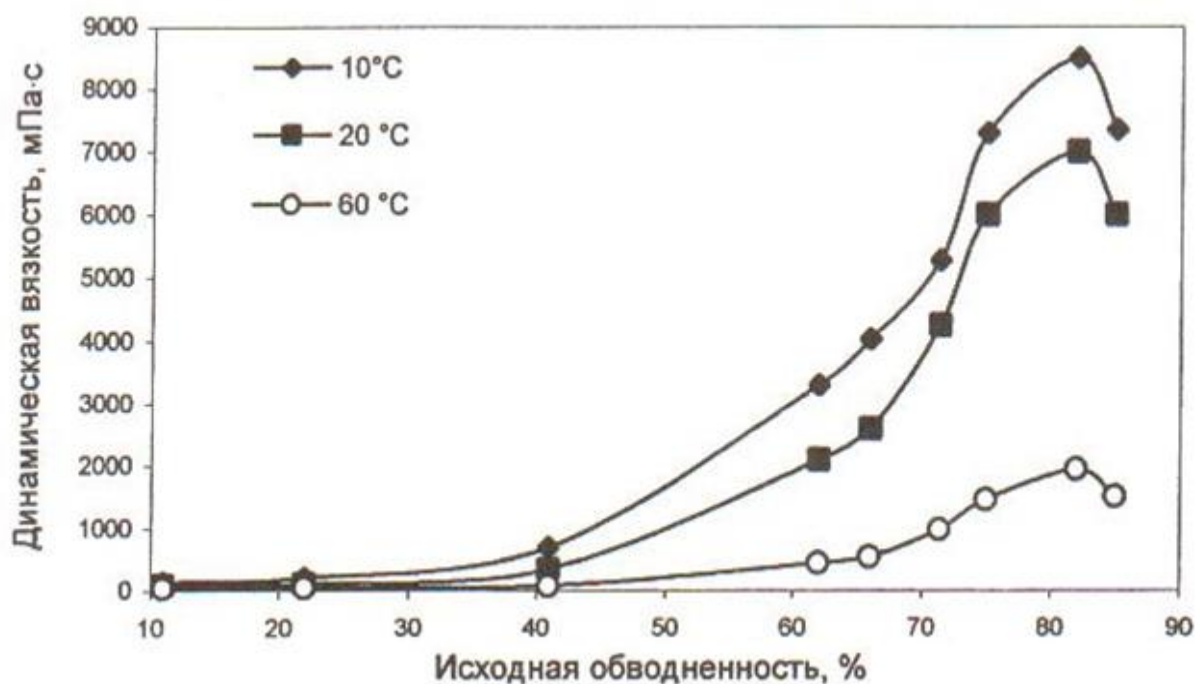


Рисунок 1.7. Зависимость вязкости от обводненности при разных температурах

Зависимость вязкости от обводненности всегда немонотонная с максимумом при 60-80%. Изменение вязкости жидкости влияет в основном на потери мощности, гидравлические сопротивления движению потока жидкости и оказывает значительно большее влияние на потери мощности, чем плотность. При

подаче вязкой сырой нефти и темных нефтепродуктов потери мощности насоса резко увеличиваются, и КПД насоса уменьшается, несмотря на увеличение объемного КПД в результате увеличения объемных потерь. При увеличении вязкости будут уменьшаться развиваемые насосом напор, подача и КПД. Потребляемая мощность при этом будет увеличиваться вследствие возрастания гидравлического сопротивления проточной полости.

Далее при движении газированных обводненных нефтей в системе сбора основной причиной образования эмульсий является энергия турбулентного потока. Перепады давления, пульсация газа, наличие штуцерирующих устройств, задвижек, поворотов и фитингов способствуют повышению турбулентности потока и интенсивному диспергированию воды в нефти. Отложения парафина на стенках труб уменьшают его сечение, увеличивают скорость потока и усиливают диспергирование воды в нефти.

Динамическая вязкость эмульсии зависит от следующих факторов: вязкости самой нефти, температуры образования эмульсии, содержания воды в нефти, степени дисперсности или диаметра капель воды (для эмульсий типа вода в нефти).

Стойкость эмульсий обусловлена двумя факторами: термодинамическим и кинетическим.

Термодинамический фактор — это степень термодинамической неравновесности системы, энергия межфазных границ. Время жизни эмульсии тем больше, чем ниже поверхностная энергия, которая уменьшается за счет наличия в нефти природных ПАВ (поверхностно-активных веществ), создания двойных электрических слоев и сольватных оболочек на поверхности дисперсных частиц. Двойной электрический слой образуют ионы противоположного знака. Сольватные оболочки возникают в результате действия вандерваальсовых сил (дипольного взаимодействия) или взаимодействия водородных связей молекул. Уменьшение энергии границы происходит за счет упорядочения ее структуры.

Кинетический фактор определяет скорость движения межфазных границ вода — нефть. Скорость движения межфазной границы уменьшается, если на

границе находится частица третьей фазы (не полностью смачиваемая как водой, так и нефтью). Такие частицы повышают устойчивость эмульсии. Если частицы третьей фазы изменяют поверхностное натяжение границы, то вдоль границы возникает течение — в область локального повышения поверхностного натяжения (эффект Марангони). Например, если частицы третьей фазы локально уменьшают поверхностное натяжение, они будут отталкиваться друг от друга, перемещаясь в области границы, где их концентрация была ниже. Эти процессы объясняют известный из опыта рост вязкости эмульсии от времени после того, как эмульсия была сформирована.

Для предотвращения образования эмульсии на начальном этапе добычи необходимо во время обнаружить возникновение эмульсии.

При турбулентном потоке образуются наиболее устойчивые эмульсии. Рассмотрим результаты эксперимента, где производили моделирование процесса образования эмульсии. Моделируемый процесс аналогичен процессу, который происходит в ступенях работы ШСНУ.

На протяжении 40 минут перемешивали нефть с водой в мешалке ИКА EUROSTAR Power Control Vise 6000 с частотой 2500 об/мин. Эксперимент проводили без доступа воздуха. Моделирование пластовой воды производилось по шестикомпонентному ионному составу первоначальной пробы пластовой воды.

Длительность перемешивания выбиралась исходя из того, что необходимо добиться максимальной дисперсности эмульсии при содержании воды 50 %. В каждом исследовании использовались новые порции исходных компонентов. С помощью камеры биомедицинского микроскопа Лабомед-2 определяли размер глобул (наибольший и наименьший). Увеличение в микроскопе было до 1600 раз. Рисунки 1.8 и 1.9 иллюстрируют результаты опытов.

Наибольшая дисперсность глобул воды наблюдается при перемешивании более 35 минут. Дальше длительность приготовления эмульсии (диспергирование и перемешивание) была выбрана 40 минут. Благодаря такой продолжительности процесса удается получить эмульсию с более развитой межфазной поверхностью.

Устойчивость эмульсий – это способность их не разрушаться и не разделяться на дисперсную фазу и дисперсионную среду в течение определенного промежутка времени.

Устойчивость эмульсии зависит от многих факторов, например, поверхностного натяжения, вязкости дисперсионной среды, температуры, дисперсности частиц и т.д. Но из всего перечисленного главный фактор устойчивости эмульсии это крупность эмульгированных частиц, то есть ее дисперсность. При уменьшении размеров капелек действие гравитационных сил убывает, и начинают превалировать силы, удерживающие их в стабильно взвешенном состоянии.

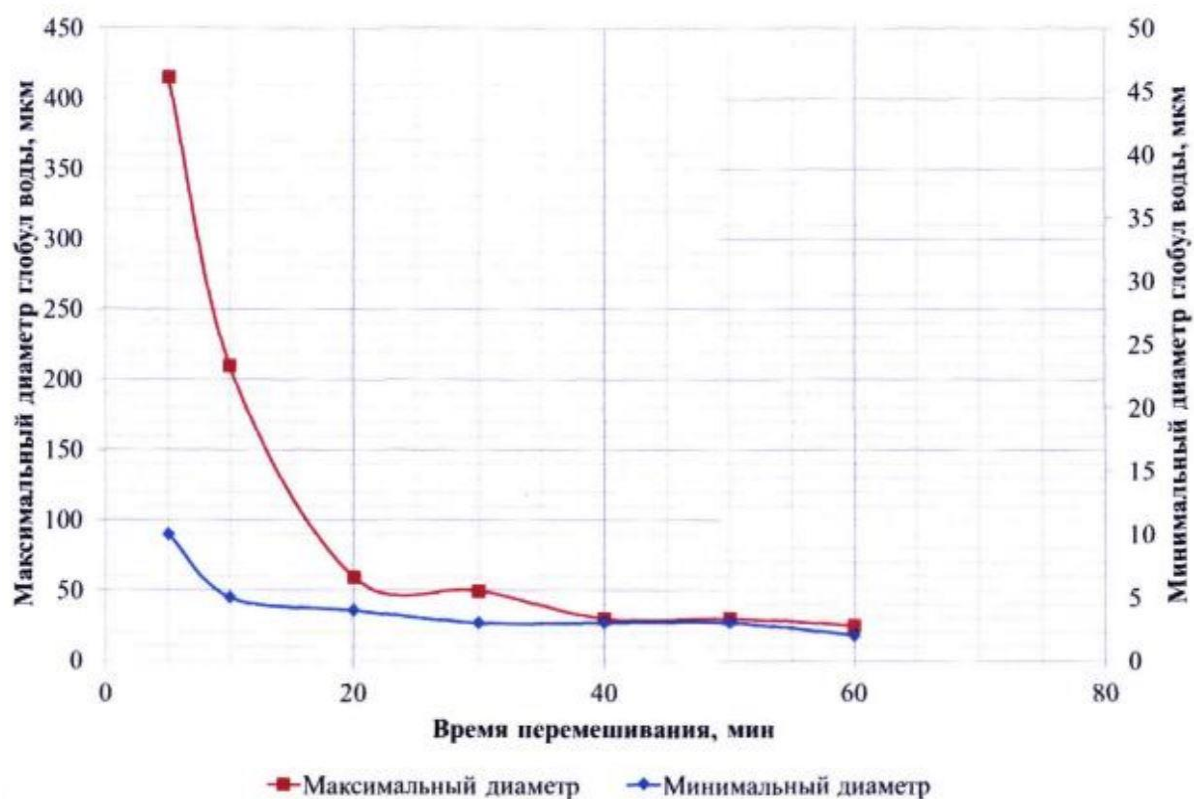


Рисунок 1.8. График зависимости диаметра глобул воды эмульсии от времени работы мешалки

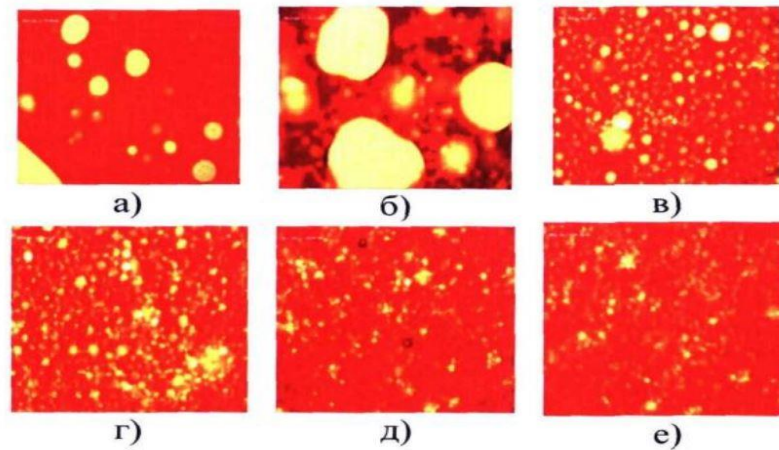


Рисунок 1.9 – Фото эмульсии под микроскопом при различном времени работы мешалки
 а) 5 минут; б) 10 минут; в) 20 минут; г) 40 минут; д) 50 минут; е) 60 минут

Исследования с различной интенсивностью перемешивания позволяют оценить влияние турбулизации потока на дисперсность (рисунок 1.10).

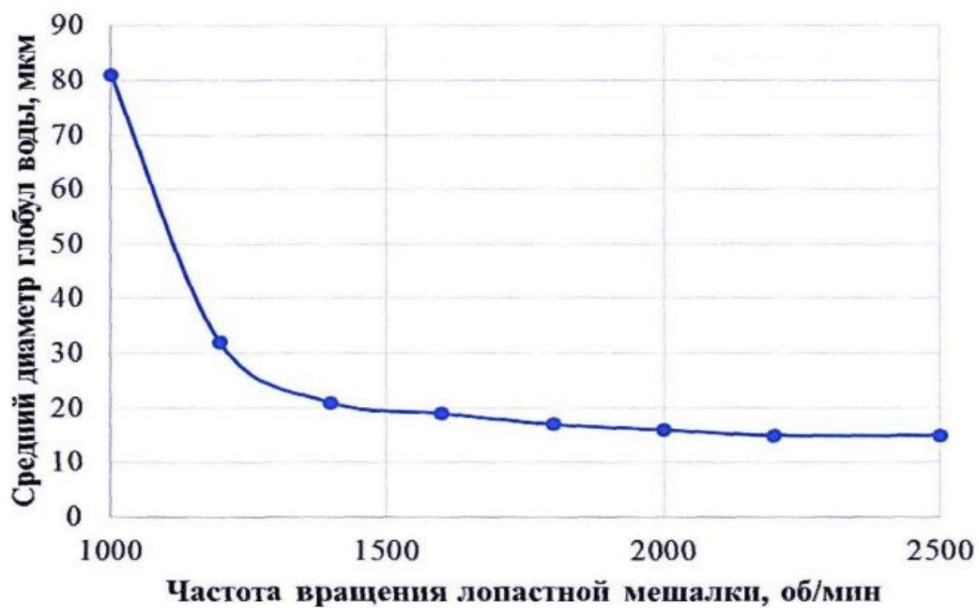


Рисунок 1.10. Влияние частоты вращения на диаметр глобул воды в течении 40 минут при разных скоростях добычи

Повышение частоты вращения мешалки (моделированный процесс добычи) оказывает влияние на дисперсность эмульсии и способствует ее увеличению. Необходимо отметить, что мелкодисперсная эмульсия образуется если обороты,

превышают 1500 об/мин. Дальнейшее увеличение частоты вращения слабо сказывается на диаметре глобул воды.

Исходя из всего вышесказанного, можно сделать вывод, что с увеличением частоты качания ШСНУ эмульсия становится более мелкодисперсной, соответственно, её устойчивость повышается, что может привести к отказам и авариям.

Как видно из диаграммы, изображенной на рисунке 1.11, основными причинами отказов работы ШСНУ за 2017-2021 гг., являются обрыв штанг - 114 ремонтов, негерметичность клапанов - 45 ремонтов, отворот штанг - 38 ремонтов, асфальтосмолопарафиновые отложения (АСПО) и наличие эмульсии - 48 ремонтов.



Рисунок 1.11 Причины отказов ШСНУ

АСПО и эмульсия становятся причиной засорения и заклинивания плунжера, вследствие отложения в цилиндре насоса АСПО, механических примесей и наличия эмульсии. Также как видно из таблицы 1.2, эмульсия и АСПО являются косвенными причинами возникновения аварийных ситуаций, вследствие обрывов штанг.

Обрыв штанг - разрушение колонны штанг происходит либо при разрыве тела штанги, либо при разрушении резьбовых соединений. Обрывы штанг происходят вследствие усталости металла, в результате переменных нагрузок, концентраций напряжений, коррозионности среды. Усталостное разрушение штанг обычно начинается с поверхности образованием микротрещины. Поверхность излома имеет характерный вид: она состоит из двух зон - мелкозернистой и крупнозернистой. Усталостное разрушение штанг ускоряется переменными нагрузками, концентрацией напряжений и воздействием коррозионной среды, поэтому выбор допускаемых напряжений для штанг представляет собой важную задачу [52].

Таблица 1.2. Косвенные причины отказа оборудования ШСНУ

Причина	№ скважины	Добыча жидкости, м ³ /сутки	Обводненность %	Предполагаемая причина отказа	Глубина спуска насоса, м
Обрыв штанг	1	7.6	4	Мех примеси. Эмульсия, АСПО	1134
Отказ ШГН	2	5	2	Залипание клапанов	1460
Отказ ШГН	3	2.2	1	Клин насоса	1156
Обрыв штанг	4	12,2	3	Большая наработка	1224
Отворот штанг	5	4,8	1	Мех примеси. Эмульсия, АСПО	1301
Обрыв штанг	6	25.4	0.5	Мех примеси. Эмульсия, АСПО	1270
Отказ ШГН	7	4.7	0,1	Залипание клапанов	1160
Обрыв штанг	8	4,8	1	Мех примеси. Эмульсия. АСПО	1493

Реализация мероприятий по устранению эмульсии в ШСНУ позволяет:

- отказаться от применения дозирующих аппаратов и использования больших количеств деэмульгатора;
- отказаться от промывок скважин растворителями;
- увеличить межремонтный период скважин;

- увеличить срок службы глубинно-насосного оборудования;
- снизить количество потребляемой электроэнергии на добычу и транспортировку скважинной продукции

Проведенный анализ показывает, что основная доля отказов приходится на насосы и штанги, очевидно, что для заметного повышения наработки на отказ ШСНУ в целом, именно этим звеньям должно быть уделено особое внимание.

1.4. Станция управления ШСНУ

1.4.1. Общие сведения

В России более половины всех скважин эксплуатируются с помощью штанговых скважинных насосных установок (ШСНУ), работа которых производится непосредственным подключением двигателя к питающей сети с помощью магнитных пускателей, коммутационных и управляющих аппаратов (прямой пуск) Схема электроснабжения приведена на рисунке 1.12. Однако число данных пусков, особенно на малодобитных скважинах, может достигать нескольких десятков. С учетом динамической нагрузки на валу электродвигателя данное обстоятельство может сопровождаться провалами напряжения в сети и приводить к значительным затратам, связанным с поломкой электротехнического и технологического оборудования, а также к простоям скважины [26]. Следовательно, актуальным является повышение эффективности эксплуатации, а именно встает вопрос об использовании современной, отвечающей всем требованиям, станции управления ШСНУ.

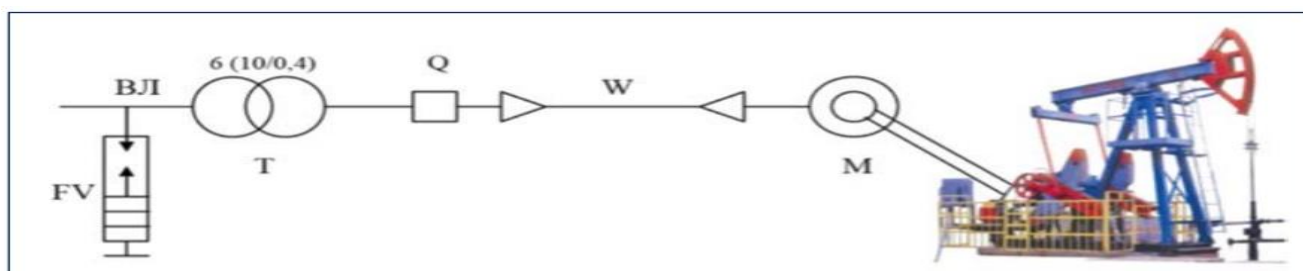


Рисунок 1.12 Схема электроснабжения электродвигателя ШСНУ.

Станция управления (СУ) предназначена для управления, защиты, контроля параметров и регулирования частоты вращения установки станка-качалки ШСНУ с трехфазным электродвигателем в условиях умеренного и умеренно-холодного климата [41].

Существует достаточно большое количество систем (станций) управления электродвигателем ШСНУ, которые обеспечивают получение заданных законов движения точки подвеса насосных штанг, например промежуточные передачи для уменьшения частоты вращения вала по сравнению с частотой вращения приводного двигателя, тиристорные преобразователи напряжения или преобразователи частоты (ПЧ) асинхронных электродвигателей [55].

На рисунке 1.13 представлена структурная схема ШСНУ.

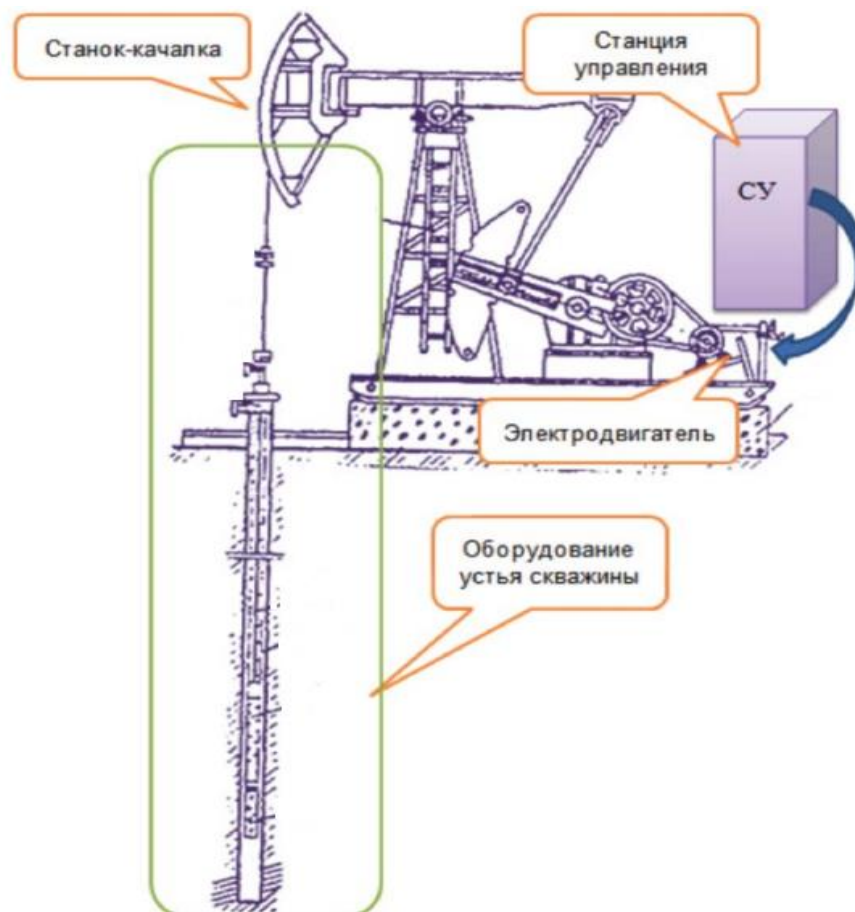


Рисунок 1.13 Структурная схема ШСНУ

Конструктивно станция управления выполнена в виде металлического шкафа одностороннего обслуживания (рисунок 1.14). На нижней стороне шкафа располагаются сальники ввода-вывода главной цепи, на боковой стороне - отсек для подключения телемеханики, преобразователь чистоты расположен в силовом отсеке [10]. Двери СУ имеют герметичное уплотнение, а также замки, закрывающие дверь на ключ. Для удобства выполнения монтажных работ внутри шкафа СУ имеются светильники, включение которых происходит автоматически при открытии двери станции.

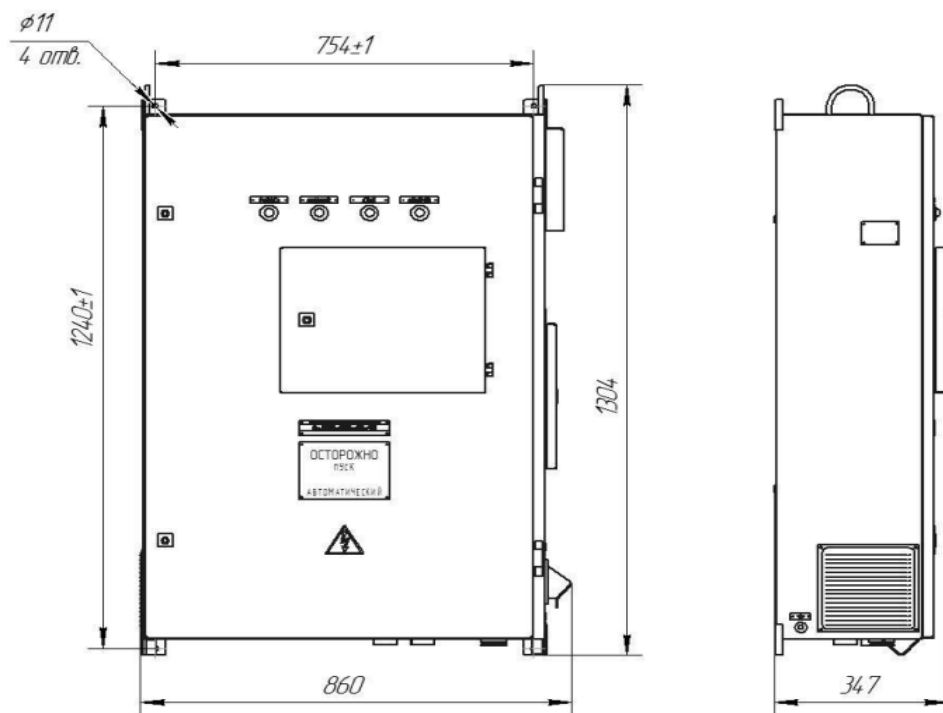


Рисунок 1.14 Исполнение станции управления с примерными установочными размерами

Главным компонентом СУ является скважинный контроллер, обеспечивающий выполнение технологических режимов работы объекта и содержащий необходимый функционал и алгоритмическую обработку данных, силового коммутатора для включения и отключения электродвигателя, радиомодема и набора датчиков технологических параметров [13]. Требования к станции управления, должны обеспечивать возможность изменения режима работы ШСНУ путем изменения частоты качаний с помощью преобразователя частоты.

1.4.2. Критерии выбора СУ

Критериями выбора СУ являются следующие критерии:

нижнего уровня:

- а) тип датчиков усилия;
- б) тип датчиков положения;

среднего уровня:

- а) наличие дисплея и клавиатуры (аппаратуры);
- б) разрядность аналого-цифрового преобразователя АЦП;
- в) динамограммы (сбор / обработка);

г) алгоритмы откачки;

д) количество аналоговых и цифровых входов / выходов;

уровня среды передачи данных:

- а) интерфейсы (RS-232, RS-485, Ethernet);
- б) протокол связи;

верхнего уровня:

- а) управление ПЧ;
- б) контроль параметров работы электродвигателя;

эксплуатационные характеристики:

- а) напряжение питания от сети переменного тока частотой 50 Гц;
- б) относительная влажность воздуха без конденсации влаги;
- в) диапазон рабочих температур;

г) габариты;

д) масса;

е) наличие голосовой связи с диспетчерским пунктом;

ж) гарантии поставщика;

з) стоимость.

На рисунке 1.15 представлена Расшифровка условного обозначения исполнения СУ.



Рисунок 1.15 Расшифровка условного обозначения исполнения СУ

1.4.3. Технические характеристики СУ

Ниже приведены основные характеристики современных станций управления, поставляемых на рынок, описывающие их функциональные возможности.

- СУ обеспечивает включение, отключение и управление ЭД в соответствии с заданными пользователем уставками.
- СУ обеспечивает работу ЭД в следующих режимах:
 - ручной;
 - автоматический;
 - автоматический по задаваемой временной программе.
- СУ обеспечивает регулирование частоты вращения ротора ЭД от 3,5 до 70 Гц с дискретностью 0,1 Гц.
- СУ обеспечивает контроль величины рабочего тока ЭД. Контроль тока ЭД осуществляется с относительной погрешностью не более 2 % в диапазоне от 0,1 от номинального тока СУ до номинального тока СУ.

- СУ обеспечивает контроль величины загрузки двигателя в процентах от задаваемой номинальной нагрузки из паспортных данных двигателя.
- СУ обеспечивает прием информации от внешнего оборудования, имеющего выход интерфейса RS485 или RS232
- СУ обеспечивает защиту от аварийных режимов, вызванных следующими нарушениями в системе ШСНУ:
 - перегрузом по току для любой из фаз;
 - недогрузом по току для любой из фаз;
 - дисбалансом токов фаз;
 - недопустимым давлением на устье скважины (выше или ниже установленного значения уставки);
 - коротким замыканием;
 - выходом параметров телеметрической информации из рабочей зоны.
- СУ имеет возможность задания времени задержки контроля для отдельных групп защит.
- СУ обеспечивает автоматическое повторное включение (АПВ) после:
 - подачи напряжения питания с возможностью задания времени задержки АПВ.
 - отключения ЭД по причине повышенного или пониженного рабочего напряжения при возвращении значения напряжения в рабочую зону и отсчета времени АПВ по подаче питания;
 - отключения ЭД по причине повышенного или пониженного тока потребления ЭД с возможностью задания времени задержки АПВ. Время задержки АПВ отсчитывается с момента защитного отключения ЭД;
 - отключения ЭД по причине повышенного дисбаланса напряжений при возвращении значения напряжения в рабочую зону и отсчета времени АПВ по подаче питания;
 - отключения ЭД при превышении допустимого дисбаланса токов потребления с возможностью задания времени задержки АПВ [63].

На рисунке 1.16 представлена рекомендуемая схема подключения станции управления.

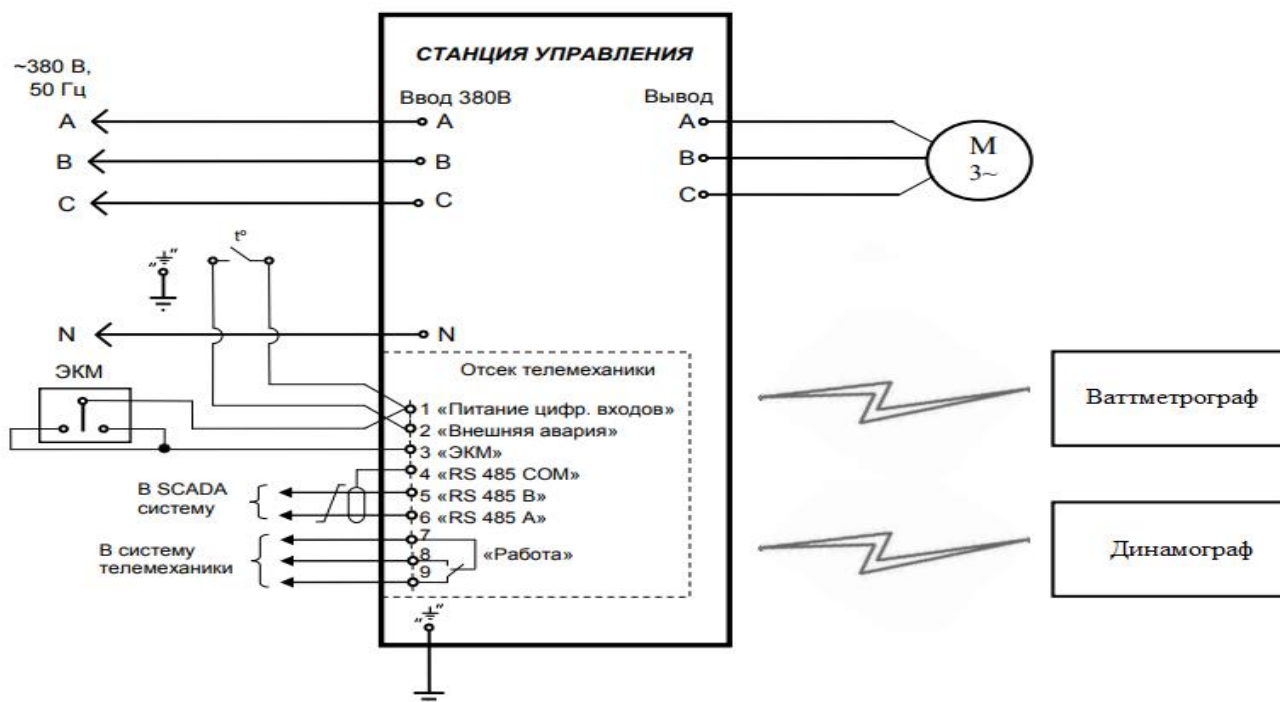


Рисунок 1.16 Рекомендуемая схема подключения СУ

1.5. Методы контроля ШСНУ

1.5.1. Основные методы контроля ШСНУ

Техническая диагностика – область знаний, охватывающая теорию, методы и средства определения технического состояния объектов [84]. Назначение технической диагностики - снижение объема затрат на стадии эксплуатации оборудования. Диагностика технических объектов является составной частью технического обслуживания [2].

Основной задачей диагностирования техники является обеспечение безопасности, функциональной надёжности и эффективности работы технического объекта, а также сокращение затрат на его техническое обслуживание, уменьшение потерь от простоев в результате отказов и преждевременных выходов в ремонт [29].

Диагностирование технических объектов включает в себя следующие этапы:

- оценка технического состояния объекта;
- обнаружение и определение места локализации неисправностей;
- прогнозирование остаточного ресурса объекта;
- мониторинг технического состояния объекта [64].

Параметры, по которым можно судить о состоянии объекта называются диагностическими параметрами [17]. Существуют прямые и косвенные диагностические параметры. Первые непосредственно характеризуют состояние объекта, а вторые связаны с прямыми параметрами функциональной зависимостью [31].

Известны следующие методы диагностирования:

- органолептические методы диагностирования, которые основаны на использовании органов чувств человека (осмотр, слушивание);
- вибрационные методы диагностирования, которые основаны на анализе параметров вибраций технических объектов;
- акустические методы диагностирования, основанные на анализе параметров звуковых волн, генерируемых техническими объектами и их составными частями [18];
- тепловые методы; сюда же относятся методы диагностирования, основанные на использовании тепловизора;
- трибодиагностика - это метод оценки технического состояния оборудования по составу и концентрации продуктов износа в рабочем масле;
- диагностика на основе анализа продуктов износа в продуктах сгорания;
- метод акустической эмиссии;
- радиография;
- магнитопорошковый метод;
- вихретоковый метод;
- ультразвуковой контроль;

- капиллярный контроль;
- методы параметрической диагностики;
- специфические методы для каждой из областей техники.

Сложностью технической диагностики является достижение адекватного распознавания истинного состояния объекта и классификации этого состояния (нормального или аномального) [35]. При проведении технического диагностирования для подтверждения нормального состояния объекта выделяют две основные задачи:

- обеспечение получения достоверной информации;
- обеспечение приемлемой оперативности получения информации.

При проведении технического диагностирования для выявления аномалий выделяют два основных вопроса:

- вероятность пропуска неисправности;
- вероятность «ложной тревоги», то есть вероятность ложного сигнала о наличии неисправности.

Чем выше вероятность «ложной тревоги», тем меньше вероятность пропуска неисправности, и наоборот [46]. Задача технической диагностики неисправностей состоит в нахождении «золотой середины» между этими двумя вопросами [56].

Вышеперечисленные методы технической диагностики относятся к двум основным группам: методы неразрушающего контроля и методы разрушающего контроля [78].

Неразрушающий контроль — контроль надежности основных рабочих свойств и параметров объекта или отдельных его элементов/узлов, не требующий выведения объекта из работы либо его демонтажа [68].

Основными методами неразрушающего контроля являются: магнитный; электрический; вихретоковый; акустический; радиационный; тепловой; радиоволновой; оптический; проникающими веществами; вибрационный.

В процессе диагностирования неисправностей нефтепромысловых агрегатов: расцентровка и соосность валов, ослабление соединений, задевания,

дисбаланс насосных агрегатов возникает необходимость исследования их влияния на уровень вибрации [21]. Вибродиагностические методы контроля являются одними из первых этапов в оценке состояния агрегатов, так как позволяют анализировать состояние последних непосредственно в процессе их работы. К примеру [66], вибродиагностика насосных агрегатов проводится прибором, позволяющем фиксировать результаты измерений; проводить спектральный анализ, по которому можно оценить состояние того или иного механизма и диагностировать имеющиеся неисправности; хранить в долговременной памяти более 200 спектрограмм с частотным диапазоном 10...10000 Гц и возможностью последующей разгрузки в базу данных компьютера.

Широко известны и используются виброакустические методы технической диагностики для выявления трещин и других видов дефектов в теле труб непосредственно на месте их эксплуатации, например, при ремонте скважины мобильными дефектоскопическими комплексами; для диагностики лопаток газотурбинного двигателя, корпуса камеры сгорания летательного аппарата. Для обоснования возможности применения этого метода для диагностики труб, проведены исследования акустических свойств их материала: определение собственных частот труб, определение влияния различных дефектов и присоединительных масс на спектр собственных частот колебаний труб. Установлены критерии состояния НКТ виброакустическим методом.

Разработан метод ранней диагностики технического состояния ШСНУ, для получения критериев диагностики из зарегистрированной эхограммы. Техническое состояние электроцентробежного насоса отражается на уровне вибрации его узлов [36]. Проведенные расчеты распространения вибрационного сигнала через газовую среду в затрубном пространстве показали возможность существования такого эффекта в скважинных условиях. Кроме того, расчеты показали, что пузырьки газа и пена влияют на погашение полезного сигнала незначительно, так как волны, несущие критерии диагностики низкочастотны. Далее полученный материал обрабатывается с использованием параметра Хаусдорфа.

Изменение параметра Хаусдорфа, представляющего меру нерегулярности (хаотичности) исследуемого временного ряда, носит вполне закономерный характер: параметр снижается в период приработки узлов установки, принимает постоянное значение в период нормальной эксплуатации, растет при ухудшении состояния оборудования, характеризующегося повышением уровня вибрации [28]. Таким образом, данный метод позволяет производить раннюю диагностику ШСНУ, на базе использования стандартных промышленных исследований: эхометрии, волнометрии.

Классификация основных методов неразрушающего контроля приведена в таблице 1.3

1.3 Классификация методов контроля

Вид контроля	По характеру взаимодействия физических полей с контролируемым объектом	По первичному информативному параметру	По способу получения первичной информации
1	2	3	4
Магнитный	Магнитный	Коэрцитивной силы; Намагниченности; Остаточной индукции; Магнитной проницаемости; Напряженности; Эффекта Баркгаузена.	Индукционный; Феррозондовый; Магнитографический; Пондеромоторный; Магниторезисторный.
Электрический	Электрический Трибоэлектрический Термоэлектрический	Электропотенциальный Электроемкостный	Электростатический порошковый Электропараметрический Электроискровой Рекомбинационного излучения Экзоэлектронной эмиссии Шумовой Контактной разности потенциалов
Вихрековый	Прошедшего излучения. Отраженного излучения	Амплитудный. Фазовый. Частотный. Спектральный. Многочастотный	Трансформаторный. Параметрический

Продолжение таблицы 1.3

1	2	3	4
Радиоволновой	Прошедшего излучения. Отраженного излучения. Рассеянного излучения. Резонансный	Амплитудный. Фазовый. Частотный. Временной. Поляризационный. Геометрический	Детекторный (диодный). Болометрический. Термисторный. Интерференционный. Голографический. Жидких кристаллов. Термобумаг. Термолюминофоров. Фотоуправляемых полупроводниковых пластин. Калориметрический
Тепловой	Тепловой контактный. Конвективный. Собственного излучения	Термометрический. Теплометрический	Пирометрический. Жидких кристаллов. Термокрасок. Термобумаг. Термолюминофоров. Термозависимых параметров. Оптический интерференционный.
Оптический	Прошедшего излучения. Отраженного излучения. Рассеянного излучения. Индукцированного излучения	Амплитудный. Фазовый. Временной. Частотный. Поляризационный. Геометрический. Спектральный	Интерференционный. Нефелометрический. Голографический. Рефрактометрический. Рефлексометрический. Визуально-оптический
Радиационный	Прошедшего излучения. Рассеянного излучения. Активационного анализа. Характеристического излучения. Автоэмиссионный	Плотности потока энергии. Спектральный	Сцинтилляционный. Ионизационный. Вторичных электронов. Радиографический. Радиоскопический
Акустический	Прошедшего излучения. Отраженного излучения (эхо-метод). Резонансный. Импедансный. Свободных колебаний	Амплитудный. Фазовый. Временной. Частотный Спектральный	Пьезоэлектрический. Электромагнитноакустический. Микрофонный. Порошковый

Окончание таблицы 1.3

1	2	3	4
	Акустико-эmissionsный	Амплитудный. Фазовый. Временной. Частотный. Спектральный	Пьезоэлектрический
	Акустико-ультразвуковой	Амплитудный. Фазовый. Временной. Частотный. Спектральный	
Виброакустический	Механические колебания – движения точки или механической системы, при котором происходят колебания характеризующих его скалярных величин	Статические параметры колебательного процесса (механических колебаний)	Пьезоэлектрический Электромагнитно-акустический

1.5.2. Контроль ШСНУ по динамограмме

Динамометрический метод заключается в построении устьевого (наземного) динамометрического графика. Динамограмма отражает зависимость нагрузки в точке подвеса стержней от положения полированного штока. Она предоставляет более полные данные о состоянии ШСНУ и о правильности выбранного режима эксплуатации скважины, помимо этого, позволяя производить оценку фактического дебита скважины. Данные о нагрузке получают с помощью датчика силы, и точность измерения зависит от места его установки: чем ближе датчик установлен к поршню насоса, тем меньше элементы, передающие усилие, будут искажать передаваемый сигнал. Но установка датчика на подземном оборудовании связана с большими трудностями в его обслуживании, электроснабжении и съеме информации, поэтому на практике установка осуществляется на штанге насоса между траверсами или между верхней траверсой и замками [14].

Конструкция датчика силы состоит из упругого элемента в виде полого цилиндра и приклеенных к его внешней поверхности тензодатчиков, которые закрыты защитным кожухом. К недостаткам данной конструкции относится сложность монтажа, поскольку он требует полной разборки траверс канатной подвески. А также аналоговый выходной сигнал, который подвержен помехам от мощных двигателей и полупроводниковых преобразователей частоты.

Для построения динамометрической диаграммы помимо данных о силе необходимы также сведения о движении стержня. Эта информация поступает от датчика положения, в состав которого входят элементы Холла. Датчики Холла крепятся на выходном валу редуктора и издают сигнал при прохождении через них постоянных магнитов. Такое положение датчика обеспечивает обратную связь о прохождении штоком мертвых точек, а также приемлемо для использования во всех типах приводов ШСНУ.

Места установки датчиков. Для получения информации о нагрузках действующих на шток в точке подвеса штанг, нужно установить датчики в различных местах станка-качалки (рисунок 1.15). На практике широко используют датчики продольной и поперечной деформации штока (1), датчики сжатия, устанавливаемые на штоке между траверсами (2) и на штоке между верхней траверсой и замками (3), датчики деформации балансира (4). Известны также попытки рассчитать усилие, измеряя потребляемую электродвигателем электрическую мощность (5) [72].

На практике применяются следующие понятия: теоретическая, практическая (измеренная, реальная) динамограмма (рисунок 1.18). Простейшая теоретическая динамограмма при нормальной работе насоса имеет форму параллелограмма (рисунок 1.18, линия 1). Она строится для условия, когда насос исправен и герметичен, цилиндр заполнен несжимаемой жидкостью, в насосной установке не возникают динамические нагрузки, коэффициент заполнения насоса равен единице [69]. Практическая динамограмма устья скважины отражает фактическое изменение нагрузки на полированный шток в течение полного цикла качания.

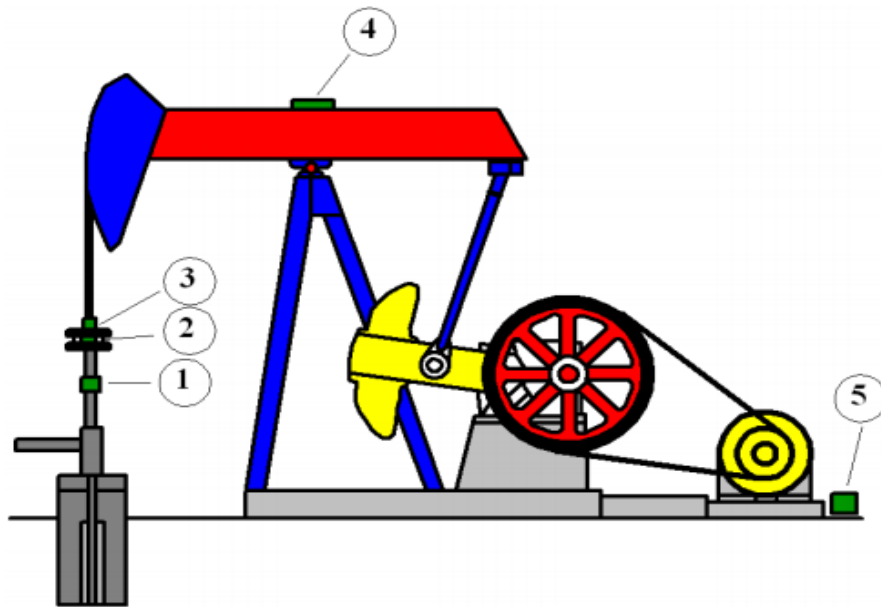


Рисунок 1.17 Схема установки датчиков усилия на станок-качалку

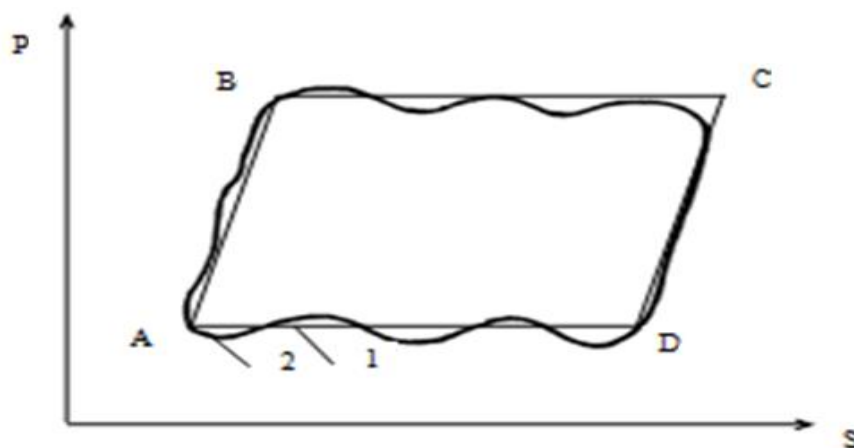


Рисунок 1.18 Графики устьевых динамограмм

1 - теоретическая; 2 – практическая

Реальный график отличается от теоретического, в основном, из-за влияния сил инерции и колебательных процессов в колонне штанг (рисунок 1.18, линия 2). Под действием силы инерции динамограмма оказывается повернутой по часовой стрелке на определенный угол, а продольные колебания в колонне штанг вызывают волнообразные изменения нагрузки на устьевой шток [65].

Размеры и форма реальной динамограммы определяются длиной хода полированного штока и действующих на него усилий, которые, в свою очередь,

зависят от глубины спуска и диаметра насоса, частоты качаний и от характера нарушений в подземном оборудовании или гидростатической нагрузки на плунжер [75].

Можно сформулировать следующие характерные признаки практической динамограммы, которые в сумме дают право на заключение о нормальной работе насоса:

- линии восприятия (рисунок 1.18, линия АВ) и снятия (рисунок 1.18, линия CD) нагрузки практически могут быть приняты за прямые;

- линии восприятия и снятия нагрузки у практической динамограммы параллельны соответствующим линиям теоретической динамограммы, и, следовательно, параллельны друг другу;

- левый нижний и правый верхний углы динамограммы острые.

Теоретическая динамограмма (Рисунок. 1.19) отражает этапы цикла работы установки.

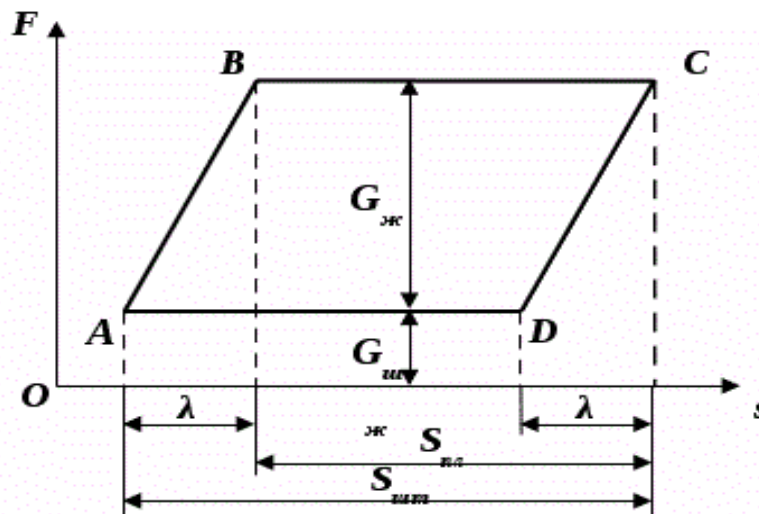


Рисунок 1.19 Теоретическая динамограмма нормальной работы ШСНУ: F – усилие на штоке, s – ход штока, $S_{штм}$ – длина хода полированного штока; $S_{пл}$ – длина хода плунжера; λ – деформация штанг и труб; $G_{жс}$ – вес столба жидкости над плунжером; $G_{шжс}$ – вес штанг в жидкости.

Точка А на динамограмме - это крайнее нижнее положение плунжера насоса. Отрезок АВ - ход вверх полированного штока. При этом происходит

деформация (растяжение) штанг, но плунжер насоса все еще находится в крайнем нижнем положении. Отрезок ВС - ход вверх полированного штока и плунжера насоса.

Точка С - крайнее верхнее положение плунжера насоса. Отрезок CD - ход вниз полированного штока. При этом происходит деформация (сжатие) штанг, но плунжер насоса все еще находится в крайнем верхнем положении. Отрезок DA - ход вниз полированного штока и плунжера насоса.

Схему ШСН можно наблюдать на рисунке 1.20.

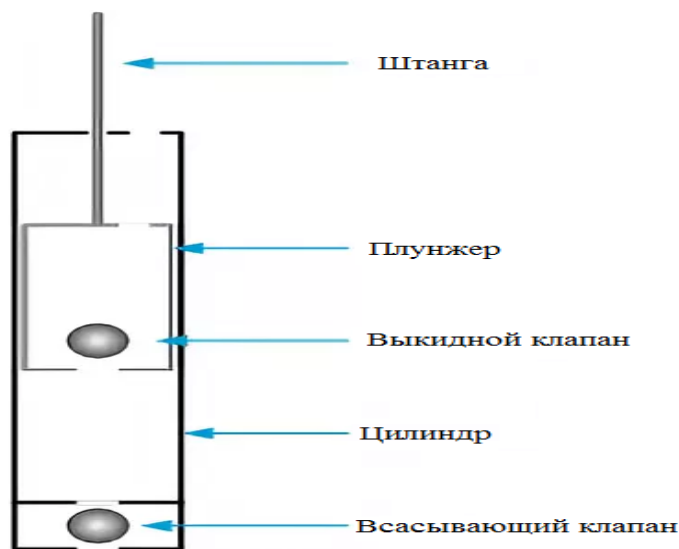


Рисунок 1.20 Схема ШСН.

По данным динамограммы можно вычислить теоретическую производительность ШСН:

$$Q_T = 1440 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot L \cdot n \left[\text{м}^3 / \text{сут} \right] \quad (1.1)$$

где 1440 – число минут в сутках, D – диаметр плунжера наружный; L - длина хода плунжера; n- число двойных качаний в минуту.

Теоретическая динамограмма – является настолько идеализированной динамограммой, что в ней не учитываются силы трения, инерционные и динамические воздействия, возникающие в реальных условиях. Благодаря этим эффектам прямые линии теоретической динамограммы трансформируются в

характерные для реальной динамограммы волнистые линии. Кроме того, на теоретической динамограмме предполагается, что цилиндр штангового насоса полностью заполнен, т. е. коэффициент подачи насоса равен одному, чего в реальных условиях никогда не бывает (коэффициент подачи насоса обычно меньше единицы).

1.5.3. Контроль ШСНУ по ваттметрограмме

Главной задачей любой диагностики, как и диагностики по параметрам ваттметрограммы, является установление технического состояния оборудования и его элементов, а также выявление неисправностей с целью рационального планирования технического обслуживания, эксплуатации и ремонта для обеспечения требуемой надежности. Ваттметрирование позволяет диагностировать работу ШСНУ. Ваттметрограмма это зависимость мгновенных значений активной мощности, потребляемой электродвигателем ШСНУ, от времени в зависимости от угла поворота кривошипа: $P(t)$, $P(\phi)$, где t - время в течении одного периода T качания балансира СК, ϕ - угол поворота кривошипа (рисунок. 1.21) [39].

Одним из лидирующих по информативности методом контроля и диагностики оборудования ШСНУ является ваттметрирование [59]. Простота измерения количества потребляемой мощности электродвигателем является достоинством ваттметрирования для этого необходимо установка только измерительных трансформаторов напряжения и тока на трех фазах электродвигателя, также есть возможность ведения учета электроэнергии потребляемой ШСНУ [85].

Для анализа ваттметрограмм понадобится массив данных, состоящий из мгновенных значений силы тока и напряжения с последующим их перемножением за один период качания. Также из этих массивов могут быть получены активная, реактивная и полная мощности, коэффициент мощности, действующие значения токов и напряжения.

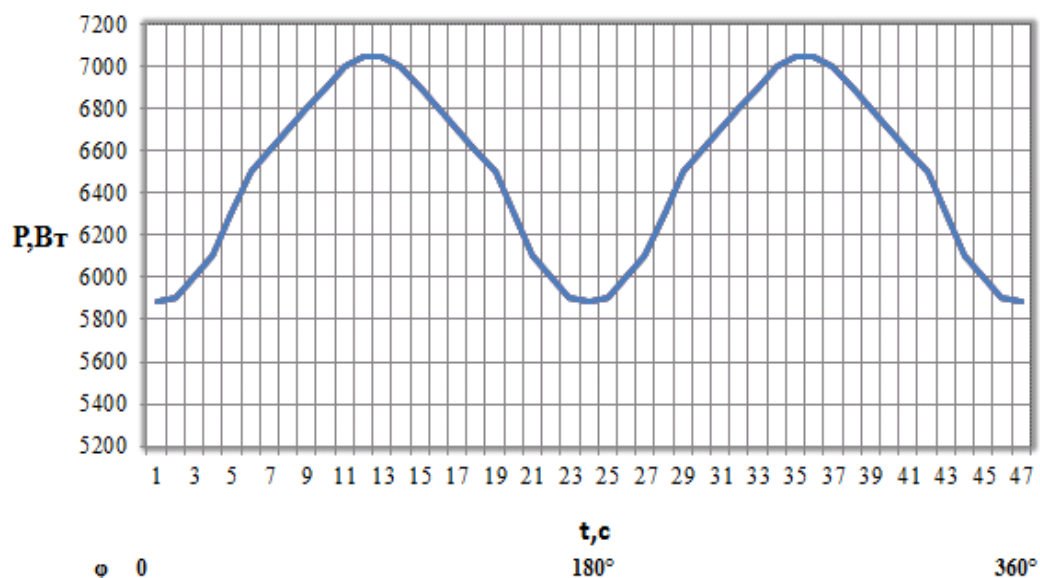


Рисунок 1.21 Ваттметриграмма при нормальной работе установки

Ваттметрирование дает возможность обнаруживать следующие неисправности электродвигателя: перегрузку по току, перекося фаз, отклонение частоты питающего напряжения и др. Ваттметриграмма позволяет в реальном времени осуществлять контроль неисправностей таких как: обрыв штанг, дефект в механическом приводе, а именно биений в редукторе, разбалансировки противовесов, дефект как нагнетательного, так и всасывающего клапанов, фонтанные проявления в скважинах, обрыв и проскальзывания ремней, неисправности полированного штока и плунжера [71].

Получение ваттметриграммы осуществляется с помощью модуля ваттметрирования. Модуль ваттметрирования предназначен для контроля и диагностики нефтяной скважины, оснащенной штанговым скважинным насосом в составе аппаратно-программного комплекса.

Модуль при работе в составе этого комплекса обеспечивает решение следующих задач: оперативное выявление аварийных ситуаций и несоответствия режимов эксплуатации оборудования, автоматизация работы станка-качалки, оптимизация режимов работы оборудования, передача оперативной информации о состоянии объекта оператору по сети телемеханики [15].

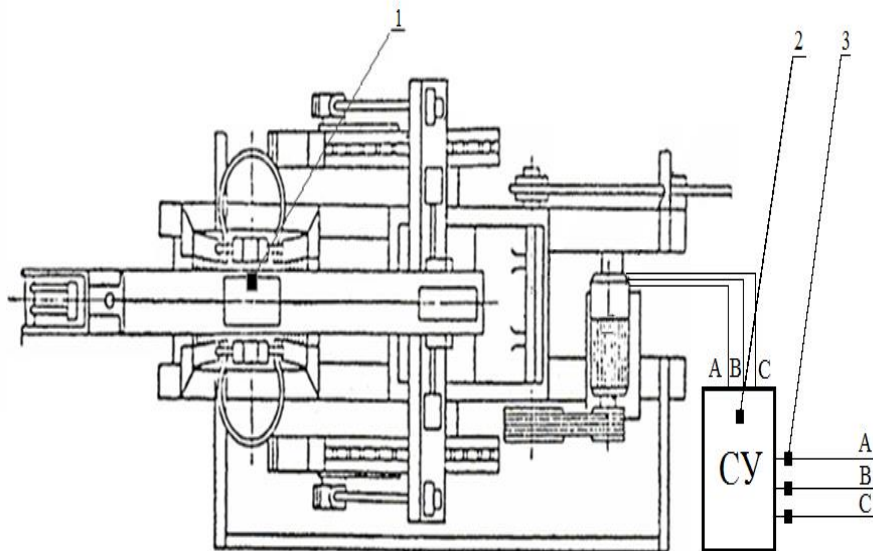


Рисунок 1.22. Места установки датчиков на станок-качалку (вид сверху)

На рисунке 1.22 показаны места установки датчиков, где 1 - акселерометр для определения периода работы СК, 2 - модуль ваттметрирования, 3 – датчики тока и напряжения.

В данном методе для измерения переменного тока и напряжения применяются трансформаторные датчики тока и напряжения или датчики на эффекте Холла. Основной частью для датчиков Холла является тонкая, полупроводниковая, прямоугольная пластина с 4-мя электродами, из которых одна пара – токовые электроды, предназначенные для подведения тока управления, вторая пара контактов, которые называются выходные контакты или холловские, предназначены для съема напряжения [3]. Напряжение Холла на выходных электродах возникает, если пластинку пронизывает магнитный поток, при этом подвижные носители зарядов образуют ток управления под действием силы Лоренца, что приводит к изменению числа носителей зарядов на концах пластинки.

Модуль ваттметрирования предназначен непосредственно для построения ваттметрограмм с помощью измерения по трем фазам электродвигателей ШСНУ - токов, напряжений, потребляемой мощности и электроэнергии. Он

устанавливается в шкаф управления скважиной или иной шкаф в соответствии с конструкторской документацией.

Модуль в процессе работы циклически измеряет значения поступающих на входные клеммы тока и напряжения. По измеренным мгновенным значениям токов и напряжений трех фаз микроконтроллером модуля проводится вычисление заявленных параметров потребляемой оборудованием электроэнергии [1].

1.6. Патентное исследование ШСНУ

1.6.1. Общие данные об объекте исследований

Область исследования – штанговая скважинная насосная установка (штанговая глубинная насосная установка), которая предназначена для подъема нефти из скважины на дневную поверхность, ваттметрирование, динамометрирование.

Область применения электрооборудование установок для насосной добычи нефти.

Исследуемый объект относится к классу "H" международной патентной классификации – "Электричество", к категории 02 «Производство, преобразование и распределение электрической энергии», «F» международной патентной классификации – "Машиностроение", "G" международной патентной классификации – "Физика", "E" международной патентной классификации – "Строительство и горное дело строительство".

Для решения задач при проведении исследований использовались следующие рубрики МПК: H02P; F04B; F04D; E21B; G06F; G01R.

При патентных исследованиях были поставлены следующие задачи:

- установление требований к объекту исследования;
- анализ тенденций развития и прогнозирование рынка продукции;
- анализ условия конкуренции.

1.6.2. Анализ результатов поиска патентной документации

1. Патентный поиск проведен в соответствии с заданием на проведение патентных исследований и регламентом поиска, утвержденным научным руководителем прикладного научного исследования А.Н. Цветковым от 22.01.2019 в рамках НИОКРА «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

2. Начало поиска 22.01.2019. Окончание поиска 30.05.2019.

3. Сведения о выполнении регламента поиска – полностью выполнен

4. Материалы, отобранные для последующего анализа представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4. Патентная документация

Предмет поиска (объект исследования, его составные части)	Страна выдачи, №, классификац Индексы	Заявитель, страна, № заявки, дата приоритета, дата публикации	Название изобретения, цель/задачи, кол-во пунктов формулы, кол-во примеров, кол-во цитируемых источников, кол-во индексов классификации, количество стран патентования	Сведения о действии охранного документа (только для анализа патентной чистоты)
1	2	3	4	5
Станция управления штанговыми глубинными насосами	RU 147664 U1 F04B 49/00	Заявка: <u>2014123212/06</u> , 06.06.2014, Андреев Николай Кузьмич (RU), Ахметгаряев Рамиль Танзилович (RU)	Система управления штанговой глубинно-насосной установкой, 8 п.; 1 индекс; 1 страна.	Прекратил действие

Продолжение таблицы 1.4

1	2	3	4	5
Станция управления штанговыми глубинными насосами	RU 111591 U1 F04B 47/02	Заявка: 2011131236/06, 26.07.2011 Огнев Михаил Ефимович (RU), Пиминова Надежда Николаевна (RU)	Мобильный привод глубинного штангового насоса 21 п.; 1 индекс; 1 страна.	действует
Станция управления штанговыми глубинными насосами	RU 161 852 U1 F04B 47/04	Заявка: 2014144025/06, 30.10.2014 Башмаков Владимир Сергеевич (RU), Перов Александр Владимирович (RU)	Гидропривод скважинного штангового насоса 12 п.; 1 индекс; 1 страна.	действует
Станция управления штанговыми глубинными насосами	RU 2 646 934 C1 МПК F04B 47/04 F04B 49/06	Заявка: 2016147064, 29.11.2016 Семериков Юрий Владимирович (RU), Коньков Тимофей Владимирович (RU), Молотков Алексей Матвеевич (RU), Демидов Олег Владимирович (RU)	Система управления гидравлическим приводом штангового насоса 3 п.; 2 индекса; 1 страна.	Действует
Станция управления штанговыми глубинными насосами	RU 122 713 U1 F04B 49/00	Заявка: 2012129089/28, 10.07.2012 Хакимьянов Марат Ильгизович (RU), Шабанов Виталий Алексеевич (RU)	Интеллектуальная станция управления скважиной с частотно- регулируемым электроприводом 6 п.; 1 индекс; 1 страна	Прекратил действие
Станция управления штанговыми глубинными насосами	RU 122 713 U1 F04B 49/00	Заявка: 2012129089/28, 10.07.2012 Хакимьянов Марат Ильгизович (RU), Шабанов Виталий Алексеевич (RU)	Интеллектуальная станция управления скважиной с частотно- регулируемым электроприводом 6 п.; 1 индекс; 1 страна	Прекратил действие
Станция управления штанговыми глубинными насосами	RU 2 640 309 C2 F04B 47/02	Заявка: 2016122991, 09.06.2016 Петров Игорь Валентинович (RU)	Длинноходовой безбалансирный привод штангового скважинного насоса 1 п.; 1 индекс; 1 страна	Действует
Станция управления штанговыми глубинными насосами	RU 2 640 309 C2 F04B 47/02	Заявка: 2016122991, 09.06.2016 Петров Игорь Валентинович (RU)	Длинноходовой безбалансирный привод штангового скважинного насоса 1 п.; 1 индекс; 1 страна	действует

Продолжение таблицы 1.4

1	2	3	4	5
Станция управления штанговыми глубинными насосами	RU 2 646 174 C2 F04B 47/04	Заявка: 2015117662, 12.05.2015 Габдрашитов Ильдар Фридатович (RU), Дудич Максим Иванович (RU)	Способ привода и устройство скважинного гидропоршневого насосного агрегата 3 п.; 1 индекс; 1 страна	Прекратил действие
Станция управления штанговыми глубинными насосами	RU 2 525 094 C1 E21B 43/12 F04D 13/10 E21B 47/008	Заявка: 2013115609/03, 05.04.2013 Ямалиев Виль Узбекович (RU), Салахов Тагир Рамилевич (RU), Шубин Станислав Сергеевич (RU)	Устройство для оценки технического состояния установок электроцентробежных насосов в процессе эксплуатации 1 п.; 3 индекса; 1 страна	Прекратил действие
Станция управления штанговыми глубинными насосами	RU 153963 U1 МПК F04B 49/06 E21B 47/00	Заявка: 2015113379/03, 10.04.2015 Салахов Денис Фаимович (RU), Черепанов Дмитрий Александрович (RU), Феофилактов Сергей Владимирович (RU)	Устройство управления электродвигателем насосной установки 1 п.; 2 индекса; 1 страна.	действует
Станция управления штанговыми глубинными насосами	RU 177215 U1 F04B 47/08	Заявка: 2017125313, 07.08.2017 Робин Андрей Викторович (RU), Робина Татьяна Андреевна (RU)	Установка для подъема скважинной жидкости 6 п.; 1 индекс; 1 страна	действует
Станция управления штанговыми глубинными насосами	RU 179 850 U1 F04B 47/06 H02K 41/02	Заявка: 2017141263, 28.11.2017 Вдовин Эдуард Юрьевич (RU), Локшин Лев Иосифович (RU), Лурье Михаил Адольфович (RU), Ошмарин Никита Сергеевич (RU), Тимашев Эдуард Олегович (RU)	Погружной линейный электродвигатель 7 п.; 2 индекса; 1 страна.	действует

Продолжение таблицы 1.4

1	2	3	4	5
Станция управления штанговыми глубинными насосами	RU 2 575 856 C2 E21B 43/00	Заявка: 2014110618/03, 19.03.2014 Галай Михаил Иванович (BY), Демяненко Николай Александрович (BY), Мулица Станислав Иосифович (BY), Третьяков Дмитрий Леонидович (BY), Серебренников Антон Валерьевич (BY), Мануйло Василий Сергеевич (BY), Токарев Вадим Владимирович (BY)	Устройство для добычи нефти с внутрискважинной сепарацией 2 п.; 1 индекс; 1 страна	действует
Станция управления штанговыми глубинными насосами	RU 2 393367 C1 F04B 47/04 F04F 1/06	Заявка: <u>2009116529/06</u> , 30.04.2009 Габдуллин Ривенер Мусавирович (RU)	Насосная глубинная установка 5 п.; 2 индекса; 1 страна	Прекратил действие
Станция управления штанговыми глубинными насосами	RU 2 097 553 C1 E21B 47/04	Заявка: 96112611/03, 25.06.1996 Федотов Василий Иванович[RU], Федотов Андрей Васильевич[UA], Ковалев Роман Викторович[RU]	Устройство для контроля технического состояния штанговых глубинных насосов 1 п.; 1 индекс; 2 страны	Прекратил действие
Станция управления штанговыми глубинными насосами	RU 2 441 151 C1 E21B 47/00	Заявка: <u>2010126823/03</u> , 30.06.2010 Дмитрюков Алексей Юрьевич (RU), Исмагилов Рустам Мидхатович (RU), Валеев Денис Газинурович (RU)	Способ передачи скважинной информации при штанговой насосной добыче 2 п.; 1 индекс; 1 страна	действует
Динамометрирование	RU 183189 U1 F04B 47/02 F04B 49/00	Заявка: <u>2017113059</u> , 14.04.2017 Акимов Дмитрий Владимирович (RU), Шипилов Андрей Игоревич (RU)	Устройство для динамометрирования 1 п., 2 индекса, 1 страна	действует

Продолжение таблицы 1.4

1	2	3	4	5
Динамометрирование	RU <u>184 392</u> U9 G01L 1/20 E21B 47/00	Заявка: <u>2018127783</u> , 27.07.2018 Алатов Сергей Анатольевич (RU), Красовитов Алексей Юрьевич (RU), Сидоров Владимир Васильевич (RU)	Устройство для динамометрирования скважинного штангового насоса 1 п., 2 индекса, 1 страна	действует
Динамометрирование	RU <u>7 456</u> U1 F04B 49/04	Заявка: <u>97115528/20</u> , 17.09.1997 Лавров В.В. (RU), Налимов Г.П (RU),, Гаус П.О. (RU), Якушкин П.Л. (RU)	Устройство динамометрирования скважинных штанговых глубинно- насосных установок 5 п., 1 индекс, 1 страна	Прекратил действие
Динамометрирование	RU <u>98 112</u> <u>315 A</u> E21B 47/00	Заявка: <u>98112315/0</u> <u>3</u> , 23.06.1998 Бородин В.И. (RU)	Устройство для динамометрирования скважинных штанговых насосов 1 п., 1 индекс, 1 страна	заявка на изобрете ние
Динамометрирование	RU <u>129 167</u> U1 F04B 47/00	Заявка: <u>2012143581</u> <u>/06</u> , 11.10.2012 Хакимьянов Марат Ильгизович (RU), Хусаинов Фанур Фаатович (RU)	Устройство для динамометрирования установок штанговых глубинных насосов с пьезогенератором 1 п., 1 индекс, 1 страна	Прекратил действие
Динамометрирование	RU <u>61</u> <u>873 U1</u> G01L 5/16	Заявка: <u>2006135074</u> <u>/22</u> , 03.10.2006 Тухватуллин Фанис Фаритович (RU)	Устройство для динамометрирования рабочих органов сельскохозяйственных машин на повышенных скоростях 1 п., 1 индекс, 1 страна	Прекратил действие
Динамометрирование	RU <u>2 221</u> <u>227 C1</u> G01L 1/22	Заявка: <u>2002110157</u> <u>/11</u> , 17.04.2002 Ковшов В.Д.(RU), Емец С.В.(RU), Хакимьянов М.И.(RU), Павлов О.Б.(RU)	Тензорезисторный датчик усилия для динамометрирования скважинных штанговых насосов 1 п., 1 индекс, 1 страна	Прекратил действие
Динамометрирование	RU <u>61 879</u> U1 G01M 17/02	Заявка: <u>2006135072</u> <u>/22</u> , 03.10.2006 Тухватуллин Фанис Фаритович (RU)	Устройство для динамометрирования опорного колеса сельскохозяйственной машины 1 п., 1 индекс, 1 страна	Прекратил действие

Окончание таблицы 1.4

1	2	3	4	5
Динамометрирование	RU 2 566 398 C1 G01L 5/13	Заявка: <u>2014121178</u> /28, 26.05.2014 Мяленко Виктор Иванович (RU)	Установка для объемного тензометрирования 2 п., 1 индекс, 1 страна	действует
Динамометрирование	RU 2 221 227 C 1 G01L 1/22	Заявка: <u>2002110157</u> /11, 17.04.2002 Ковшов В.Д. (RU), Емец С.В.(RU), Хакимьянов М.И.(RU), Павлов О.Б. (RU)	Тензорезисторный датчик усилия для динамометрирования с кважинных штанговых насосов 1 п., 1 индекс, 1 страна	Прекратил действие
Ваттметрирование	RU 2 190 126 C1 F04B 51/00	Заявка: 2001105021/06, 21.02.2001 Гольдштейн Е.И.(RU), Цапко И.В.(RU), Иванов Д.В.(RU)	Способ диагностики штанговых насосных установок с известным состоянием уравновешенности 1п., 1 индекс, 1 страна	Прекратил действие
Ваттметрирование	RU 120 159 U1 F04D 15/00	Заявка: 2012121334/28, 23.05.2012 Садов Виктор Борисович (RU)	Система управления приводом глубинного штангового насоса 16 п., 1 индекс, 1 страна	Прекратил действие
Ваттметрирование	F04B49/00; G01C9/00; G01L3/00; G01L5/00; G01M13/00; H04W4/38; F04B47/02	Заявка: WO2019053513 FYFE KELLY [CA]; FYFE KIPLING [CA]; WILLIAMS THOMAS [CA] 21.03.2019	Oil-well pump instrumentation device and surface card generation method Устройство установки нефтяного насоса и метод получения поверхностных карт 32 п., 7 индексов, 1 страна	Действует

Найденные патенты могут быть разделены по ключевым словам на следующие группы:

- изобретения в области управления штанговыми глубинными насосами;
- изобретения в области динамометрирования;
- изобретения в области ваттметрирования;

1.7. Выводы

Были рассмотрены общие сведения о штанговых скважинных насосных установках, оборудование входящее в состав ШСНУ и принцип его работы.

Обзор нефтяного фонда скважин показал значительную долю использования ШСНУ в России и важность данного типа добычи нефтепродуктов.

Проведен анализ отказов оборудования ШСНУ, основные причины которого стали обрыв штанг, дефекты клапанов и отказ оборудования вследствие появления эмульсии. При появлении эмульсии необходимо снизить частоту качания ШСНУ, для недопущения появления мелкодисперсной устойчивой эмульсии.

Рассмотрена станция управления, которая предназначена для управления, защиты, контроля параметров и регулирования частоты вращения установки станка-качалки ШСНУ. Выявлены критерии выбора станции управления и ее технические характеристики.

Далее рассмотрены методы и этапы технической диагностики ШСНУ. Приведена классификация методов технического контроля.

Проанализировав методы диагностирования, были выявлены 2 основных метода – метод динамометрирования и метод ваттметрирования. По этим методам описаны основные части и выявлены их преимущества и недостатки.

Проведено патентное исследование по ключевым аспектам данной главы, которое показало нераскрытость темы ваттметрирования в области спектрального анализа параметров ваттметрограммы для контроля возникновения эмульсии.

2. РАЗРАБОТКА МЕТОДА КОНТРОЛЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЭМУЛЬСИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ВАТТМЕТРОГРАММЫ ШТАНГОВОЙ СКВАЖИННОЙ НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ

2.1. Основные сведения о построении и анализе спектра

Для исследования диагностирования ШСНУ по параметрам ваттметрограммы необходимо знать про построение и анализ спектра т.к. по данным ваттметрограммы строится спектр ваттметрограммы.

Практически в каждой технической или энергетической системе приходится встречаться с таким понятием как сигнал, служащий для переноса информации между элементами этой системы. Такие сигналы можно назвать информационными или сигнал – это есть материальный носитель информации. Сигналы существуют как во временной, так и в частотной областях; мы можем одинаково точно думать о них как о значениях, изменяющихся во времени (временная область), или как о сочетаниях основных частот (спектральная область).

Метод определения этих основных частот по временным изменениям называется спектральным разложением Фурье или спектральным анализом. Проиллюстрируем это на рисунке 2.1 для простой формы волны, состоящей из двух синусоидальных волн.

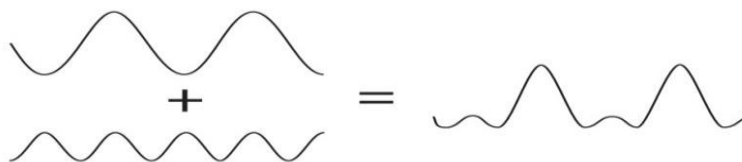


Рисунок 2.1. Сложение синусоидальных волн

Правильно выбирая амплитуды, частоты и фазы этих синусоидальных волн, мы можем генерировать форму волны, идентичную нашему желаемому сигналу [37]. И наоборот, мы можем разбить любой существующий сигнал на те же самые синусоидальные волны. Можно показать, что эта комбинация синусоидальных волн уникальна. Любой сигнал может быть представлен только одной

комбинацией синусоидальных волн [76]. Форма сигнала во временной области не важна в этих сигналах; ключевая информация находится в частоте, фазе и амплитуде составляющих синусоид. Для извлечения этой информации используется быстрое преобразование Фурье [37].

В электроэнергетике и электронике часто используется математическая модель сигнала $F(\omega)$ – функция частоты, известная как спектр сигнала. Функция времени $S(t)$ и спектр описывают один и тот же сигнал, следовательно, они взаимосвязаны. Спектр сигнала существует, если сигнал $S(t)$ можно представить в виде суммы гармонических колебаний [12].

Представление $S(t)$ в виде суммы гармонических колебаний называют спектральным разложением Фурье, которое в 1965 году, благодаря появлению второго поколения ЭВМ (переход к транзисторной элементной базе, появление первого монитора с параметрами: производительность – $5 \cdot 10^4$ коротких операций в секунду, разрядность – 24–48 бит, емкость ОЗУ–64–512 Кбайт) сделало цифровые вычисления спектра практически осуществимыми.

Рисунок 2.2 представляет собой трехмерный график сложения синусоидальных волн. Две оси - это время и амплитуда, по временной области. Третья ось - это частота, которая позволяет нам визуальнo отделять синусоидальные волны, чтобы дать нам нашу сложную форму волны. Если мы наложим этот трехмерный график вдоль оси частот, мы получим представление в рисунке 2.2. б). Это представление синусоидальных волн во временной области. Сложение их вместе в каждый момент времени дает исходную форму сигнала.

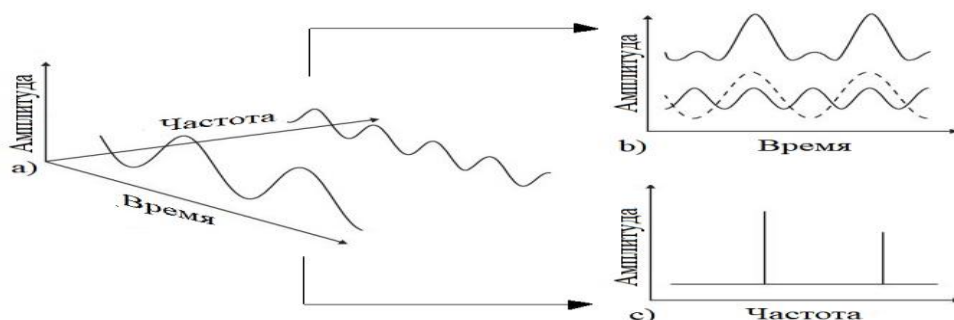


Рисунок 2.2. Взаимосвязь между временной и частотной областями.

а) Трехмерные координаты времени, частоты и амплитуды

б) Временная область с) Частотная область

Однако, если мы посмотрим на наш график вдоль оси частоты, как показано на рисунке 2.2 с), мы получим совершенно иную картину. Здесь у нас есть оси амплитуды и частоты, то, что обычно называют частотной областью. Каждая отдельная волна, которую мы отделили от входного сигнала, отображается в виде вертикальной линии. Её высота представляет амплитуду сигнала, а положение вертикальной линии представляет частоту этого сигнала. Исходя из рисунков 2.2б и 2.2с, видим, что каждая линия представляет собой синусоидальную волну, мы однозначно охарактеризовали наш входной сигнал в частотной области. Это представление частотной области нашего сигнала называется спектром сигнала. Каждая синусоидальная линия спектра является составляющей общего сигнала.

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

$$S(t) = A \cos(2\pi ft + \Phi) \quad (2.1)$$

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 любой, но обязательно положительной величиной. Частота f является физическим параметром, размерность которого Герц.

В теории сигналов под энергией сигнала понимается величина:

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} S^2(t) dt \quad (2.2)$$

В свою очередь, средняя мощность в общем виде определяется как

$$P_{cp} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} S^2(t) dt \quad (2.3)$$

Если средняя мощность является конечной, а – энергия сигнала E бесконечная величина, то спектральное разложение сигнала $S(t)$ имеет вид ряда

$$S(t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cos(\omega_n t + \Phi_n) \quad (2.4)$$

Если энергия сигнала E - конечная величина, спектральное разложение имеет интегральное представление

$$S(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} F(\omega) \cos \omega t + \Phi(\omega) d\omega \quad (2.5)$$

В разложении (2.4) частота принимает дискретные значения ω_n . Множество амплитуд A_n и множество начальных фаз Φ_n гармонических колебаний представляют дискретный спектр сигнала $S(t)$.

В разложении (2.5) роль амплитуды играет дифференциал

$$dA = \frac{1}{\pi} F(\omega) d\omega \quad (2.6)$$

Сигнал $S(t)$, в данном случае, формируется суммой гармонических колебаний *всех частот*. Амплитуда (2.6) на фиксированной частоте бесконечно мала и её значение не определено, поскольку бесконечно малый интервал частот d не имеет конкретного значения. Однако сигнал (2.5) полностью определен, если известны *амплитудная спектральная плотность* $F(\omega)$ и начальная фаза (ω) как функции частоты. Функции $F(\omega)$ и $\Phi(\omega)$ представляют непрерывный спектр сигнала $S(t)$ [38].

Анализ выражений (2.4) и (2.5), дает понять, что они имеют общие свойства, следовательно, спектр сигнала $S(t)$ – это есть множество начальных фаз гармонических колебаний кратных частот и амплитуд, сумма которых равна сигналу $S(t)$.

Спектр периодического сигнала

Сигнал $S_T(t)$ называется периодическим, если все его значения повторяются через промежутки времени, кратные T , где T – период повторения сигнала, $k \in \mathbb{Z}$. Такой сигнал можно разложить в гармонический ряд Фурье:

$$S_T(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cdot \cos 2\pi n F_1 t + b_n \cdot \sin 2\pi n F_1 t) \quad (2.7)$$

где A_0 – постоянная составляющая сигнала, определяемая выражением

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s_T(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T s_T(t) dt. \quad (2.8)$$

Частота первой гармоники F_1 обратно пропорциональна периоду сигнала

$$F_1 = \frac{1}{T} \quad (2.9)$$

Коэффициенты ряда Фурье a_n и b_n определяются выражениями:

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s_T(t) \cdot \cos(2\pi n F_1 t) dt, \\ b_n &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s_T(t) \cdot \sin(2\pi n F_1 t) dt, \end{aligned} \quad (2.10)$$

Зависимость коэффициентов $\{A_0, a_n, b_n\}$ от частоты называют гармоническим спектром периодического сигнала в квадратурной форме. Эта зависимость изображается в виде дискретной функции частоты для значений $f = n \cdot F_1$, $n = 1, 2, \dots, \infty$. Коэффициент A_0 определен при $f = 0$. Если функция сигнала $s(t)$ нечётная, то коэффициенты $a_n = 0$, если чётная, то $b_n = 0$.

Периодический сигнал $S_T(t)$ также можно представить в амплитудно-фазовой форме ряда Фурье:

$$S_T(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \cos(2\pi n F_1 t + \phi_n) \quad (2.11)$$

где $n \cdot F_1$ – частота n -й гармоники периодического сигнала.

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \quad (2.12)$$

где A_n – амплитуда n -й гармоники периодического сигнала, определяемая по формуле:

$$\phi_n = \begin{cases} -\operatorname{arctg} \frac{b_n}{a_n}, & a > 0, \\ -\operatorname{arctg} \frac{b_n}{a_n} \pm \pi, & a < 0, \end{cases} \quad (2.13)$$

где ϕ_n – начальная фаза n -й гармоники периодического сигнала

Односторонним фазовым спектром сигнала называют зависимость начальной фазы гармоник от частоты, в то же время односторонний амплитудный спектр есть зависимость амплитуд гармоник периодического сигнала от частоты.

Обе зависимости определены для значений частоты $f = n \cdot F_1$, $n = 1, 2, \dots, \infty$.
Общий вид этих зависимостей приведен на рисунке 2.3.

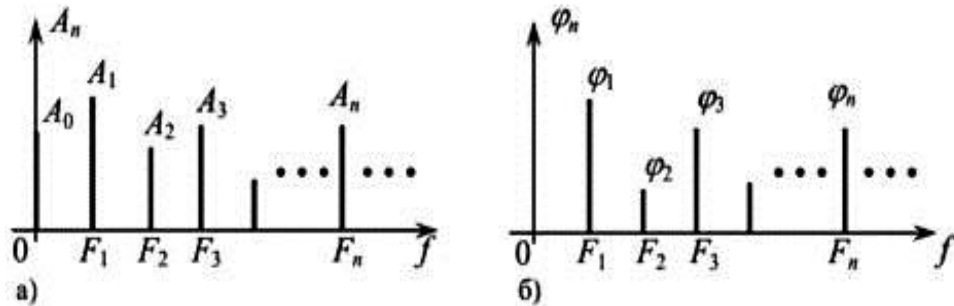


Рисунок 2.3. Односторонний спектр периодического сигнала:
а) амплитудный спектр, б) фазный спектр

Для расчета односторонних спектров необходимо знать аналитическое выражение сигнала $S(t)$. Тогда по формуле (2.8) вычисляется постоянная составляющая сигнала A_0 , по формуле (2.9) – частота первой гармоники F_1 , по формулам (2.10) – коэффициенты a_n, b_n , по формулам (2.12) и (2.13) – амплитуды и начальные фазы гармоник сигнала.

На рисунке 2.4 показано преобразование гармонического сигнала первой, третьей и пятой гармоник в амплитудно-частотный спектральный вид.

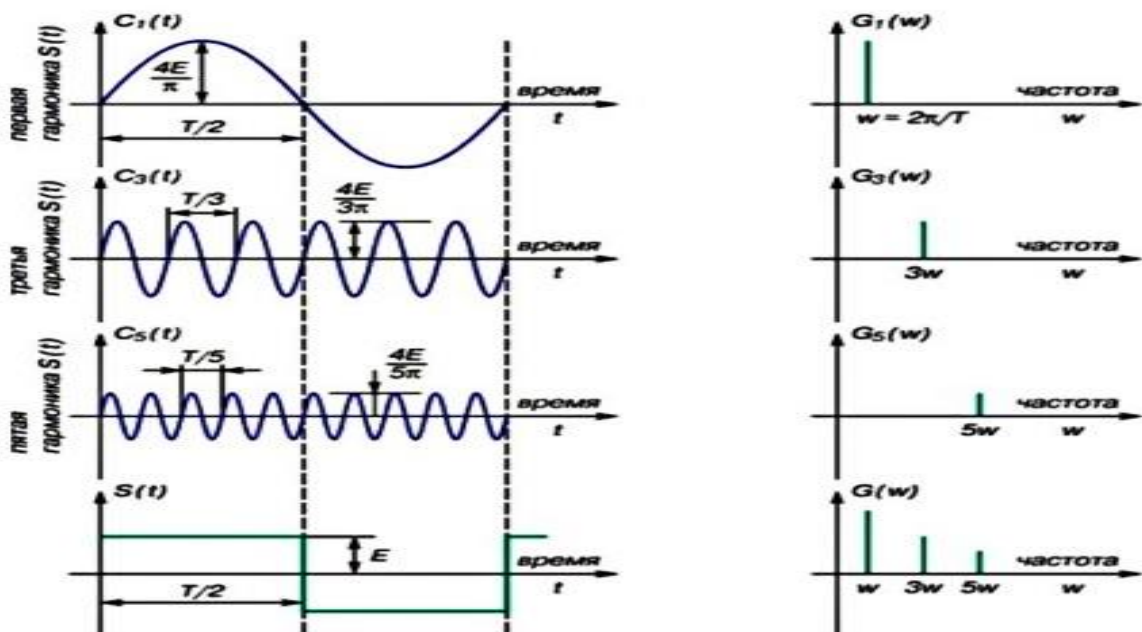


Рисунок 2.4. Преобразование Фурье для представления гармонического сигнала в спектр

2.2. Дискретные сигналы и дискретное преобразование Фурье

С развитием цифровой техники изменились и способы хранения данных, измерений сигналов. Если раньше сигнал мог записываться на магнитофон и храниться на ленте в аналоговом виде, то сейчас сигналы оцифровываются и хранятся в файлах в памяти компьютера в виде набора чисел (отсчетов).

В нашем случае блок-схема измерения и оцифровки сигнала представлена на рисунке 2.5

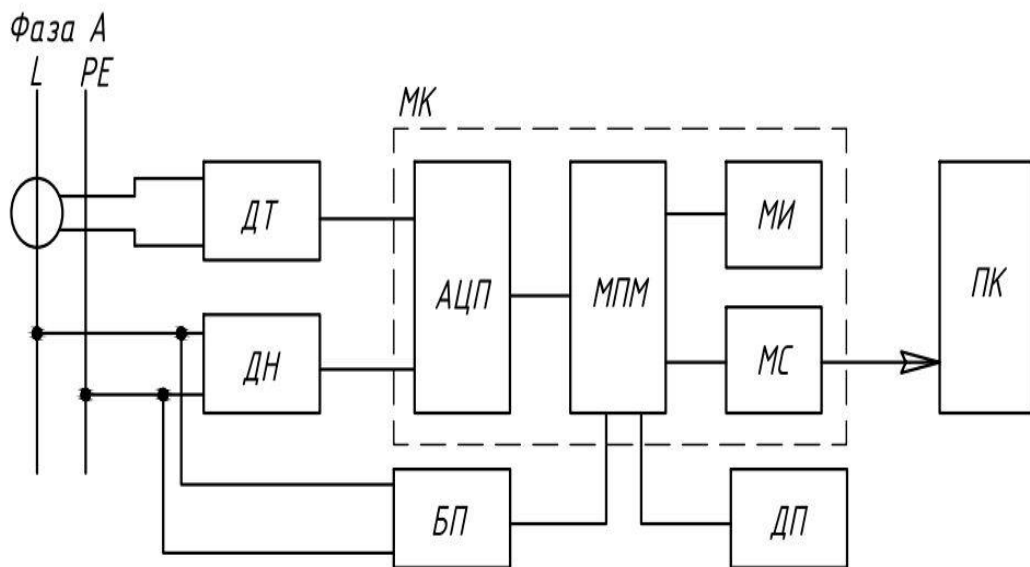


Рисунок 2.5. Блок-схема прибора контроля и диагностики ШСНУ. ДТ, ДН - датчики тока и напряжения, БП - блок питания прибора, АЦП - аналого-цифровой преобразователь, МПМ - микропроцессорный модуль, МИ - модуль индикации, МС - модуль связи, МК – микроконтроллер, ДП – датчик положения балансира ШСНУ

Сигнал с измерительного преобразователя поступает на АЦП в течение периода времени T . Полученные за время T отсчеты сигнала (выборка) передаются в компьютер и сохраняются в памяти.

Устройство, преобразующее входной аналоговый сигнал в дискретный код (цифровой сигнал) называется аналого-цифровой преобразователь (АЦП).

Одним из основных параметров АЦП является максимальная частота дискретизации— частота взятия отсчетов непрерывного во времени сигнала при его дискретизации. Измеряется в герцах (Гц).

Согласно теореме Котельникова, если непрерывный сигнал имеет спектр, ограниченный частотой $F_{\text{макс}}$, то он может быть полностью и однозначно восстановлен по его дискретным отсчетам, взятым через интервалы времени:

$$T = \frac{1}{2 \cdot F_{\text{макс}}} \quad (2.14)$$

Таким образом, частота дискретизации должна быть равна:

$$F_d \geq 2 \cdot F_{\text{макс}} \quad (2.15)$$

где F_d — частота дискретизации; $F_{\text{макс}}$ — максимальная частота спектра сигнала. Другими словами частота оцифровки сигнала (частота дискретизации АЦП) должна как минимум в 2 раза превышать максимальную частоту сигнала, который мы хотим измерить.

Для того чтобы вычислить спектр сигнала по его дискретным отсчетам используется дискретное преобразование Фурье (ДПФ). Отметим еще раз, что спектр дискретного сигнала по определению ограничен частотой $F_{\text{макс}}$, меньшей половине частоты дискретизации F_d . Поэтому спектр дискретного сигнала может быть представлен суммой конечного числа гармонических составляющих, в отличие от бесконечной суммы для ряда Фурье непрерывного сигнала, спектр которого может быть неограничен.

Согласно теореме Котельникова максимальная частота гармонических составляющих должна быть такой, чтобы на нее приходилось как минимум два отсчета, поэтому число гармонических составляющих равно половине числа отсчетов дискретного сигнала. То есть если в выборке имеется N отсчетов, то число гармонических составляющих в спектре будет равно $N/2$.

Рассмотрим теперь дискретное преобразование Фурье (ДПФ).

$$u_k = \sum_{n=1}^{N/2} (a_n \cdot \cos(n\omega_1 t_k) + b_n \sin(n\omega_1 t_k)],$$

$$t_k = k\tau, k = 0, 1, 2, \dots, N-1, \omega_1 = \frac{2\pi}{T}. \quad (2.15)$$

Сравнивая с рядом Фурье:

$$u_k = \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cdot \cos n\omega_1 t + b_n \sin n\omega_1 t) \quad (2.16)$$

Видно, что они совпадают, за исключением того, что время в ДПФ имеет дискретный характер, и число гармонических составляющих ограничено величиной $N/2$ — половиной числа отсчетов.

Формулы ДПФ записываются в безразмерных целых переменных n , s , где n — номера отсчетов сигнала, s — номера спектральных составляющих.

Величина s показывает количество полных колебаний гармонических составляющих на периоде T (длительности измерения сигнала). Дискретное преобразование Фурье используется для нахождения амплитуд и фаз гармоник численным методом с помощью программного обеспечения Matlab.

Таким образом, данная методика обработки позволит построить спектр дискретного конечного сигнала ваттметрограммы.

2.3. Ваттметрирование ШСНУ

Ваттметрирование является одним из основных по информативности методом контроля и диагностики оборудования ШСНУ. К достоинствам ваттметрирования необходимо отнести такие факторы, как простота измерения ваттметрограмм (требуется установка только измерительных трансформаторов тока и напряжения на трех фазах двигателя), возможность ведения учета потребляемой приводом электроэнергии (станции управления могут быть интегрированы в системы коммерческого и технического учета электроэнергии) [5].

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

Исходными данными для анализа является сам массив ваттметрограммы за один период качания, полученный путем измерения мгновенных значений тока и

напряжения с их последующим перемножением. Необходимо выделить, то что из массивов мгновенных значений тока и напряжения могут быть получены соответствующие параметры: действующие значения токов и напряжений по каждой фазе, активная, реактивная и полная мощности, коэффициент мощности.

Массив — упорядоченный набор элементов, каждый из которых хранит одно значение, массив имеет постоянную длину и хранит единицы данных одного и того же типа, а в качестве индексов выступают числа (точки).

Обработка ваттметрограммы начинается с построения основного графика, рисунок 2.6.

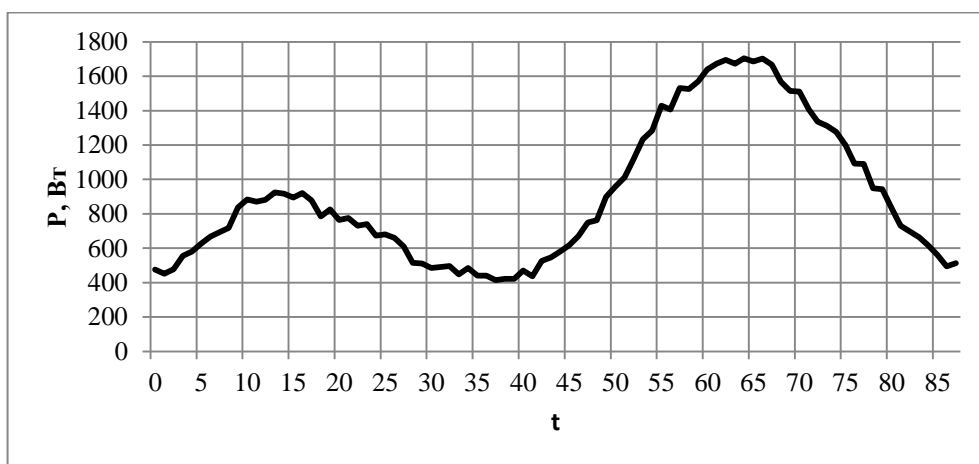


Рисунок 2.6 График ваттметрограммы

После производится построение спектра ваттметрограммы. Построение спектра ваттметрограммы иллюстрируется на рисунке 2.7. По спектру можно диагностировать как механические дефекты, так и электрические. Все зависит от частоты дискретизации сигнала — частоты взятия отсчетов непрерывного по времени сигнала. Если прибор, у которого частота дискретизации равна и превышает частоту электрического тока, то с помощью него можно диагностировать электрические дефекты электрического двигателя, в противном случае диагностировать удастся только механические дефекты и образование эмульсии.

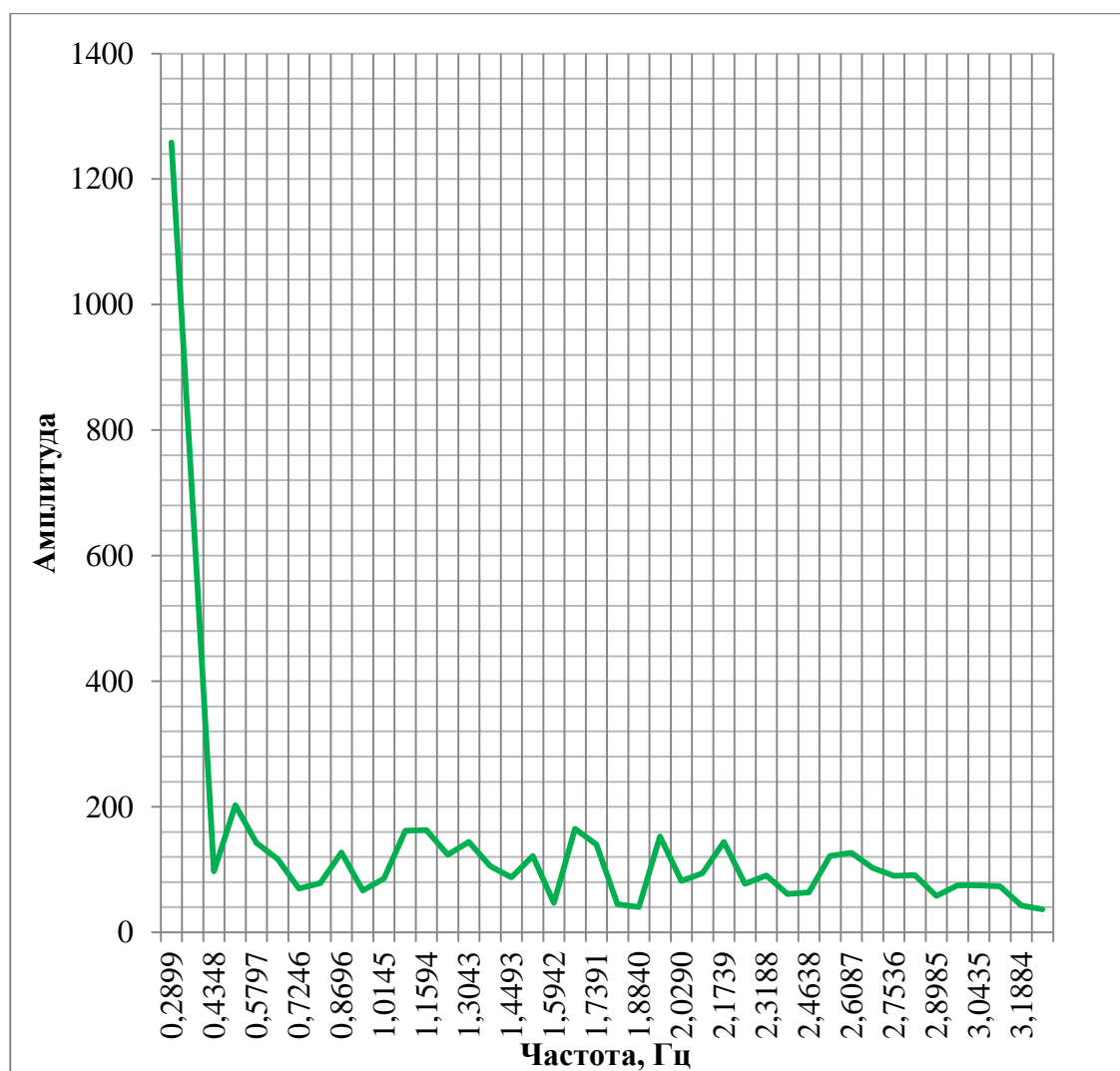


Рисунок 2.7 Спектр ваттметрограммы при нормальной работе

2.4. Определение неисправностей по ваттметрограммам и их спектрам

Рассмотрим ваттметрограммы и их спектры при различных дефектах с частотой дискретизации 50 Гц.

Первая рассматриваемая неисправность это обрыв штанг - самая распространённая причина отказов, как показал литературный обзор (таблица 1.2.) Обрыв штанг и истирание насосно-компрессорной трубы происходят в результате трения штанг или муфт о стенки труб при длительной их работе в искривленных скважинах. Износ труб, штанг и их муфт также зависит от гладкости трущихся поверхностей и отношения их твердостей, наличия в

продукции скважины пластовой минерализованной воды, которая вызывает коррозию труб и штанг и ослабляет их прочность [25].

Ниже приведена ваттметрограмма (рисунок 2.8.) и спектр ваттметрограммы (Рисунок 2.9.) при дефекте – обрыв штанг.

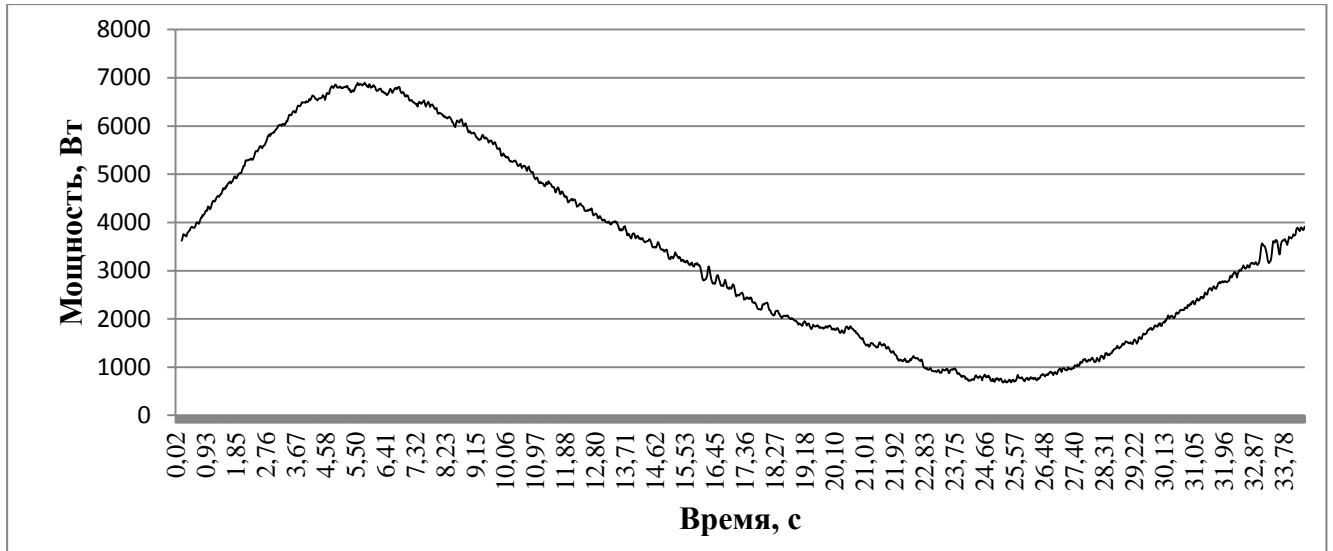


Рисунок 2.8. Ваттметрограмма при обрыве штанг

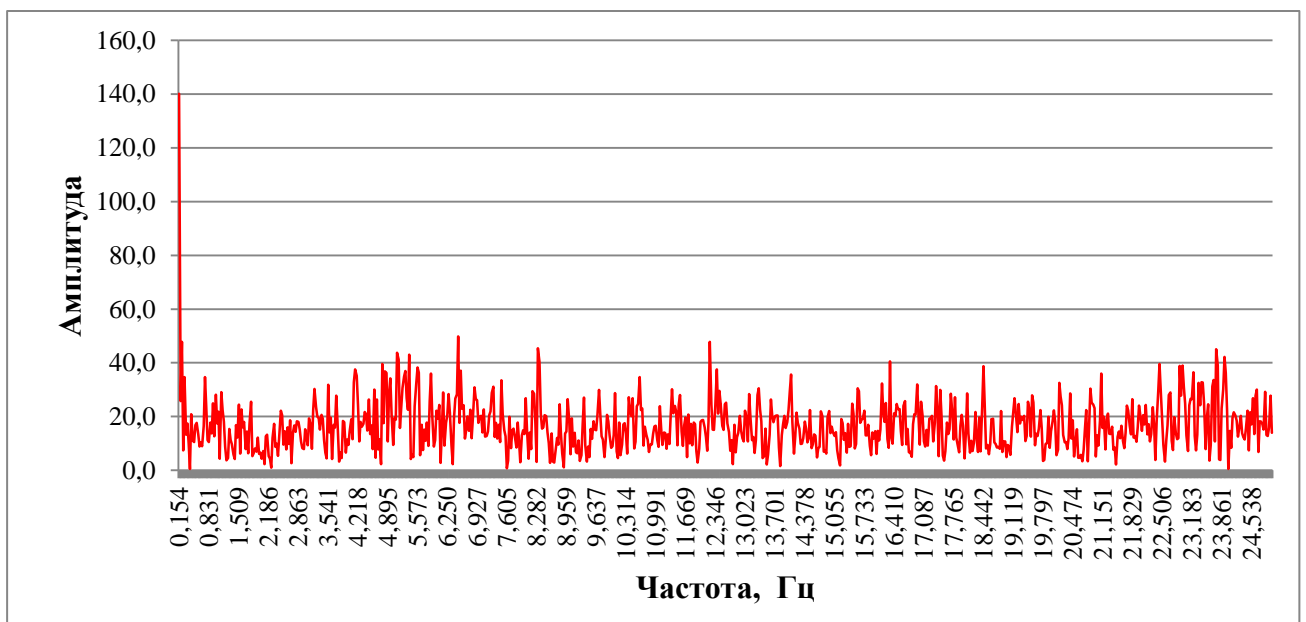


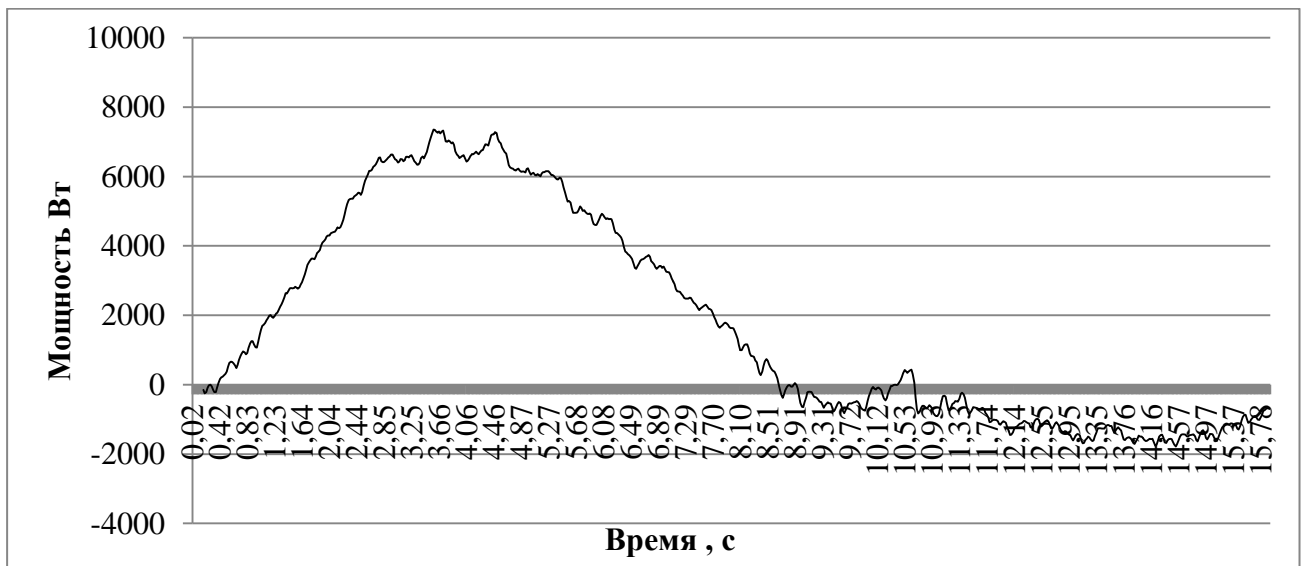
Рисунок 2.9 Спектр ваттметрограммы при обрыве штанг

Вторая рассматриваемая неисправность это неисправность клапанов - нагнетательного и приёмного, приводящая к аварийной остановке ШСНУ.

При неисправности нагнетательного клапана первой ступени часть сжатого газа через неисправный клапан возвращается в цилиндр, и объем засасываемого

насосом свежего газа уменьшается, что также ведет к снижению производительности насоса. Кроме того, во время остановки насоса маховик немного поворачивается в обратную сторону, так как в цилиндре с неисправным нагнетательным клапаном поршень устанавливается в нижней мертвой точке и может произойти быстрое выравнивание давления между нагнетанием и всасыванием.

На рисунке 2.10 изображена ваттметриграмма исходная при дефекте нагнетательного клапана. И соответствующий ей спектр (рисунок 2.11). Также при данном замере наблюдались такие дефекты как неудовлетворительное состояние балансировки станка-качалки, а именно велик груз балансира.



2.10. Ваттметриграмма при дефекте нагнетательного клапана

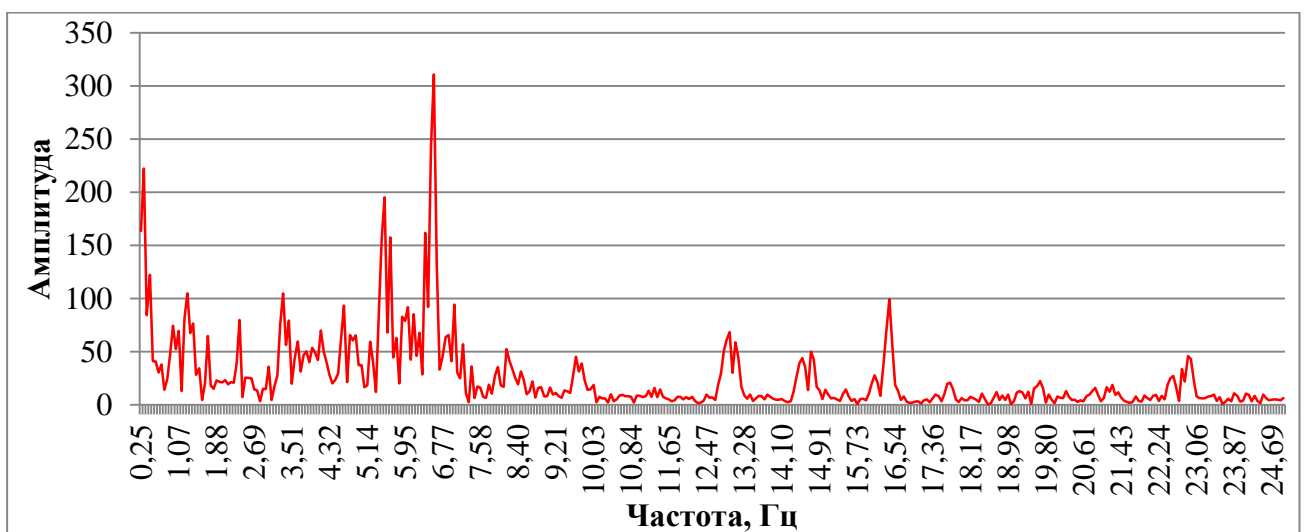
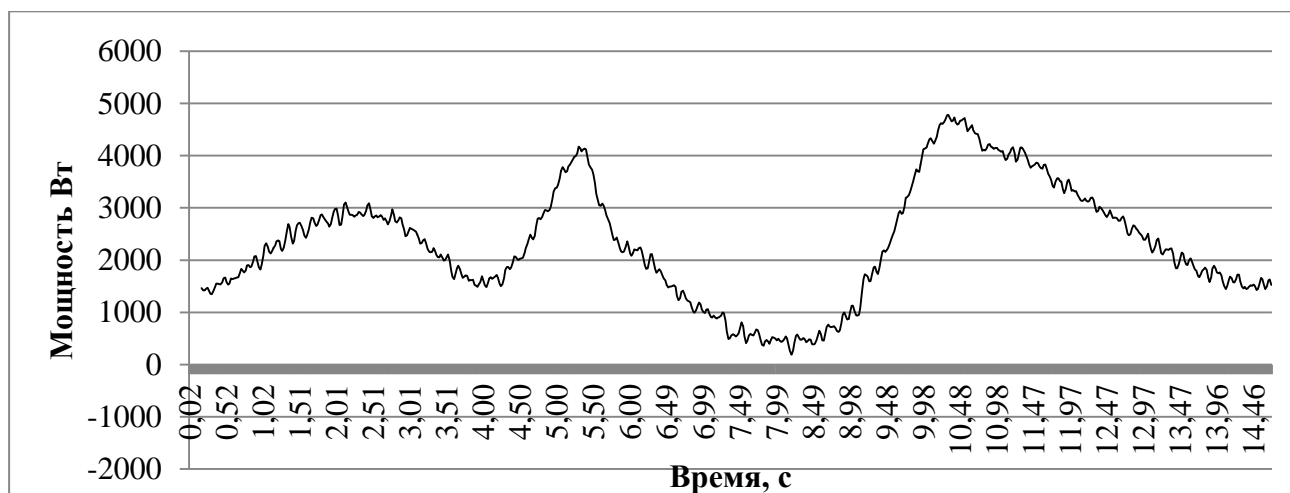


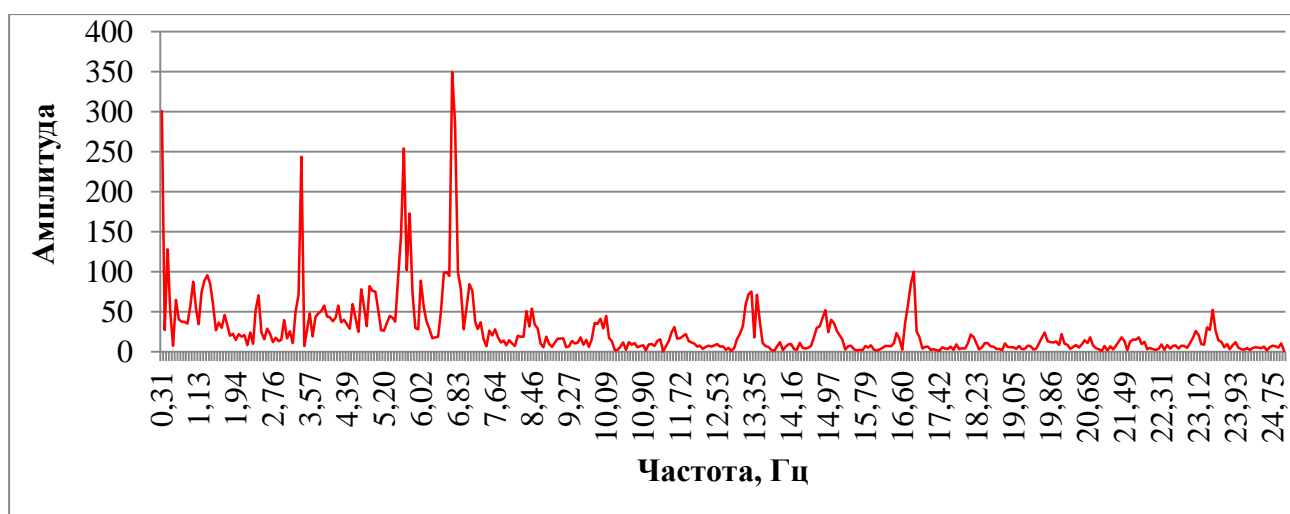
Рисунок 2.11 Спектр ваттметриграммы при дефекте нагнетательного клапана

Одной из главных причин снижения срока службы клапанов, в том числе приёмного (всасывающего) являются некачественное изготовление деталей и небрежная сборка его узлов. Между трущимися поверхностями плунжера и цилиндра, в которых находятся клапаны, в отдельных сопрягающихся точках или площадках возникают значительные удельные давления, которые приводят к увеличению силы трения при движении плунжера в цилиндре, из-за песка и коррозии [32].

Ниже изображены ваттметрограмма (рисунок 2.12), и спектр ваттметрограммы (рисунок 2.13.) с неисправностью приемного клапана. При данной неисправности возможны потери мощности в таких узлах как: зубчатая передача "промежуточный вал - ведомый вал" редуктора и клиноременная передача.



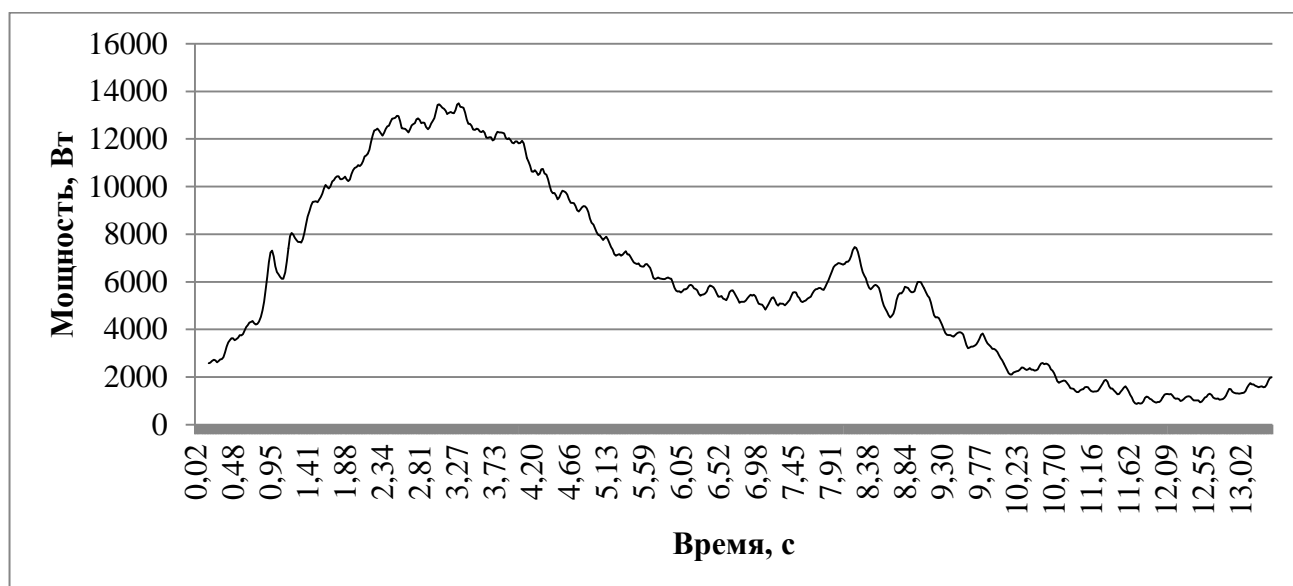
2.12. Ваттметрограмма при дефекте приемного клапана



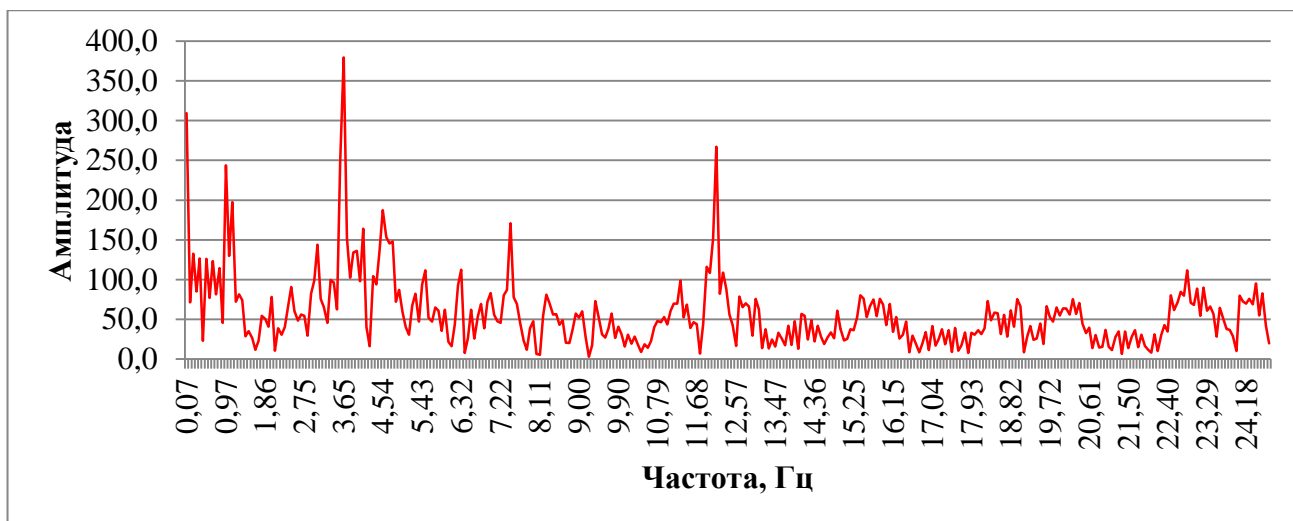
2.13. Спектр ваттметрограммы при дефекте приемного клапана

Третья рассматриваемая неисправность это отложения парафина и асфальтосмолопарафинов. При отложении парафина в клапанах насоса, поверхностях и стенках труб и штанг нарушается нормальная работа насоса. При этом снижается площадь проходного сечения между подъемными трубами и штангами, повышаются гидравлические давления на плунжерную пару, что приводит к утечкам жидкости через их зазоры. Из-за интенсивного отложения парафина происходят обрывы штанг либо поломка их в нижней части ближе к плунжеру при появлении осевых нагрузок, также увеличиваются нагрузки на головку балансира станка-качалки, уменьшается коэффициент подачи, нарушается её уравниваемость [44]. При подъеме штанг в период ремонта вставной насос или плунжер срезает парафин со стенок насосно-компрессорной трубы и образует над собой сплошную парафиновую пробку, которая выталкивает нефть из труб и загрязняет территорию возле скважины. Иногда становится невозможным подъем колонны штанг из-за уплотнения парафина.

Ваттметрограмма при запарафировании насоса показана на рисунке 2.14. Далее изображен спектр при данной неисправности (рисунок 2.15.). Вследствие данного негативного явления возможно развитие разбалансировки станка-качалки и выход из строя нагнетательного и приемного клапанов.



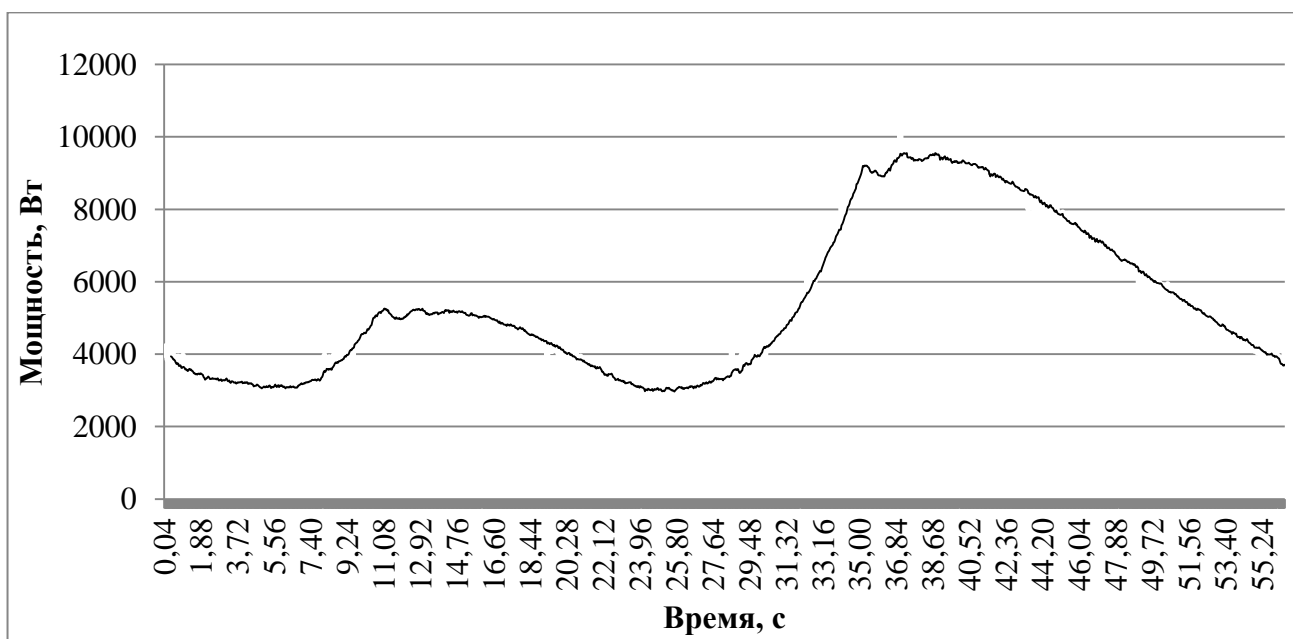
2.14. Ваттметрограмма при запарафировании насоса



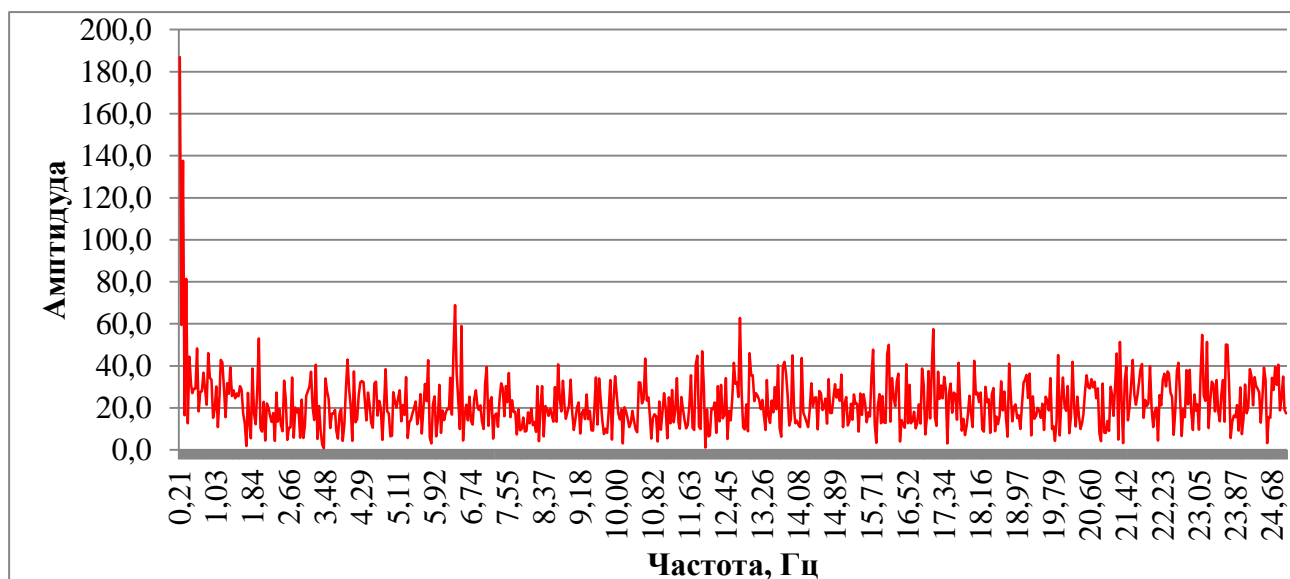
2.15. Спектр ваттметрограммы при запаривании насоса

Четвертая рассматриваемая неисправность это попадание свободного газа в цилиндр насоса. В итоге происходит снижение коэффициента наполнения насоса вплоть до нарушения подачи. Уровень негативного воздействия газа зависит от величины газового фактора и от объема, возникающего между нагнетательным и всасывающим клапанами при ходе вверх (объем мертвого пространства) [60].

На рисунке 2.16 изображена ваттметрограмма при наличии газа в цилиндре насоса. А также соответствующий спектр данной неисправности (рисунок 2.17).



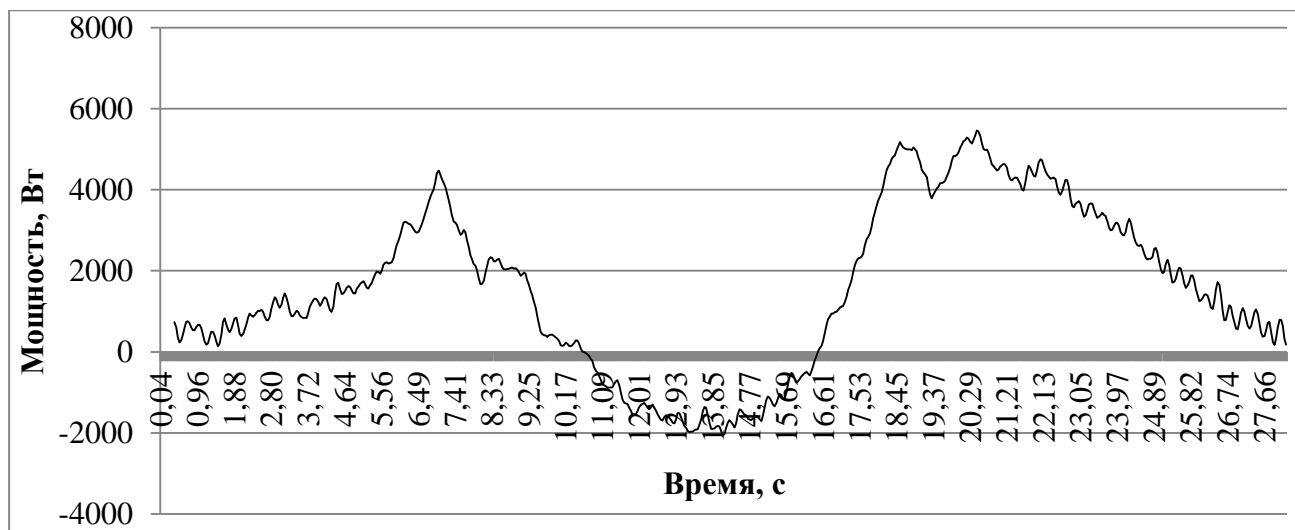
2.16. Ваттметрограмма при наличии газа в цилиндрах ШСНУ



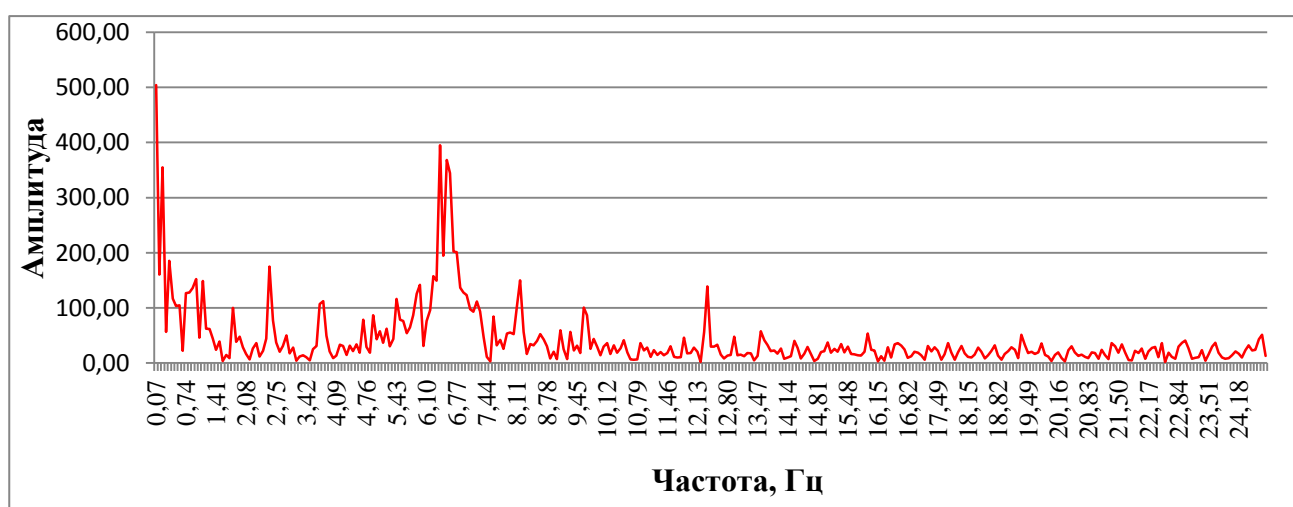
2.17. Спектр ваттметрограммы при наличии газа в цилиндрах ШСНУ

Пятая рассматриваемая неисправность это неисправность редуктора. Редуктор является одним из самых ответственных и дорогостоящих узлов СК. Сбой в работе редуктора ведет к простоя скважины, снижению коэффициента использования оборудования, повышению себестоимости добычи нефти [57]. Существует ряд неисправностей редуктора, которые не приводят к аварии одновременно. К таким неисправностям относится: шум в редукторе, вибрации в редукторе, удары и стуки промежуточного вала подшипников, износ шпонки шкива, с последующим сходом с вала, ослабление крепления редуктора, протечки масла по валу, отсутствие масла, износ вала, износ шкива редуктора, выход из строя подшипников на ведомом и промежуточных валах. На продолжительность работы всех узлов станка-качалки во время эксплуатации в особенности редуктора существенно влияют уравновешенность станка-качалки.

Ниже изображена ваттметрограмма (рисунок 2.18.) и спектр ваттметрограммы (рисунок 2.19.) с неисправностью редуктора. Вследствие данной неисправности также замечены потери мощности в ведущем вале редуктора, зубчатой передачи (промежуточный вал – ведомый вал редуктора) и в клиноременной передаче.



2.18. Ваттметрограмма при неисправности редуктора ШСНУ



2.19. Спектр ваттметрограммы при неисправности редуктора ШСНУ

Как видно из текущих ваттметрограмм (рисунки 2.8 – 2.18) их неисправности можно диагностировать по форме графика ваттметрограмм, в отличие от возникновения эмульсии в цилиндре насоса ШСНУ, где необходимо прибегать к спектральному анализу ваттметрограммы.

2.5. Метод контроля возникновения эмульсии с применением спектрального анализа ваттметрограммы

Образование эмульсий начинается при движении нефти к устью скважины и продолжается при дальнейшем движении по промышленным коммуникациям, т. е. эмульсии образуются там, где происходит непрерывное перемешивание нефти и воды.

При глубиннонасосной добыче нефти эмульгирование происходит в клапанных коробках, самих клапанах, в цилиндре насоса, в подъемных трубах при возвратно-поступательном движении насосных штанг. Эмульсия в цилиндре насоса возникает в основном из-за слишком быстрой добычи нефтепродукта.

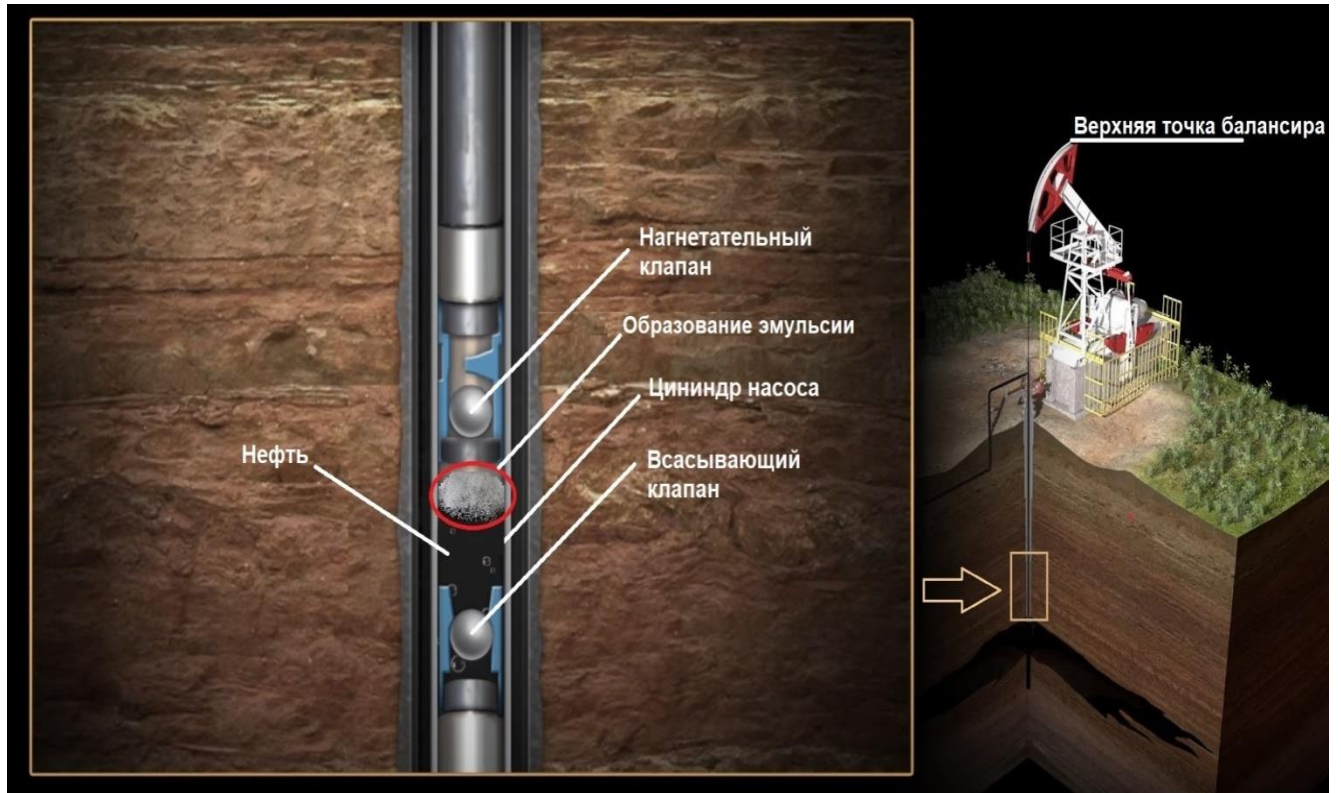


Рисунок 2.20. Эмульсия в цилиндре насоса с демонстрацией положения балансира

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 (рисунок 2.20). Содержание в нефти воды называется нефтяной эмульсией – это есть механическая смесь нефти и пластовой воды, нерастворимых друг в друге и находящихся в мелкодисперсном состоянии (в виде мелких капель) (Рисунок 2.21) [77].

Вязкость эмульсий не обладает аддитивным свойством, т.е. вязкость эмульсий не равна сумме вязкостей нефти и воды. Вязкость эмульсии зависит от

вязкости самой нефти, температуры, при которой создается эмульсия, количества воды, содержащейся в нефти, степени дисперсности или диаметра капель дисперсной фазы в дисперсионной среде.

У нефтяных эмульсий и парафинистых нефтей, не подчиняющихся закону Ньютона о вязком трении, вязкость изменяется в зависимости от градиента скорости движения нефти. В этом случае оперируют понятием кажущейся вязкости.

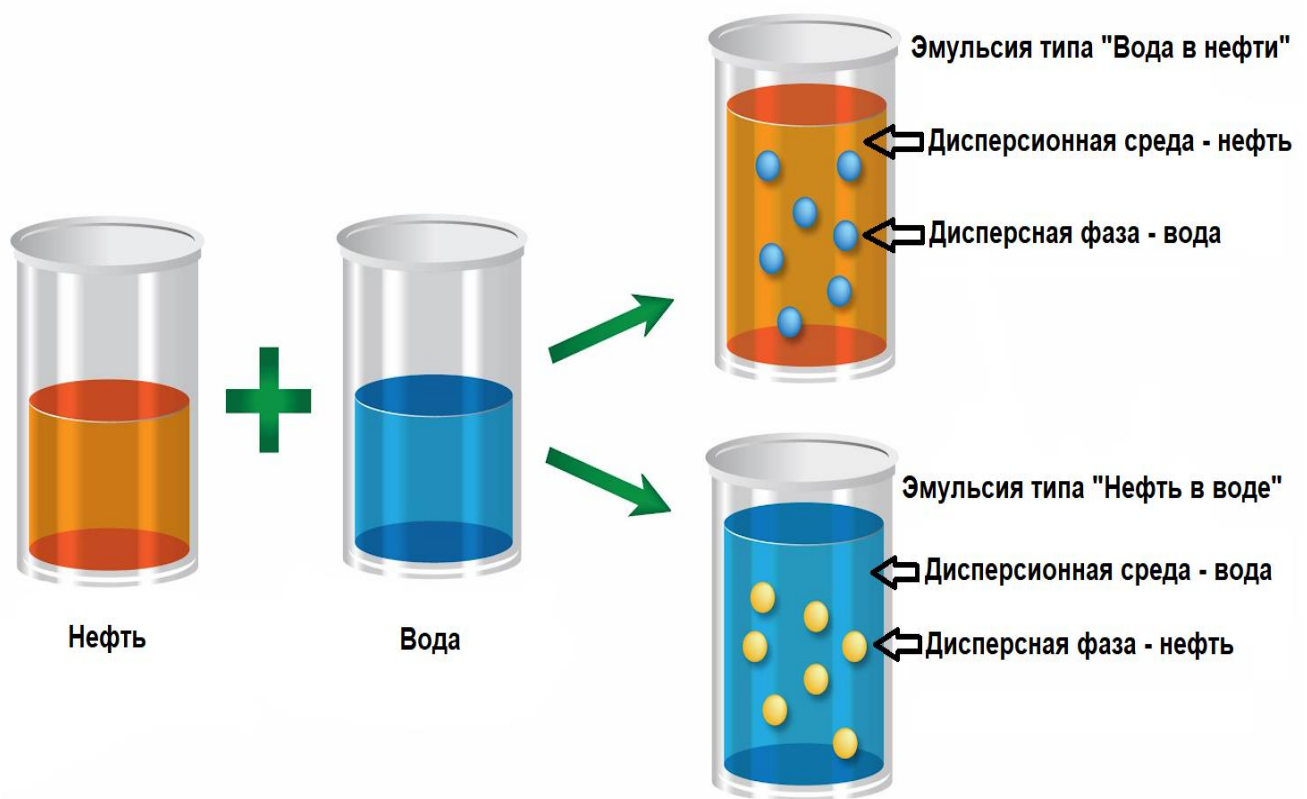


Рисунок 2.21. Типы эмульсий

Увеличение воды в нефтяной эмульсии до определенного предела (точки инверсии), а именно перехода из состояния «вода в нефти» в состояние «нефть в воде», приводит к повышению вязкости 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.

На рисунке 2.22 представлена ваттметрограмма скважины при нормальной работе ШСНУ без образования эмульсии.

Данная ваттметрограмма принята эталоном для скважины, т.к. построена по методу средней точки из десяти ваттметрограмм, которые были замерены при нормальной работе после запуска ШСНУ. При измерении данных ваттметрограмм не было обнаружено механических дефектов, а потребление электроэнергии двигателем было близко к номинальному значению по паспортным данным.

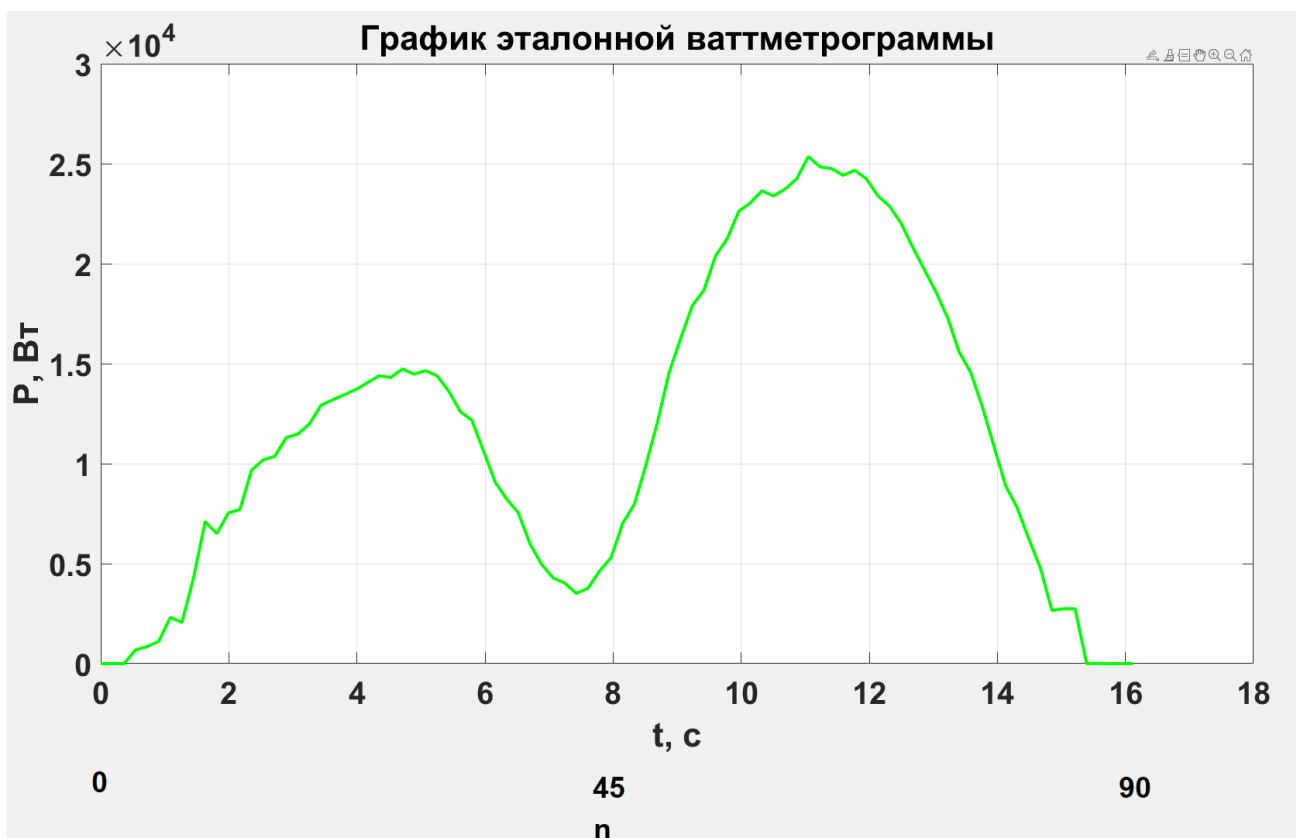


Рисунок 2.22. Ваттметрограмма при нормальной работе ШСНУ

Построим соответствующий ей спектр в программе Matlab, отфильтровывая низкочастотную составляющую 0-0,3Гц, для наиболее оптимального спектрального анализа (Рисунок 2.23)



Рисунок 2.23. Спектр ваттметрограммы при нормальной работе ШСНУ без образования эмульсии

На рисунке 2.24 представим данный спектр в виде гистограммы.

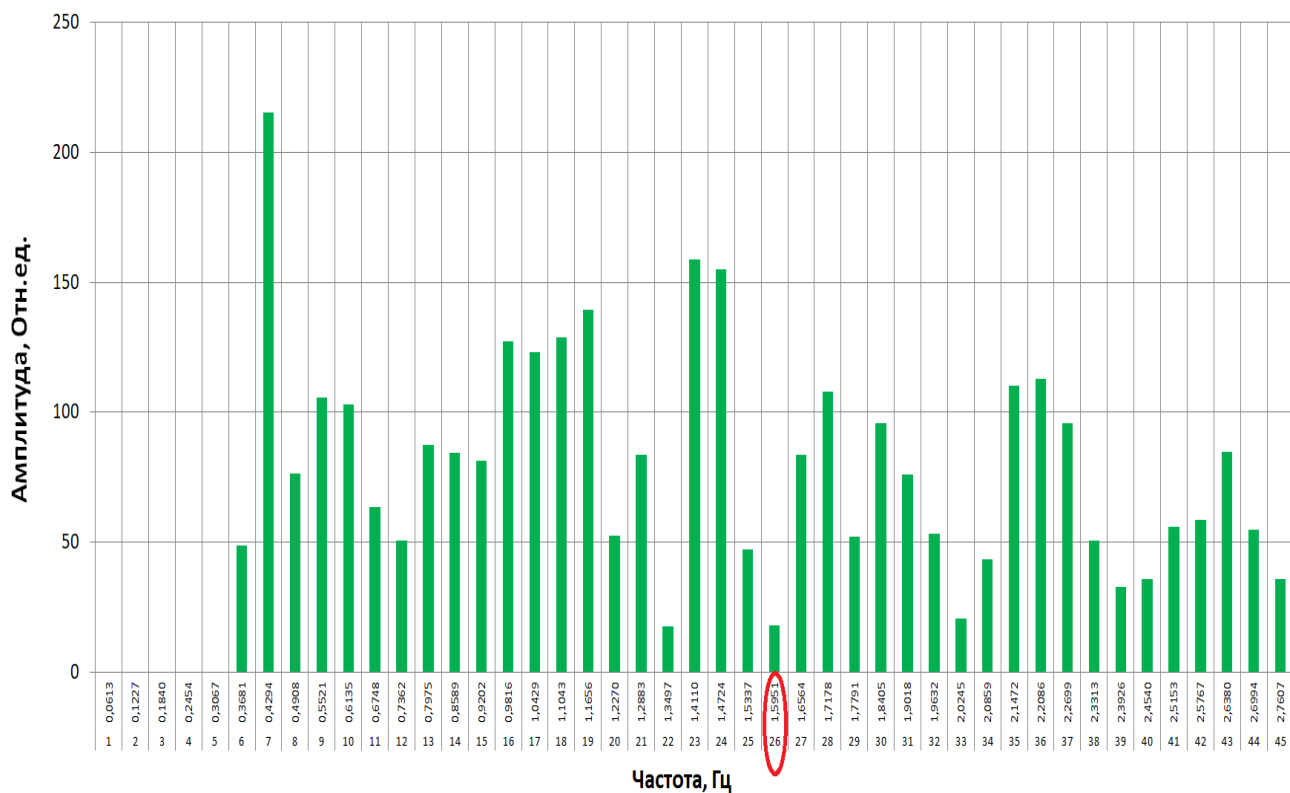


Рисунок 2.24. Представление полученного спектра в виде гистограммы

Для сравнения данных спектров и ваттметрограмм построим ваттметрограмму и спектр, полученные при максимальном образовании эмульсии в цилиндре насоса ШСНУ.

На рисунке 2.25 показана ваттметрограмма станка-качалки с образованием эмульсии в цилиндре насоса ШСНУ.



Рисунок 2.25. Ваттметрограмма при максимальном образовании эмульсии в цилиндре насоса ШСНУ

По ваттметрограмме можно заметить увеличение потребляемой мощности в пиковых точках, которые мы можем наблюдать в красных отметках на рисунке 2.25. Повышенная нагрузка в данных точках может свидетельствовать об образовании эмульсии нефтяной жидкости в цилиндре насоса.

Но в тоже время форма графика ваттметрограммы очень схожа по своей форме с такими дефектами, как проблема с нагнетательным клапаном и удар плунжера насоса о клапан при неправильной посадке насоса. Поэтому именно спектральный анализ ваттметрограммы позволяет выявить образование эмульсии.

Построим соответствующий ей спектр в программе Matlab, отфильтровывая низкочастотную составляющую 0-0,3Гц, для наиболее оптимального спектрального анализа (Рисунок 2.26)

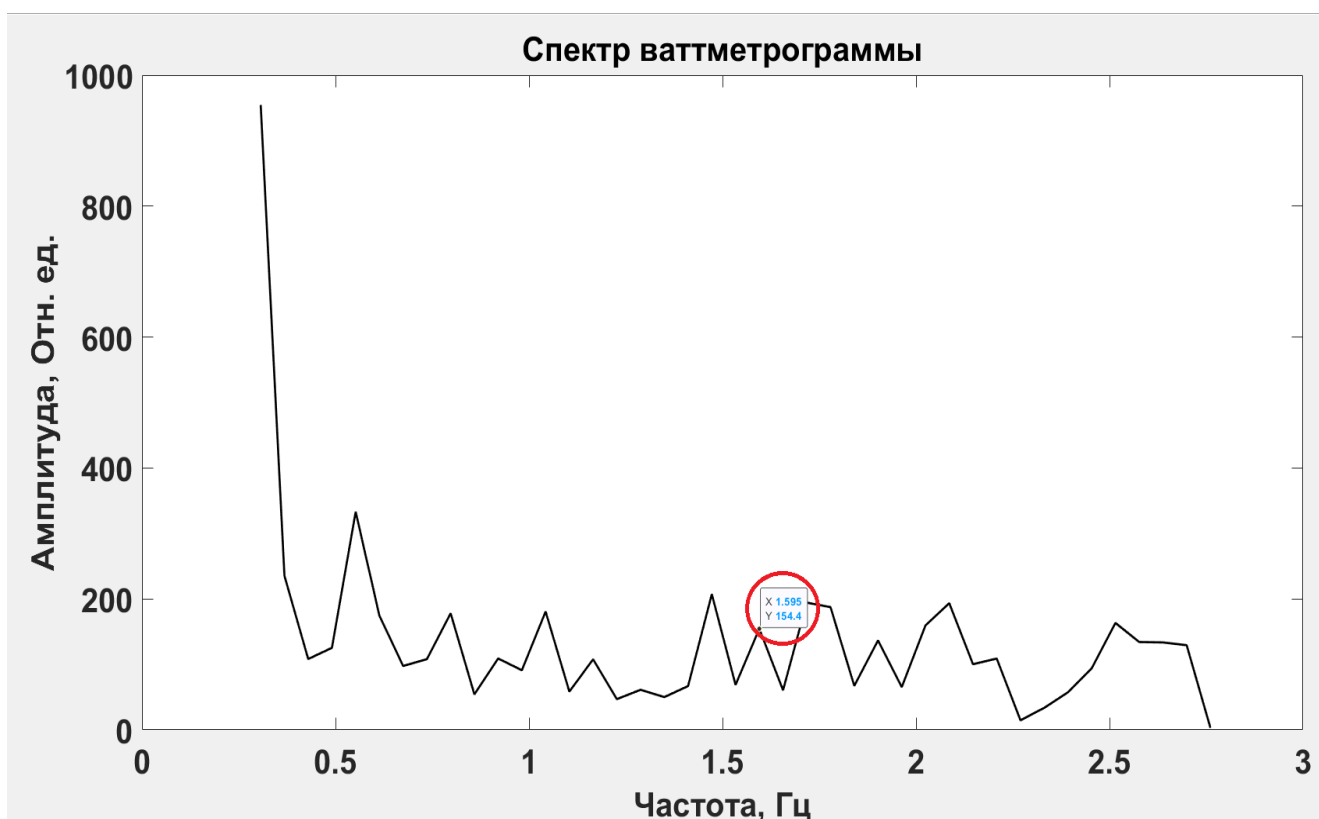


Рисунок 2.26. Спектр ваттметрограммы при нормальной работе ШСНУ без образования эмульсии

На рисунке 2.27 представим данный спектр в виде гистограммы.

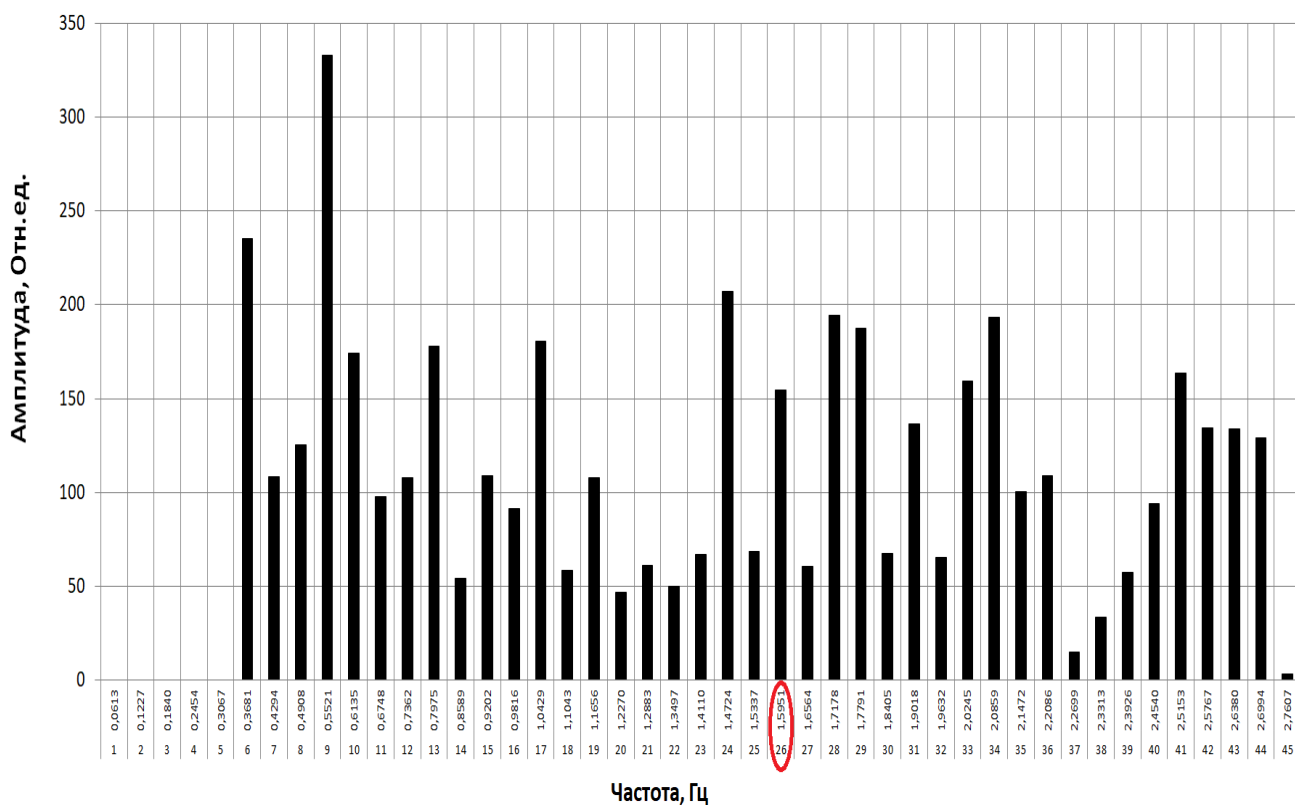


Рисунок 2.27. Представление полученного спектра в виде гистограммы

При разработке метода при спектральном анализе удалось выявить прямую корреляцию на 26 гармонической составляющей, от нормальной работы до момента аварийного отключения ШСНУ в связи с образованием эмульсии. Разработка метода велась на основе данных, полученных на трех разных скважинах, на которых наблюдались осложненные условия работы с процессом образования эмульсии, при этом на каждой из скважин были получены данные не менее 20 случаев образования эмульсии.

Необходимо отметить, что по определению реальный измеренный сигнал ваттметрограммы, длительностью T сек, оцифрованный АЦП, то есть представленный набором дискретных отсчетов (N штук), имеет дискретный непериодический спектр, представленный набором гармонических составляющих ($N/2$ штук).

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

Для наглядности изобразим на рисунке 2.28, 26 гармоническую составляющую при росте образования эмульсии от нормального (эталонного) состояния ШСНУ до предаварийного состояния в связи с эмульсией, включая предыдущие измерения ваттметрограмм и построенных спектров, с сохранением цветов в обозначении сигнала на графике (рисунки 2.23-2.27)

Таким образом метод состоит в том, что ваттметрограмма, полученная прибором, передается на обработку в ПО MATLAB, которое возвращает массив амплитуд спектра. Из массива данных выделяется значение, соответствующее 26 гармонической составляющей, которая была принята как основная при выявлении процесса образования эмульсии. Данной гармонической составляющей соответствует различная частота, зависящая от параметров станка-качалки, и в частности периода качания, а значит и частоты дискретизации сигнала.

Выявление образования эмульсии производится путем сравнения амплитуды полученного сигнала с амплитудой эталонного сигнала.

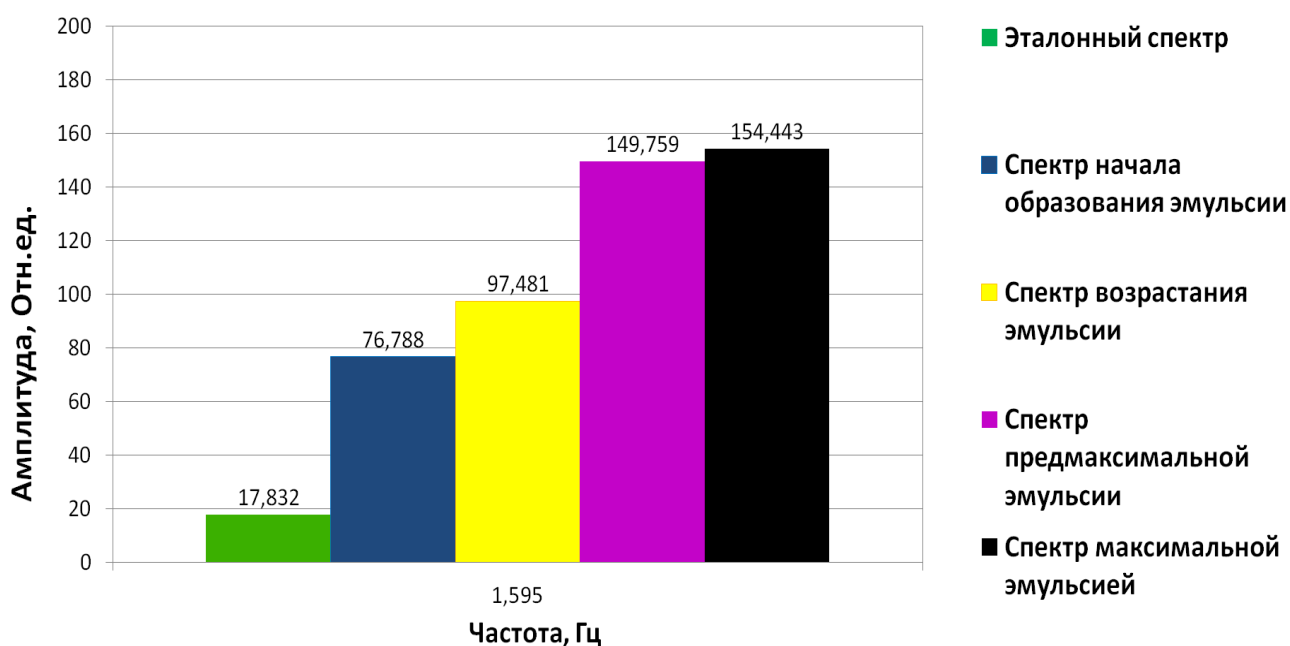


Рисунок 2.28. 26 гармоническая составляющая спектров в процессе образования эмульсии

По причине того, что каждая скважина имеет свои параметры работы и влияния пластовой жидкости на процесс добычи, становится невозможным задаться эталонным сигналом, так как он будет различным для каждой скважины.

Поэтому в предлагаемом методе принято, что эталонным будет являться сигнал, полученный при первом запуске станка-качалки с внедренным прибором определения образования эмульсии, или при изменении режима работы, например скорости качания.

В процессе работы станка-качалки производится постоянное сравнение амплитуды спектра текущего качания с эталонным, и при отклонении амплитуды текущего качания более чем на 30% от амплитуды, принятой за эталон, формируется команда о возникновении эмульсии.

В процессе экспериментов с образованием эмульсии в ШСНУ выяснилось, что наименьшая вероятность образования эмульсии наблюдается при первом пуске после длительного простоя. В этот момент складываются самые благоприятные условия для создания эталонного значения параметра. Эталонное значение создается после пуска ШСНУ. При этом выполняется накопление 10 последних ваттметрограмм, получение спектров сигнала 26 гармонической составляющей, соответствующей образованию эмульсии, их усреднение и

сравнение со спектром сигнала текущей ваттметрограммы. В случае отсутствия процесса образования эмульсии в насосе ШСНУ, отклонения данного сигнала от среднего 10 предыдущих качаний, будет минимальным. В противном случае, при значительном отклонении сигнала от среднего, процесс создания эталона будет продолжаться до стабилизации параметра, но не более 100 качаний (в этом случае эталон будет создан по последним 20 качаниям). В случае успешного создания эталона, по прошествии трех часов работы вновь выполняется проверка среднего значения сигнала за 10 качаний с эталонным значением, и в случае снижения сигнала более чем на 10 %, выполняется корректировка значения эталона. Данное изменение эталона говорит о возможной стабилизации процесса добычи во время работы. Графическое представление процесса создания и корректировки эталонного значения сигнала показано на рисунке 2.29.

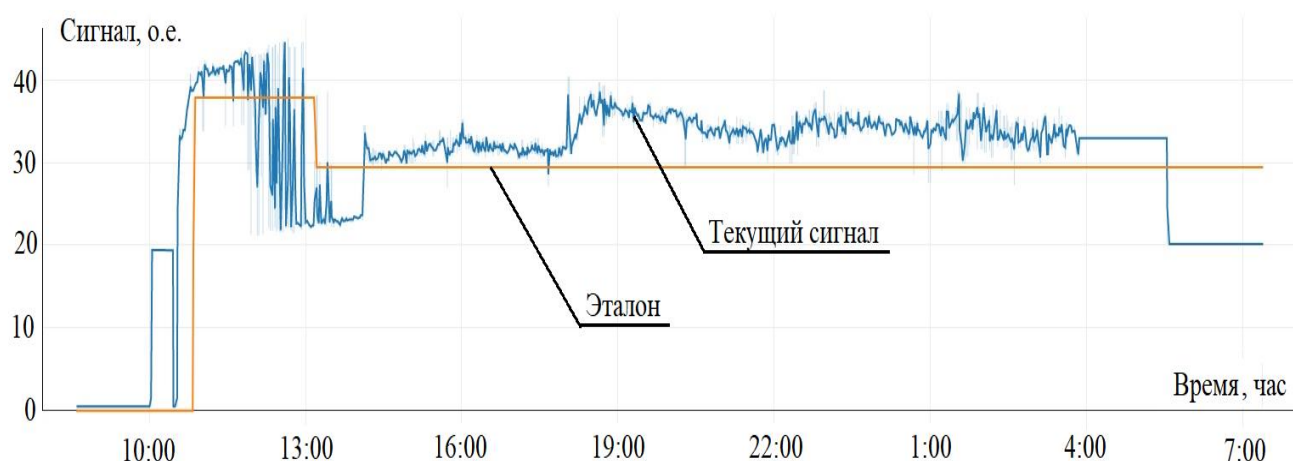


Рисунок 2.29. Процесс создания эталона и его корректировка

2.6. Выводы

1. Приведены основные сведения о построении и анализе спектра.
2. Раскрыт вопрос о методе ваттметрирования ШСНУ и построении ваттметрограммы.
3. Построен спектр ваттметрограммы, по спектру можно диагностировать как механические и электрические дефекты, так и образование эмульсии.

4. Рассмотрены и определены по ваттметрограммам и их спектрам шесть неисправностей ШСНУ.

5. Необходимо отметить, что если дефекты или возникновение эмульсии нельзя диагностировать по ваттметрограммам, то стоит прибегнуть к спектральному анализу данного массива ваттметрограммы.

6. Реальный измеренный сигнал, длительностью T сек, оцифрованный АЦП, то есть представленный набором дискретных отсчетов (N штук), имеет дискретный непериодический спектр, представленный набором гармонических составляющих ($N/2$ шт.).

7. Разработан метод контроля возникновения эмульсии с применением спектрального анализа ваттметрограммы.

3. РАЗРАБОТКА ПРИБОРА КОНТРОЛЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЭМУЛЬСИИ

3.1. Аппаратно-программная платформа для ваттметрирования

В основе разработанного прибора контроля эмульсии лежит микроконтроллерное устройство (МКУ) на базе микроконтроллера Atmega 2560. (рисунок 3.1). Для программирования используется язык программирования и программное обеспечение на основе языка C++. Программное обеспечение работает в операционных системах Windows, Macintosh OSX и Linux [24].

Программное обеспечение данного микроконтроллера публикуется в виде инструментов с открытым исходным кодом, доступных для расширения опытными программистами [27]. Язык может быть расширен с помощью библиотек C++.

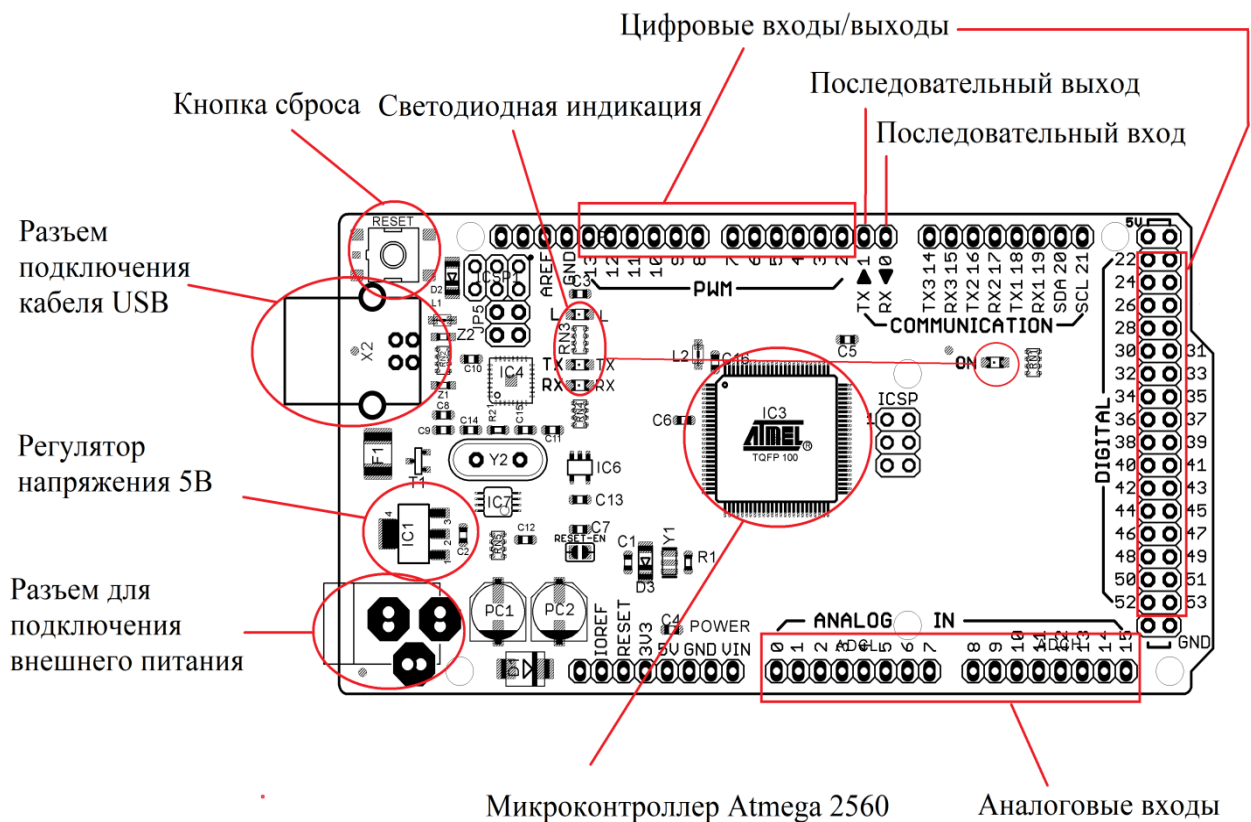


Рисунок 3.1. Микроконтроллерное устройство на базе микроконтроллера ATmega2560

Микроконтроллер имеет в своем составе следующие порты ввода/вывода:

- Цифровые входы/выходы: логический уровень единицы — 5 В, нуля — 0 В. Максимальный ток выхода — 40 мА.
- ШИМ: позволяет выводить аналоговые значения в виде ШИМ-сигнала. Разрядность ШИМ не меняется и установлена в 8 бит.
- АЦП: позволяет представить аналоговое напряжение в цифровом виде. Разрядность АЦП не меняется и установлена в 10 бит. Диапазон входного напряжения от 0 до 5 В.
- TWI/I²C: для общения с периферией по интерфейсу I²C.
- SPI: для общения с периферией по интерфейсу SPI.
- UART: используется для коммуникации платы с компьютером или другими устройствами по последовательному интерфейсу.

3.2. Измерительные датчики тока и напряжения

3.2.1. Датчик на основе эффекта Холла

Датчик тока с эффектом Холла - это тип датчика, который определяет наличие и величину магнитного поля, используя эффект Холла. Назван датчик в честь американского физика Эдвина Холла.

Датчик тока с эффектом Холла обеспечивает высокий уровень безопасности благодаря гальванической развязке между датчиком и измеряемым током [33]. Это также позволяет избежать значительного рассеивания мощности шунтирующего резистора, используемого в резистивных методах измерения тока.

На рисунке 3.2. показан принцип работы датчика Холла, где измеряемый ток $I_{\text{вх}}$ протекает по проводнику, который находится внутри магнитного сердечника. Таким образом, ток создает магнитное поле внутри сердечника. Магнитная индукция B и напряжение Холла, создаются измеряемым первичным током $I_{\text{вх}}$, который пропорционально преобразовывается в выходной ток $I_{\text{вых}}$ датчика.

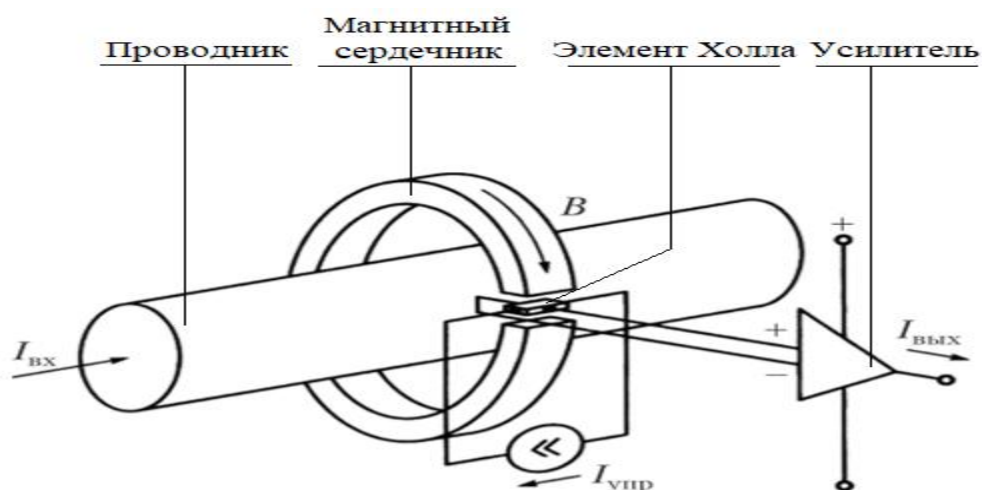


Рисунок 3.2 Принцип работы датчика, основанного на эффекте Холла

В датчике Холла ток $I_{упр}$ подается на тонкую полоску металла, называемую элементом Холла, далее в присутствии магнитного поля, перпендикулярного направлению тока, носители заряда отклоняются силой Лоренца, создавая разницу в электрическом потенциале (напряжении) между двумя сторонами полосы. Эта разность напряжений (напряжение Холла) пропорциональна напряженности магнитного поля. Следовательно, выход датчика Холла представляет собой напряжение, пропорциональное магнитному полю сердечника, которое также пропорционально входному току. Сигнал, создаваемый устройством Холла, обычно обрабатывается схемой формирования сигнала. Схема формирования сигнала может представлять собой простой каскад усиления или более сложную схему, предназначенную для устранения ошибки дрейфа устройства Холла и т.д.

3.2.2. Трансформаторный датчик тока

Трансформаторный датчик тока в основном представляет собой неинвазивный датчик тока, принцип которого похож на работу трансформатора. Трансформатор тока представляет собой тип «измерительного трансформатора», который предназначен для выработки переменного тока во вторичной обмотке, пропорционального измеряемому току в первичной обмотке. Трансформаторы

тока уменьшают токи высокого напряжения до гораздо меньшего значения и обеспечивают удобный способ безопасного контроля фактического электрического тока, протекающего в линии передачи переменного тока, с помощью стандартного амперметра.

Силовой кабель пропускается через датчик, и является первичной обмоткой трансформатора с одним витком. На магнитопровод намотан тонкий медный провод в несколько тысяч витков (например, для модели SCT-013-030 количество витков вторичной обмотки составляет 2000). Таким образом, 100А переменного тока силового кабеля создают 50 мА тока во вторичной обмотке. Соответственно, двухжильный вывод датчика и создает переменный ток, величина которого прямо пропорциональна току силового кабеля.

Трансформатор тока, как и любой другой трансформатор, должен удовлетворять уравнению коэффициента трансформации, где соотношение витков равно:

$$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}; \quad (3.1)$$

где N_1 и N_2 – количество витков первичной и вторичной обмотки; I_1 и I_2 – показатели силы тока в первичной и вторичной обмотке [42].

Коэффициент тока устанавливает соотношение витков, и поскольку первичная обмотка обычно состоит из одного или двух витков, в то время как вторичная обмотка может иметь несколько сотен витков, соотношение между первичной и вторичной обмотками может быть довольно большим. Например, предположим, что номинальный ток первичной обмотки равен 100А. Вторичная обмотка имеет стандартную номинальную мощность 5А. Тогда соотношение между первичным и вторичным токами составляет 100А к 5А, или 20:1 т.е. первичный ток в 20 раз больше, чем вторичный ток.

Аналоговые цифровые преобразователи микроконтроллеров способны воспринимать только напряжение, а не ток. Соответственно, вторичную обмотку нужно нагрузить нагрузочным резистором – на его концах и появится напряжение. Однако это напряжение будет переменным, а АЦП

микроконтроллера способно воспринимать только положительное напряжение. Для этого необходимо поднять ноль на половину напряжение питания микроконтроллера (МК), это будет половина от 5В. Делается это классическим делителем напряжения из двух одинаковых резисторов по 10 кОм каждый. Кроме того, стоит поставить конденсатор между землей и половиной питания.

Технические характеристики трансформаторного датчика тока YHDC SCT-013-000 приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Технические характеристики датчика тока YHDC SCT-013-000

Рабочая температура	-25 ~ + 70 °С
Номинальный рабочий ток измерения	до 100 А
Погрешность	до 1%
Напряжение питания	5В
Выходящий ток	0-50мА
Температура хранения	-25 ~ + 70 °С
Время отклика	< 3 μs
Вес	63 г

Принципиальная схема показана на рисунке 3.3.

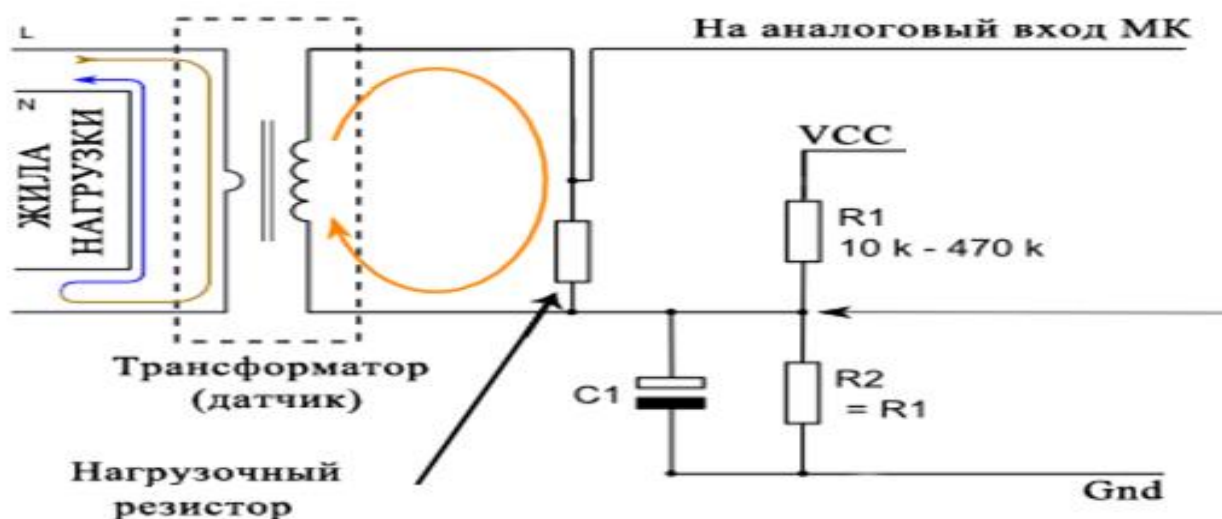


Рисунок 3.3. Принципиальная схема работы трансформаторного датчика тока

Для аппаратно-программной платформы ваттметра используется модель SCT-013-000, компании YHDC (рисунок 3.4.)



Рисунок 3.4. Трансформаторный датчик тока YHDC SCT-013-000

В приборостроении понятие точность – это предел допустимой погрешности при использовании прибора в нормальных условиях эксплуатации.

На рисунке 3.5. изображена схема подключения трансформаторного датчика тока YHDC SCT-013-000 с реальными габаритными размерами.

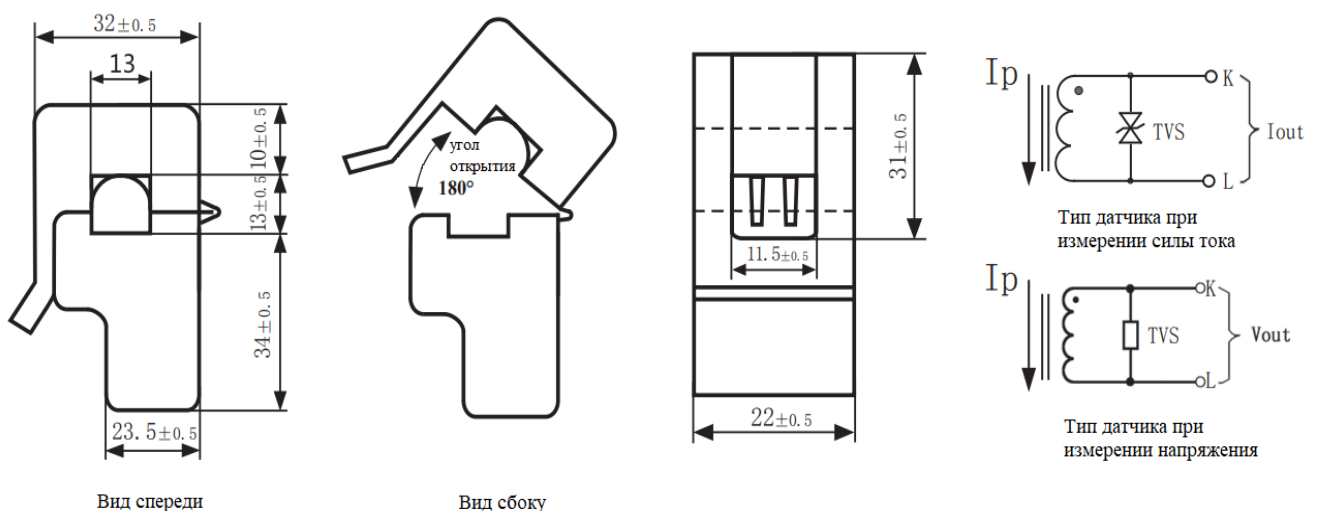


Рисунок 3.5. Схема подключения датчика тока YHDC SCT-013-000

3.2.3. Трансформаторный датчик напряжения

Модуль датчика напряжения переменного тока ZMPT101B (рисунок 3.6) основан на высокоточном трансформаторе напряжения ZMPT101B. Датчик напряжения переменного тока ZMPT101B лучше всего подходит, где нам нужно измерить точное напряжение переменного тока с помощью трансформатора напряжения. Это идеальный выбор для измерения напряжения переменного тока с

использованием микроконтроллерного устройства в качестве платформы с открытым исходным кодом. Во многих электротехнических проектах инженер непосредственно занимается измерениями с несколькими основными требованиями, такими как высокая гальваническая развязка, широкий диапазон, высокая точность, хорошая согласованность.

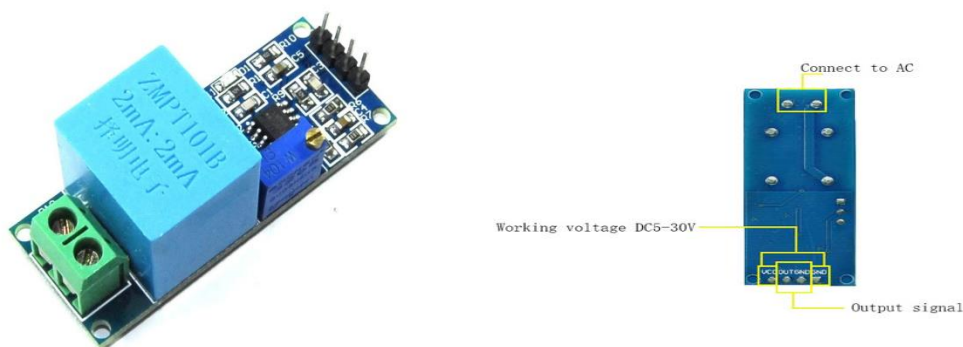


Рисунок 3.6. Датчик напряжения переменного тока ZMPT101B

ZMPT101B – модуль на основе одноимённого понижающего трансформатора напряжения, позволяющий измерять напряжение переменного тока от 0 до 1000 В. Для приведения показаний в читаемый микроконтроллером вид используется операционный усилитель, установленный на плату [54]. В модуль встроен прецизионный миниатюрный трансформатор напряжения, модуль трансформатора выходного напряжения переменного тока активной фазы, также встроена прецизионная схема операционного усилителя, дискретизация сигнала и соответствующая компенсация для точных функций. Модули могут быть измерены в пределах 1000 В переменного напряжения, соответствующий аналоговый выход может быть отрегулирован [82].

Для начала работы необходимо – подключить питание 5В от микроконтроллерного устройства, высокое напряжение на вход трансформатора и аналоговый выход к любому аналоговому контакту микроконтроллерного устройства. Ток, потребляемый из сети – до 2 мА [9].

В таблице 3.2. приведены основные технические характеристики трансформаторного датчика напряжения ZMPT101B.

Таблица 3.2. Технические характеристики датчика напряжения ZMPT101B

Измеряемое напряжение	0 - 1000 В
Пробивное напряжение изоляции	4000 В
Ток обмоток	2 мА
Напряжение питания	4 - 12 В
Погрешность	0,2 %
Индикация питания	светодиод
Рабочая температура	-40 .. +70°C
Размеры платы	49,5 x 19.4 мм

3.3. Аппаратно-программный комплекс для контроля возникновения эмульсии в ШСНУ

Для построения ваттметрограммы нужны показания токов и напряжений и период качания станка-качалки с действующей ШСНУ [81]. Эти данные были получены с действующей нефтяной насосной установки, посредством разработанного аппаратно-программного комплекса (АПК) который предназначен для измерения токов, напряжений, потребляемой мощности и электроэнергии по фазе электродвигателя станка-качалки, а также для периодического набора ваттметрограмм.

АПК выполняет следующие функции:

- периодическое измерение и накопление мгновенных значений напряжений и токов по питающей фазе;
- вычисление активной мощности;
- периодическое (с заданным периодом) обновление массивов действующих значений токов, напряжений и активной мощности по питающей фазе.

АПК выполнен в виде законченного блока в пластмассовом корпусе со съемной верхней крышкой. (Рисунок 3.7.).

В таблице 3.3 приведем основные технические характеристики АПК.

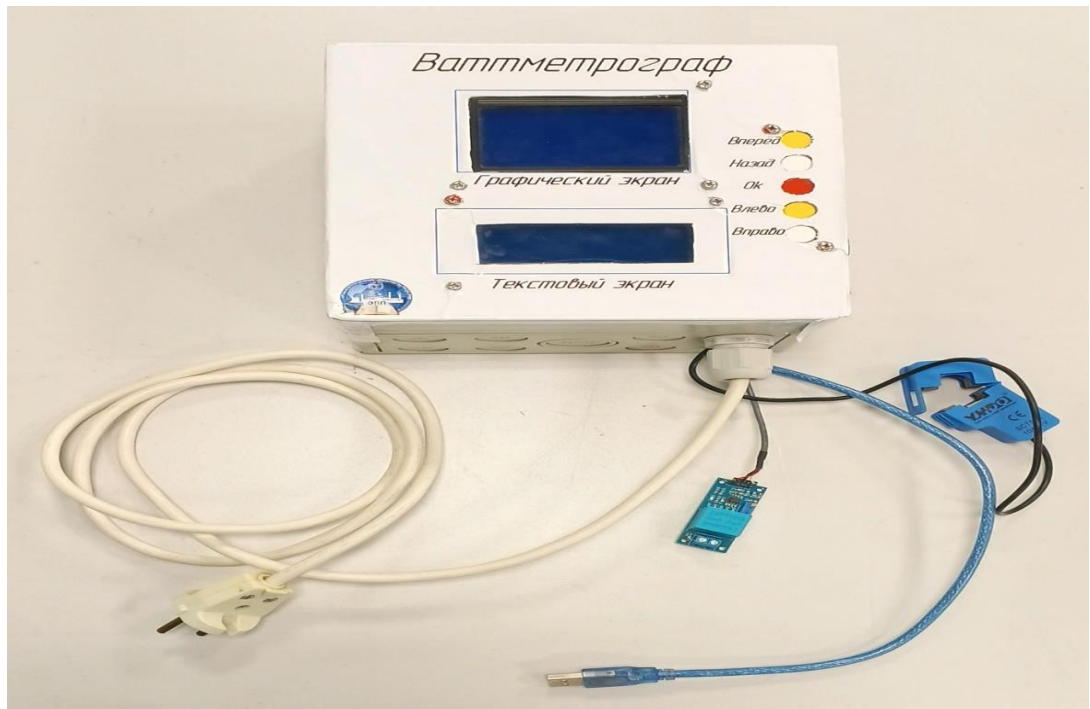


Рисунок 3.7. Опытный образец АПК в сборе

Таблица 3.3 Технические характеристики модуля АПК

Параметр	Значение
Напряжение питания, Вольт	220-230
Ток потребления, мА,	не более 200
Вид измеряемой цепи	Однофазная, переменного тока
Диапазон амплитуд измеряемых напряжений по фазе на измерительном датчике аппарата,	От 1 до 1000 В
Максимальная приведенная погрешность измерения действующего значения тока, %	1
Максимальная приведенная погрешность измерения действующего значения напряжения, %	1
Пробивное напряжение между измерительными цепями модуля, цепями питания и цепями интерфейса, не менее, Вольт	1000
Степень защиты от воздействия пыли и воды, по ГОСТ 14254-96	IP20
Диапазон рабочих температур, оС	От минус 40 до плюс 60
Габаритные размеры датчика с антенной, не более, мм	180x180x110
Масса АПК, не более, кг	1,4

Блок-схема АПК на основе платы микроконтроллера и схема подключения к исследуемой сети представлены на рисунке 3.8.

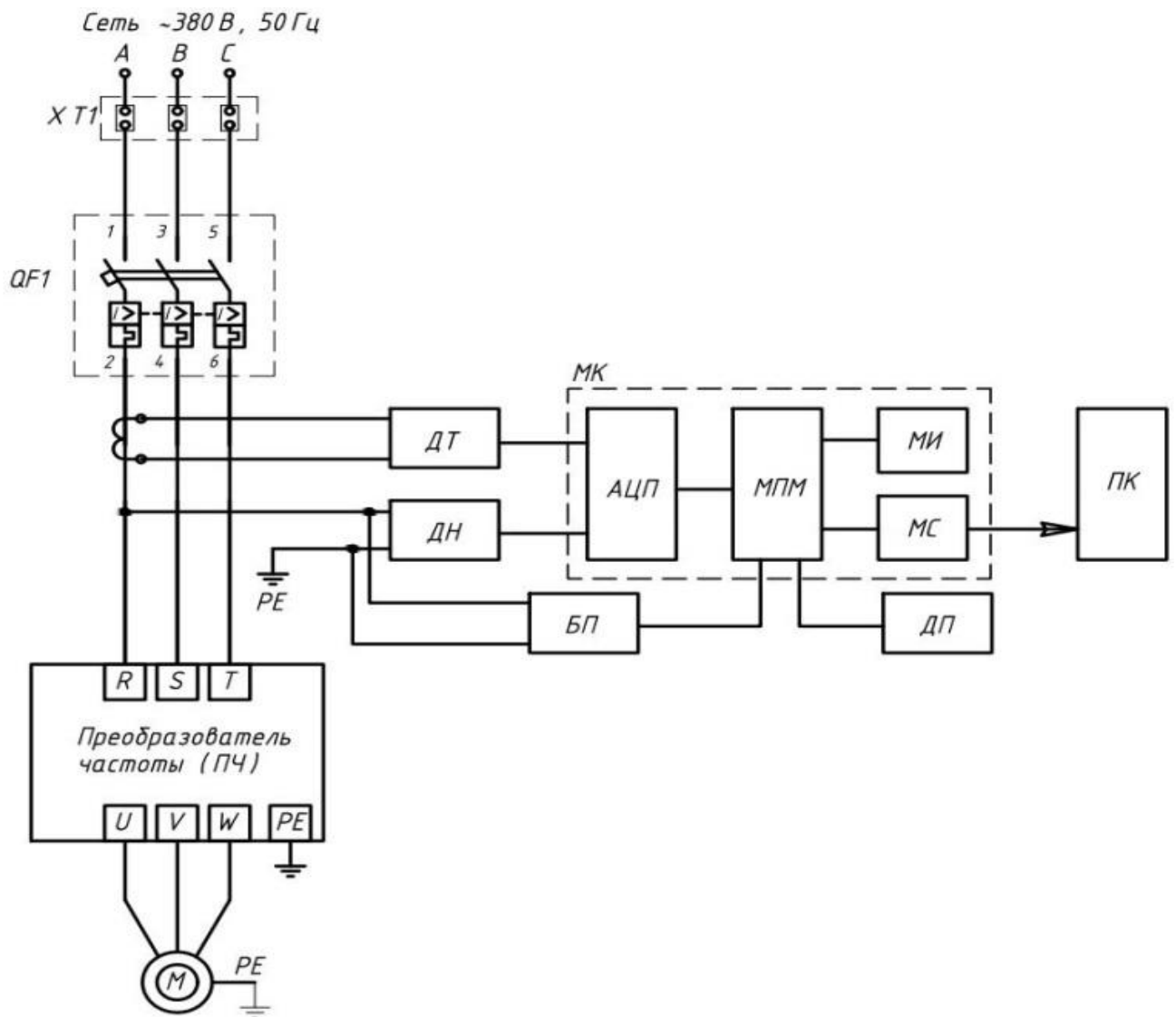


Рисунок 3.8. Схема подключения ваттметра к измеряемой сети. ДТ, ДН - датчики тока и напряжения, БП - блок питания прибора, АЦП - аналогово-цифровой преобразователь, МК - микропроцессорный модуль, МИ - модуль индикации, МС - модуль связи, МК - микроконтроллер, ДП - датчик положения балансира ШСНУ

Измеренные с помощью датчиков мгновенные значения токов и напряжений поступают на аналогово-цифровой преобразователь, который после преобразования передает их в микропроцессорный модуль. Мгновенные значения тока и напряжения преобразуются в действующие, по принципу определения среднеквадратического значения (СКЗ), рассчитывается активная мощность и

формируется массив ваттметрограммы, состоящий из 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 нижней мертвой точке (НМТ) или верхней мертвой точке (ВМТ), выполняется процесс накопления ваттметрограммы очередного качания. Таким образом, стартовые точки всех накопленных прибором ваттметрограмм совпадают с НМТ или ВМТ, что существенно облегчает их дальнейшую обработку.

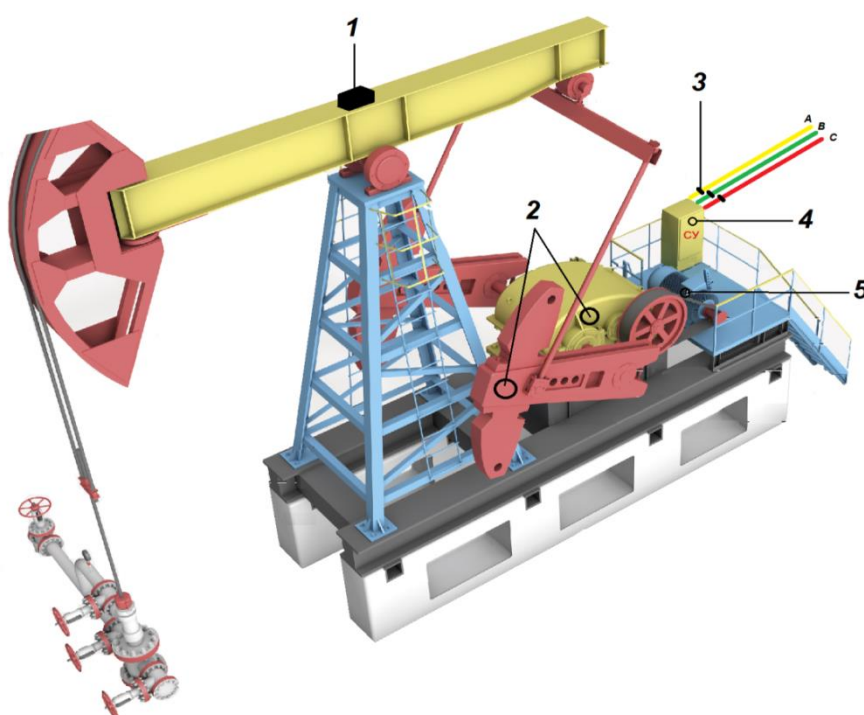


Рисунок. 3.9. Места установки датчиков на ШСНУ

Места установки датчиков и ваттметрографа показаны на рисунке 3.9. где 1 – акселерометр; 2 – магниторезистивный датчик положения для определения периода работы СК; 3 – датчики тока и напряжения; 4 – ваттметрограф; 5 – электрический двигатель.

Схема спроектирована для работы с напряжением в диапазоне 0-250 В с током 0-100 А с возможностью расширить диапазоны ее работы до необходимых значений. Основополагающий принцип работы этой схемы заключается в измерении напряжения и тока в нагрузке, чтобы затем рассчитать потребляемую

нагрузкой мощность. Значения всех измеряемых параметров будут отображаться на экране ЖК-дисплея (модуль индикации).

Далее рассмотрим работу по отдельности небольших элементов представленной схемы.

Измерительный блок. Измерительный блок схемы состоит из делителя напряжения на двух резисторах для измерения значения напряжения и шунтирующего резистора с неинвертированным операционным усилителем для измерения силы тока. Делитель напряжения показан на рисунке 3.10.

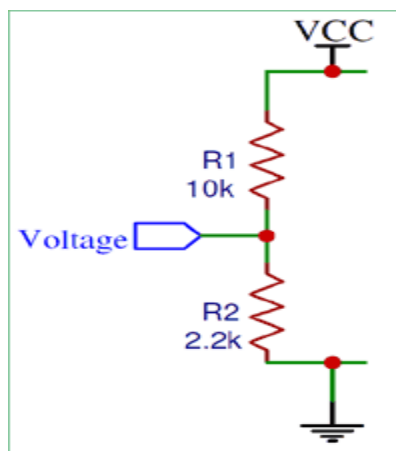


Рисунок 3.10. Схема делителя напряжения

Входное напряжение на этой схеме обозначено как VCC. Как мы говорили ранее, схема спроектирована для измерения напряжений от 0V до 24V. Но плата МКУ не может измерять такие большие напряжения – она может измерять напряжения только в диапазоне 0-5V. Соответственно, мы должны преобразовать измеряемое напряжение в диапазоне 0-24V в диапазон 0-5V. Это преобразование как раз и осуществляется с помощью представленного делителя напряжения. Соответственно, и номиналы резисторов в схеме этого делителя (10 кОм и 2,2 кОм) как раз подобраны таким образом, чтобы преобразовывать диапазон 0-24V в диапазон 0-5V. Если вам нужно изменить диапазон измеряемых схемой напряжений вам всего лишь нужно изменить значения номиналов резисторов в представленной схеме делителя напряжения. Значение напряжение на выходе делителя напряжения можно рассчитать по хорошо известной формуле:

$$V_{out} = \frac{(V_{in} \cdot R_2)}{(R_1 + R_2)} \quad (3.2)$$

Преобразованное к диапазону 0-5V напряжение со средней точки делителя напряжения у нас на схеме обозначено меткой Voltage. В дальнейшем это преобразованное значение напряжения подается на аналоговый вход платы.

Далее мы должны измерять ток через нагрузку (LOAD). Поскольку микроконтроллеры могут считывать только аналоговые значения напряжения нам необходимо преобразовать значение тока в значение напряжения. Это можно сделать при помощи добавления шунтирующего резистора – в соответствии с законом Ома падение напряжения на нем будет пропорционально протекающему по нему току. Поскольку на шунтирующем резисторе падение напряжения будет очень маленькое, используем операционный усилитель, чтобы усилить его. Схема для осуществления этого процесса показана на рисунке 3.11.

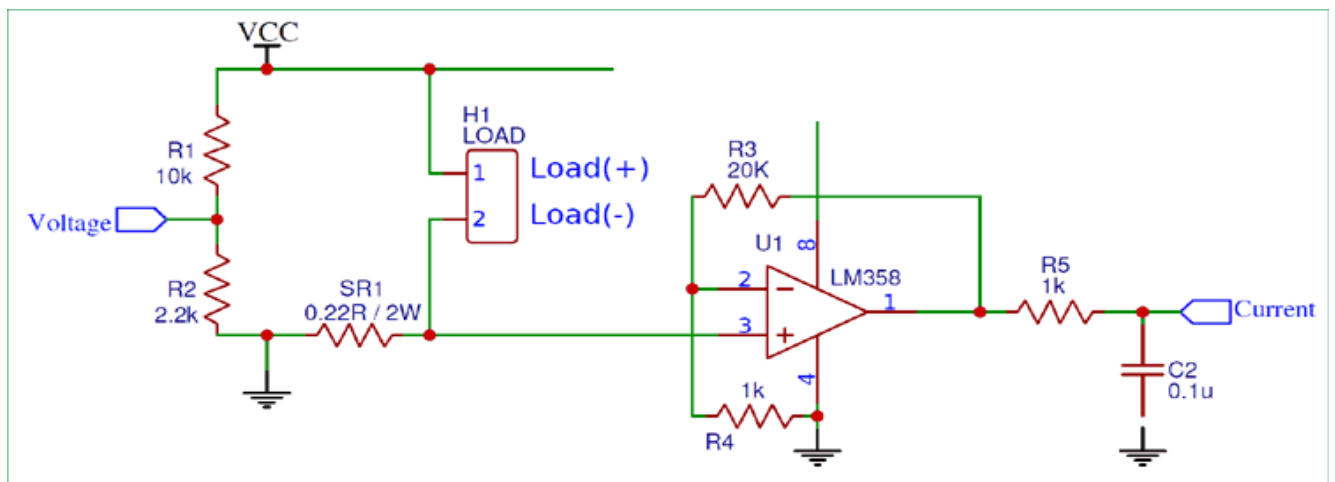


Рисунок 3.11. Схема при добавлении шунтирующего резистора

Значение сопротивления шунтирующего резистора (SR1) в нашем случае равно 0.22 Ом. Как было указано ранее, наша схема спроектирована для измерения силы тока в диапазоне 0-1А, поэтому в соответствии с законом Ома при максимальном токе через нагрузку 1 А падение напряжения на нашем шунтирующем резисторе будет примерно 0.2V. Это напряжение мало для считывания микроконтроллером, поэтому мы используем операционный

усилитель в неинвертированном усилительном режиме, чтобы усилить это напряжение до значения, которое можно комфортно считать с помощью платы МКУ.

Операционный усилитель в неинвертированном режиме показан на вышеприведенной схеме. Усилитель спроектирован таким образом чтобы его коэффициент усиления составлял значение 21, итого получаем $0.2 \cdot 21 = 4.2V$. Формула для расчета коэффициента усиления представленного операционного усилителя выглядит следующим образом:

$$G_{ain} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{R_f}{R_{in}} \quad (3.3)$$

Если нужно изменить диапазон измеряемых схемой значений тока необходимо изменить значение сопротивления шунтирующего резистора, а также значения сопротивлений резисторов, влияющих на коэффициент усиления операционного усилителя.

В нашем случае значение сопротивления резистора R_f равно 20 кОм, а значение сопротивления резистора R_{in} равно 1 кОм, что обеспечивает коэффициент усиления 21 для операционного усилителя. Далее напряжение с выхода операционного усилителя подается на RC фильтр, состоящий из резистора 1 кОм и конденсатора 0,1 мкФ. Данный фильтр предназначен для фильтрации нежелательных шумов. Далее отфильтрованное напряжение подается на аналоговый вход платы МКУ.

Последний компонент, который нам необходимо рассмотреть в блоке измерений нашей схемы – это регулятор напряжения. Поскольку мы подаем на вход схемы изменяемое напряжение нам необходимо стабилизированное напряжение +5V для питания платы МКУ и операционного усилителя. Это регулируемое (стабилизированное) напряжение в нашей схеме обеспечивается с помощью регулятора напряжения 7805. Конденсатор добавлен на выход схемы регулятора для фильтрации шума (рисунок 3.12)

Как видно из схемы, контакт со значением напряжения подключается к аналоговому контакту А3, а контакт со значением тока – к аналоговому контакту А4 платы. ЖК-дисплей запитывается от напряжения +5V с регулятора 7805 и подключен к цифровым контактам платы МКУ в 4-битном режиме.

ZMPT101B – это трансформаторный датчик напряжения, который линейно уменьшает входное напряжение и обладает аналоговым выходом. Также он обеспечивает изоляцию напряжения до 4000V и безопасную работу с напряжением до 1000V. Схема датчика ZMPT101B приведена на рисунке 3.14.

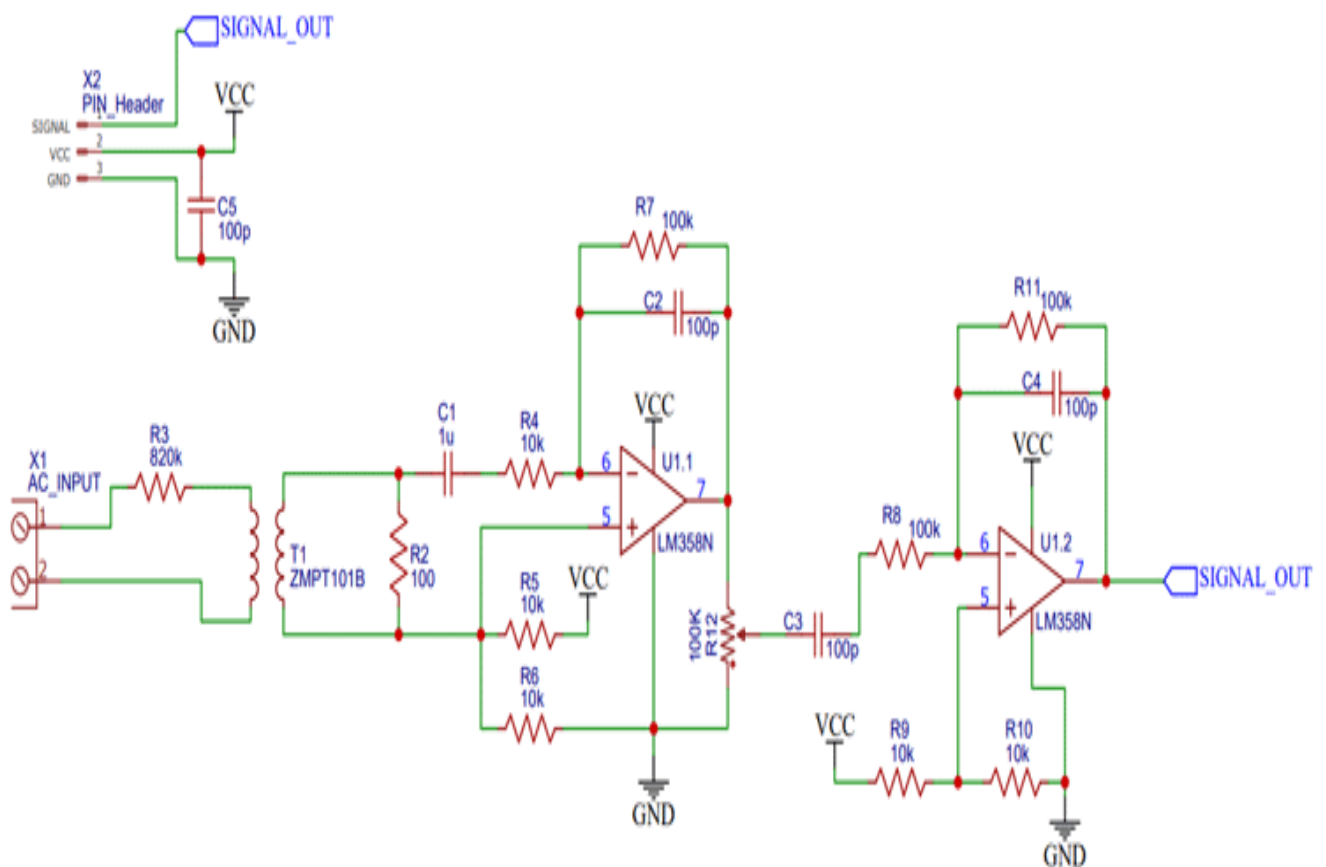


Рисунок 3.14. Схема трансформаторного датчика напряжения

Из анализа представленной схемы видно, что выход трансформатора датчика подключен к микросхеме операционного усилителя LM358N, который усиливает пики напряжения.

Для функционирования прибора контроля и диагностики ШСНУ разработано программное обеспечение (Приложение А).

Цель функционирования программы – считать значения аналогового напряжения с входных контактов АЦП и рассчитать напряжение, ток и мощность, а потом отобразить все это на экране ЖК-дисплея, а также при этом передать данные на ПК в виде массива значений ваттметрограммы, составляющего 90 точек на одно качание не зависимо от скорости качания. Программа рассчитывает период формирования точек ваттметрограммы путем деления промежутка времени, прошедшего между двумя сигналами положения балансира, на 90 равных временных отрезков.

Микроконтроллерное устройство использует язык C++ для связи ATmega2560 с программным обеспечением. Файл создается и открывается на ПК для записи фактического времени. Позже датчик тока и датчик напряжения собирают данные от источника ввода и записывают их в тот же файл. Кроме значений тока и напряжения, также включается программный код с расчетом соответствующей мощности и напрямую записывается в файл. Массив данных в файле содержит дату и время сбора данных, значения тока и напряжения, измеренные датчиками, а также расчетную мощность при мгновенном измерении. Программный код остановит, сохранит и закроет файл только тогда, когда закончится период качания. Далее данные от модуля сохраняются в формате XLS программе Microsoft Excel, после чего обрабатываются и загружаются в программу Matlab. Данный процесс происходит во время следующего качания, благодаря чему формирование следующей ваттметрограммы начнется при поступлении сигнала нахождения балансира в НМТ или ВМТ. При этом все полученные ваттметрограммы будут синхронизированы с НМТ. В этом есть главное отличие прибора контроля и диагностики ШСНУ от промышленных ваттметрографов, которые не синхронизируют начало ваттметрограммы с мертвой точкой и в результате получается эффект «плывущей» ваттметрограммы, что затрудняет ее дальнейшую обработку.

3.4. Метрологический анализ

Микроконтроллерное устройство поставляется со встроенным аналого-цифровым преобразователем (АЦП), к которому интегрированы аналоговые датчики тока и напряжения ZMPT101B и SCT-013 и подключены к аналоговым выводам A0 и A1 соответственно. Эти аналоговые контакты являются частью встроенных каналов АЦП, которые могут принимать диапазон напряжений от 0 до 5В.

Так как датчики тока и напряжения работают со среднеквадратичными значениями тока и напряжения, следует раскрыть это понятие. Среднеквадратичное значение напряжения. — известное также как действующее значение напряжения — на линейной активной нагрузке оно совершает ту же самую работу, что и постоянное напряжение аналогичного уровня [58].

$$V = V_0 \sin(2\pi ft) \quad (3.4)$$

где V – напряжение в момент времени, V_0 – пиковое напряжение, f – частота в Гц. Для этой простой схемы сопротивления $I = V/R$, поэтому ток переменного выглядит как:

$$I = I_0 \sin(2\pi ft) \quad (3.5)$$

где I – ток в момент времени, а $I_0 = V_0/R$ – пиковый ток. Теперь, используя вышеприведённое определение, выведем среднеквадратичные напряжение и ток. Прежде всего, у нас есть:

$$V_{rms} = V_0 \sqrt{\frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} \frac{1 - \cos(2\omega t)}{2} dt} \quad (3.6)$$

Интегрируя написанное:

$$V_{rms} = V_0 \sqrt{\frac{1}{T_2 - T_1} \left[\frac{t}{2} - \frac{\sin(2\omega t)}{4\omega} \right]_{T_1}^{T_2}} \quad (3.7)$$

Поскольку интервал отображает целое число полных циклов, члены отменяются, оставляя:

$$V_{rms} = V_0 \sqrt{\frac{1}{T_2 - T_1} \left[\frac{t}{2} \right] \frac{T_2}{T_1}} = V_0 \sqrt{\frac{1}{T_2 - T_1} \frac{T_2 - T_1}{2}} = \frac{V_0}{\sqrt{2}} \quad (3.8)$$

Таким же образом можно выразить среднеквадратичное значение тока, где в итоге получаем:

$$I_{rms} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \quad (3.9)$$

3.4.1. Калибровка датчика тока YHDC SCT-013-000

Датчик SCT-013-000 - это тип датчика выходного сигнала тока, которому требуется нагрузочный резистор для преобразования выходного сигнала тока в сигнал напряжения, который может быть считан и обработан микроконтроллером.

Подаваемый ток измеряется с помощью трансформатора тока, а результирующий (небольшой) ток преобразуется в напряжение нагрузочным резистором [74]. Это напряжение измеряется аналоговым входом микроконтроллера. Это напряжение измеряется относительно напряжения питания процессора (в данном случае 5 В), которое используется в качестве эталонного, и масштабируется таким образом, чтобы эталонное напряжение давало максимальное значение 10 битного АЦП - 2^{10} (= 1024).

К входному напряжению микроконтроллера добавляется постоянное смещение, но оно немедленно удаляется программным фильтром, поэтому мы можем игнорировать его при вычислении постоянной калибровки. Аналогично, мы можем работать со среднеквадратичными значениями для токов, напряжений и отсчетов.

Таким образом, число, отображаемое микроконтроллером, равно:

$$counts = \frac{input\ pin\ voltage}{V_{aop}} \cdot 2^{10} \quad (3.10)$$

где, V_{aop} - опорное аналоговое напряжение, *input pin voltage* - напряжение на входном выводе, которое находится путем умножения вторичного тока на нагрузочный резистор:

$$\text{input pin voltage} = \text{secondary current} \cdot \text{burden resistance} \quad (3.11)$$

где вторичный ток находится путем деления первичного тока на коэффициент трансформатора:

$$\text{secondary current} = \frac{\text{primary current}}{\text{transformer ratio}}, \quad (3.12)$$

Коэффициент трансформатора тока обычно определяется производителем как отношение максимального первичного тока к вторичному, например, 100 А: 50 мА.

Далее найдем значение сопротивления нагрузочного резистора, который необходим для нашего датчика.

Согласно спецификации датчика тока, коэффициент измерения равен 2000 раз, что означает, что при максимальном токе 100А, протекающем по проводу под напряжением, вторичный выходной ток датчика тока становится 0,05А. Однако, поскольку ток, протекающий по проводу под напряжением, измеряется на основе среднеквадратичного значения, значение тока вторичной катушки датчика измеряется как $I_{rms}=0,0707\text{А}$. Согласно пользовательской инструкции микроконтроллера и датчика напряжения, для максимального разрешения измерения напряжения пиковый ток должен быть равен половине аналогового опорного напряжения микроконтроллера, которое равно:

$$V_{\text{оп}} = \frac{V_{\text{max}}}{2} = \frac{5}{2} = 2,5 \text{ В} \quad (3.13)$$

Следовательно, сопротивление требуемого нагрузочного резистора, для калибровки и максимального измерения напряжения микроконтроллерным устройством равно:

$$R_{\text{н.п.}} = \frac{V_{\text{оп}}}{I_{\text{rms}}} = \frac{2,5}{0,0707} = 35,361 \text{ Ом} \quad (3.14)$$

Таким образом, для калибровки датчика, исходя из расчетов, нагрузочный резистор 35,361 Ом рекомендуется использовать в качестве идеального нагрузочного резистора. В этом случае было выбрано значение, более близкое к предлагаемому нагрузочному резистору, т.е. резистор 33 Ом. Поправка

отклонения измеренного значения скомпенсирована введением поправочного коэффициента при расчете СКЗ измеренного тока.

3.4.2. Калибровка датчика напряжения ZMPT101B

Датчик напряжения ZMPT101B измеряет переменное напряжение, которое имеет синусоидальный характер, поэтому к датчику подключено синусоидальное переменное напряжение, что означает, что он может считывать значение напряжения только в определенное время. Мгновенный расчет используется в случае питания переменным напряжением, в котором алгоритм использует выборки напряжения для расчета среднеквадратичные значения напряжения. Поскольку напряжение измеряется через равные промежутки времени, программа вычисляет среднеквадратичное значение напряжения и делит на $\sqrt{2}$, выдавая при этом на экране ПК действительное значение напряжения.

Далее произведем калибровку с помощью анализатора качества электроэнергии Fluke 430 серии II, который использовался для измерения входного напряжения 230 В переменного тока. Переменное напряжение, измеренное с помощью измерителя FLUKE 430, подается на датчик и с помощью программы микроконтроллера регистрируются значения АЦП входного напряжения.

Калибровка осуществлена с помощью потенциометра на датчике напряжения, при котором значения напряжения на эталонном приборе FLUKE 430 и датчике тока были с минимальной разницей измерений.

Разница после калибровки составила 1,467В в средней точке диапазона измерения, что в процентном соотношении составляет менее 1%.

Анализируя полученные данные, можем уверенно сказать, что датчик напряжения ZMPT101B откалиброван и готов к использованию.

3.4.3. Расчет погрешности АЦП микроконтроллерного устройства

Для измерения аналоговых сигналов микроконтроллерного устройства Atmega 2560 использует АЦП последовательного приближения с аналоговым коммутатором. В программе вызываем функцию `analogRead()`. Она подключает коммутатор к выбранному аналоговому входу, вырабатывает управляющие сигналы для АЦП, ожидает окончания преобразования и возвращает измеренный код.

В микроконтроллерном устройстве Atmega 2560 используется 10 битный, разрядный АЦП, что соответствует 1024 градациям выходного кода, т.е. позволяет выводить значения в десятичном виде от 0 до 1023. Производители микроконтроллера нормируют полную погрешность преобразования АЦП, в которую включены:

- интегральная нелинейность;
- дифференциальная нелинейность;
- случайные ошибки.

Для расчета погрешности АЦП необходимо ввести ряд определений

LSB (least significant bit) или МЗБ (младший значащий бит) – это наименьшее значение напряжения, которое может быть измерено АЦП. Находиться по формуле:

$$1LSB = \frac{V_{on}}{2^N} = \frac{5}{2^{10}} = 4882,8 \text{ мкВ} , \quad (3.15)$$

где V_{on} – значение источника опорного напряжения (ИОН), N разрядность АЦП.

Интегральная нелинейность - представляет собой максимальное отклонение любого кода от прямой линии, проведенной через крайние точки передаточной функции АЦП. Крайними точками являются: нулевая, находящаяся на 0.5LSB ниже точки появления первого кода, и последняя — на 0.5LSB выше граничного кода шкалы.

Дифференциальная нелинейность DNL (differential non-linearity) - представляет собой разницу между измеренной и идеальной шириной 1 LSB АЦП.

Систематические ошибки – ошибки, величина которых одинакова во всех измерениях, приводящих одним и тем же методом с помощью одних и тех же измерительных приборов.

Случайные ошибки – ошибки, величина которых различна даже для измерений, выполненных одинаковым образом. Интегральная и дифференциальная нелинейности относятся к систематическим ошибкам. Случайная ошибка АЦП будет состоять из интегральной и дифференциальной нелинейности, а также из ошибки квантования, которая составляет:

$$\Delta a = \frac{1LSB}{2} = \frac{4882,8}{2} = 2441,4 \text{ мкВ} \quad (3.16)$$

Так как интегральная и дифференциальная нелинейности относятся к случайным ошибкам и являются независимыми друг от друга ошибками их необходимо сложить по «закону сложения независимых случайных ошибок»:

$$\left(\frac{\Delta Y}{Y}\right)^2 = \left(\frac{\Delta X_1}{X_1}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\Delta X_n}{X_n}\right)^2, \quad (3.17)$$

где X_1, \dots, X_n – номинальные значения независимых случайных величин, $\Delta X_1, \dots, \Delta X_n$ – ошибки случайных величин, Y – номинальное значение конечной измеряемой величины, ΔY – абсолютная ошибка конечной измеряемой величины.

Итак, относительная погрешность измерения АЦП:

$$\frac{\Delta Y}{Y} = \sqrt{\left(\frac{4882,8 \cdot 10^{-6}}{5}\right)^2 + \left(\frac{4882,8 \cdot 10^{-6}}{5}\right)^2 + \left(\frac{2441,4 \cdot 10^{-6}}{5}\right)^2} \cdot 100\% = 0,146\%, \quad (3.18)$$

В документации на микроконтроллер Atmega 2560 [83] приводятся значения отдельных погрешностных параметров, а именно ошибки преобразования АЦП в единицах младшего разряда, для перевода погрешности из единиц младшего разряда в проценты, необходимо число единицы младшего разряда разделить количеством всего единиц (в нашем случае 1024), умножив на 100%.

Интегральная нелинейность – не более 0,5 единицы младшего разряда, т.е. 0,0488%

Дифференциальная нелинейность - не более 0,25 единицы младшего разряда, т.е. 0,0244%

Ошибка коэффициента преобразования – не более 1 единицы младшего разряда, т.е. 0,0977%. Эта ошибка показывает насколько наклон прямой между первой и последней точкой реальной характеристики преобразования соответствует идеальному значению. Ошибка может быть скорректирована умножением на поправочный коэффициент.

Ошибка смещения нуля – не более 1 единицы младшего разряда, т.е. 0,0977%. Данная ошибка показывает значение сигнала на входе АЦП при выходном коде равном 0. Может быть скорректирована прибавлением к выходному коду поправочного коэффициента.

Так как ошибки независимы друг от друга, для подсчета относительной погрешности воспользуемся формулой 3.13:

$$\frac{\Delta Y}{Y} = \sqrt{0,0488^2 + 0,0244^2 + 0,0977^2 + 0,0977^2} = 0,1486\%, \quad (3.19)$$

Исходя из расчетов (3.14 и 3.15) делаем вывод, что погрешность АЦП микроконтроллерного устройства Atmega 2560 не превышает 0,15%

3.4.4. Расчет погрешности измерительного канала

Для проверки достоверности проводимых экспериментальных исследований необходимо выполнить метрологический анализ каналов измерения и преобразования величин, измеряемых аппаратно-программным комплексом.

В процессе проведения метрологического анализа использовались такие документы, как ГОСТ 8.009-84 «Нормируемые метрологические характеристики средств измерения», РД-153-34.0-11.201-97 «Методика определения обобщенных метрологических характеристик измерительных каналов ИИС и АСУ ТП по метрологическим характеристикам агрегатных средств измерения», МИ-222-80

«Методика расчета метрологических характеристик измерительных каналов информационно-измерительных систем по метрологическим характеристикам компонентов».

При подготовке к исследованиям и снятии метрологических характеристик должен быть произведен внешний осмотр приборов и средств измерений; проверена их комплектность и необходимое заземление. Все первичные преобразователи и средства поверки должны иметь клейма и свидетельства о прохождении поверки.

Должны быть выполнены все специальные мероприятия по технике безопасности.

На рисунке 3.15. показана структурная схема измерительного канала.

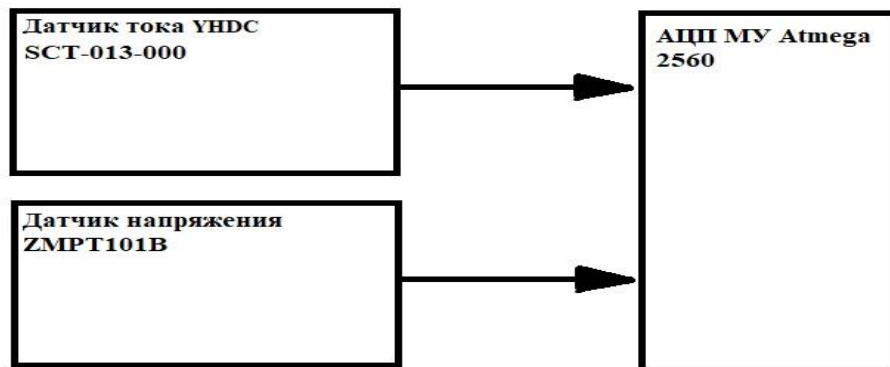


Рисунок 3.15 Структурная схема измерительного канала АПК

Измерительный канал имеет структуру, состоящую из двух параллельных приборов со следующими характеристиками точности измерений:

- трансформаторный датчик тока УНДС SCT-013-000 (Диапазон токов измерения – 0-100А, основная погрешность измерения до 1%);
- датчик напряжения ZMPT101B (Диапазон измеряемых напряжений – 0-1000В, основная погрешность измерения до 1%);
- 10 разрядный АЦП микроконтроллерного устройства Atmega 2560, с основной погрешностью измерений – 0,15%.

Оценка допускаемых среднеквадратических отклонений (СКО) погрешности измерительного канала с учетом приборов, входящих в состав ИК определяется по методике, приведенной в МИ-222 и РД-153 и выглядит следующим образом:

Расчет характеристики систематической составляющей погрешности ИК в виде функций входного сигнала дает возможность получить:

$M[\Delta_c(x)]$ - математическое ожидание систематической составляющей погрешности ИК данного типа;

$\sigma[\Delta_s(x)]$ - среднее квадратическое отклонение систематической составляющей погрешности ИК данного типа.

Исходными данными для расчёта являются :

m – количество ИК в многоканальных компонентах, входящих в АПК;

N - количество компонентов, входящих в ИК;

$f_{nji}(x)$ - номинальная характеристика преобразования по одному каналу j -го компонента, входящего в ИК ИИС ($j = 1, 2, \dots, N$),

$f_{nji}(x)$ является линейной функцией входного сигнала i -го канала компонента, входящего в ИИС : $f_{nji}(x) = A_j x_i + a_j$ при $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, N$;

$M[\Delta_{cij}(x)]$ – математическое ожидание систематической составляющей погрешности одного канала каждого компонента, входящего в ИК ИИС ($j = 1, 2, \dots, N$);

$M[\Delta_{cij}(x)]$ – является линейной комбинацией всех входных сигналов компонента:

$$M[\Delta_{cij}(x)] = \sum_{k=1}^m B_{kij} x_k + b_{ij} \quad (3.20)$$

где i – номер какого – либо выделенного канала;

$\sigma[\Delta_{ci}(x)]$ – среднее квадратическое отклонение систематической составляющей погрешности по одному каналу каждого компонента ($j = 1, 2, \dots, N$), $\sigma[\Delta_{ci}(x)]$ является функцией всех входных сигналов компонентов x_k ($k = 1, 2, \dots, m$):

$$\sigma[\Delta_{cij}(x)] = \left(\sum_{k=1}^m G_{kij}^2 x_k^2 + g_{kj}^2 \right)^{1/2} \quad (3.21)$$

где i – номер какого – нибудь выделенного канала.

Результатами расчета являются $M(\Delta_{ci})$, $\sigma(\Delta_{ci})$, выраженные функциями от всех входных сигналов многоканальной ИИС.

Оценка допустимых среднеквадратических отклонений (СКО) погрешности измерительного канала с учетом приборов, входящих в состав ИК для нормального закона распределения случайных составляющих погрешности в % от нормирующего значения определяется по формуле:

$$\sigma_{ИК} = \sqrt{\sum_{i=1}^N Y_i^2} \quad (3.22)$$

где σ - СКО погрешностей компонентов ИК, Y_i - пределы основной приведенной погрешности соответствующего прибора, N - количество приборов.

Рассчитаем СКО погрешностей компонентов ИК по формуле 3.21.

$$\sigma_{ИК} = \sqrt{1^2 + 1^2 + 0,1486^2} = 1,422\%$$

Примечание

Если в документации на приборы, входящие в состав ИК нормируются отдельно функции влияния (основная Y_o и дополнительная Y_d погрешность) и реальные условия эксплуатации отличаются от нормальных, то необходимо учитывать, что значение основной приведенной погрешности соответствующего прибора Y_i в формуле (3.21), необходимо заменить на выражение:

$$Y_i = Y_o + Y_d, \text{ где } Y_o, Y_d - \text{основная и дополнительная погрешность.}$$

В дальнейшем данные передаются в программное обеспечение Matlab в оцифрованном виде, следовательно, на суммарную погрешность измерительного канала не влияют.

В качестве сравнения приведем характеристики известного, выпускаемого промышленно ваттметра СИЛК-UI производства НГП Информ. Для данного прибора, по информации из руководства по эксплуатации, установлены следующие технические характеристики: максимальная приведенная погрешность измерения действующего значения тока 2 %, максимальная приведенная погрешность измерения действующего значения напряжения 2 %, максимальная приведенная погрешность вычисленных значений полной и активной мощности,

3 %. Эти данные говорят об улучшенной характеристике разработанного прибора по сравнению с промышленно выпускаемым прибором.

3.5. Алгоритм и программное обеспечение для получения и обработки спектра ваттметрограммы

В качестве программного обеспечения для получения и обработки спектра ваттметрограммы была выбрана автоматизированная программно-математическая система Matlab.

Matlab – одна из старейших, тщательно проработанных и проверенных временем систем автоматизации математических и научно-технических расчетов, построенная на расширенном представлении и применении матричных операций [19]. Это нашло отражение в названии системы – MATrix LABoratory – матричная лаборатория.

Одной из основных задач при создании системы MATLAB всегда было предоставление пользователям мощного языка программирования, ориентированного на технические и математические расчеты и способного превзойти возможности традиционных языков программирования, которые многие годы использовались для реализации численных методов. При этом особое внимание уделялось как повышению скорости вычислений, так и адаптации системы к решению самых разнообразных задач пользователей.

MATLAB реализует три важные концепции программирования:

- процедурное модульное программирование, основанное на создании модулей – процедур и функций;
- объектно-ориентированное программирование, особенно ценное в реализации графических средств системы;
- визуально-ориентированное программирование, направленное на создание средств графического интерфейса пользователя GUI (Graphics User Interface) [30].

Язык программирования MATLAB относится к классу интерпретаторов. Это значит, что любая команда системы распознается (интерпретируется) по ее

имени (идентификатору) и немедленно исполняется в командной строке, что обеспечивает легкую проверку по частям любого программного кода. Важными достоинствами системы являются ее открытость и расширяемость. Большинство команд и функций системы реализованы в виде m-файлов текстового формата (с расширением .m) и файлов на языке C/C++, причем все файлы доступны для модификации. Пользователю дана возможность создавать не только отдельные файлы, но и библиотеки файлов для реализации специфических задач. Любой набор команд в справке можно тут же исполнить с помощью команды Evaluate Selection контекстного меню правой клавиши мыши.

Для обработки сигнала ваттметрограммы разработано программное обеспечение (Приложение Б). Цель функционирования программы – обработать цифровой сигнал ваттметрограммы полученный от микроконтроллерного устройства, построить ваттметрограмму каждого качания и соответствующий ей спектр.

В ПО формируется эталон спектра, построенный по ваттметрограмме, состоящий из спектра ваттметрограммы, полученной после 10 спектров ваттметрограмм, показавших минимальное отклонение, что говорит о нормальной работе станка-качалки.

При отклонении амплитуды сигнала спектра ваттметрограммы на частоте, соответствующей росту эмульсии, более чем на 30%, формируется сигнал об обнаружении эмульсии для системы управления скоростью качания верхнего уровня. Частота, соответствующая росту эмульсии, будет индивидуальна для каждой ШСНУ и зависит от таких параметров как частота вращения электродвигателя, передаточное отношение редуктора, период качания и длина хода штока.

Разработанное программное обеспечение позволяющее определить возникновение эмульсии нефти в глубинном насосе состоит из двух блоков, работающих в приборе и ПК:

1. В приборе работает программа микроконтроллера прибора для формирования ваттметрограмм электрической нагрузки

Цель функционирования программы – считать значения аналогового напряжения с входных контактов АЦП, рассчитать мощность и передать данные на ПК в виде массива значений ваттметрограммы, составляющего 90 точек на одно качание не зависимо от скорости качания. Программа рассчитывает период формирования точек ваттметрограммы путем деления промежутка времени, прошедшего между двумя сигналами положения балансира, на 90 равных временных отрезков. На рисунке 3.16 показан алгоритм программы записи сигнала ваттметрограммы.

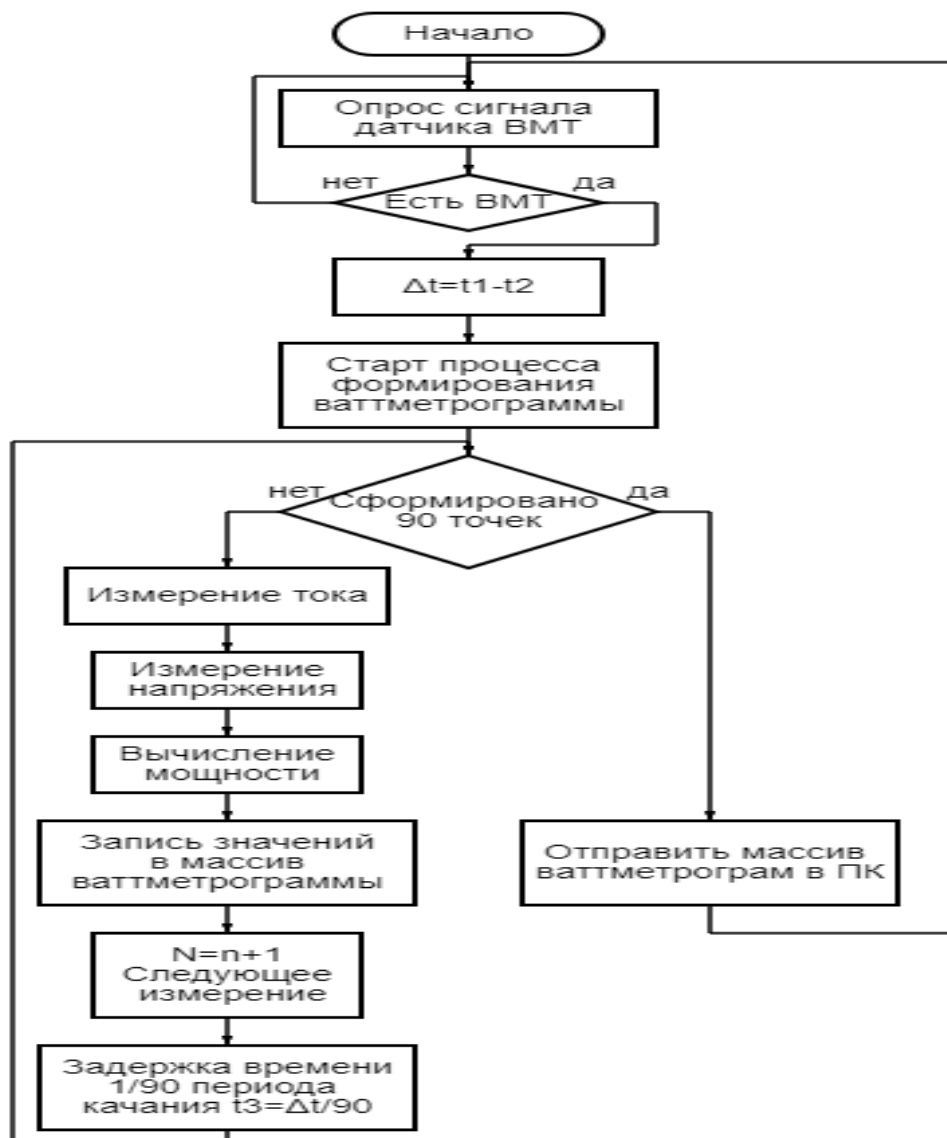


Рисунок 3.16. Алгоритм программы записи сигнала ваттметрограммы:

ВМТ – верхняя мертвая точка плунжера (балансира) ШСНУ;

Δt – период качания ШСНУ;

t_2 – время прихода сигнала ВМТ;

t_1 – время прихода предыдущего сигнала ВМТ.

Программный код остановит, сохранит и закроет файл только тогда, когда закончится период качания.

Процесс формирования ваттметрограммы разбит на несколько блоков: измерение тока, измерение напряжения и вычисление мощности.

Блоки измерения тока и напряжения состоят из процедур чтения величины сигнала на соответствующем аналоговом входе и вычисления среднеквадратичного значения полученных значений за период, равный 1/90 периода качания установки.

Традиционно принято вычислять величину измеренного переменного тока по упрощенной формуле:

$$V_{RMS} = \frac{V_{PK}}{\sqrt{2}} \approx V_{PK} \cdot 0,707 \quad (3.23)$$

Эта формула упрощена для приборов с малой производительностью процессора или без применения вычислений и учитывает только положительный пик синусоиды и сигнал фильтруется в среднее выпрямленное значение с поправочным коэффициентом. Среднеквадратичное измерение RMS надежно, когда синусоидальная волна идеальна, потому что это измерение учитывает только пиковое значение формы волны. Как правило, в современных электроустановках присутствует большое количество электроприемников, искажающих форму синусоидальности волны. Так в станциях управления станками-качалками нефти, как правило, присутствуют преобразователи частоты для управления скоростью вращения приводного электродвигателя с целью изменения интенсивности качания. Форма волны тока таких устройств сильно отличается от идеальной синусоиды из-за процесса регулирования частоты выходного напряжения. В таком случае необходимо применять формулу вычисления истинного среднеквадратичного значения (TrueRMS) по формуле:

$$V_{TRMS} = \sqrt{\frac{V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_n^2}{n}} \quad (3.24)$$

В методе TrueRMS используются более сложные математические формулы, которые позволяют приблизить значение к реальности, чем RMS. Здесь в

дополнение к пиковым значениям берется несколько выборок значений по каждому циклу.

На входе аналогового сигнала напряжения и тока присутствует сигнал напряжения, преобразуемый датчиком тока и напряжения в диапазоне 0...5 В, соответствующий номинальному диапазону датчика, например амплитуда положительной полуволны напряжения 250 В соответствует сигналу в 5 В, а амплитуда отрицательной полуволны 250 В соответствует сигналу 0 В, и соответственно 0 В измеряемого значения соответствует напряжению 2,5 В на аналоговом входе датчика. Таким образом произведено смещение выходного сигнала, так как отрицательные значения на входе микроконтроллера не обрабатываются встроенным АЦП. При этом входной сигнал 0...5 В преобразуется 10 разрядным АЦП микроконтроллера в цифровое значение диапазона 0...1023.

Для дальнейшей обработки сигнала из полученного значения вычитается 256, и производится смещение измеренного сигнала. Далее полученное значение умножается на коэффициент преобразования в реальную величину, при этом коэффициент преобразования вычисляется по формуле:

$$k_{\text{преобр}} = \sqrt{\frac{2U_H}{A_{\text{АЦП}}}}, \quad (3.25)$$

где U_H – номинальное напряжение, измеряемое датчиком напряжения или I_H – номинальный ток, измеряемый датчиком тока, $A_{\text{АЦП}}$ – максимальное значение преобразования АЦП, соответствующее максимальному сигналу на аналоговом входе.

После этого производится вычисление СКЗ сигнала.

После перемножения полученных значений напряжения и тока производится перевод вычисленной полной мощности S в активную P . Для этого применяется формула:

$$P = \sqrt{\frac{S}{\cos \varphi}} \quad (3.26)$$

Для определения $\cos \varphi$, применяется алгоритм детектирования перехода мгновенного значения тока и напряжения через ноль и вычисления времени между событиями. На основе данного алгоритма вычисляется значение коэффициента мощности.

Период качания определяется по данным дискретного входа микропроцессорного устройства, связанного с датчиком положения балансира (датчиком ВМТ или НМТ), при поступлении очередного сигнала НМТ засекается время t_1 , после прохождения следующего сигнала ВМТ засекается время t_2 и вычисляется период качания по формуле:

$$Period = t_2 - t_1 \quad (3.27)$$

После этого вычисляется период формирования точек ваттметрограммы путем деления времени периода качания на 90:

$$PeriodWt = \frac{Period}{90} \quad (3.27)$$

При этом в программе формируется цикл вычисления напряжения, тока, мощности. По окончании каждого из 90 циклов формируется значение текущей мощности, а по окончании периода качания станка-качалки формируется массив ваттметрограммы, состоящий из 90 значений (рисунок. 3.17).

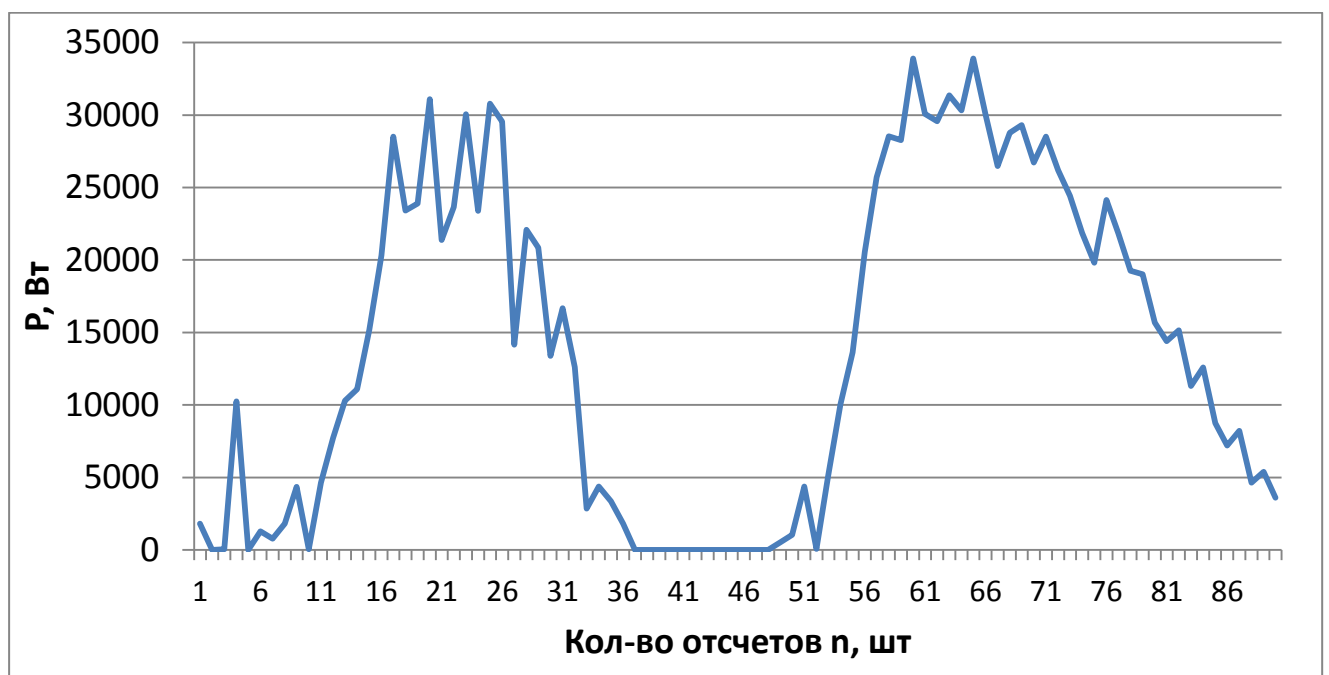


Рисунок 3.17. Сформированный массив ваттметрограммы после каждого цикла качания СК

2. Программа ПК для формирования спектра ваттметрограмм, выделения частоты спектра при возникновении эмульсии, сравнения с эталонным значением и формирования команды на снижение скорости вращения двигателя.

Во время работы программа получает ваттметрограмму каждого качания и формирует соответствующий ей спектр. Производится сравнение с эталоном спектра, построенным по ваттметрограмме, снятой во время нормальной работы при запуске ШСНУ.

При отклонении амплитуды сигнала спектра ваттметрограммы на частоте, соответствующей росту эмульсии, более чем на 30%, формируется сигнал об обнаружении эмульсии для системы управления скоростью качания ШСНУ.

Алгоритм содержит функцию фильтрации случайных возмущений (рисунок 3.18), который позволяет отклонить возмущения, не имеющие более трех повторений.

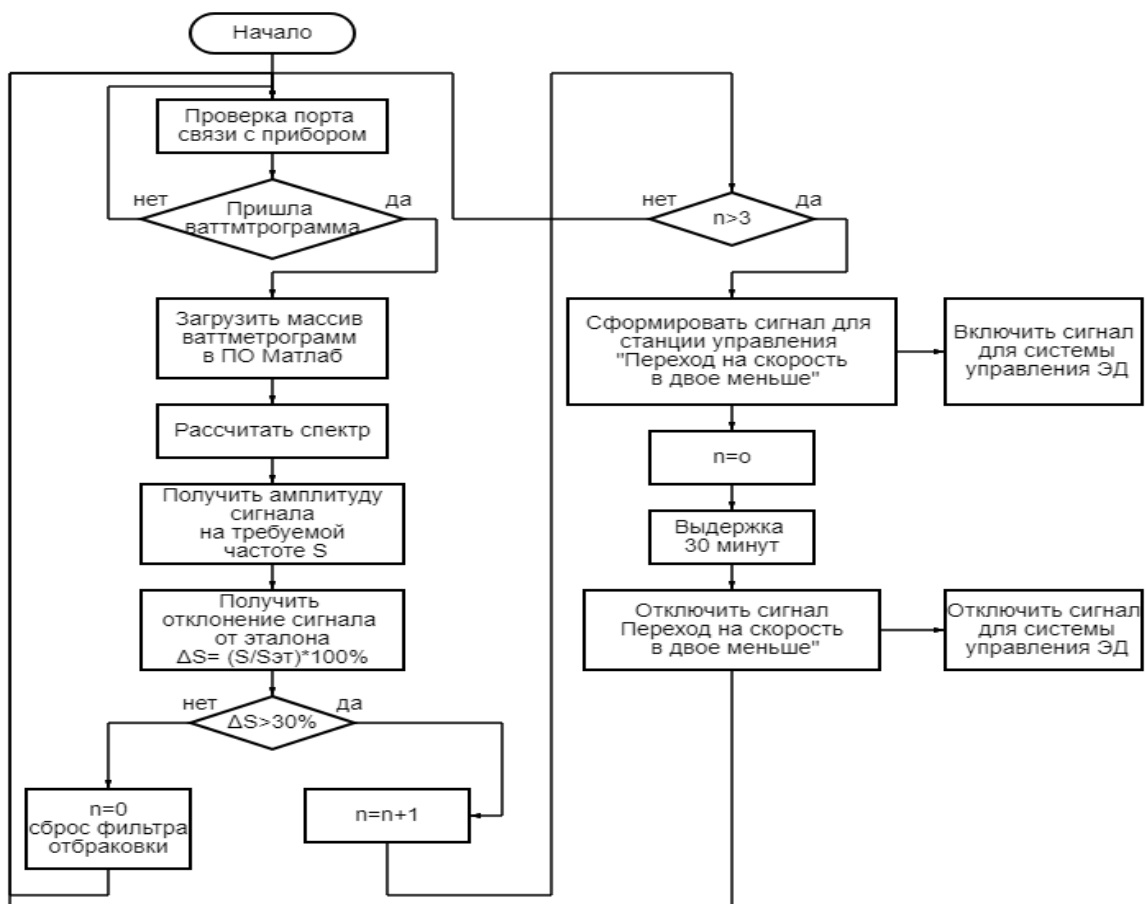


Рисунок 3.18. Алгоритм формирования спектра ваттметрограмм

Где, $S_{эт}$ - частота эталонного спектра;
 n - количество превышений 30% порога;
 ЭД – электрический двигатель.

Основным блоком данной части программы является блок, основанный на применении ПО MATLAB.

На рисунке 3.19 представлен график изменения во времени амплитуды сигнала спектра при работе станка-качалки и значение эталона сигнала, полученного при запуске системы и скорректированного через один час работы станка-качалки при условии снижения текущего сигнала, говорящего о стабилизации процесса добычи.

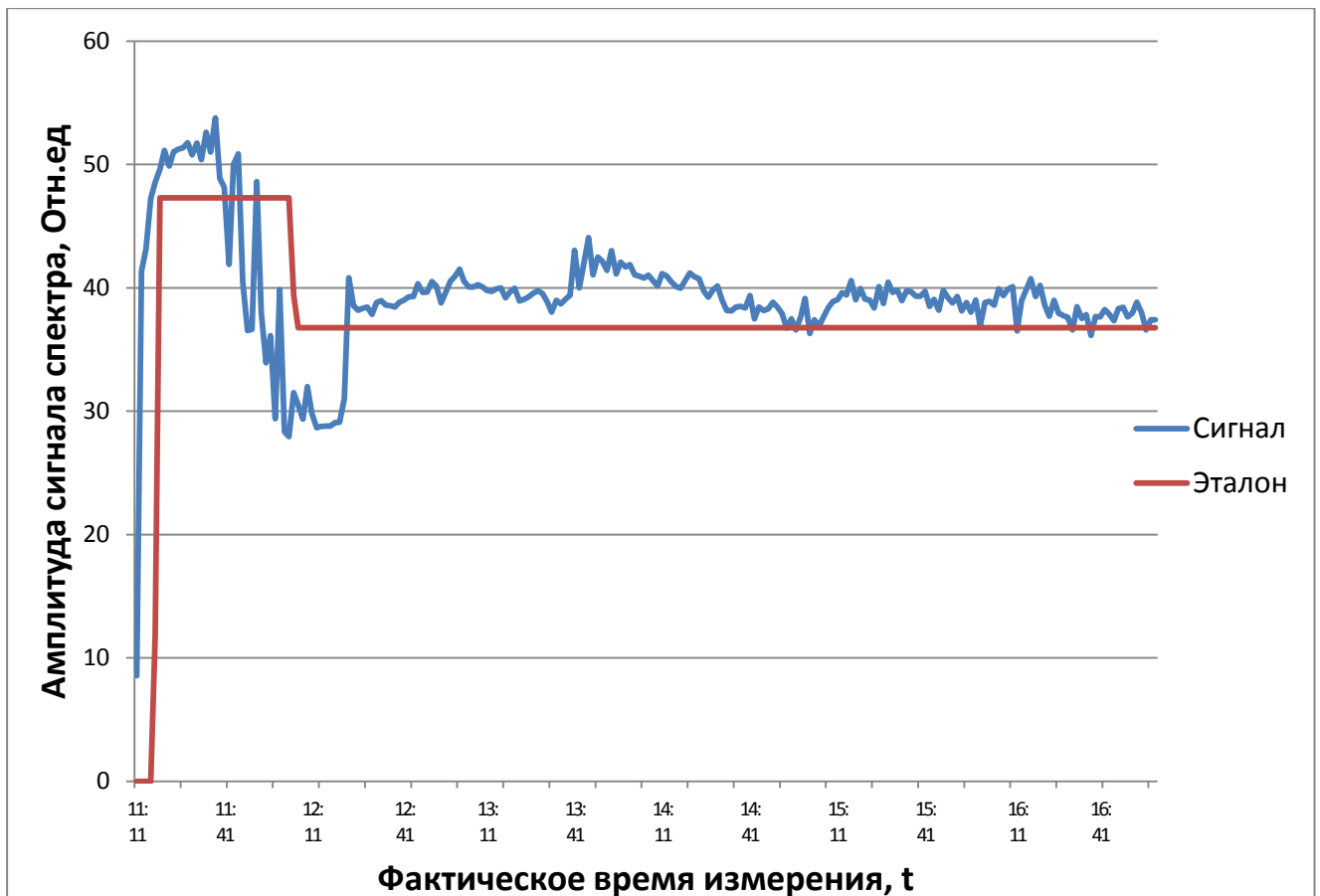


Рисунок 3.19. Графическое представление сигнала, полученного прибором и программным обеспечением

3.6. Выводы

В третьей главе реализован метод ваттметрирования с использованием спектрального анализа с разработанным аппаратно-программным комплексом, основанным на программном обеспечении Matlab для контроля возникновения эмульсии.

Раскрыт вопрос получения параметров для ваттметрирования.

Проведен метрологический анализ разработанного АПК. Проведена калибровка датчика тока и датчика напряжения.

Произведен расчет погрешности АЦП микроконтроллерного устройства и в целом расчет погрешности всего измерительного канала. Допускаемое среднеквадратическое отклонение погрешности измерительного канала с учетом приборов, входящих в состав измерительного канала для нормального закона распределения случайных составляющих погрешности в процентах от нормирующего значения составляет 1,422%.

Разработаны алгоритм и программное обеспечение получения и обработки спектра ваттметрограммы для реализации метода контроля возникновения эмульсии в разработанном приборе.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫМ КОМПЛЕКСОМ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЭМУЛЬСИИ В ШСНУ ПО СПЕКТРАЛЬНОМУ АНАЛИЗУ ВАТТМЕТРОГРАММЫ

4.1. Планирование эксперимента

Целью экспериментального исследования является подтверждение и проверка адекватности, работоспособности и практической пригодности метода и прибора контроля возникновения эмульсии в нефтяных скважинах с применением спектрального анализа ваттметрограммы штанговой скважинной насосной установки по результатам эксперимента.

Задачи экспериментального исследования:

- определение наличия нефтяной эмульсии;
- проверка теоретических положений с целью их подтверждения;
- проверка работоспособности аппаратно-программного комплекса.

Средства проведения измерений - аппаратно-программный комплекс, в состав которого входит:

- ваттметрограф на основе микроконтроллерного устройства;
- трансформаторный датчик тока YHDC SCT-013-000;
- трансформаторный датчик напряжения ZMPT101B;
- Датчик положения балансира для определения периода качания СК;
- Ноутбук или персональный компьютер с установленным программным обеспечением Matlab.

Проводимые исследования относятся к однофакторным экспериментам, т.е. при реализации эксперимента будет изменяться только один параметр – потребляемая активная мощность.

4.2. Методика проведения эксперимента

При проведении эксперимента необходимо исключить возможность влияния внешних факторов, таких как воздействие сторонних источников вибрации, ударов при работе привода и т.д, то есть ШСНУ должна быть исправна. Эксперименты проводятся с применением разрабатываемой станции управления станком-качалкой с интеграцией в нее разработанного прибора контроля и подключенного ПК с установленным программным обеспечением (рисунок 4.1).



Рисунок 4.1. Размещение оборудования на ШСНУ при проведении экспериментов

Порядок проведения эксперимента следующий:

- 1) Оснастить установку штангового скважинного насоса необходимым оборудованием для проведения эксперимента. Подготовить измерительное оборудование, установить датчики тока и напряжения на линию электропитания станции управления (место установки датчиков зачистить от загрязнений) согласно схеме, показанной на рисунке 3.11, установить датчик положения балансира.
- 2) Провести внешний осмотр наземного оборудования;
- 3) Перевести режим работы станка – качалки на станции управления переключателем с автоматического в ручной.

4) Разблокировать станок – качалку тормозным устройством, путем вращения ручки против часовой стрелки.

5) Подать питание на станцию управления станком-качалкой.

6) Произвести пуск СК нажатием кнопки ПУСК на панели СУ.

7) Установить переключатель СУ режима работы СК с ручного на автоматический.

8) Дождаться выхода работы установки в рабочий режим подачи скважины.

9) Произвести замеры рабочих параметров за цикл работы ШСНУ (один двойной ход) в течение максимально возможного времени до наступления момента образования эмульсии и возможного останова процесса добычи по аварии - перегрузки приводного электродвигателя:

– регистрация ваттметрограмм;

– регистрация времени полного цикла ШСНУ.

В случае применения станции управления с функцией повторного перезапуска накапливать ваттметрограммы в течение нескольких циклов перезапуска.

10) Остановить станок – качалку, установить переключатель режима работы станка-качалки в положение «отключено», после этого заблокировать станок – качалку тормозным устройством.

12) Обесточить станцию управления станка – качалки.

13) Демонтировать датчики тока и напряжения и датчик положения балансира.

4.3. Экспериментальная часть

С мая 2019 года по сентябрь 2020 года на ШСНУ СКДР6-3-5,3-63-18,5-1500, принадлежащей ОАО «ГРИЦ» в Черемшанском районе республики Татарстан было проведено множество экспериментов по снятию массивов ваттметрограмм разработанным макетным образцом ваттметрографа, как в режиме нормальной работы, так и в режиме интенсивного образования эмульсии (рисунок 4.2).



Рисунок 4.2. Проведение экспериментальных исследований на ШСНУ с интенсивным образованием эмульсии

Экспериментальные исследования проводились на трех скважинах с периодом качания 16,3 секунды 26,3 секунды и 16,2 секунды. На каждой из скважин был смонтирован прибор с АПК для контроля образования эмульсии. Длительность исследования каждой скважины составил от трех до 14 дней. За время экспериментов на каждой скважине было зарегистрировано не менее 20 случаев возникновения эмульсии. Ниже приведены характерные примеры возникновения эмульсии по каждой скважине.

В реальности, каждая скважина с ее оборудованием индивидуальна по своим параметрам, поэтому для расширения условий универсальности применения разработанных алгоритма и метода контроля образования эмульсии в ШСНУ на основе спектрального анализа ваттметрограммы и ухода от возникновения аварийных ситуаций необходимо иметь параметр, на основе которого будет производиться обработка измерений и принятие решений об изменении режима работы ШСНУ. Для получения параметра контроля принято решение о создании эталонного значения гармонического сигнала, получаемого при заведомо исправном состоянии объекта контроля.

Первая из скважин, на которых проводились эксперименты имеет период качания (полный оборот балансира) 16,3 секунды.

Ваттметрограммы, полученные в период времени одного из процессов образования эмульсии, показанны на рисунке 4.3. Для удобства все ваттметрограммы поместили в один рисунок, где зеленый цвет – эталонная ваттметрограмма, синий цвет – ваттметрограмма начала эмульсии, желтый цвет – ваттметрограмма возрастания эмульсии, фиолетовый цвет – ваттметрограмма при предмаксимальной эмульсии, черный цвет – ваттметрограмма, при которой наблюдался процесс максимального образования эмульсии, которая привела к аварийной остановке ШСНУ. Из рисунка видно, что процесс образования эмульсии характеризуется увеличением нагрузки на электропривод, однако, к увеличению нагрузки могут приводить и другие факторы, возникающие на ШСНУ, такие как, заклинивание штока, запарафинивание, механические повреждения станка-качалки и другие. Поэтому для выявления процесса образования эмульсии недостаточно опираться на такой показатель как изменение нагрузки. Разработанный метод контроля образования эмульсии основан на анализе спектров ваттметрограммы.

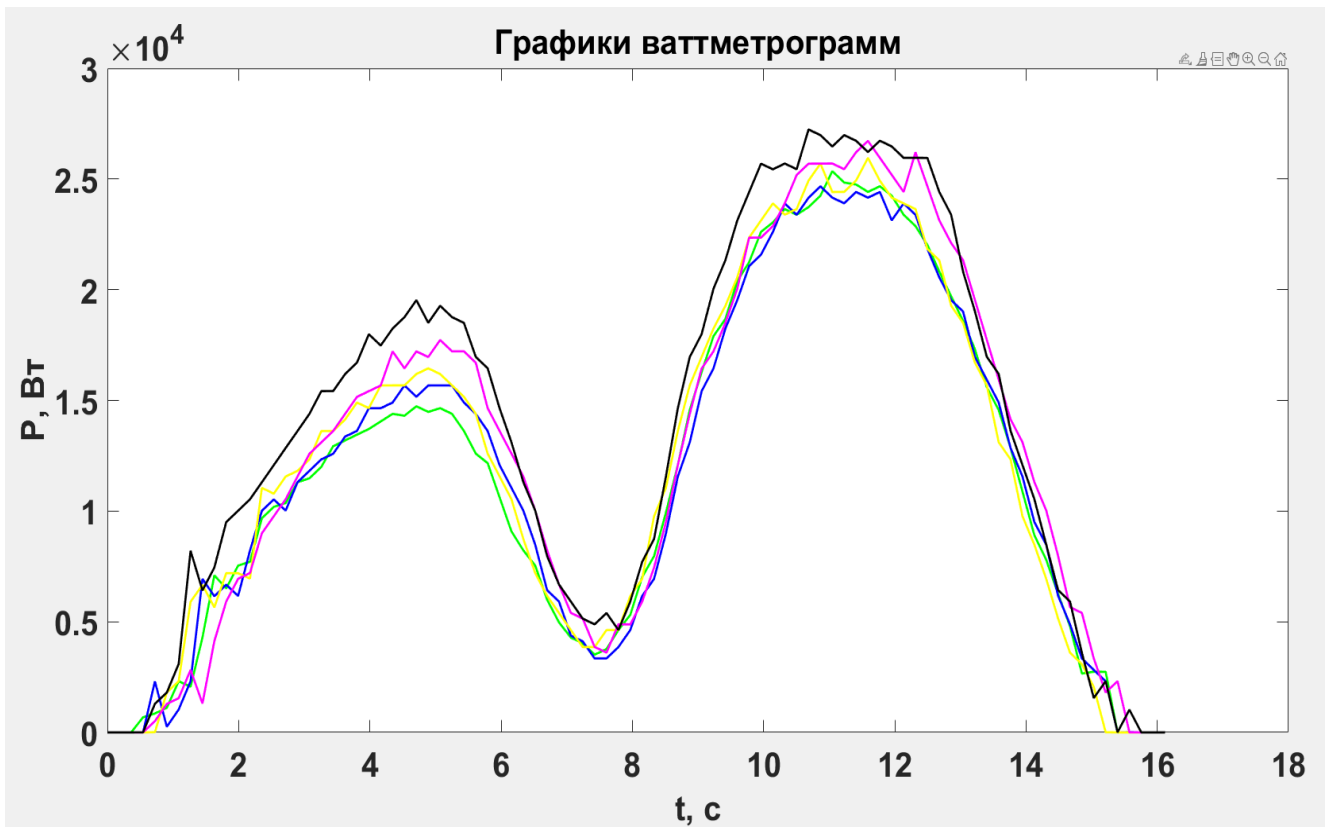


Рисунок 4.3. Представление эталонной ваттметрограммы и ваттметрограмм с нарастанием эмульсии

Произведено сравнение спектров нарастания эмульсии со спектром эталонной ваттметрограммы, обозначенной зелёным цветом. На спектрах отброшена низкочастотная составляющая (рисунок 4.4). Для удобства сравнения поместим все спектры на одном, с сохранением цветов с предыдущего рисунка обозначений ваттметрограмм с нарастанием эмульсии.

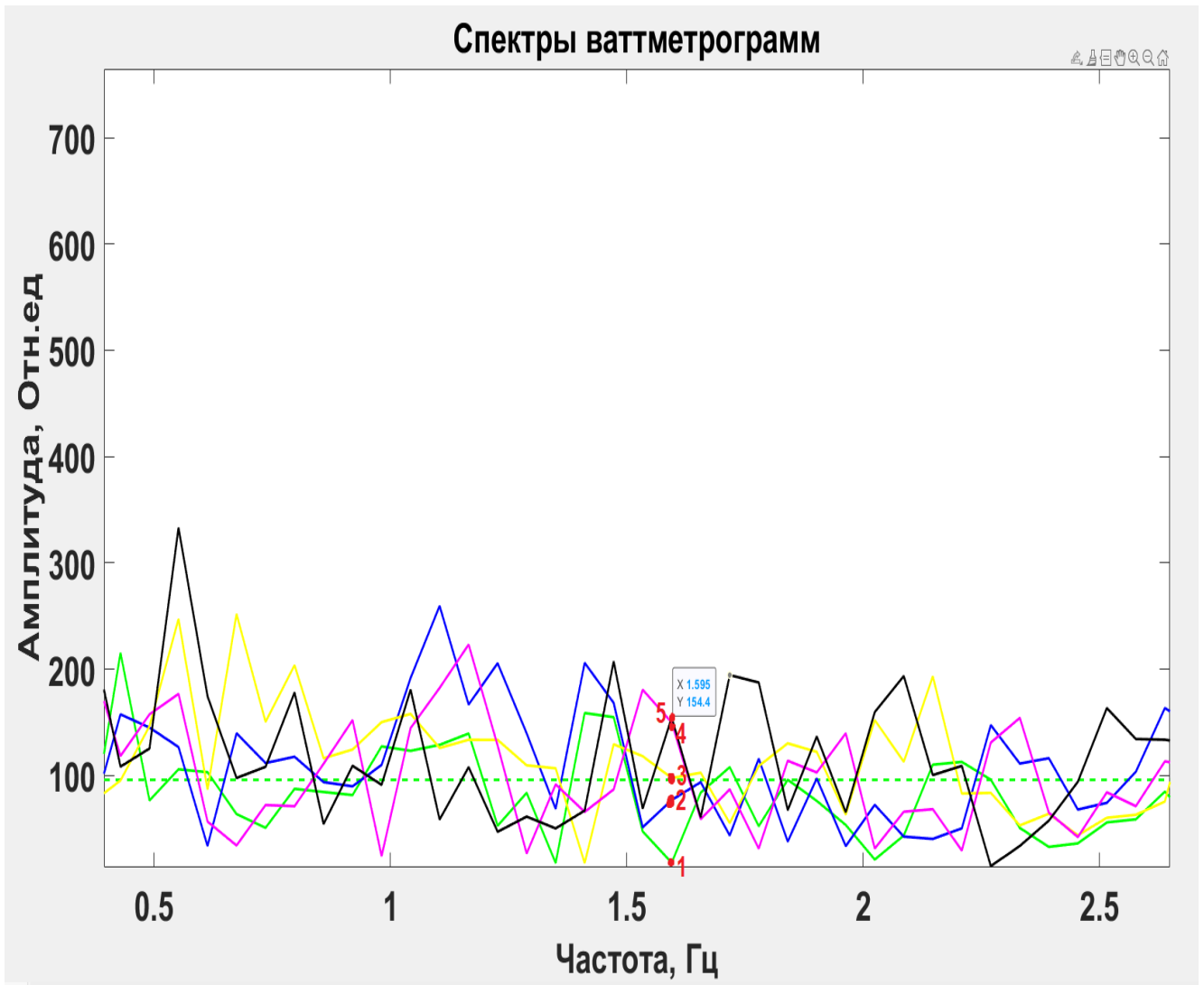


Рисунок 4.4. Сравнение эталонного спектра и спектров с нарастанием эмульсии

На спектре можно заметить рост в амплитуде на частоте 1,595 Гц. Стоит отметить, что спектр должен выглядеть в дискретном виде как на рисунке 2.2, программа Matlab достраивает линии между точками амплитуд, и поэтому для удобства анализа переведем все значения спектров в формат XLS программе Microsoft Excel и построим гистограмму (рисунок 4.5).

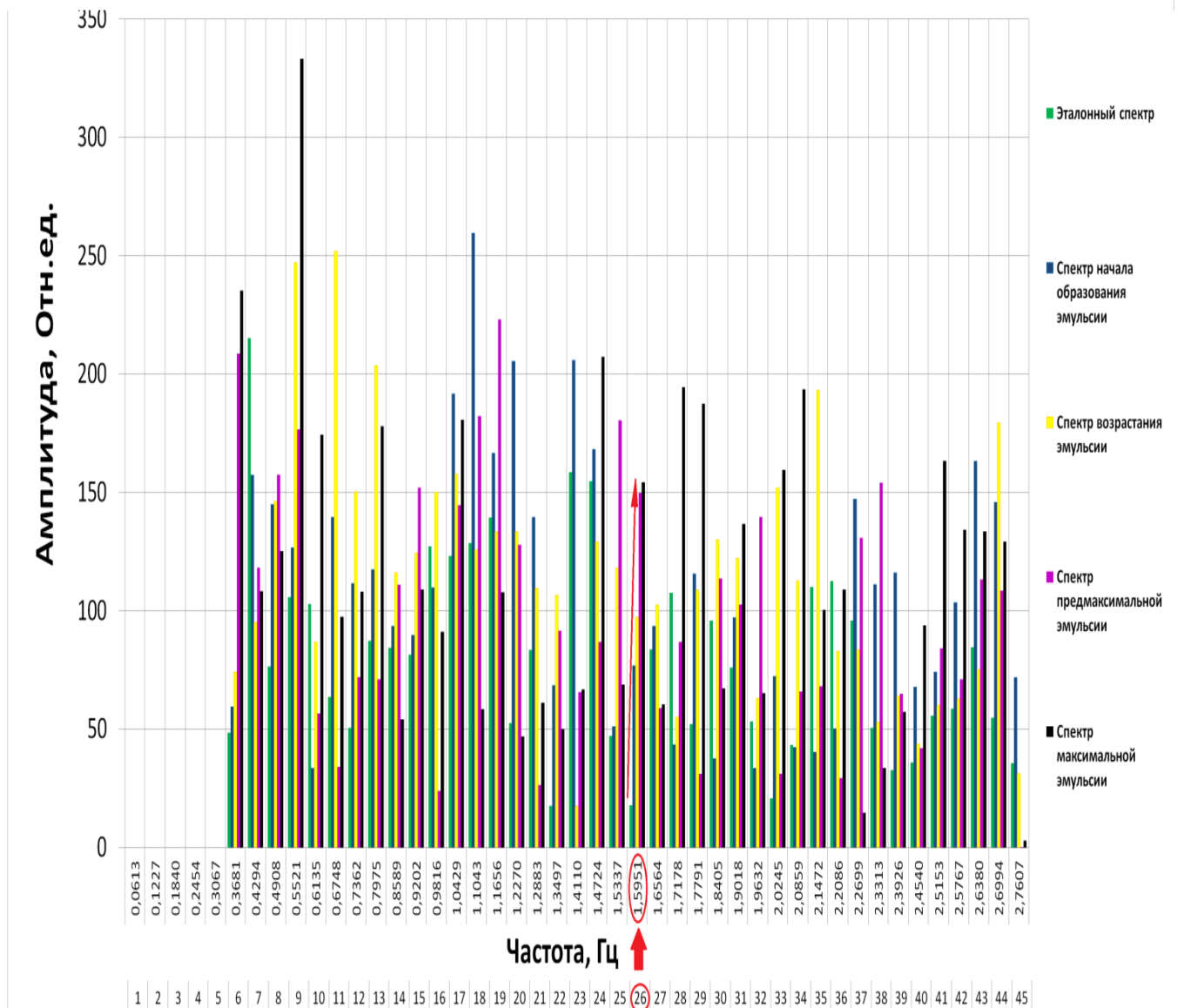


Рисунок 4.5. Представление полученных спектров в виде гистограммы

На рисунке 4.5 можем увидеть частоту 1,595 Гц, на которой происходит рост амплитуды от эталонного спектра до спектра максимальной эмульсии, что говорит о росте процесса образования эмульсии.

Данная 26 гармоническая составляющая была принята как основная при выявлении процесса образования эмульсии. На данном слайде представлена частота соответствующая росту эмульсии в более удобном виде.

Частота в спектрах, соответствующая 26 гармонической составляющей зависит от ряда параметров:

- частоты вращения двигателя;
- передаточного числа редуктора;

- длины хода штока.

Эти параметры позволяют рассчитать частоту спектра, соответствующую образованию эмульсии и 26 гармонической составляющей, на основе паспортных данных станка-качалки, текущих настроек механической части и заданной технологическим процессом частоты качания. Программное обеспечение осуществляет перерасчет частоты при каждом изменении условий работы.

Как оказалось данная частота соответствует только одному режиму работы ШСНУ и при изменении условий, например скорости вращения двигателя, частоты качаний, хода штока, необходимо производить перерасчет данной 26 гармонической составляющей.

Вследствие чего можно сделать вывод, что частота, соответствующая росту эмульсии будет зависеть от периода качания ШСНУ, а 26 гармоническая составляющая, соответствующая росту эмульсии останется неизменной. Это подтверждает эксперименты, сделанные на других ШСНУ с образованием эмульсии

Для проверки соответствия разработанной методики были проведены эксперименты на другой ШСНУ с периодом качания 26,3 секунды, где наблюдалось образование эмульсии, ваттметрограммы которой изображены на рисунке 4.6.

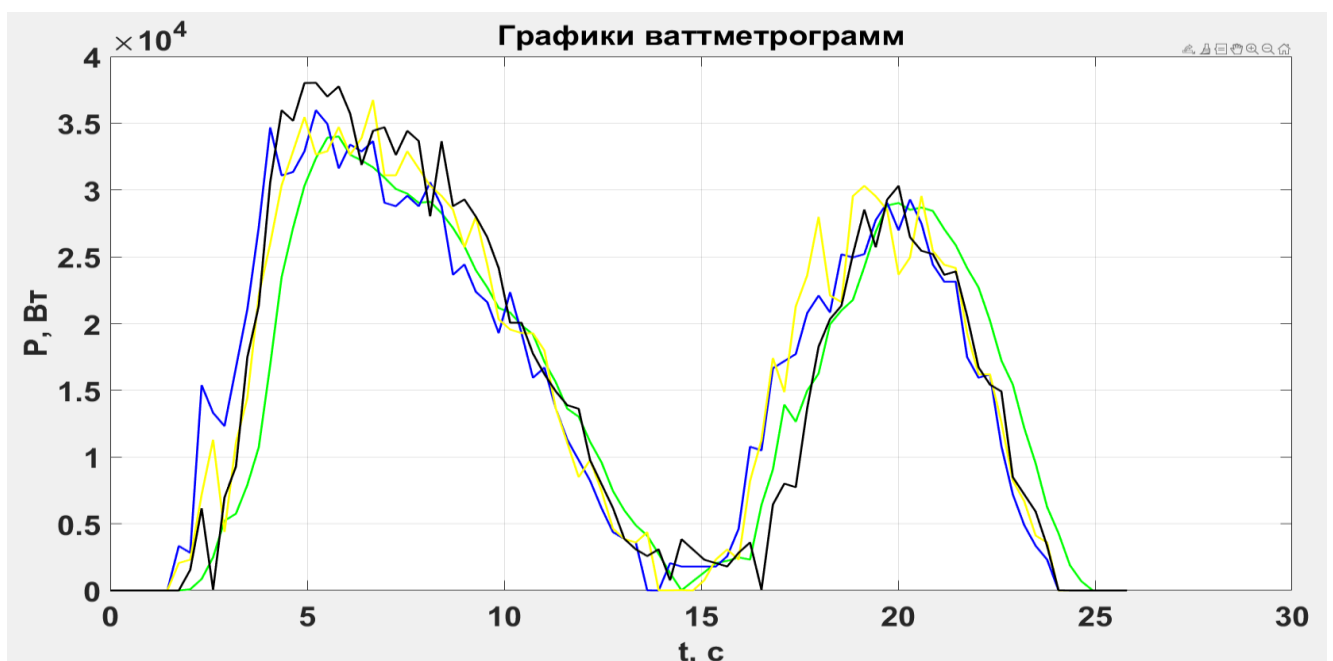


Рисунок 4.6. Ваттметрограммы - соответствующие нарастанию эмульсии

В ходе анализа ваттметрограмм, полученных в период времени одного из процессов образования эмульсии на ШСНУ с периодом работы 26,3 секунды рисунок 4.7, на котором для удобства все ваттметрограммы поместили в один рисунок, где зеленый цвет – эталонная ваттметрограмма, синий цвет – ваттметрограмма начала эмульсии, желтый цвет – ваттметрограмма возрастания эмульсии, черный цвет – ваттметрограмма, при которой наблюдалась максимальная эмульсия, которая привела к аварийной остановке ШСНУ.

Произведено сравнение спектров нарастания эмульсии со спектром эталонной ваттметрограммы, обозначенной зелёным цветом. На спектрах отброшена низкочастотная составляющая (рисунок 4.7.). Для удобства сравнения поместим все спектры на одном рисунке, с сохранением цветов с предыдущего рисунка обозначений ваттметрограмм с нарастанием эмульсии.

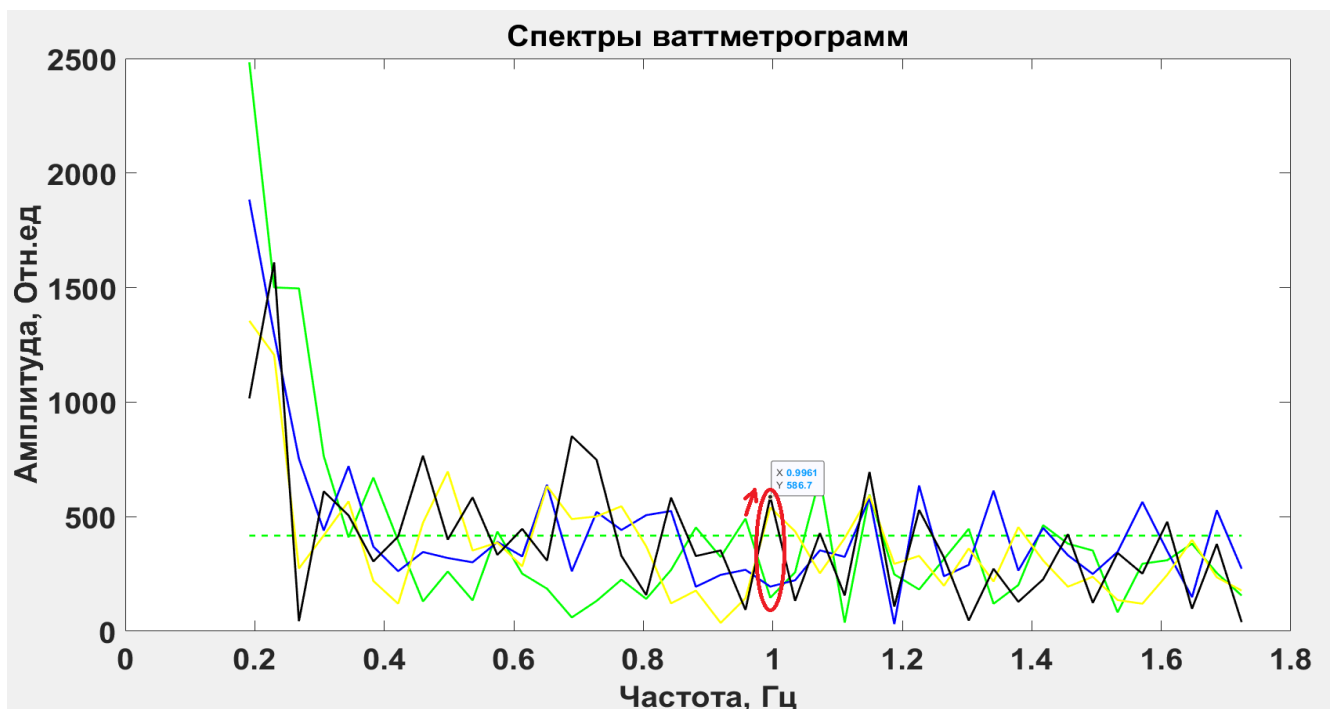


Рисунок 4.7. Сравнение эталонного спектра и спектров с нарастанием эмульсии

На спектре можно заметить рост в амплитуде на частоте 0,996 Гц. Для анализа переведем все значения спектров в формат XLS программе Microsoft Excel и построим гистограмму (рисунок 4.8).

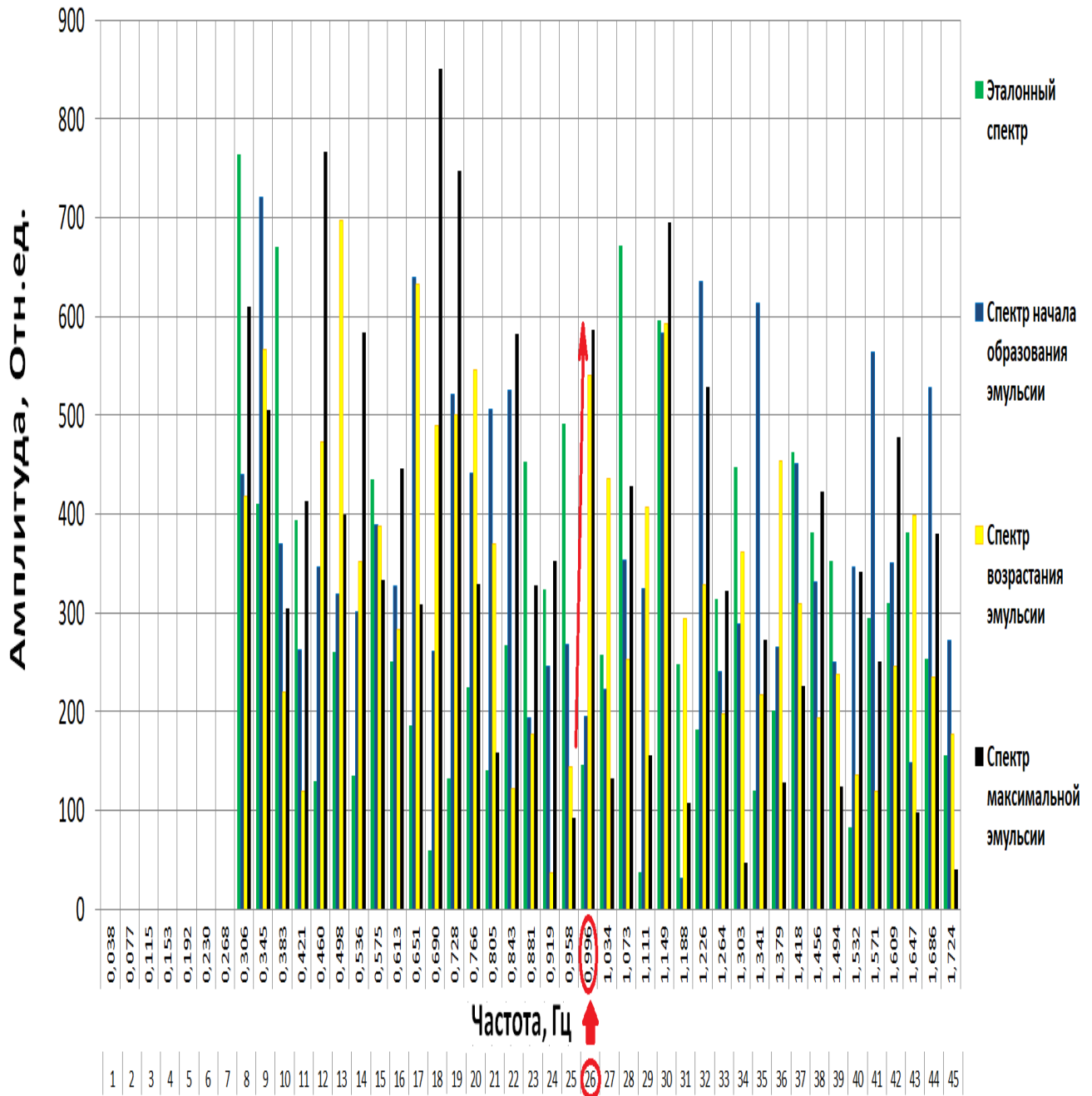


Рисунок 4.8. Представление полученных спектров в виде гистограммы

Стоит отметить, что при изменении периода качания и передаточного числа редуктора изменилась частота 0,996 Гц, но не порядковый номер гармонической составляющей, который остался 26

В третьем эксперименте разработанный метод показал свою эффективность в определении начала возрастания образования эмульсии. Эксперимент проводился на ШСНУ периодом качания 16,2 секунды. На рисунке 4.9 представлены ваттметрограммы нарастания эмульсии в данном эксперименте.



Рисунок 4.9. Ваттметрограммы, соответствующие нарастанию эмульсии

Этим ваттметрограммам соответствуют спектры, изображенные на рисунке 4.10.

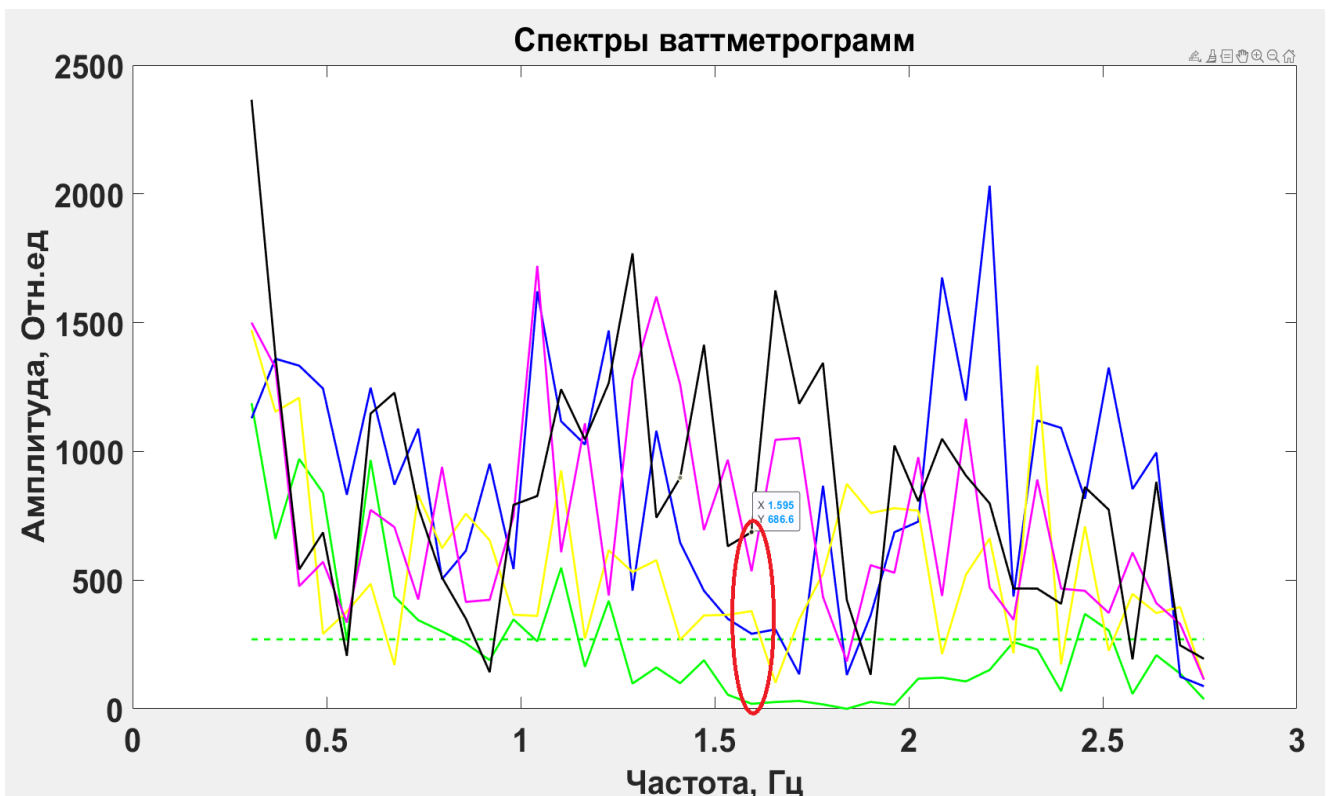


Рисунок 4.10. Сравнение эталонного спектра и спектров с нарастанием эмульсии

И соответственно в виде гистограммы на рисунке 4.11.

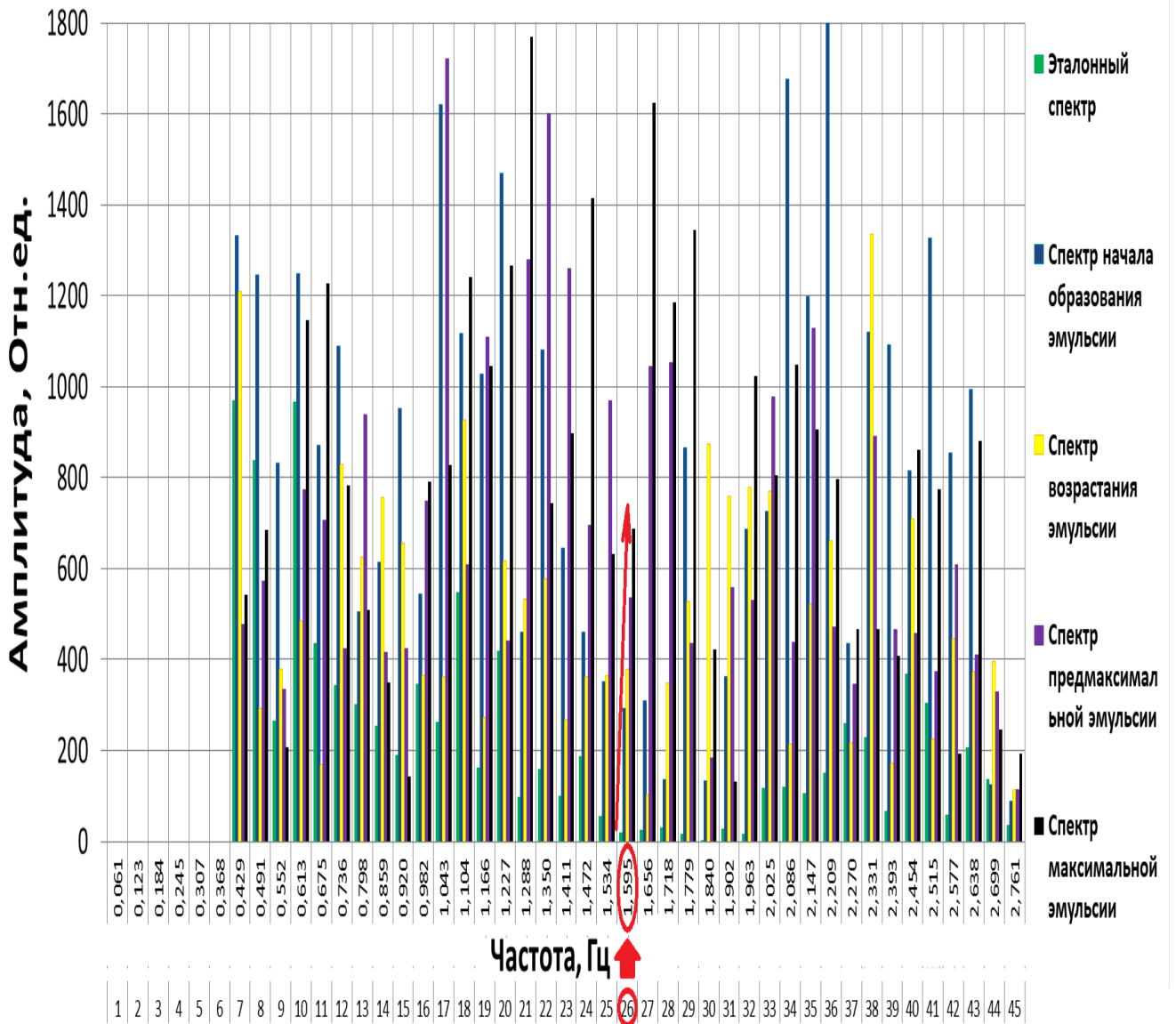


Рисунок 4.11. Представление полученных спектров в виде гистограммы

По всем трем экспериментальным скважинам можно сделать вывод, что в разработанном методе определения возникновения эмульсии 26 гармоническая составляющая показывает рост эмульсии в цилиндре насоса.

Эмульсия типа «нефть в воде» может развиваться в гидравлический удар. Это когда насос не заполняется полностью жидкостью во время хода плунжера вверх, в верхней части камеры между всасывающим и нагнетательным клапаном образуется газовая шапка низкого давления. При следующем ходе плунжера вниз

нагнетательный клапан остается закрытым до тех пор, пока не столкнется с жидкостью. Это явление называется гидравлическим ударом, который приводит к сильной ударной нагрузке на всю насосную установку [74].

Гидравлический удар можно уменьшить, если настроить время откачки в соответствии с нефтеотдачей скважины с помощью процентного таймера, установленного в органы управления электродвигателем [11].

4.4. Алгоритм работы АПК ухода от аварийной ситуации

С целью обеспечения безаварийной работы ШСНУ в моменты возникновения эмульсии возникла необходимость разработки алгоритма ухода от аварийной ситуации при работе станции управления. Данный алгоритм должен создавать эталоны параметров нормальной работы ШСНУ и постоянно отслеживать их отклонения с целью выработки управляющего воздействия на электропривод, то есть при обнаружении возникновения эмульсии снизить скорость качания с последующим возвратом на заданную скорость. Применение данной методики, как показала практика, способствует уменьшению степени образования эмульсии и исключению аварийных остановок ШСНУ.

В нормальном режиме работы станка-качалки отсутствуют возмущающие факторы, действующие на систему электропривода, поэтому привод работает без перегрузок и отсутствует опасность остановки добычи в связи с перегрузкой [20].

Начало работы всего алгоритма (рисунок 4.12) основано на получении и сохранении в памяти управляющей системы станка-качалки эталонного режима работы. Изначально определить является ли текущий режим работы качалки нормальным или предаварийным невозможно, так как необходимо сравнивать параметры работы с некими параметрами наиболее близкими к нормальным.

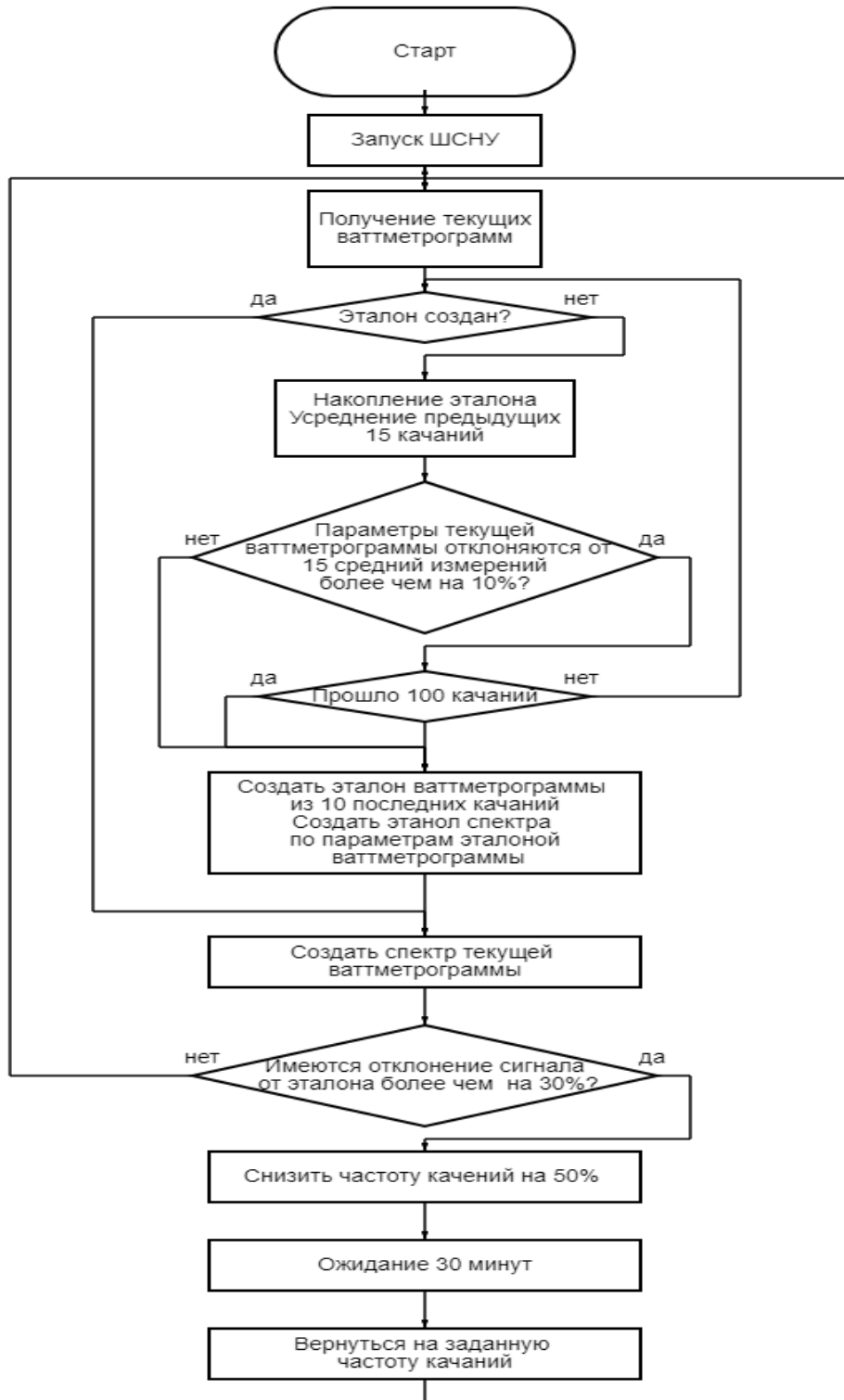


Рисунок 4.12. Алгоритм работы АПК

Рассмотрим подробнее представленный алгоритм.

Для упрощения процесса получения эталонных параметров принято считать, что запуск станка-качалки производится на исправной ШСНУ также отсутствует эмульсия в насосной части.

Сразу после запуска начинается процесс получения эталонных параметров, которые включают в себя мгновенные значения токов и напряжений, которые в свою очередь перемножаются в АПК для получения активной мощности. При этом происходит накопление параметров с каждым качанием (оборотом балансира) станка-качалки. Далее происходит усреднение за последние 10 качаний и сравнение усредненных параметров с новыми параметрами, полученными с каждым новым качанием.

Работа станка-качалки стабилизируется в течение 10-20 качаний, и в случае если в данный период параметры не выравниваются, дается еще некоторое время (до 100 качаний), в течение которого продолжается сравнение текущих параметров с предыдущими усредненными.

В момент, когда текущие параметры станка-качалки не будут отличаться от усредненных предыдущих более чем на 5-10%, будет происходить формирование и сохранение в памяти системы управления - эталона параметров работы СК. Дальнейший процесс контроля возникновения эмульсии будет производиться на значениях эталонных параметров.

Система управления через час после запуска качалки производит уточнение параметров эталона в том случае, если они изменились в меньшую сторону, например, снизилась нагрузка на электропривод, то происходит построение нового эталона.

После создания эталона параметров качалки, система управления получает ваттметрограмму каждого качания, обрабатывает ее, получает спектральное представление. На частоте, соответствующей периоду качания, частоте вращения кривошипно-шатунного механизма, определяется амплитуда сигнала, которая сравнивается с эталонной величиной, полученной в момент формирования эталона параметров. При отклонении амплитуды сигнала спектра ваттметрограммы на данной частоте на 30 и более процентов, системой формируется команда частотному регулятору, работающему в составе электропривода СК, перехода на частоту качания, соответствующую половине заданной частоте качания.

Спустя 30 минут качания на пониженной частоте, система вновь формирует команду перейти на заданную частоту качаний и определяет произошел ли уход от образования эмульсии в нагнетающей части насоса. Если произошел уход от эмульсии, то система продолжает работать на заданной частоте качаний. В случае, если уход от эмульсии не произошел, система управления снова переходит на пониженную частоту качаний с последующим возвратом на заданную частоту.

Применяя такой алгоритм работы, становится возможным избежать перегрузок электропривода станка-качалки нефти из-за образования эмульсии, и тем самым избежать простоев, и добиться максимального уровня добычи нефти.

4.5. Результаты опытной эксплуатации промышленного образца электропривода ШСНУ

С 13 октября по 15 декабря 2021 года проведены опытно-промышленные испытания электропривода ЭПСКН-15 производства АО «ЧЭАЗ» на скважинах НГДУ «Джалильнефть» (СП «Татнефть-Добыча») ПАО «Татнефть». В качестве объектов испытаний были подобраны скважины №16715, №15902 с интенсивным образованием эмульсии (Приложение Д).

Получены результаты полевых испытаний электропривода, показавшие обеспечение безаварийной работы электропривода ШСНУ благодаря применению разработанной методики диагностики.

На скважине №16715 11 ноября был введен противоэмульсионный реагент. Станция управления при этом была переведена в ручной режим, который подразумевал работу на одной фиксированной частоте электродвигателя с фиксированным периодом качания. Данный режим работы станции управления подразумевает реализацию только защит по перегрузке электропривода с активацией системы автоматического повторного включения (АПВ). Система АПВ подразумевает реализацию повторного запуска станка-качалки в случае возникновения аварийной ситуации. Повторный запуск системы производится

через 30 минут после аварийной остановки, а в случае неудачной попытки перезапуска, следующая попытка запуска выполняется через 60 минут. Каждый запуск с помощью системы АПВ выполняется на пониженной частоте вращения электродвигателя в течение 30 минут с последующим переходом на заданную частоту вращения. На рисунке 4.13 показана диаграмма работы ШСНУ на скважине №16715 в период с 12 по 14 ноября. После запуска системы был успешно создан эталон сигнала, который, через три часа после запуска, скорректирован по причине уменьшения значения сигнала текущего качания.

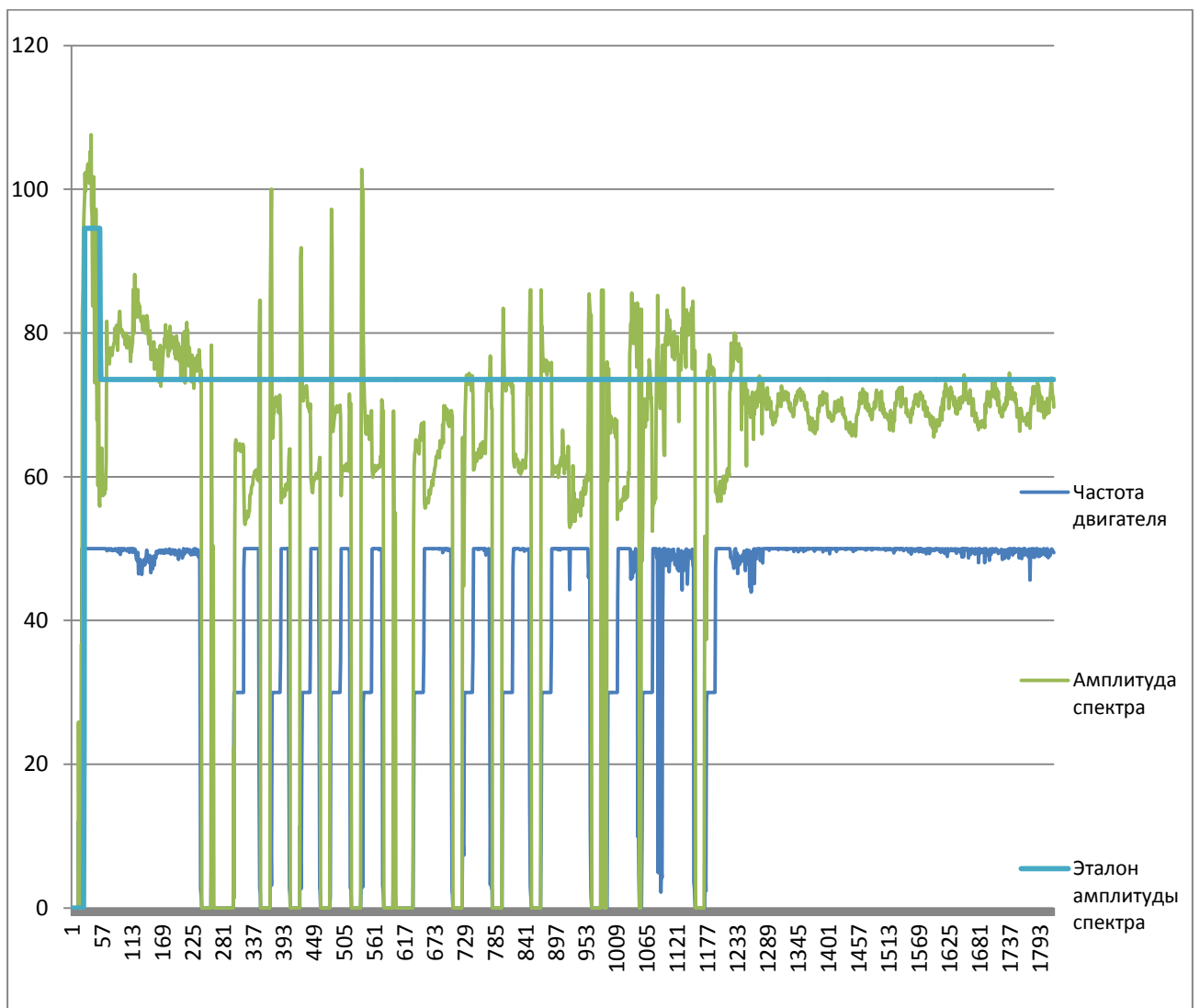


Рисунок 4.13. Диаграмма работы ШСНУ с введенным противоземulsionным реагентом

Примерно через 11 часов после запуска системы в скважине начался процесс интенсивного образования эмульсии, о чем говорят всплески амплитуды

сигнала, рассчитанного разработанным прибором контроля образования эмульсии. Но так как система управления станции находилась в ручном режиме работы, перехода на пониженную частоту качания не происходило. Процесс качания продолжался до критических значений нагрузки на электропривод станка-качалки, в результате чего происходило его отключение системой защиты от перегрузок с повторным перезапуском.

Примерно через 48 часов после введения противоэмульсионного реагента, началось его действие. При этом интенсивность образования эмульсии резко снизилась. Об этом говорит правая часть диаграммы на рисунке 4.13. Также снизилась амплитуда сигнала образования эмульсии ниже эталонного значения, что говорит о правильности выбора 26 гармонической составляющей в качестве сигнала интенсивности образования эмульсии.

На основании проведенного испытания, можно сделать вывод о правильности работы предложенного метода контроля образования эмульсии в ШСНУ

С 6 декабря опытная эксплуатация продолжилась на скважине №15902. Станция управления была демонтирована со скважины №16715 и смонтирована на скважине №15902.

На рисунке 4.14 представлена диаграмма работы ШСНУ при отключенной системе защиты от образования эмульсии и алгоритма ухода от аварийных ситуаций. Диаграмма приведена с частотой обновления данных 2 минуты. Данный режим был использован в начале опытно-промышленной эксплуатации, на данной скважине, с целью точной настройки защит электропривода от перегрузок. На графике можно увидеть частые всплески амплитуды спектра ваттметрограммы, говорящие об образовании эмульсии и приводящие 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.



Рисунок 4.14. Диаграмма работы ШСНУ с отключенной системой защиты от эмульсии

На рисунке 4.15 представлена диаграмма работы ШСНУ с включенной системой защиты от образования эмульсии на основе разработанной методики диагностирования и алгоритма ухода от аварийных ситуаций. Диаграмма приведена с частотой обновления данных 2 минуты. При этом можно увидеть график эталонного значения частоты спектра сигнала, созданного при запуске станка-качалки и скорректированного через три часа работы при условии уменьшения среднего значения десяти ваттметрограмм на величину более 10 %. При дальнейшей эксплуатации ШСНУ разработанная методика четыре раза распознала процесс образования эмульсии и не позволила произойти аварийной остановке благодаря переходу на пониженную с последующим возвратом на заданную частоту качания.

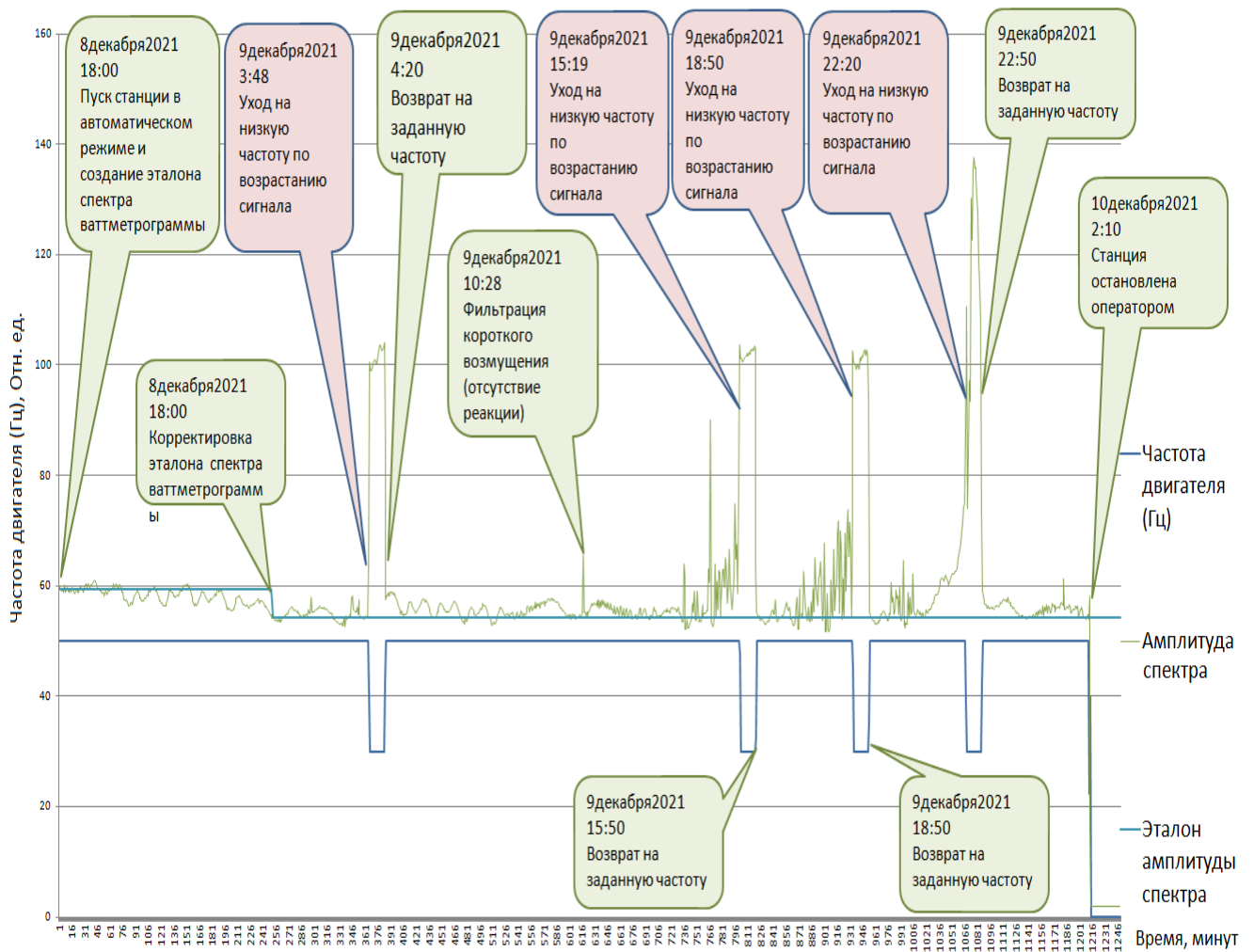


Рисунок 4.15. Диаграмма работы ШСНУ с включенной системой защиты от эмульсии

На рисунке 4.16 показаны диаграммы сигнала наличия эмульсии при работе ШСНУ с включенной и отключенной защите от эмульсии, совмещенные во времени, здесь можно видеть соизмеримость величины сигнала. Данные диаграммы были получены на одной и той же ШСНУ в разное время работы.

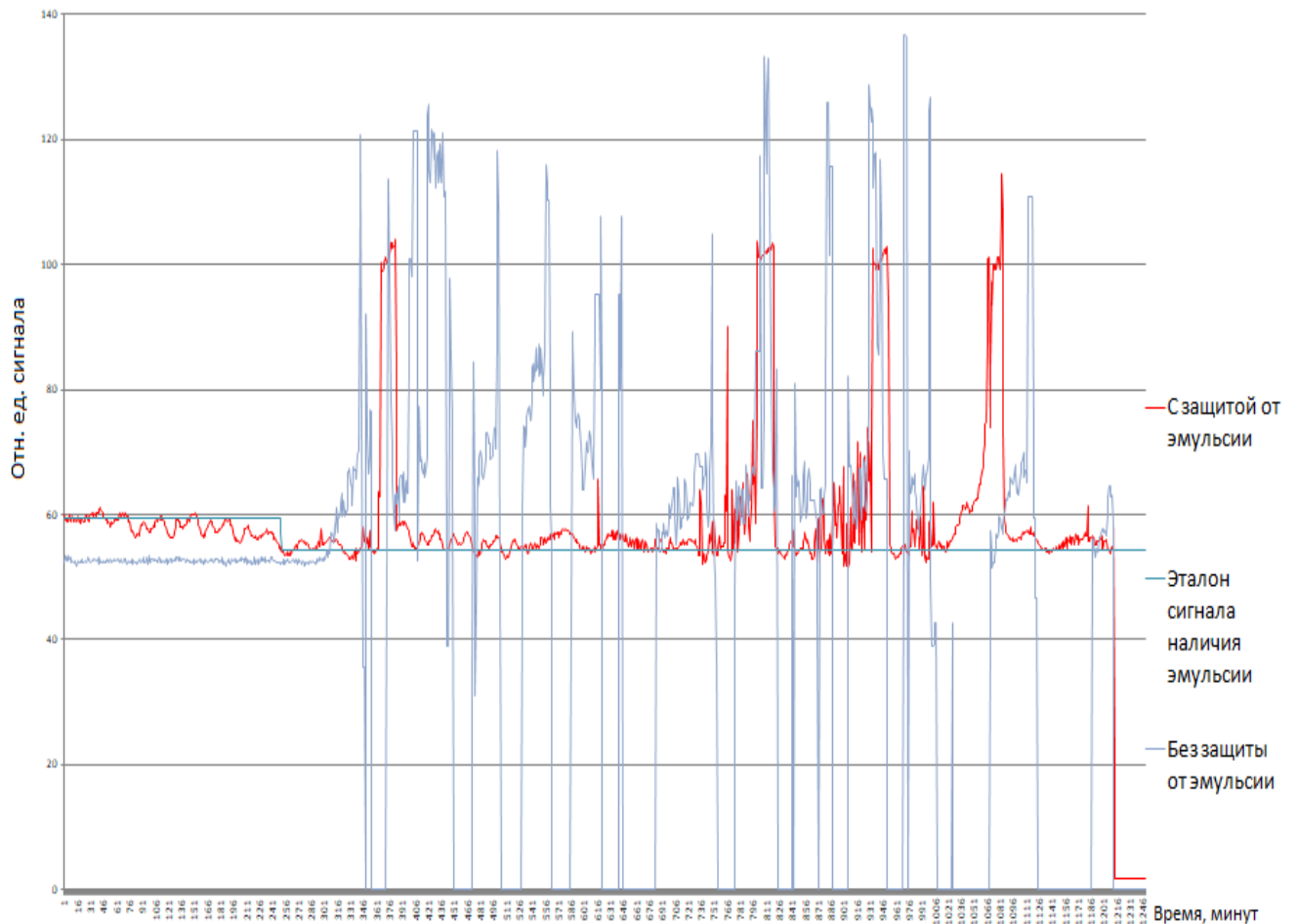


Рисунок 4.16. Диаграмма сигнала наличия эмульсии при работе ШСНУ с включенной и отключенной защите от эмульсии, совмещенные во времени

На рисунке 4.17 показаны частоты электропривода данной ШСНУ, полученные в режимах с отключенной и включенной защитой от эмульсии, совмещенные во времени.

В результате, рассчитав время непрерывной работы в режимах без защиты, при этом ШСНУ работала 1806 минут, и с защитой от эмульсии, при этом ШСНУ работала 2426 минут, получено, что в первом случае на ШСНУ произошло 14 отказов, вызвавших остановку электропривода по защите от перегрузки, а во втором случает только одна (рисунок 4.17).

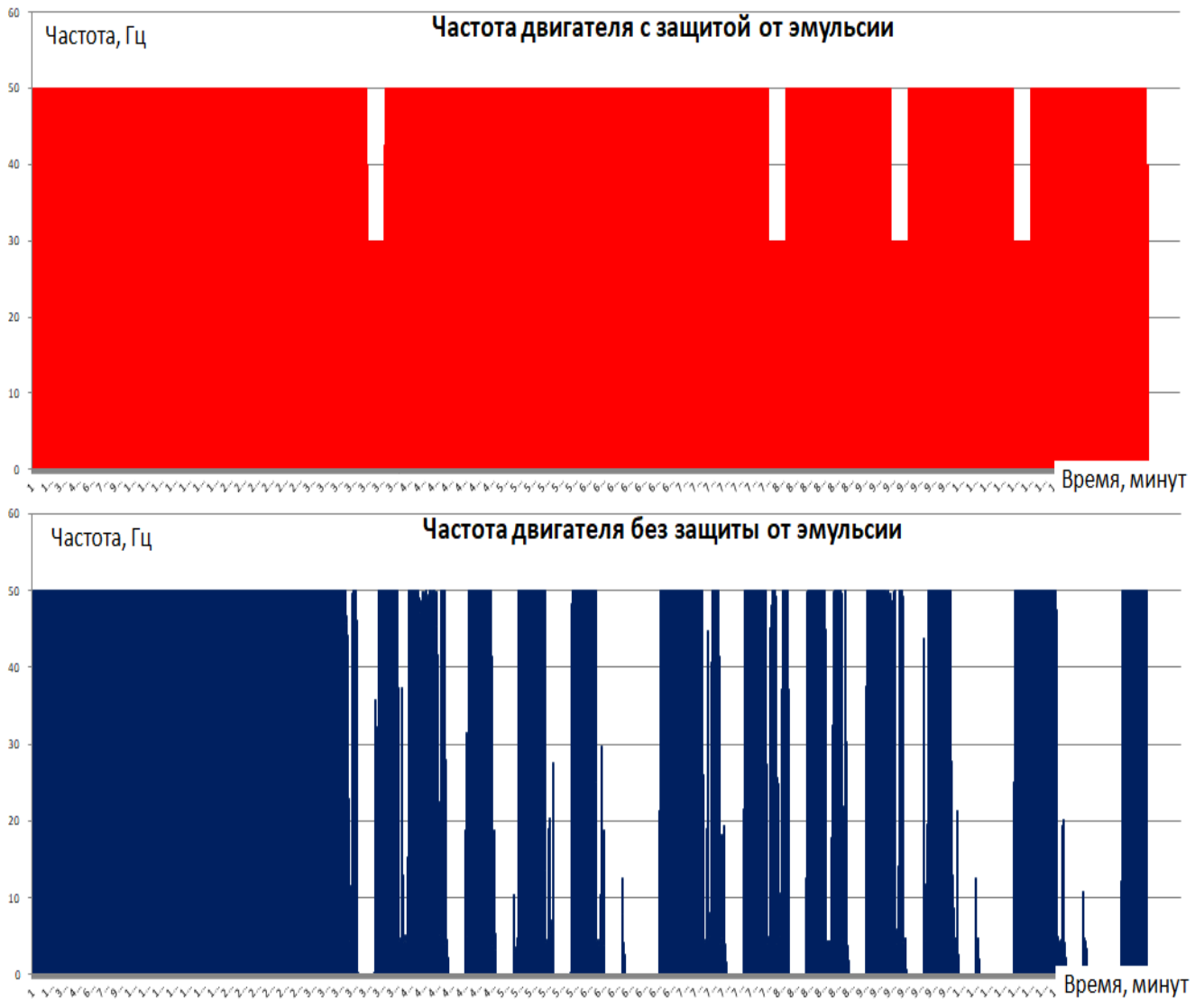


Рисунок 4.17. Диаграмма частоты электропривода при работе ШСНУ с включенной (верхний рисунок) и отключенной (нижний рисунок) защите от эмульсии, совмещенная во времени

Произведен расчет технического параметра, характеризующего надежность восстанавливаемой технической системы - средней наработки на отказ.

Средняя наработка на отказ системы, рассчитывается по формуле:

$$T_{oi} = \frac{T_{pi}}{k} \quad (4.1)$$

где: T_{pi} - суммарное (общее) время пребывания системы в работоспособном состоянии; k - суммарное число отказов системы.

В соответствии с диаграммой «Частота двигателя без защиты от эмульсии» (рисунок 4.17) суммарное число отказов составляет 14, при времени пребывания системы в работоспособном состоянии равным 1806 минут и общем временем

2426 минут. В соответствии с диаграммой «Частота двигателя с защитой от эмульсии» произошёл 1 отказ при времени пребывания системы в работоспособном состоянии равным 2396 минут и общем временем 2426 минут.

Средняя наработка на отказ без защиты от эмульсии:

$$T_{обз} = \frac{T_{pbz}}{k} = \frac{1806}{14} = 129(\text{мин})$$

Средняя наработка на отказ с защитой от эмульсии:

$$T_{оз} = \frac{T_{pz}}{k} = \frac{2396}{1} = 2396(\text{мин})$$

Произведен расчет среднего времени восстановления в связи с возникновением эмульсии.

Среднее время восстановления системы, рассчитывается по формуле:

$$\hat{T}_g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tau_i \quad (4.2)$$

где: n – число восстановлений, равное числу отказов, τ – время затраченное на восстановление.

Среднее время восстановления системы без защиты от эмульсии:

$$\hat{T}_{гбз} = \frac{2426 - 1806}{14} = 44,29(\text{мин})$$

Среднее время восстановления системы с защитой от эмульсии:

$$\hat{T}_{гз} = \frac{2426 - 2396}{1} = 30(\text{мин})$$

Среднее время восстановления системы равняется 44,29 минуты без защиты от эмульсии, и 30 минут с защитой.

Произведен расчет комплексного показателя надежности - коэффициента готовности.

Коэффициент готовности – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени.

Представляет собой отношение времени исправной работы к сумме времен исправной работы и вынужденных простоев объекта, взятых за один и тот же календарный срок.

$$K_{gbz} = \frac{T_{obz}}{T_{obz} + \hat{T}_{gbz}} \quad (4.3)$$

Коэффициент готовности без защиты от эмульсии

$$K_{gbz} = \frac{T_{obz}}{T_{obz} + \hat{T}_{gbz}} = \frac{129}{129 + 44,29} = 0,7444$$

Коэффициент готовности с защитой от эмульсии:

$$K_{gz} = \frac{T_{oz}}{T_{oz} + \hat{T}_{gz}} = \frac{2426}{2426 + 30} = 0,9878$$

Коэффициент готовности при защите от эмульсии равен 0,9878, т.к. был один отказ на протяжении всего эксперимента в связи с возникновением эмульсии. Тогда разность коэффициентов готовности с защитой от эмульсии и без защиты от эмульсии покажет увеличение комплексного показателя надежности - коэффициента готовности на 24,34%, что является явным показателем увеличения надежности ШСНУ благодаря внедрению в систему управления ШСНУ разработанного метода контроля эмульсии с алгоритмом ухода от аварийной ситуации и прибора контроля образования эмульсии.

4.6. Выводы

В четвертой главе представлено экспериментальное исследование с помощью АПК для диагностирования механических дефектов ШСНУ по параметрам ваттметрограммы с использованием спектрального анализа.

Проведено планирование эксперимента, в котором поставлены задачи. Приведены средства проведения измерений. Проводимые исследования относятся к однофакторным экспериментам, т.е. при реализации эксперимента поддается изменению только один параметр – потребляемая активная мощность.

Составлена пошаговая методика проведения экспериментального исследования.

Проведен эксперимент на действующей ШСНУ в процессе эксплуатации. Данный эксперимент, с помощью разработанного метода и созданного АПК, выявил процесс образования эмульсии нефти.

Разработан алгоритм работы станции управления для ухода от аварийной ситуации в связи с образованием эмульсии в насосном оборудовании ШСНУ и повышения безаварийности работы.

Разработанный прибор контроля образования эмульсии с аппаратно-программным комплексом для реализации метода контроля ШСНУ, по параметрам спектра ваттметрограмм актуален для нефтедобывающих компаний и может быть использован для разработок новых усовершенствованных методов контроля и диагностики. Данная технология реализована в виде алгоритмов программного обеспечения, которое можно интегрировать в существующие микропроцессорные системы контроля и управления ШСНУ.

В качестве перспектив дальнейшей разработки темы исследования можно отметить, что создание системы и методики определения механических дефектов и состояния оборудования штанговых скважинных насосных установок в процессе эксплуатации может быть расширено функционалом дополнительной динамометрической диагностики, которая позволяет повысить точность определения возникновения эмульсии и повысить надежность ШСНУ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщив выводы изложенные в отдельных главах, отметим основные результаты диссертационной работы.

1. Обзор нефтяного фонда скважин показал большую долю использования ШСНУ в России. Проведен анализ отказов оборудования ШСНУ, основные причины которого стали обрыв штанг, дефекты клапанов и отказ оборудования вследствие появления водонефтяной эмульсии. Раскрыто понятие эмульсии, причины ее возникновения и способы её устранения.

2. Патентный анализ показал нераскрытость темы ваттметрирования в области спектрального анализа параметров ваттметрограммы.

3. Необходимо отметить, что если дефекты или наличие эмульсии нельзя диагностировать по ваттметрограммам, то необходимо прибегнуть к спектральному анализу массива ваттметрограммы.

4. Разработан метод ваттметрирования с использованием спектрального анализа с использованием разработанного аппаратно-программном комплекса.

5. Разработан прибор для контроля возникновения эмульсии в цилиндре насоса и формирования управляющего воздействия на электропривод ШСНУ с целью недопущения аварийных остановок по перегрузке.

6. Проведен метрологический анализ разработанного АПК. Проведена калибровка датчика тока и датчика напряжения.

7. Произведен расчет погрешности АЦП микроконтроллерного устройства и в целом расчет погрешности всего измерительного канала. Допускаемое среднеквадратическое отклонение погрешности измерительного канала с учетом приборов, входящих в состав измерительного канала для нормального закона распределения случайных составляющих погрешности в процентах от нормирующего значения составляет 1,422%.

8. Разработан алгоритм для АПК ухода от аварийной ситуации в связи с эмульсией в насосном оборудовании ШСНУ во время эксплуатации.

9. Разработано программное обеспечение для контроля образования эмульсии в ШСНУ на базе программного обеспечения Matlab;

10. Произведено экспериментальное исследование по составленной пошаговой методике с помощью разработанного АПК для контроля возникновения эмульсии в цилиндре насоса ШСНУ по параметрам ваттметрограммы с использованием спектрального анализа.

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

12. Благодаря внедрению в систему управления ШСНУ разработанного метода контроля эмульсии с алгоритмом ухода от аварийной ситуации и прибора контроля образования эмульсии, удалось улучшить комплексный показатель надежности - коэффициент готовности на 24,34%.

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.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

АПВ	Автоматическое повторное включение
АПК	Аппаратно-программный комплекс
АСПО	Асфальтосмолопарафиновые отложения
АЦП	Аналого-цифровой преобразователь
ВАК	Высшая аттестационная комиссия
ВИЭ	Возобновляемые источники энергии
ГОСТ	Государственный стандарт
Гц	Герц
ЖК	Жидкокристаллический
ИК	Измерительный канал
КПД	Коэффициент полезного действия
МЗБ	Младший значащий бит
МК	Микроконтроллер
МКУ	Микроконтроллерное устройство
МПК	Международная патентная классификация
НИОКР	Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы
НК	Нефтяная компания
НКТ	Насосно-компрессорная труба
НМТ	Нижняя мертвая точка
ВМТ	Верхняя мертвая точка
ПАВ	Поверхностно-активные вещества
ПАО	Публичное акционерное общество
ПК	Персональный компьютер
ПО	Программное обеспечение
ПЧ	Преобразователь частоты
РФ	Российская Федерация
РЭА	Российское энергетическое агентство
СК	Станок-качалка
СКЗ	Среднеквадратическое значение
СКО	Среднеквадратическое отклонение
СУ	Станция управления
СШН	Скважинные штанговые насосы
ТТ	Трансформатор тока
ТЭК	Топливо-энергетический комплекс
ЦДУ	Центральное диспетчерское управление
ЧЭАЗ	Чебоксарский электроаппаратный завод
ШСНУ	Штанговая скважинная насосная установка
ЭД	Электрический двигатель
IDE	Integrated Development Environment
IoT	Internet of Things
LSB	Least significant bit

СПИСОК РАБОТ АВТОРА, ОТРАЖАЮЩИХ ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

A1. 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 (статья в рецензируемом научном издании ВАК К2).

A2. 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 статья в рецензируемом научном издании ВАК К2).

A3. Valeriy Manakhov, Alexey Tsvetkov. Determination of state of electrical equipment by spectra of wattmetrograms / Manakhov V.A., Tsvetkov. A.N. // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 288, – paper № 01042 (Scopus)

A4. Свидетельство №2023611551 Рос. Федерация. Спектральный анализ массива ваттметрограммы / А.Н. Цветков (RU), В.А. Манахов (RU) - заявл.11.01.2023; опубл. 23.01.2023.

A5. 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.

A6. 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.

A7. 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.

А8. Манахов В.А., Цветков А.Н. Использование датчиков на эффекте холла для измерения параметров ваттметрограммы // Материалы докладов всероссийского XXIV аспирантско-магистерского семинара, посвященного Дню энергетика. – Казань: КГЭУ, 2020 – С. 78-80.

А9. Манахов В.А., Цветков А.Н. Диагностика состояния нефтяного оборудования по параметрам ваттметрограммы // Материалы докладов VI Национальной науч.-практ. Конф Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве. Казань: КГЭУ, 2020 – Т.2. С-63-65.

А10. Манахов В.А. Диагностирование штанговых скважинных насосных установок по параметрам динамограммы // Материалы IV Международной науч.-практ. конференции «Энергия молодежи для нефтегазовой индустрии». – Альметьевск: АГНИ, 2019 – С. 403-407.

А11. Манахов В.А., Цветков А.Н. Диагностирование состояния штанговых скважинных насосных установок средствами станции управления ваттметрограммы // Материалы V Национальной науч.-практ. конф. «Приборостроение и автоматизированный электропривод в ТЭК и ЖКХ». – Казань: КГЭУ, 2019 – Т. 1. С. 210 -213.

А12. 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.

А13. 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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов Г.С., Барычев А.В., Чураков В.В. Ваттметрические методы контроля за работой скважин // Нефтегаз. 2003. № 3. С. 87 - 89.
2. Абрамович Б.Н. Электроснабжение нефтегазовых предприятий: учебное пособие / Б.Н.Абрамович, Ю.А.Сычев, Д.А.Устинов. Санкт-Петербургский государственный горный институт. СПб, 2008. 81с.
3. Аврамчук, В.С. Функциональный контроль и диагностика электротехнических и электромеханических систем и устройств по цифровым отсчетам мгновенных значений токов и напряжений / В.С. Аврамчук, Е.И. Гольдштейн, Н.Л. Бацева, И.Н. Исаченко, Д.В. Ли, А.О. Сулейманов, И.В. Цапко; под ред. Е.И. Гольдштейна. – Томск: Печатная мануфактура, 2003. – 240 с.
4. Аливердизаде К.С. Приводы штангового глубинного насоса / К.С. Аливердизаде. – М.: Недра, 1973. – 192 с.
5. Алиев Т.М., Тер-Хачатуров А.А. Автоматический контроль и диагностика СШНУ. - М.: Недра, 1988. - 232 с.
6. 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.
7. Арбузов В.Н. Эксплуатация нефтяных и газовых скважин. Часть 2: учебное пособие / В.Н. Арбузов; Томский политехнический университет.- Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012.- 272 с. 292
8. Артыкаева, Э.М. Перспективы повышения энергоэффективности нефтедобывающих штанговых насосных установок / Э.М. Артыкаева, В.С. Тенин, В.А. Нестерин // Электротехника. - 2011. - №10. - С. 2-7. газовых промыслов / Т.С. Атакишиев и др. -М.: Недра, 1988. – 221 с.
9. Барков А.В., Баркова Н.А., Борисов А.А. Методика диагностирования механизмов с электроприводом по потребляемому току. – СПб.: Севзапуч-центр, 2012. – 68 с.

10. Бикбулатова, Г.И. Эксплуатация штангового насосного оборудования: учебное пособие / Г.И. Бикбулатова, Е.Б. Думлер. – Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт, 2009. – 130 с.
11. Бобылев, О.А. Диагностика периодически работающих установок скважинных штанговых насосов / Бобылев О.А. // Нефтепромысловое оборудование. -2002. -№2. – С. 82-83.
12. Бойко Б.П., Тюрин В.А. Спектр сигнала: учебно-методическое пособие / Казань: Казанский федеральный университет, 2014.- 38 с.
13. Бреслав, Б.М. Новые системы электропривода насосных установок для добычи нефти / Б.М. Бреслав, А.А. Зубков, Л.Б. Масандилов и др // Энергетика Тюменского региона. 2001. №4. – С. 25-28.
14. Бубнов М.В. Средства диагностирования оборудования установок штанговых глубинных насосов / М.В. Бубнов, А.М. Зюзев // Труды первой научно-технической конференции молодых ученых Уральского энергетического института.– Екатеринбург:Уральский федеральный университет,2016.– С.175–178
15. Быков С.Д. Мобильная ваттметрическая лаборатория оперативного контроля работы установок скважинных штанговых насосов // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности.- 1992.- №07.- С. 1-4.
16. Вакула Я.В. Нефтегазовые технологии: учеб. пособие по дисциплине «Нефтегазовые технологии» / Я.В. Вакула. – Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт, 2006. – 168 с.
17. Галеев, А.С. Обзор современного оборудования в области контроля технического состояния ШСНУ / А.С. Галеев, И.Г. Арсланов, С.Л. Сабанов // Ученые записки Альметьевского государственного нефтяного института. - Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт, 2018. – Том XVII. - С. 141-145.
18. Галеев, А.С. Станция мониторинга состояния скважинной штанговой насосной установки / А.С. Галеев, Г.И. Бикбулатова, Р.Н. Сулейманов, О.В. Филимонов, С.Л. Сабанов, Ю.А. Болтнева // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2019. - №4. – С. 82-91.

19. Гершкович Ю.Б., Широков К.А. Применение пакета —MATLAB для решения нелинейных задач оптимизации градиентными методами.- М.: РГУ нефти и газа имени И.М.Губкина, 2009.- 32 с.
20. 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.
21. Гизатуллин Ф.А., Хакимьянов М.И., Семисынов Р.А., Шафиков И.Н. Энергетические характеристики электроприводов погружных нефтедобывающих насосов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 24–32. DOI: 10.14529/power170403 300
22. Гольдштейн Е.И., Ермакова Е.Н., Серебрякова И.В. Пути улучшения контроля и диагностики глубинных насосов по ваттметрограммам. Тез. Докл. Всероссийской НТК «Повышение эффективности производства и использования электроэнергии в условиях Сибири», ч. 2, с. 48-51, Иркутск 1994 г.
23. Ерофеев А.А. Теория автоматического управления: учебник для вузов / А.А. Ерофеев. – 2-е изд., доп. и перераб. – СПб.: Политехника, 2005. – 302 с.
24. Зейгман Ю.В. Выбор оборудования и режима работы скважин с установками штанговых и электроцентробежных насосов: учеб. пособие / Ю.В. Зейгман, О.А. Гумеров, И.В. Генералов. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2000. – 120 с.
25. Ивановский В.Н., Дарищев В.И., Сабиров А.А., Каштанов В.С., Пекин С.С. Скважинные насосные установки для добычи нефти.- М.: ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2002.- 824 с.
26. Ивановский, В.Н. Энергетика добычи нефти: основные направления оптимизации энергопотребления / В.Н. Ивановский // Инженерная практика. - 2011. - № 6. - С. 18–26.
27. Информационно-диагностические средства объективного контроля как инструмент повышения эффективности эксплуатации добычных горных машин / С.А. Асонов, В.В. Габов, С.Л. Иванов, М.Г. Трифанов, Н.В. Чекмасов, Д.И. Шишлянников // Вестник Пермского национального исследовательского

политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2015. – № 14. – С. 62–71.

28. Исаченко И. Н., Гольдштейн Е. И., Налимов Г. П. Методы контроля сбалансированности станка-качалки на основе измерения электрических параметров // Нефтяное хозяйство. 2002. № 1. С. 60–61.

29. Каплан, Л.С. Современные технологии и техника эксплуатации скважин штанговыми насосами: учебное пособие / Л.С. Каплан. – Уфа: Издательство УГНТУ, 2005. – 334 с.

30. Карманов В.Г. Математическое программирование: учеб. пособие.- М.: Физматлит, 2001. 263 с.

31. Контроль технического состояния и система ремонта нефтепромыслового оборудования по фактическому техническому состоянию: стандарт ОАО «Татнефть» . – Альметьевск: ОАО «Татнефть», 2004. – 68 с.

32. Коршак А.А., Шаммазов А.М. Основы нефтегазового дела. Учебник для ВУЗов. Издание второе, дополненное и исправленное: — Уфа.: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2002 - 544 с.

33. Кричке В.О. Автоматический анализатор работы глубиннонасосной установки // Автоматизация и телемеханика в нефтяной промышленности. 1975. № 12. С. 10 - 14.

34. Кричке В.О. Анализ работы станков-качалок с помощью автоматических устройств // Автоматизация и телемеханика в нефтяной промышленности. 1976. № 5. С. 23 - 25.

35. Кричке В.О. Оперативный контроль текущей эффективности работы скважинной ШНУ// Нефтяное хозяйство. -1986. - №7. - с. 47-53.

36. Логинов С.В., Сальнов А.С., Губис Я.Б. Электроприводы для насосов, применяемых в нефтедобывающей промышленности. - Электртехника, 2001. - №4. - С.41 - 43.

37. Манахов, В. А. Диагностика состояния нефтяного оборудования по параметрам ваттметрограммы / В. А. Манахов, А. Н. Цветков // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и

жилищно-коммунальном хозяйстве : Материалы VI Национальной научно-практической конференции, в 2 т., Казань, 10–11 декабря 2020 года. Том 2. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2020. – С. 63-65.

38. Манахов, В. А. Спектральный анализ механических дефектов по параметрам ваттметрограммы штанговых скважинных насосных установок в процессе эксплуатации / В. А. Манахов, А. Н. Цветков // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24, № 4. – С. 50-62. – DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-4-50-62.

39. Манахов В.А., Цветков А.Н. Диагностика состояния нефтяного оборудования по параметрам ваттметрограммы. Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливноэнергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве: матер. VI Национальной науч.-практ. конф. в 2 т./ редкол.: Э.Ю. Абдуллазянов (гл. редактор) и др. Казань: Казан.гос. энерг. ун-т, 2020. Т. 2. 63-66с.

40. 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;23(3):127-139.

41. Математическое моделирование эксплуатационной скважины в процессе оптимизации нефтедобычи / С.Г. Воронин, Д.А. Курносов, М.И. Корабельников, Д.В. Коробатов, В.В. Запунный // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. – 2005. – № 9 (49). – С. 70–74

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

43. 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.

44. Молчанов А.Г. Машины и оборудование для добычи нефти и газа: учеб. для вузов. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Альянс, 2010. – 588 с.
45. Молчанов, А.Г. Станки-качалки: проблемы и перспективы совершенствования / А.Г. Молчанов // «Промышленные Ведомости». – 2007. – № 10. – С. 45-60.
46. О проблемах повышения эффективности ремонтного хозяйства предприятий нефтегазового комплекса / А.А. Сунгатуллин, О.А. Норкина, Р.Р. Садыкова // Нефть и газ Западной Сибири: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Тюмень: Изд-во Тюмен. гос. нефтегаз. ун-та, 2011. – Т. 4. – С. 251–254.
47. Основные осложняющие факторы при эксплуатации станков-качалок штанговых глубинных насосов на нефтяном месторождении Айн-зала Республики Ирак / А. А. Альмохаммад, Е. В. Безверхая, Н. Г. Квеско, М. В. Брунгардт // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 5. – С. 397-403. – DOI 10.24412/2071-6168-2022-5-397-404. – EDN HRGYNW.
48. Официальный сайт Министерства энергетики Российской Федерации (Минэнерго России). [Электронный ресурс]. – URL: <https://minenergo.gov.ru/node/22620> свободный доступ – (30.03.2022).
49. Официальный сайт Центрального диспетчерского управления топливно-энергетического комплекса – филиала ФГБУ «РЭА» Минэнерго России [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.cdu.ru/> свободный доступ – (25.09.2021).
50. Очередько, Т. Б. Анализ эффективности эксплуатации скважин в условиях формирования асфальто-смоло-парафиновых отложений и высоковязких эмульсий на скважинах, оборудованных штанговыми насосными установками, на Восточно-Лениногорской площади Ромашкинского месторождения / Т. Б. Очередько, А. С. Яковина // . – 2018. – № 4. – С. 301-317. – EDN YVLNBR.
51. Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: межвуз. сб. науч. тр. - Уфа: Изд-во УГНТУ, 2010. – С. 179–188.

52. Поникаров, С. И. Анализ причин обрывов штанговых колонн при эксплуатации скважин, оборудованных штанговыми насосами / С. И. Поникаров, Л. Ф. Каримов, Н. Ф. Калимуллин // Вестник Технологического университета. – 2017. – Т. 20. – № 3. – С. 44-45

53. Попов, А.Л. Штанговые скважинные насосные установки: конструирование и расчет: учебное пособие / А.Н. Вихарев, А.Э. Абанов, М.В. Теселкин; А.Л. Попов. — Архангельск : Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, 2016. — 90 с.

54. Портной Г.Я. Датчики тока, напряжения и мощности для систем автоматики и телемеханики // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности.- 2005.- №05.- С. 2 - 9. 287

55. Разработка математической модели системы автоматизации электропривода штанговой скважинной насосной установки/ Сагдатуллин А.М. // - Альметьевск : Территория нефтегаз.- 2014. – № 4. – С. 26–33.

56. 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, N6, 2013, С. 176-186.

57. Руководство по эксплуатации скважин штанговыми насосами. - Альметьевск: АО “Татнефть”. 1992. – 440 с.

58. Сагдатуллин, А. М. Разработка математической модели системы автоматизации электропривода штанговой скважинной насосной установки / А. М. Сагдатуллин // Территория Нефтегаз. – 2014. – № 4. – С. 28-35. – EDN SBDPQL.

59. Сакаев, А. Ф. Контроль и диагностика состояния оборудования штанговых глубинных насосов косвенным методом по ваттметрограмме с использованием искусственных нейронных сетей / А. Ф. Сакаев // Записки Горного института. – 2007. – Т. 173. – С. 101-104. – EDN IPVCAD.

60. Сквацинные насосные установки для добычи нефти / В.Н. Ивановский, В.И. Дарищев, А.А. Сабиров, В.С. Каштанов. – М.: Нефть и газ, 2002. – 824 с.
61. Софьина, Н.Н. Способ контроля параметров работы и технического состояния штанговых сквацинных насосных установок / Софьина Н.Н., Шишлянников Д.И., Корнилов К.А., Вагин Е.О. // Master's Journal. –2016. – № 1. – С. 247-257.
62. Способ контроля параметров работы и технического состояния штанговых сквацинных насосных установок / Н.Н. Софьина, Д.И. Шишлянников, К.А. Корнилов [и др.] // Master's Journal. – 2016. – № 1. – С. 247–257.
63. Справочное руководство по проектированию и эксплуатации нефтяных месторождений. Добыча нефти / Р. С. Андриасов, И. Т. Мищенко, А. И. Петров и др.; Под общ. ред. Ш. К. Гиматудинова. М.: Недра, 1983. 455 с.
64. Техническая диагностика механического оборудования / В.А. Сидоров, В.М. Кравченко, В.Я. Седуш [и др.]. – Донецк: Новый мир, 2003. – 125 с.
65. Тимофеев, А.О. Анализ корреляции между сквацинной динамограммой и энергией, потребляемой электродвигателем станка-качалки / Тимофеев
66. Турбаков М.С., Мордвинов В.А. Анализ и оптимизация технологических режимов работы добывающих сквацин с целью повышения эффективности их эксплуатации // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2005. № 6. С. 77-81.
67. Управление реологическими свойствами углеводородов в пластовых условиях : [монография] / Гуторов Ю. А., Гуторов А. Ю. ; Группа компаний "Недра", Региональный координационный науч.-технический центр "Нефтяная долина". - Октябрьский : РКНТЦ, 2015. - 365 с. : 2; ISBN 978-5-93105-244-1
68. Уразаков, К.Р. Справочник по добыче нефти / К.Р. Уразаков, С.Е. Здольник, М.М. Нагуманов и др. // под ред. К.Р. Уразакова - СПб.: ООО «Недра», 2012. – 672 с.

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

70. Хакимьянов М.И. Современные станции управления скважинными штанговыми глубинно-насосными установками / М.И. Хакимьянов // Нефтегазовое дело. – 2014. – № 12-1. – С. 78–85.

71. Хакимьянов М.И., Гузеев Б.В. Контроль работы электродвигателей станков - качалок методом ваттметрирования // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: межвузовский сборник научных трудов / редкол.: В.А. Шабанов и др.– Уфа: Изд-во УГНТУ, 2010. – С. 179-188.

72. Хакимьянов М.И., Ковшов В.Д., Сакаев А.Ф. Датчик параметров движения штанговых глубиннонасосных установок на основе интегрального акселерометра // Электронный журнал "Нефтегазовое дело", 2007. [Электронный ресурс]. - URL: http://www.ogbus.ru/authors/Накимьянов/Накимьянов_2.pdf. свободный доступ – (24.02.2021).

73. Цылёв П.Н. Электропривод и электрооборудование технологических объектов нефтегазовой отрасли: учеб. пособие / П.Н. Цылёв. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2015. – 192 с.

74. Чаронов В.Я. Автоматизация работы основного оборудования и проблемы энергосбережения на объектах нефтегазодобычи.- Альметьевск: Изд-во АО «Татнефть», 1998.- 330 с.

75. Ширококов П.Э. Технологические процессы исследования штанговых глубинных насосов на основе динамометрирования и ваттметрирования / П.Э. Ширококов // Роль инноваций в трансформации современной науки: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф., 1 июня 2017 г., г. Уфа. – 2017. – В 6 ч. Ч. 4. – С. 163–167.

76. Щербинин С.В. Методы и средства измерений: Учебное пособие.- Уфа: УГНТУ, 2010.- 111 с.

77. Щуров В.И. Технология и техника добычи нефти. Учебник для вузов. М.:Недра,-1983.-510 с.
78. Ямалиев В.У. Методы диагностирования станков-качалок / В.У. Ямалиев, Л.К. Ардаширов // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. – 2013. – № 4. – С. 364.
79. Datasheet Atmel ATmega640/V-1280/V-1281/V-2560/V-2561/V. © Atmel Corporation. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.atmel.com/> свободный доступ – (28.10.2019).
80. J. F. Lea, Cleon Dunham, Lynn Rowlan. Well Modelling: Optimized Production and Troubleshooting Using Nodal Analysis [Электронный ресурс]. URL: https://rogtecmagazine.com/wp-content/uploads/2014/10/09_WellModeling.pdf свободный доступ – (13.06.2020).
81. Khakimyanov, M.I. Monitoring of sucker-rod pump units as a result of the analysis wattmeter cards / M.I. Khakimyanov, I.N. Shafikov, F.F. Khusainov, R.A. Semisynov, E.A. Bezryadnova // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. - Volume 803. - Number 1.
82. Orvel Lynn Rowlan. Efficient and Accurate Monitoring of Rod Pump Well Performance Using Real Time Data Processing and Visualization / Orvel Lynn Rowlan, James N. McCoy, Dieter Joseph Becker, Kay Stefan Capps, A.L. Podio // Society of Petroleum Engineers. Oklahoma, USA. - 2013. – Pp. 10.
83. Shinyakov, Yuriy. Methods and facilities for monitoring the operation of a sucker rod pump / Yuriy Shinyakov, Maxim Sukhorukov, Daria Torgaeva, Andrey Soldatov // International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET). - Volume 9, Issue 12, December 2018. - Pp. 1224–1231.
84. Shishlyannikov D.I. Operational control and diagnostics of the equipment by the parameters of the electric drive powersupply by the example of deep well pump units / D.I.Shishlyannikov, M.A.Vasilyeva // MEACS2016, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 177. P.12-16. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012013.

Приложение А

Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023613640

**Программа управления работой прибора для
формирования ваттметрограмм электрической
нагрузки**

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Казанский государственный энергетический
университет» (RU)**

Авторы: **Цветков Алексей Николаевич (RU), Манахов
Валерий Александрович (RU)**



Заявка № 2023611779

Дата поступления 03 февраля 2023 г.

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ 17 февраля 2023 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 68b80077e14e40f0a94ebd24145d5c7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 20.03.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов

Приложение Б

Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023611551

Спектральный анализ массива ваттметрограммы

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет» (RU)*

Авторы: *Цветков Алексей Николаевич (RU), Манахов Валерий Александрович (RU)*



Заявка № 2023610127

Дата поступления 11 января 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 23 января 2023 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

документ подписан электронной подписью
Сертификат 68b80077e14e40f0a94e6bd24145d5c7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 2.03.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов

Приложение В

Акт о практическом использовании результатов диссертации

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
АО «ЧЭАЗ»
_____ А.А. Ильбеков
_____ 2023 г.



АКТ

о практическом использовании результатов кандидатской диссертации
аспиранта кафедры ЭПП ФГБОУ ВО «КГЭУ» Манахова В.А.

Настоящий акт составлен в том, что результаты исследований, представленных в диссертационной работе Манахова В.А., использованы в ходе выполнения комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства «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 договора № ДР-936/17 от 26 октября 2017 года с участием ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» и АО «Чебоксарский электроаппаратный завод».

В ходе создания станции управления ШСНУ разработанной в результате реализации комплексного проекта использованы материалы диссертации, а именно: метод контроля ШСНУ по спектру ваттметрограммы, позволяющий определить возникновение эмульсии нефти в глубинном насосе, не допуская аварийной остановки процесса добычи, алгоритм, послуживший основой при разработке программного обеспечения для выявления момента начала образования эмульсии и устранения её в процессе эксплуатации ШСНУ.

В ходе выполнения указанного проекта В.А. Манахов участвовал в проведении научно-исследовательских работ, а также проводил разработку алгоритмов работы программного обеспечения и конструкторской документации, принимал участие в отладке программного обеспечения в ходе стендовых и полевых испытаний станции управления.

Заместитель генерального директора-
директор по управлению проектами
_____ Е.Ю. Егорова

Главный конструктор проекта - Заместитель главного конструктора
ОГК ЭМ ИПК Приводной техники
_____ А.В. Матвеев

Приложение Г

Акт о практическом использовании результатов диссертации

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор –
проректор по учебной работе
ФГБОУ ВО

«Казанский государственный
энергетический университет»

А.В. Леонтьев

« 14 » сентября 2021 г.



АКТ

о внедрении результатов работы Манахова В.А., Цветкова А.Н. «Диагностика преобразователей электрической энергии в процессе эксплуатации по параметрам ваттmetroграммы»
в учебный процесс

Настоящий акт составлен о том, что результаты работы аспиранта Манахова В.А. доцента Цветкова А.Н., «Диагностика преобразователей электрической энергии в процессе эксплуатации по параметрам ваттmetroграммы» внедрены в учебный процесс кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» и используются 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».

Использование указанных результатов позволило повысить качество образовательного процесса.

Заведующий кафедрой
«Электроснабжение
промышленных предприятий»
профессор, д.т.н.

И.В. Ившин

Директор Института
электроэнергетики и электроники
профессор, д. т. н.

И.В. Ившин

Приложение Д

Отчет по результатам опытно-промышленных испытаний с применением диагностирования оборудования ШГН в процессе эксплуатации по параметрам ваттметрограммы.

ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ
ОБЩЕСТВО «ТАТНЕФТЬ»
имени В.Д. Шашина
(ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина)



ул. Ленина, 75, г. Альметьевск,
Республика Татарстан, 423450

В.Д. Шашин исемендәге
«ТАТНЕФТЬ» АЧЫК
АКЦИОНЕРЛЫК ҖӘМҖЫЯТЕ
(В.Д. Шашин исемендәге «Татнефть» АҖ)

Ленин ур., 75, Әлмәт шәһәре,
Татарстан Республикасы, 423450

« _____ » _____ 2022 г. № _____

На № _____ от _____

Директору инженерно-
производственного комплекса
«Приводная техника»
Турчиновичу Р.В.

О направлении отчета по итогам ОПИ

Уважаемый Роман Владимирович!

Направляю Вам отчет «Применение электропривода с вентильным электродвигателем на приводах ШГН» по результатам опытно-промышленных испытаний ЭПСН в рамках договора с АО «ЧЭАЗ» № 0002/2021/4185 от 05.10.21.

С уважением,
Главный энергетик - начальник
управления энергетики

А.Х. Гумаров

Хафизов Айрат Ревович
Начальник ОЭиЭ
Тел. (8553)305-098