

На правах рукописи



Торгаева Дарья Сергеевна

**СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ УСТАНОВКОЙ ШТАНГОВОГО
ГЛУБИННОГО НАСОСА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СИГНАЛА
ПОТРЕБЛЯЕМОЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ МОЩНОСТИ**

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами
и производствами (промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2020

Работа выполнена в НИИ Космических технологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Шиняков Юрий Александрович

Официальные оппоненты: **Горюнов Алексей Германович**,
доктор технических наук,
руководитель Отделения ядерно-топливного цикла Томского политехнического университета

Титов Виталий Семенович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой вычислительной техники Юго-западного государственного университета (г. Курск)

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

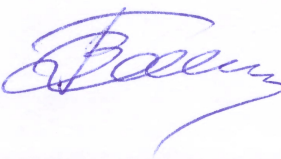
Защита состоится «08» октября 2020 г. в 15:15 на заседании диссертационного совета Д 212.268.02 при «Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина 40, ТУСУР, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУРа по адресу:
г. Томск, ул. Красноармейская, 146 и на сайте:

<https://postgraduate.tusur.ru/urls/qsherykl>

Автореферат разослан «__» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Зайченко Татьяна Николаевна

Актуальность темы исследования

В настоящее время значительную долю фонда «легкой» нефти составляют низкодебитные скважины и скважины с различными осложнениями в добыче, такими как высокая обводненность, пескопроявление, высокая вязкость или температура скважинной жидкости, соли- и парафинообразование. В категорию низкодебитных скважин можно отнести значительную долю глубинно-насосного фонда на месторождениях России. Даже на высокопродуктивных месторождениях примерно 20–30 % фонда добывающих скважин относится к низкодебитным. Для таких скважин характерна эксплуатация с помощью установок штанговых глубинных насосов (УШГН), которые включают в себя следующие основные узлы: штанговый глубинный насос (ШГН), станок-качалку (СК) и электродвигатель. Этот способ насосной эксплуатации является наиболее распространенным, в настоящее время более 40 % всего скважинного фонда оснащено такими установками. Стремительное сокращение запасов «легкой» нефти, значительный износ оборудования, увеличение стоимости электроэнергии, удаленность месторождений от населенных пунктов и многие другие факторы обуславливают ужесточение требований, предъявляемых к системам управления установками штанговых глубинных насосов. Современные системы управления УШГН предполагают реализацию двух основных функций:

- регулирование подачи (объема жидкости в единицу времени) установки штангового глубинного насоса для обеспечения максимального дебита жидкости, минимального износа оборудования и энергосбережения;
- диагностику неисправностей оборудования установки штангового глубинного насоса и скважины (для последующего принятия решения об остановке или переходе в другой режим работы с одновременной сигнализацией оператору о возникновении неисправности).

Необходимость повышения надежности, технологичности и снижения себестоимости разрабатываемых систем управления требует кардинального изменения существующих подходов к обработке информации и снижения количества устанавливаемых на УШГН датчиков. Несмотря на значительный объем исследований, проводимых в области построения точных и надежных датчиков физических величин, последние, тем не менее, остаются самым слабым элементом систем управления УШГН. В связи с этим в настоящее время набирают популярность системы управления, позволяющие регулировать подачу установки штангового глубинного насоса, а также определять состояние погружного и наземного оборудования посредством математической обработки сигналов активной мощности, затрачиваемой электроприводом штанговой насосной установки на работу по подъему скважинной жидкости. Такие системы управления требуют установки только датчиков электрических величин для осуществления алгоритмов управления и диагностики, что позволяет существенным образом сократить их себестоимость, а также затраты на обслуживание. Однако существующие на данный момент методы регулирования и диагностики имеют низкую точность, сложны в реализации и требуют дальнейшего изучения и совершенствования.

Степень разработанности темы исследования

В основе исследований установок штанговых глубинных насосов как объектов управления и разработки математического описания их узлов лежат работы Ивановского В.Н., Вирновского А.С., Белова И.Г., Адонина А.Н., Череповицына А.Е., Дарищева А.А., Муравьева И.М., Аливердизаде К.С., Зюзева А.М., Щурова В.И., Шагиева Р.Г., Мищенко И.Т., Чичерова Л.Г., Уразакова К.Р., Топольникова А.С. и др. В них приводится математическое описание штанговых глубинных насосов, кинематики и динамики станков-качалок, анализ влияния различных неисправностей и режимов работы ШГН на форму сигнала динамограммы, а также методы расчета технологических параметров, анализа сигналов динамограммы и потребляемой электроприводом мощности. В разработку методов управления и диагностики неисправностей установки штангового глубинного насоса также большой вклад внесли труды Хакимьянова М.И., Пачина М.Г., Садова В.Б., Рзаева А.Г., Шагиева В.Р., Ямалиева В.У. и других специалистов, ведущих исследования в области создания систем управления нефтедобывающими установками в настоящее время.

Объектом исследования является замкнутая система «пласт – скважина – установка штангового глубинного насоса» с системой управления и обратной связью по потребляемой электроприводом мощности.

Предметом исследования являются метод регулирования подачи УШГН, основанный на поддержании оптимального динамического уровня жидкости в затрубном пространстве нефтяной скважины, и метод диагностики неисправностей штангового глубинного насоса посредством анализа сигнала потребляемой электроприводом мощности.

Цель работы – повышение эффективности установки штангового глубинного насоса путем разработки и применения методов регулирования подачи и диагностики неисправностей на основании анализа потребляемой электроприводом мощности.

Для достижения поставленной цели решались следующие основные задачи:

- 1) анализ существующих методов регулирования подачи и диагностики неисправностей установки штангового глубинного насоса;
- 2) разработка имитационной модели объекта управления, включающей модели ШГН, СК, электродвигателя и подсистемы «продуктивный пласт – скважина», позволяющей выявить влияние различных параметров скважины и оборудования на сигнал потребляемой электроприводом мощности;
- 3) исследование взаимосвязи между изменениями форм сигнала потребляемой электроприводом мощности, характерными для определенных неисправностей, и соответствующими изменениями форм динамограмм с целью разработки метода диагностики неисправностей ШГН;
- 4) разработка метода регулирования подачи УШГН, основанного на поддержании оптимального динамического уровня жидкости в затрубном

пространстве нефтяной скважины посредством анализа сигнала потребляемой электроприводом мощности;

5) разработка метода диагностики неисправностей штангового глубинного насоса посредством анализа сигнала потребляемой электроприводом мощности;

б) проведение экспериментальных исследований разработанных методов с помощью имитационной модели и экспериментального образца системы управления УШГН.

Научная новизна

1. Разработана имитационная модель объекта управления, включающая в себя подсистему «продуктивный пласт – скважина» и следующие узлы УШГН: ШГН, СК, электродвигатель. Имитационная модель отличается модульной структурой, возможностью моделирования двух типов балансирного привода, а также учетом изменения скорости притока скважинной жидкости. Кроме того, разработанная модель позволяет имитировать различные неисправности штангового глубинного насоса.

2. Выявлены закономерности изменения форм сигнала потребляемой электроприводом установки штангового глубинного насоса мощности, проведены аналогии между изменениями форм этих сигналов и характерными изменениями динамограмм с целью разработки метода диагностики неисправностей ШГН. Исследованы неисправности: обрыв и отворот штанг, попадание газа в цилиндр насоса, образование эмульсии, запарафинивание, удар плунжера о приемный клапан, удар плунжера о верхнюю ограничительную гайку вставного насоса, утечка в приемном клапане, утечка в нагнетательном клапане.

3. Предложен метод регулирования подачи установки штангового глубинного насоса, основанный на анализе сигнала потребляемой электроприводом мощности, отличающийся поддержанием оптимального динамического уровня жидкости в затрубном пространстве нефтяной скважины без использования дополнительных датчиков физических величин.

4. Разработан метод диагностики неисправностей штангового глубинного насоса на основании анализа сигнала потребляемой электроприводом мощности без использования дополнительных датчиков физических величин.

Теоретическая значимость работы

Выявлены и исследованы закономерности изменения форм сигнала потребляемой электроприводом установки штангового глубинного насоса мощности (характерные смещения фронтов и спадов, площадей под кривой, а также амплитуд сигнала), проведены аналогии между изменениями форм этих сигналов и характерными изменениями динамограмм с целью разработки метода диагностики неисправностей. Разработана имитационная модель подсистемы «продуктивный пласт – скважина» с учетом изменения скорости притока скважинной жидкости. Обоснован выбор имитационной модели штангового глубинного насоса. При разработке имитационной модели станка-качалки выведены уравнения баланса сил для двух типов балансирного привода (одноплечего и двухплечего). Разработана имитационная модель объекта

управления, позволяющая представить пласт, скважину, установку штангового глубинного насоса и систему управления как замкнутую систему с учетом изменения скорости притока скважинной жидкости.

Практическая значимость работы

Результаты диссертационной работы внедрены при разработке экспериментальной установки, включающей стенд испытаний и экспериментальный образец системы управления, разработанной совместно с предприятием АО «Энергонефтемаш» (г. Омск). Метод регулирования подачи установки штангового глубинного насоса, основанный на поддержании оптимального динамического уровня жидкости в затрубном пространстве нефтяной скважины, и метод диагностики неисправностей ШГН на основании анализа сигнала потребляемой электроприводом мощности позволяют снизить себестоимость разрабатываемой системы управления и повысить эффективность УШГН. Методы реализованы в экспериментальном образце системы управления УШГН. Разработанная имитационная модель объекта управления позволяет получать мощностные и токовые профили нагрузки, необходимые для работы стенда испытаний при проведении экспериментальных исследований систем управления УШГН. Результаты исследований использованы при выполнении ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы» по теме «Исследование и разработка интеллектуальной системы управления штанговым глубинным насосом для поддержания оптимального динамического уровня жидкости в нефтяной скважине» (соглашение № 14.574.21.0157, уникальный идентификатор RFMEFI57417X0157).

Методология и методы исследования

Исследования динамических нагрузок на узлы установки штангового глубинного насоса проведены при помощи методов математического моделирования физических процессов, теории упругости и методов решения уравнений математической физики. Метод регулирования подачи установки штангового глубинного насоса разработан с использованием методов поиска экстремума функции. Метод диагностики неисправностей ШГН по потребляемой электроприводом мощности разработан с применением принципов и методов высокоуровневого программирования. Для реализации поставленных задач использовано следующее программное обеспечение: Matlab версии 9.3.0.713579, Simulink версии 9.0, MathCad версии 13.1.

Достоверность и обоснованность предложенных в диссертации методов регулирования подачи УШГН и диагностики ШГН подтверждается результатами имитационного моделирования с использованием разработанной модели объекта управления и экспериментальными исследованиями на экспериментальном образце системы управления и нагрузочном стенде. Адекватность имитационной модели объекта управления подтверждается сравнением полученных при моделировании результатов с экспериментальными.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработанная имитационная модель объекта управления описывает скважину, установку штангового глубинного насоса и систему управления как замкнутую систему с учетом изменения скорости притока скважинной жидкости, а также позволяет проводить исследования данной системы для синтеза и тестирования методов управления и диагностики неисправностей.

2. Выявленные характерные изменения форм сигнала потребляемой электроприводом мощности позволяют определять следующие неисправности: обрыв и отворот штанг, попадание газа в цилиндр насоса, образование эмульсии, запарафинивание, удар плунжера о приемный клапан, удар плунжера о верхнюю ограничительную гайку вставного насоса, утечку в приемном клапане, утечку в нагнетательном клапане.

3. Метод регулирования подачи установки штангового глубинного насоса, основанный на анализе сигнала потребляемой электроприводом мощности, реализует вывод скважины на оптимальный режим работы, обеспечивающий откачивание скважинной жидкости с максимальной скоростью и коэффициентом заполнения цилиндра насоса.

4. Метод диагностики неисправностей штангового глубинного насоса на основании анализа сигнала потребляемой электроприводом мощности позволяет проводить анализ состояния штангового глубинного насоса без использования дополнительных датчиков физических величин.

Апробация результатов работы

Результаты, представленные в работе, обсуждались на следующих конференциях и семинарах: международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления», г. Томск, 2017; XII российской конференции с международным участием «Новые информационные технологии в исследовании сложных структур», пос. Катунь, 4–8 июня 2018 г.; международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления», г. Томск, 2019; International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), Tomsk, 21–27 October 2019.

Личный вклад автора

Все результаты, сформулированные в положениях, выносимых на защиту, и составляющие научную новизну работы, получены лично автором. В ходе выполнения поставленных задач проведен анализ информационных источников по теме диссертационных исследований, существующих методов регулирования подачи установки штангового глубинного насоса, а также методов диагностики неисправностей. Разработана имитационная модель объекта управления, с помощью которой проведен анализ влияния различных неисправностей на форму сигнала потребляемой электроприводом мощности (ваттметрограммы). На основании полученных результатов разработаны метод регулирования подачи УШГН, основанный на поддержании оптимального динамического уровня жидкости в затрубном пространстве нефтяной скважины, а также метод диагностики неисправностей штангового глубинного насоса посредством

анализа сигнала потребляемой электроприводом мощности. С помощью разработанной имитационной модели объекта управления и экспериментального образца системы управления УШГН автором проведены экспериментальные исследования предложенных методов и анализ полученных результатов.

Публикации

Основные результаты диссертационной работы представлены в 20 публикациях, 7 из которых опубликованы в изданиях, входящих в международную базу цитирования Scopus, 3 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 4 – в материалах конференций, получено 5 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ и 1 патент на полезную модель.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 111 наименований и двух приложений. Общий объем основной части составляет 148 страниц и включает 71 рисунок и 26 таблиц.

Во введении изложена актуальность темы диссертационного исследования, степень разработанности темы, сформулированы цели и задачи исследования, представлены научная новизна, основные положения, выносимые на защиту, практическая значимость и структура диссертационной работы.

В разделе 1 приводится описание объекта управления, а также анализ существующих методов регулирования подачи и диагностики установок штанговых глубинных насосов.

Известны три группы методов регулирования подачи УШГН. Первая группа основана на поддержании в скважине оптимального забойного давления и включает методы, которые требуют измерения давления на приеме насоса, забое и устье скважины. Достоинство таких методов состоит в их простоте, но спуск датчиков давления в скважину является дорогим и трудоемким, поскольку требует прокладки питающего кабеля, который подвержен коррозии. Определение же изменения давления на приеме насоса косвенными способами связано с реализацией сложных вычислений для получения достоверных результатов.

Вторая группа методов основана на поддержании в затрубном пространстве нефтяной скважины постоянного положения динамического уровня. Эти методы наиболее распространены, однако их проблемой является осуществление прямого измерения динамического уровня жидкости, поскольку известные способы дороги или обладают невысокой точностью. Косвенное измерение динамического уровня по динамограмме и ваттметрограмме требует реализации сложных математических моделей, для адекватной работы которых необходимо точное измерение и ввод большого числа переменных во времени параметров.

Третья группа методов автоматического регулирования подачи установки штангового глубинного насоса предусматривает поддержание постоянного объема откачиваемой жидкости (дебита), проходящей по выкидной линии скважины. Данные методы не требуют использования внутрискважинных датчиков. Однако, как и у методов второй группы, большим недостатком

является высокая цена современных расходомеров, обладающих необходимой для управления установкой точностью и надежностью. Кроме того, методы определения количества откачиваемой жидкости по динамограмме позволяют установить лишь теоретическую производительность ШГН, а не фактический дебит жидкости на устье скважины.

Для регулирования подачи УШГН наиболее оптимальными являются методы, основанные на стабилизации динамического уровня с обратной связью по потребляемой электроприводом мощности, так как при этом сокращается количество используемых в системе управления УШГН датчиков физических величин. Проведенный обзор публикаций показывает, что методы, основанные на анализе сигнала потребляемой электроприводом мощности, позволяют определять как характер, так и место неисправностей установки штангового глубинного насоса. Следовательно, для создания систем управления УШГН, обладающих высокой эффективностью и низкой стоимостью, необходима разработка метода регулирования подачи УШГН, основанного на поддержании оптимального динамического уровня без необходимости осуществления его измерения, а также метода диагностики неисправностей штангового глубинного насоса на основе анализа потребляемой электроприводом мощности.

В разделе 2 представлено математическое описание объекта управления, необходимое для разработки и последующего тестирования методов регулирования подачи УШГН и диагностики ШГН. Структурно-функциональная схема объекта управления приведена на рисунке 1.

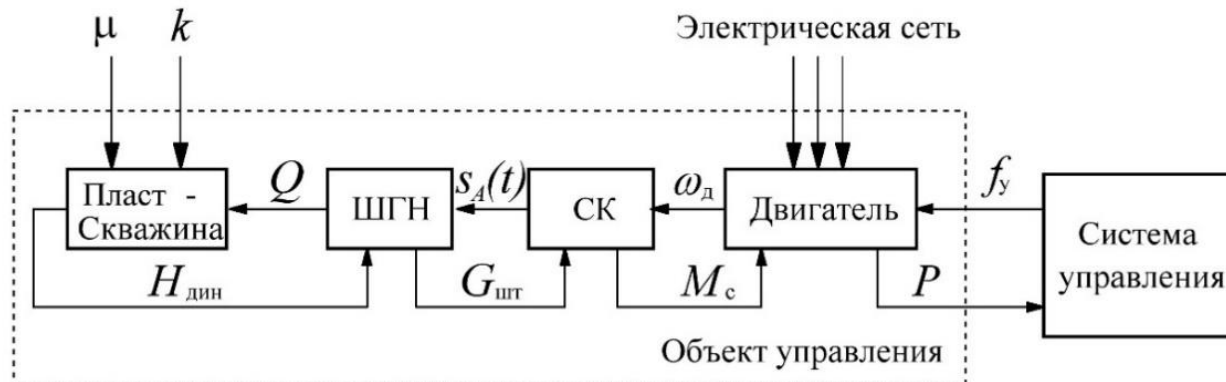


Рисунок 1 – Структурно-функциональная схема объекта управления: Q – подача УШГН; $s_A(t)$ – закон движения полированного штока; ω_d – угловая частота вращения вала двигателя; f_y – частота управляющего сигнала, задаваемая системой управления; M_c – момент сопротивления на валу электродвигателя; $G_{шт}$ – усилие на полированном штоке; $H_{дин}$ – динамический уровень жидкости в затрубном пространстве нефтяной скважины; P – величина средней за период качания балансира потребляемой электроприводом мощности; μ – динамическая вязкость жидкости; k – коэффициент проницаемости пласта

Объект управления представляет сложную систему «продуктивный пласт – скважина – ШГН – СК – электродвигатель», параметры и состояния узлов которой связаны между собой. Для упрощения математического описания объекта управления каждый узел системы рассматривается как отдельная подсистема. Связи с другими узлами УШГН являются для такой подсистемы

входными сигналами (управляющими и возмущающими воздействиями). Реакция подсистемы на входные воздействия в свою очередь является входным сигналом для других узлов системы.

Имитационная модель подсистемы «пласт – скважина»

Управляющим воздействием для данной подсистемы является изменение количества откачиваемой жидкости (расход жидкости ШГН), а реакцией на воздействие – изменение уровня жидкости в затрубном пространстве нефтяной скважины. Математическое описание такой подсистемы неоднократно приводилось в публикациях, посвященных разработке систем управления УШГН, но представленные модели учитывали лишь влияние параметров, характеризующих производительность ШГН (количество двойных ходов в минуту, длину хода полированного штока, диаметр плунжера и коэффициент заполнения насоса), на положение динамического уровня. Однако изменение динамического уровня оказывает существенное влияние на величину забойного давления, что в свою очередь влияет на скорость притока пластовой жидкости, а значит, и на дебит скважины.

Исходя из уравнения расхода жидкости в системе и формулы Дюпюи, получено следующее уравнение для динамического уровня жидкости в затрубном пространстве:

$$H_{\text{дин}}(t) = \frac{1}{\pi(r_c - r_{\text{НКТ}})^2} \left(\int_0^t \left(\frac{2\pi kh(p_0 - p_{\text{заб}}(t))}{\mu \ln \frac{R_k}{r_c}} - v_{\text{пл}} S_{\text{пл}} \beta \right) dt + H_{\text{дин}}(0) \right), \quad (1)$$

где μ – динамическая вязкость жидкости, Па·с; k – коэффициент проницаемости пласта, мД; h – толщина продуктивного пласта, м, через который происходит фильтрация; p_0 – пластовое давление (давление на приеме контура питания скважины), Па; $p_{\text{заб}}$ – забойное давление (давление на границе зоны фильтрации), Па; R_k – радиус контура питания, м; r_c – радиус скважины, м; $S_{\text{пл}}$ – площадь сечения плунжера, м²; n – число двойных ходов в минуту; $v_{\text{пл}}$ – скорость плунжера, м/с; β – коэффициент наполнения насоса ($\beta \in [0, 1]$); $H_{\text{дин}}$ – положение динамического уровня, м; $r_{\text{НКТ}}$ – внешний радиус колонны насосно-компрессорных труб (НКТ), м; S_z – площадь сечения пространства между внутренней поверхностью скважины и внешней поверхностью колонны НКТ, м²; $H_{\text{дин}}(0)$ – начальное значение динамического уровня, м.

Имитационная модель штангового глубинного насоса

Управляющим воздействием для этой подсистемы является изменение закона перемещения полированного штока (точки подвеса штанг (ТПШ)), возмущающим воздействием – изменение динамического уровня жидкости в затрубном пространстве нефтяной скважины, а реакцией подсистемы на управляющее воздействие – изменение длины хода и скорости плунжера, которое вызывает изменение расхода жидкости (1), а также усилия в ТПШ. В основе имитационной модели штангового глубинного насоса лежит решение волнового

уравнения продольного колебания однородного стержня с заданными граничными условиями.

Имитационная модель станка-качалки

Данная подсистема показывает взаимосвязь между усилием, приложенным к полированному штоку, и моментом сопротивления на валу электродвигателя. При этом управляющим воздействием является изменение угловой скорости вращения вала электродвигателя, возмущающим воздействием – изменение усилия в ТПШ, а реакцией подсистемы на управляющее воздействие – изменение закона перемещения ТПШ и момента сопротивления на валу электродвигателя.

Имитационная модель СК разделена на два блока: блок задания закона движения точки подвеса штанг и блок расчета момента сопротивления на валу электродвигателя. Зачастую для построения имитационной модели ШГН закон движения точки подвеса штанг принимается гармоническим, однако на практике движение этой точки подчиняется более сложному закону и напрямую зависит от параметров и кинематической схемы используемого станка-качалки. Чтобы устранить данное допущение, применяется закон движения ТПШ, основанный на решении прямой задачи кинематики для схемы, представленной на рисунке 2.

Для расчета момента сопротивления на валу электродвигателя проведен динамический анализ станка-качалки с целью определения крутящего момента на кривошипе. Поставленная задача решалась методом Н.Е. Жуковского. Схема приложения сил в различных точках СК с двуплечим балансиром представлена на рисунке 3. Для объектов управления, включающих СК с одноплечим балансиром, реализована имитационная модель СК с учетом кинематики и динамики данного механического привода.

Имитационная модель электродвигателя

Управляющим воздействием для этой подсистемы является изменение частоты управляющего сигнала (частоты фазного напряжения на обмотках статора электродвигателя), возмущающим воздействием – изменение момента сопротивления на валу электродвигателя, реакцией системы на изменение входных воздействий – изменение частоты вращения вала электродвигателя. Для определения зависимости потребляемой электродвигателем мощности от изменения момента сопротивления на его валу реализована Т-образная схема замещения (рисунок 4). Параметры схемы замещения X_1 , R_1 , X_m , X_2' , R_2' рассчитываются по методу, описанному в статье Мощинского Ю.А., Беспалова В.Я., Кирякина А.А. (Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным // *Электричество*. – 1998. – Т. 34, № 98. – С. 38–42). Зависимость скольжения s от изменения момента сопротивления M_c определяется по формуле Клосса.

Для оценки адекватности разработанной имитационной модели объекта управления проведено сравнение полученного с ее помощью сигнала с реальным сигналом потребляемой приводом мощности, измеренным на скважине специалистами АО «Энергонефтемаш». Среднеквадратичное отклонение смоделированного сигнала от реального составляет 13,6 %.

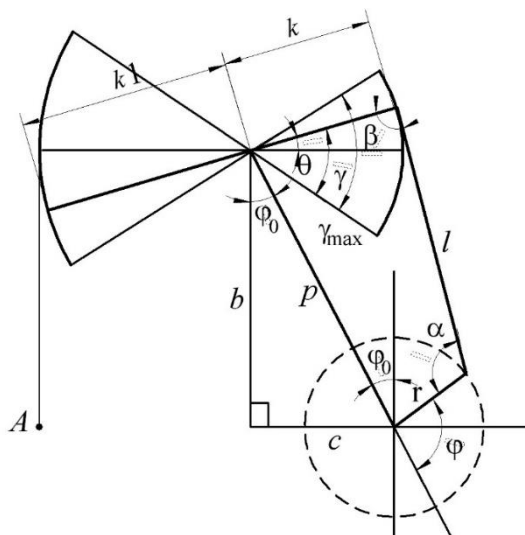


Рисунок 2 – Кинематическая схема станка-качалки с двухплечим балансирам: k_1 – длина переднего плеча балансира; k – длина заднего плеча балансира; l – длина шатуна; p – кратчайшее расстояние между центром качания балансира и центром вращения кривошипа; r – радиус кривошипа; $\varphi_{кр}$ – угол поворота кривошипа относительно направления p ; φ_0 – угол между вертикалью и направлением p ; c – проекция p на горизонтальную плоскость; b – проекция p на вертикальную плоскость; γ – угол поворота заднего плеча балансира относительно p ; α – угол между кривошипом и шатуном; β – угол между задним плечом балансира и шатуном; θ – угол отклонения балансира от горизонтального положения

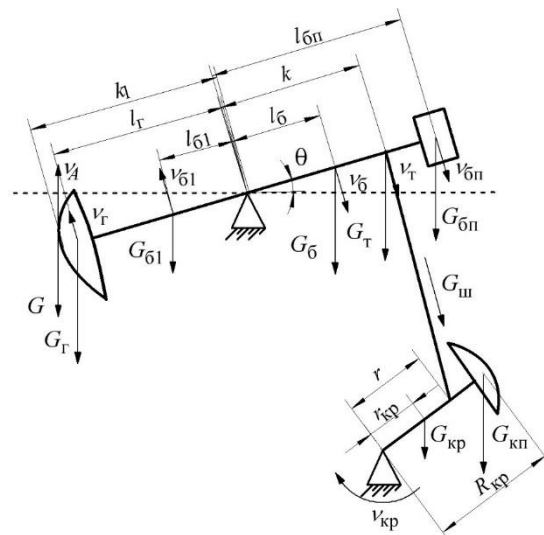


Рисунок 3 – Схема приложения сил в различных точках СК с двухплечим балансирам: $G_Г, G_{Г1}, G_Б, G_Т, G_{БП}, G_{Кр}, G_{КП}$ – вес головки, переднего плеча балансира, заднего плеча балансира, траверсы, балансирного противовеса, кривошипа, кривошипного противовеса соответственно; $l_Г, l_{Г1}, l_Б, l_{БП}$ – расстояния от оси качания балансира до центров масс головки балансира, переднего плеча балансира, заднего плеча балансира, балансирного противовеса соответственно; $R_{кр}, r_{кр}$ – расстояния от оси вращения кривошипа до центров масс кривошипного противовеса и кривошипа соответственно

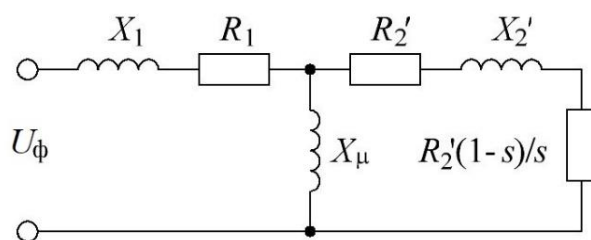


Рисунок 4 – Т-образная схема замещения асинхронного электродвигателя

В разделе 3 описывается метод регулирования подачи УШГН, основанный на поддержании оптимального динамического уровня жидкости в затрубном пространстве нефтяной скважины посредством анализа сигнала потребляемой электроприводом мощности, а также приводится описание и обоснование алгоритмов, позволяющих реализовать данный метод. Для формирования законов и алгоритмов регулирования с целью нахождения и поддержания оптимального динамического уровня жидкости сформулирован ряд задач,

которые должна выполнять система управления в процессе своего функционирования.

В начальный момент времени скважина остановлена, приток жидкости равен нулю вследствие выравнивания пластового и забойного давлений, уровень жидкости равен статическому уровню, т.е. имеет максимально близкое к устью скважины положение. Первоочередной задачей является вывод скважины на режим откачивания, а именно поиск оптимального положения динамического уровня и согласование скорости притока пластовой жидкости со скоростью откачивания. После выхода скважины на режим необходима стабилизация выбранного положения динамического уровня в течение всего времени работы установки. Воспользовавшись принципом декомпозиции систем автоматического управления, можно разделить метод регулирования подачи УШГН, основанный на поддержании оптимального динамического уровня жидкости, на следующие этапы.

1. Определение оптимального динамического уровня жидкости, при котором обеспечивается максимальная скорость притока, при максимальном коэффициенте заполнения цилиндра штангового глубинного насоса.

2. Подбор скорости откачивания, соответствующей скорости притока скважинной жидкости.

3. Стабилизация выбранного положения динамического уровня.

Параметрами оборудования, задаваемыми оператором, являются диапазон возможного изменения частоты качания балансира УШГН, зависящий от параметров выбранного оборудования, и передаточное число клиноременной передачи и редуктора. Исходя из этих параметров рассчитывается соответствующий диапазон частот вращения вала двигателя $[f_{\min}, f_{\max}]$. При увеличении динамического уровня жидкости происходит снижение забойного давления, что ведет к увеличению пластовой депрессии, а следовательно, и скорости притока скважинной жидкости. Однако при приближении динамического уровня к приему штангового глубинного насоса увеличивается содержание газа в жидкости, что негативно влияет на коэффициент заполнения насоса вследствие попадания в него большого количества газа. Следовательно, оптимальным в данном случае является такое положение динамического уровня жидкости, при котором обеспечивается максимальная скорость притока скважинной жидкости при минимальном попадании газа в цилиндр насоса (т.е. максимальном коэффициенте заполнения).

Определение оптимального динамического уровня жидкости, обеспечивающего максимальную скорость притока, заключается в установлении на выходе системы управления текущей частоты вращения вала двигателя, соответствующей максимальной частоте качания балансира станка-качалки $f_T = f_{\max}$ (что соответствует максимальной скорости откачивания скважинной жидкости), с последующим измерением системой управления средней за период качания балансира T потребляемой электроприводом мощности P . Увеличение динамического уровня сопровождается ростом потребляемой мощности. Неполное заполнение цилиндра насоса вследствие влияния газа приводит либо к

ее уменьшению и появлению на кривой $P(t)$ точки перегиба A (рисунок 5), либо к характерному искривлению формы ваттметрограммы (рисунок 6). В момент появления одного из перечисленных признаков в соответствии с предлагаемым методом система управления переходит ко второму этапу решения задачи – определению скорости откачивания, равной скорости притока скважинной жидкости при найденной величине динамического уровня. Скорость откачивания регулируется путем изменения частоты вращения вала двигателя.

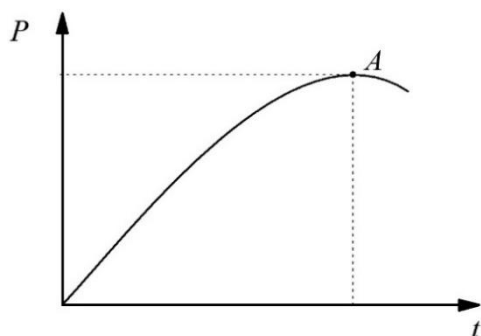


Рисунок 5 – Зависимость средней за период потребляемой приводом мощности от времени при постепенном увеличении динамического уровня жидкости до приема насоса

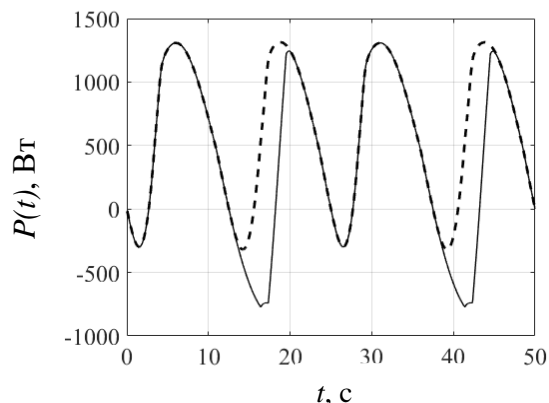


Рисунок 6 – Изменение формы ваттметрограммы (пунктирная линия – полное заполнение цилиндра насоса ШГН, сплошная линия – заполнение цилиндра насоса на 70 %)

Вблизи точки оптимума (точка A , см. рисунок 5) происходит искривление формы сигнала потребляемой мощности, а значит, появляется риск неверно интерпретировать его изменение, поэтому необходимо уменьшить динамический уровень до определенной величины, позволяющей произвести настройку скорости откачивания с полным цилиндром. Для этого текущая частота вращения вала двигателя уменьшается до минимальной: $f_t = f_{\min}$, происходит накопление жидкости в затрубном пространстве скважины. Далее в соответствии с предлагаемым методом производится подбор скорости откачивания скважинной жидкости с использованием метода дихотомии. Алгоритм подбора скорости представлен на рисунке 7.

Задаются начальные значения границ интервала поиска частоты вращения вала двигателя $[f_l = f_{\min}, f_r = f_{\max}]$ и текущее значение частоты вращения, равное половине от заданного интервала: $f_t = (f_r - f_l)/2 + f_l$. Вводится значение погрешности определения частоты ε . Далее производится откачивание жидкости с выбранной скоростью в течение N периодов с параллельной записью значений средней за период потребляемой мощности P . По истечении N периодов вычисляется скорость изменения средней мощности $v_{\text{ср}}$ с последующим изменением значений границ интервала поиска и значения текущей частоты вращения вала.

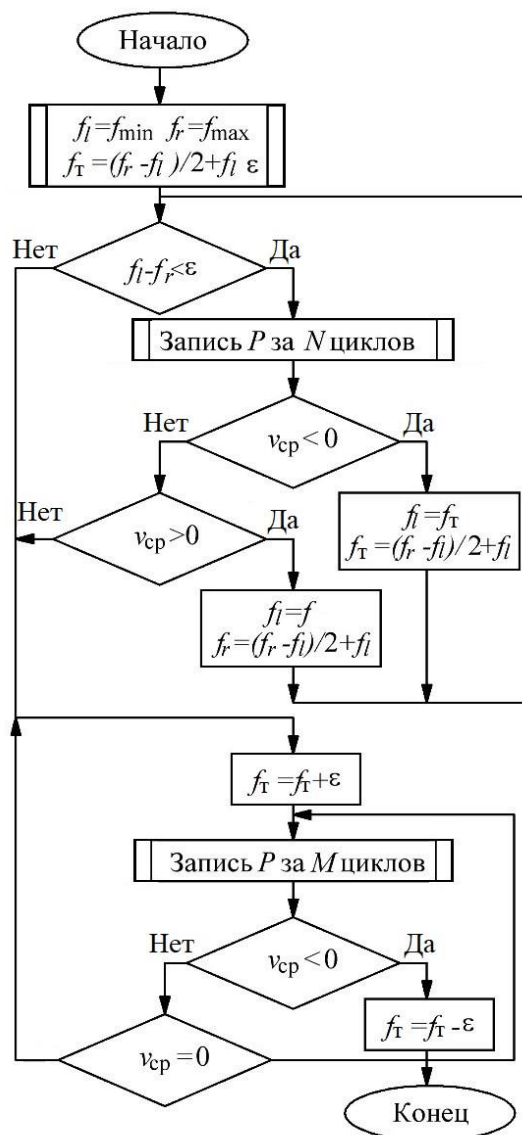


Рисунок 7 – Алгоритм подбора скорости откачивания скважинной жидкости: $[f_l, f_r]$ – границы интервала поиска частоты вращения вала двигателя; $[f_{min}, f_{max}]$ – минимальное и максимальное значение частоты вращения вала двигателя; ϵ – погрешность определения скорости вращения вала двигателя; f_T – текущее значение частоты вращения вала двигателя; P – значение средней за период T потребляемой мощности

Если скорость изменения мощности $v_{cp} < 0$, значит, потребляемая установкой мощность падает, что свидетельствует об уменьшении динамического уровня жидкости. Текущая скорость откачивания жидкости меньше скорости ее притока, а значит, границы диапазона поиска частоты вращения вала двигателя и ее текущее значение изменяются по формулам

$$[f_l = f_T, f_r], f_T = (f_r - f_l) / 2 + f_l. \quad (2)$$

Если скорость изменения мощности $v_{cp} > 0$, значит, потребляемая установкой мощность растет, что свидетельствует об увеличении динамического уровня жидкости. Текущая скорость откачивания жидкости больше скорости ее притока, а значит, границы диапазона поиска частоты вращения вала и ее текущее значение изменяются по формулам

$$[f_l, f_r = f_T], f_T = (f_r - f_l)/2 + f_l. \quad (3)$$

Если скорость изменения средней за период T потребляемой мощности $v_{cp}=0$ или диапазон интервала поиска частоты меньше значения погрешности: $(f_l - f_r) < \varepsilon$, искомая скорость считается найденной и выполняется выход из цикла алгоритма поиска скорости откачивания скважинной жидкости.

В процессе подбора скорости откачивания жидкости происходит изменение динамического уровня, а следовательно, незначительное изменение скорости притока скважинной жидкости. После завершения этапа подбора значения скорости откачивания скважинной жидкости положение динамического уровня оказывается несколько меньше оптимального значения. Необходимо вновь вывести систему в точку оптимума. Для этого значение текущей частоты вращения вала двигателя увеличивается на значение погрешности: $f_T = f_T + \varepsilon$. Производится запись средней за период T потребляемой мощности в течение M периодов откачивания с последующим вычислением средней скорости изменения за период потребляемой мощности v_{cp} . Падение скорости v_{cp} до нуля свидетельствует о выравнивании пластового и забойного давлений, в этом случае система управления вновь увеличивает частоту до $f_T = f_T + \varepsilon$. Уменьшение скорости нарастания мощности v_{cp} ниже нуля или характерное для неполного заполнения цилиндра насоса искажение формы сигнала ваттметрограммы свидетельствует о выходе динамического уровня за точку оптимума. Текущая частота вращения вала двигателя снижается до $f_T = f_T - \varepsilon$, значение скорости откачивания скважинной жидкости, соответствующее этой частоте вращения, считается оптимальным. Система управления переходит к третьему этапу решения задачи – стабилизации выбранного положения динамического уровня в течение длительного периода времени.

При выбранной скорости откачивания скважинной жидкости изменение динамического уровня может происходить вследствие изменений давления в скважине, скорости притока или технического состояния скважины. В режиме стабилизации динамического уровня жидкости в затрубном пространстве нефтяной скважины производится запись значений средней за период потребляемой мощности в течение M периодов T с последующим вычислением скорости изменения мощности v_{cp} . Если с течением времени значение потребляемой мощности уменьшается, скорость откачивания увеличивается до $f_T = f_T + \varepsilon$. При появлении признаков незаполнения вследствие попадания газа в цилиндр насоса скорость откачивания скважинной жидкости уменьшается до $f_T = f_T - \varepsilon$. Таким образом, все три этапа составляют метод регулирования подачи УШГН, позволяющий определять оптимальные параметры откачивания жидкости и автоматически выводить систему на режим работы.

Моделирование неисправностей с помощью разработанной имитационной модели объекта управления позволило выявить закономерности между формами ваттметрограммы и динамограммы и составить алгоритм диагностики неисправностей посредством анализа сигнала потребляемой электроприводом мощности. На рисунке 8 представлена ваттметрограмма нормальной работы насоса с выделенными на ней характерными областями, изменение которых

указывает на возникновение какой-либо неисправности. В процессе работы алгоритма регулирования подачи УШГН при переходе к стабилизации динамического уровня жидкости в течение длительного периода времени системой управления производится запись N периодов сигнала ваттметрограммы, ее разделение на периоды, усреднение по N выборкам и фильтрация. В памяти системы сохраняется эталонный сигнал, соответствующий нормальной работе ШГН. В процессе работы с заданной периодичностью запускается подпрограмма, реализующая метод диагностики неисправностей.

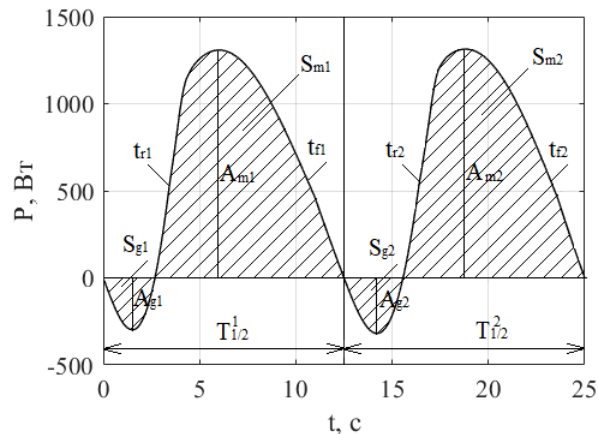


Рисунок 8 – Ваттметрограмма при нормальной работе ШГН: $T_{1/2}^1$ – полупериод, соответствующий ходу штанг вверх; $T_{1/2}^2$ – полупериод, соответствующий ходу штанг вниз; $t_{r1}, t_{r2}, t_{f1}, t_{f2}$ – фронты и спады сигналов соответствующих периодов; S_{m1}, S_{m2} – площади под кривой мощности P , соответствующие двигателю режиму работы АД; S_{g1}, S_{g2} – площади под кривой, соответствующие генераторному режиму работы АД; $A_{m1}, A_{m2}, A_{g1}, A_{g2}$ – максимальные значения сигнала в соответствующие полупериоды и режимы работы двигателя

В начале работы алгоритма диагностики записывается сигнал ваттметрограммы за N периодов, его усреднение и фильтрация. Затем производится выделение фронтов и спадов $t_{r1}, t_{r2}, t_{f1}, t_{f2}$, а также измерение амплитуд и площадей $S_{m1}, S_{m2}, S_{g1}, S_{g2}, A_{m1}, A_{m2}, A_{g1}, A_{g2}$ эталонного и измеренного сигналов ваттметрограммы. Далее выполняется сравнение соответствующих характеристик и формирование кода неисправностей. Определение отклонения значений параметров $t_{r1}, t_{r2}, t_{f1}, t_{f2}, S_{m1}, S_{m2}, S_{g1}, S_{g2}, A_{m1}, A_{m2}, A_{g1}, A_{g2}$ от эталона осуществляется по формулам:

$$r_1 = \frac{t_{r1}^r - t_{r1}}{T} 100\%; \quad r_2 = \frac{t_{r2}^r - t_{r2}}{T} 100\%; \quad f_1 = \frac{t_{f1}^r - t_{f1}}{T} 100\%; \quad f_2 = \frac{t_{f2}^r - t_{f2}}{T} 100\%;$$

$$S_1 = \frac{S_{g1}^r - S_{g1}}{S_{g1}^r} 100\%; \quad S_2 = \frac{S_{m1}^r - S_{m1}}{S_{m1}^r} 100\%; \quad S_3 = \frac{S_{g2}^r - S_{g2}}{S_{g2}^r} 100\%; \quad S_4 = \frac{S_{m2}^r - S_{m2}}{S_{m2}^r} 100\%;$$

$$A_1 = \frac{A_{g1}^r - A_{g1}}{A_{g1}^r} 100\%; \quad A_2 = \frac{A_{m1}^r - A_{m1}}{A_{m1}^r} 100\%; \quad A_3 = \frac{A_{g2}^r - A_{g2}}{A_{g2}^r} 100\%; \quad A_4 = \frac{A_{m2}^r - A_{m2}}{A_{m2}^r} 100\%,$$

где надстрочным индексом r обозначены значения эталонного сигнала, соответствующего нормальной работе штангового насоса.

Код неисправностей формируется из 4 отдельных частей. Вычисленные коэффициенты $r_1, f_1, r_2, f_2, S_1, S_2, S_3, S_4, A_1, A_2, A_3, A_4$ округляются до целых значений. Первая часть кода p_1 является маркером возникновения аварии. В случае падения коэффициента $S_2 < -90\%$ выводится сообщение о возникновении аварии «Обрыв штанг», в случае падения коэффициента $S_4 < -90\%$ выводится сообщение «Срыв подачи». Части кода p_2-p_4 формируются исходя из значений вычисленных коэффициентов.

В разделе 4 приводятся результаты экспериментальных исследований имитационной модели объекта управления и метода регулирования подачи УШГН, основанного на поддержании оптимального динамического уровня жидкости в затрубном пространстве нефтяной скважины посредством анализа сигнала потребляемой электроприводом мощности.

На рисунке 9 представлены зависимости различных параметров от времени, полученные с помощью разработанной имитационной модели при разомкнутой петле обратной связи без реализации алгоритма управления. На рисунке 9,а начальное положение динамического уровня соответствует статическому уровню, давление на забое равно пластовому, соответственно скорость притока равна нулю, система находится в равновесии. При откачивании жидкости с некоторой постоянной скоростью происходит снижение забойного давления вследствие увеличения динамического уровня жидкости, что ведет к росту скорости притока.

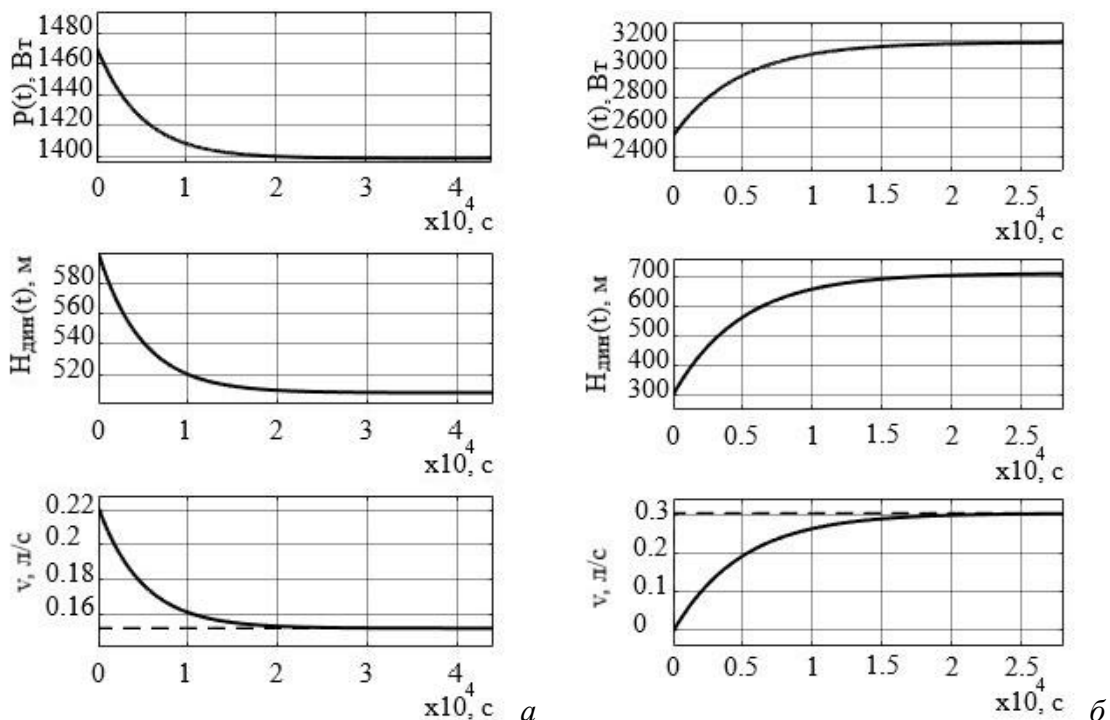


Рисунок 9 – Зависимости средней за период качания балансира потребляемой приводом УШГН мощности $P(t)$, динамического уровня $H_{\text{дин}}(t)$ и скоростей $v(t)$ притока (сплошная линия) и откачивания скважинной жидкости

Зависимости, приведенные на рисунке 9,б, иллюстрируют ситуацию, когда скорость откачивания скважинной жидкости несколько меньше скорости

притока, что ведет к уменьшению динамического уровня и соответствующему снижению скорости притока и дебита скважины. Представленные зависимости подтверждают вывод, что подсистема «продуктивный пласт – скважина» является самоорганизующейся, поскольку при несоответствии скорости притока скорости откачивания происходит изменение динамического уровня, приводящее к изменению забойного давления. Спустя некоторое время происходит естественное выравнивание этих скоростей. Однако новое установившееся значение динамического уровня может отличаться от оптимального, что чревато негативными последствиями. При снижении динамического уровня уменьшается значение перепада давления ΔP , что приводит к искусственному занижению дебита скважины. Данные зависимости подтверждают возможность тестирования разработанного метода с помощью модели, основанной на схеме, представленной на рисунке 1.

Проверка предлагаемого метода регулирования подачи УШГН проводилась с помощью имитационной модели, описывающей объект управления (рисунок 10). Реализация осуществлялась с использованием среды программирования в Matlab/Simulink.

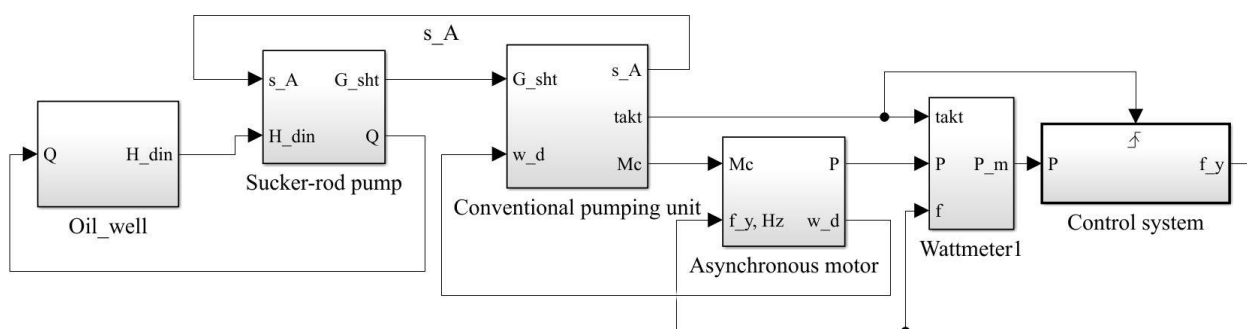


Рисунок 10 – Имитационные модели объекта управления, включающего следующие узлы: скважину и пласт (Oil Well), штанговый глубинный насос (Sucker-rod pump), станок-качалку (Conventional pumping unit), электродвигатель (Asynchronous Motor) и системы управления (Control system)

Для подтверждения работоспособности метода регулирования подачи эксперимент выполнялся для объектов управления, имеющих различные параметры УШГН и подсистемы «продуктивный пласт – скважина». Исходя из результатов экспериментальных исследований разработанного метода регулирования подачи, можно сделать следующие выводы:

- длительность выполнения всех алгоритмов вывода системы на оптимальный режим работы напрямую зависит от параметров скважины, оборудования и выбранных значений параметров ε , N , M ;
- вывод системы в точку оптимума является наиболее длительным этапом регулирования. Количество итераций при подборе скорости напрямую зависит от скорости притока скважинной жидкости вблизи точки оптимума: чем она больше, тем больше значение параметра ΔH и тем сильнее отличается установившееся в результате грубого подбора скорости значение динамического уровня жидкости от оптимального;

- значения параметров ε , N , M необходимо скорректировать при промысловых испытаниях системы управления;

- предложенный метод позволяет вывести систему на оптимальный режим работы, что приводит к увеличению эффективности УШГН.

Для подтверждения работоспособности метода диагностики неисправностей ШГН посредством анализа потребляемой электроприводом мощности проведено моделирование неисправностей при различных параметрах ШГН, кинематики механического привода и режимов работы оборудования. Выявлено, что, помимо кинематики станка-качалки, на форму ваттметрограммы в значительной степени влияют силы инерции, которые усложняют расшифровку ваттметрограммы. В результате проведенных исследований определены группы кодов, характерные для возникновения различных неисправностей штангового глубинного насоса.

При тестировании разработанного метода регулирования подачи УШГН в режимах «программа в контуре» и «процессор в контуре» доказана его аппаратная реализуемость. Посредством стенда испытаний выполнено тестирование экспериментального образца системы управления УШГН, разработанной совместно с предприятием АО «Энергонефтемаш», реализующей предложенный метод регулирования подачи УШГН. Для тестирования использовались профили нагрузки, полученные с помощью имитационной модели объекта управления.

В приложении А приведены ваттметрограммы, полученные в процессе моделирования неисправностей при различных параметрах оборудования.

В приложении Б представлены акты о внедрении результатов исследований, а также свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Основные результаты работы

1. Разработана имитационная модель объекта управления, включающая подсистему «продуктивный пласт – скважина» и следующие узлы УШГН: штанговый глубинный насос, станок-качалку, электродвигатель. Модель позволяет представить скважину, установку штангового глубинного насоса и систему управления как замкнутую систему с учетом изменения скорости притока скважинной жидкости, а также имитировать различные неисправности штангового глубинного насоса с целью исследования их влияния на форму сигнала потребляемой электроприводом мощности для разработки метода диагностики.

2. Предложен метод регулирования подачи установки штангового глубинного насоса, основанный на поддержании оптимального динамического уровня жидкости в затрубном пространстве нефтяной скважины посредством анализа сигнала потребляемой электроприводом мощности. Метод позволяет производить откачивание скважинной жидкости при максимальной скорости и минимальном вредном влиянии растворенного в нефти газа, что обеспечивает высокий суточный дебит.

3. С помощью разработанной имитационной модели объекта управления проведены исследования и выявлено влияние различных неисправностей на сигнал потребляемой электроприводом мощности.

4. Предложен метод диагностики неисправностей штангового глубинного насоса посредством анализа сигнала потребляемой электроприводом мощности, позволяющий выявить обрыв и отворот штанг, попадание газа в цилиндр насоса, образование эмульсии, запарафинивание, удар плунжера о приемный клапан, удар плунжера о верхнюю ограничительную гайку вставного насоса, утечку в приемном клапане, утечку в нагнетательном клапане.

5. Исследования разработанного метода регулирования подачи установки штангового глубинного насоса, основанного на поддержании оптимального динамического уровня жидкости в затрубном пространстве нефтяной скважины, проведены с помощью имитационной модели объекта управления, экспериментального образца системы управления и стенда испытаний. Доказана работоспособность и аппаратная реализуемость предложенного метода.

6. Методы регулирования подачи установки штангового глубинного насоса и диагностики неисправностей ШГН позволяют повысить эффективность УШГН.

7. При тестировании метода диагностики с помощью разработанной имитационной модели получены коды, характерные для различных неисправностей штангового глубинного насоса и параметров оборудования.

8. Результаты исследований внедрены при выполнении ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы» по теме «Исследование и разработка интеллектуальной системы управления штанговым глубинным насосом для поддержания оптимального динамического уровня жидкости в нефтяной скважине».

Основные публикации по теме диссертации

1. Алгоритм управления установкой штангового глубинного насоса для определения и поддержания оптимального динамического уровня жидкости в скважине / **Д.С. Торгаева**, Ю.А. Шурыгин, Ю.А. Шиняков, М.П. Сухоруков, А.Г. Старинов // Доклады ТУСУР. – 2019. – Т. 22, № 4. – С. 62–68. (ВАК)

2. Имитационное моделирование установки штангового глубинного насоса для добычи нефти / **Д.С. Торгаева**, М.П. Сухоруков, Ю.А. Шурыгин, Ю.А. Шиняков, Н.А. Шаляпина // Доклады ТУСУР. – 2019. – Т. 22, № 3. – С. 71–78. (ВАК)

3. Многоуровневое моделирование физико-технических задач на примере глубинного насоса / М.И. Кочергин, **Д.С. Торгаева**, М.П. Сухоруков, В.М. Дмитриев, Ю.А. Шурыгин // Доклады ТУСУР. – 2019. – Т. 22, № 3. – С. 79–86. (ВАК)

4. Detection and maintenance of optimum dynamic fluid level in oil well / **D.S. Torgaeva**, Y.A. Shinyakov, N.A. Shalyapina, M.P. Sukhorukov // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. – 2019. – October. – Vol. 8, Issue 12. – P. 5395–5399. (Scopus)

5. Multilevel simulation of physical and engineering problems / M.I. Kochergin, **D.S. Torgaeva**, M.P. Sukhorukov, V.M. Dmitriev // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. – 2019. – October. – Vol. 8, Issue 12. – P. 5400–5405. (Scopus)
6. Development of a Sucker Rod Pumping Unit Simulation Model / **D.S. Torgaeva**, M.P. Sukhorukov, Y.A. Shinyakov, N.A. Shalyapina // International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). – 2019. – October. – Vol. 9, Issue 1. – P. 4403–4409. (Scopus)
7. **Torgaeva Daria S.** Simulation of Load on a Polished Rod of Sucker Rod Pump for Oil Production / **Daria S. Torgaeva**, Maxim P. Sukhorukov // International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). – 2019. – P. 504–508. (Scopus)
8. Mathematical simulation of sucker rod pump and its control system / Y. Shinyakov, M. Sukhorukov, **D. Torgaeva**, N. Shalyapina // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. – 2018. – Vol. 9. – P. 1141–1147. (Scopus)
9. Methods and facilities for monitoring the operation of a sucker rod pump / Y. Shinyakov, M. Sukhorukov, **D. Torgaeva**, A. Soldatov // International Journal of Mechanical Engineering and Technology, – 2018. – Vol. 9. – P. 1224–1231.
10. Analysis of methods for measuring the liquid level in the annular space of an oil well / J. Shinyakov, M. Sukhorukov, **D. Torgaeva**, A. Soldatov, N. Shalyapina, D. Li // MATEC Web of Conferences. – 2018. – P. 158. (Scopus)
11. Сухоруков М.П. Сравнительный анализ методов определения динамического уровня жидкости в межтрубном пространстве нефтяной скважины / М.П. Сухоруков, **Д.С. Торгаева**, В.В. Мамлина // Электронные средства и системы управления: материалы докладов XIII Международной научно-практической конференции (29 ноября – 1 декабря 2017 г.): в 2 ч. – Томск: В-Спектр, 2017. – Ч. 1. – С. 178–181.
12. Моделирование усилий на полированном штоке штангового глубинного насоса для добычи нефти / **Д.С. Торгаева**, М.П. Сухоруков, Ю.А. Шиняков, Н.А. Шаляпина // Новые информационные технологии в исследовании сложных структур: материалы Двенадцатой конференции. – Томск: Изд. дом Томского государственного университета, 2018. – С. 52.
13. Перспективы использования искусственных нейронных сетей для диагностики и управления техническими объектами / М.П. Сухоруков, Ю.А. Шиняков, Н.А. Шаляпина, **Д.С. Торгаева** // Новые информационные технологии в исследовании сложных структур: материалы Двенадцатой конференции. – Томск: Изд. дом Томского государственного университета, 2018. – С. 20.
14. Сухоруков М.П. Методы регулирования подачи установки штангового глубинного насоса / М.П. Сухоруков, **Д.С. Торгаева**, Н.А. Шаляпина // Электронные средства и системы управления: материалы докладов XV Международной научно-практической конференции (20–22 ноября 2019 г.): в 2 ч. – Томск: В-Спектр, 2019. – Ч. 2. – С. 94–98.

15. Свидетельство о гос. регистрации ПрЭВМ № 2018663030. Система управления автоматизированным стендом испытаний интеллектуальной системы управления штанговым глубинным насосом / Сухоруков М.П., **Торгаева Д.С.**, Шаляпина Н., Кремзуков Ю.А. ; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники». – № 2018660184. – Оpubл. 18.10.18.

16. Свидетельство о гос. регистрации ПрЭВМ № 2018662951. Программа контроллера интеллектуальной системы управления штанговым глубинным насосом / Сухоруков М.П., **Торгаева Д.С.**, Шаляпина Н., Ли Д. ; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники». – № 2018619910.

17. Свидетельство о гос. регистрации ПрЭВМ № 2018662922. Программный модуль поддержания оптимального динамического уровня жидкости в нефтяной скважине / Сухоруков М.П., **Торгаева Д.С.**, Матолыгин А.К. ; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники». – № 2018619902.

18. Свидетельство о гос. регистрации ПрЭВМ № 2019663895. Модель штангового глубинного насоса / **Торгаева Д.С.**, Сухоруков М.П., Шаляпина Н. ; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники». – № 2019662790.

19. Свидетельство о гос. регистрации ПрЭВМ № 2019663894. Модель системы управления штанговым глубинным насосом / **Торгаева Д.С.**, Сухоруков М.П., Шаляпина Н. ; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники». – № 2019662792.

20. Пат. RU193003U1. Контроллер интеллектуальной системы управления штанговым глубинным насосом / Сухоруков М.П., **Торгаева Д.С.**, Шаляпина Н.А. ; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР). – № 2019123047 ; заявл. 17.07.19 ; опубл. 09.10.19, Бюл. № 28.