

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента доктора технических наук

доцента Хакимьянова Марата Ильгизовича

на диссертацию соискателя Текле Самуэль Исаак по теме «Development and research on fault diagnosis and energy efficiency improvement methods for sucker rod pumps driven by an induction motor / Разработка и исследование методов диагностики и повышения энергоэффективности штанговых глубинно-насосных установок с приводом от асинхронного двигателя», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

### **Актуальность.**

Значительная часть нефтедобывающих скважин в России и других странах эксплуатируется штанговыми глубинно-насосными установками (ШГНУ), для привода которых используются трехфазные асинхронные электродвигатели. Нефтедобывающие предприятия обслуживаются тысячами скважин, распределенных на обширных труднодоступных территориях. Ограниченнная численность персонала не позволяет проводить ежедневный мониторинг условий работы большей части фонда скважин. В то же время невысокие цены на нефть не позволяют сейчас оснастить все скважины широким набором технологических датчиков и современными системами скважинной автоматики. Установка датчиков динамометрирования вызывает ряд проблем: датчики часто выходят из строя, требуют проведения обслуживания, калибровок, ремонтов, кабели к ним подвержены обрывам. В то же время датчики ваттметрирования лишены таких недостатков. Поэтому разработка методологии получения информации о состоянии и режимах работы погружного и наземного оборудования ШГНУ путем обработки измеренных ваттметрограмм является актуальной задачей для нефтедобывающих предприятий.

Диссертационная работа Текле С. И. направлена на решение указанной проблематики.

**Научная новизна** заключается в следующем:

1. Соискателем разработана имитационная модель ШГНУ в среде MatLab, воспроизводящая типовые режимы работы штангового насоса.
2. Разработана модель диагностики основных неисправностей штангового насоса на основе ваттметрограмм двигателя и метода опорных векторов (SVM) путем построения обучающей выборки с помощью имитационной модели штангового насоса.
3. Предложена специальная стратегия формирования траектории тока намагничивания в системе векторного управления частотно-регулируемым электроприводом штангового насоса с асинхронным двигателем, обеспечивающая определённое снижение энергопотребления.

4. Предложена структура симулятора реального времени электропривода ШГНУ в среде LabVIEW и на её основе создан электромеханический стенд для исследования динамических режимов ШГНУ.

**Теоретическая значимость работы** состоит в развитии математической и компьютерной модели электропривода ШГНУ, которая позволяет выполнять детальное исследование различных режимов работы и состояний ШГНУ, решить задачи оптимизации энергопотребления и построения обучающей выборки ваттметрограмм электропривода при реализации компьютерных методов диагностики.

**Практическая значимость работы** заключается в разработке алгоритмов диагностики и структуры симулятора ШГНУ, которые могут быть использованы при построении испытательных стендов для отработки функций и отладки интеллектуальных станций управления ШГНУ.

**Апробация работы.** Основные результаты работы доложены на 6 конференциях различного уровня:

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 11 печатных изданиях, 1 из которых в журналах, рекомендованных ВАК, 2 — в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, 8 — в тезисах докладов. Зарегистрирована 1 программа для ЭВМ.

**Степень обоснованности основных положений, выводов и заключений.**

Работа включает в себя введение, 4 главы, заключение, библиографический список из 131 наименования и 2 приложения, изложенных на 156 страницах текста, содержит 88 рисунков и 10 таблиц.

*Во введении* обосновывается актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту.

*В первой главе* диссертации проведен обзор некоторых методов добычи нефти. Обзор дает представление о достоинствах штангового насоса, что делает его предпочтительным выбором в нефтяной промышленности. Кроме того, в среде программирования Matlab разработана интегрированная имитационная модель штангового насоса. Интегрированная гидродинамическая модель объединяет модели первичного двигателя, наземной системы передачи, насосной установки, колонны штанговых насосов, подземного насоса и коллектора. Для нормального рабочего состояния смоделированное перемещение полированного штока, скорость, ускорение, нагрузка и коэффициент крутящего момента демонстрируют общие характеристики насосной установки. Разница между перемещениями полированного штока и плунжера показывает влияние упругого характера колонны насосных штанг. Также показаны чистая нагрузка крутящего момента коробки передач и ее реакция. Характеристики нормального рабочего состояния были описаны смоделированной динамометрической

картой, имеющей форму типичной динамометрической карты для нормального рабочего состояния.

*Во второй главе* диссертации дан подробный обзор системы контроля и диагностики штангового глубинного насоса. Подробно обсуждаются вопросы, связанные с выделением признаков и требованием к тренировочному набору, которые ограничивают продвижение метода компьютерной диагностики, и предлагаются решения, способствующие использованию кривой мощности двигателя в качестве источника для диагностической системы. Разработана диагностическая модель, основанная на кривой мощности двигателя и методе опорных векторов, и симуляционные тесты показали удовлетворительные результаты. Программы для алгоритма SVM, классификации и выделения признаков могут быть написаны на разных языках программирования. Следовательно, это повышает гибкость предлагаемого метода для использования в онлайн-приложениях.

*Третья глава* диссертации посвящена формулировке специальной процедуры нахождения траектории тока намагничивания, которая может быть использована для управления системой векторного управления асинхронным двигателем, приводящим в действие штанговый насос, с целью снижения энергопотребления. В формулировке используются минимальный и максимальный токи, создающие поток. Эффективность предложенной стратегии оценивается с помощью численного моделирования, и результаты показывают, что часть энергии можно сэкономить.

*Четвёртая глава* диссертации посвящена разработке системы имитации штанговых насосов. Для имитации динамики штангового насоса в уменьшенном масштабе разработаны электромеханический испытательный стенд, модель штангового насоса в реальном времени и стратегия управления погружочной машиной. Электрические и механические измерения используются для оценки предложенной эмулирующей системы на основе электромеханического испытательного стенда, поскольку можно рассчитать входную/выходную мощность и динамометрическую карту. Полученные результаты подтверждают предложенную стратегию.

*В заключении* приводятся основные результаты диссертационной работы.

*В приложениях* соискатель разместил Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Симулятор ШГНУ» и Акт о внедрении результатов работы.

Автореферат соответствует содержанию диссертации, опубликованные статьи в полной мере отражают основные положения и результаты диссертационного исследования.

### **Вопросы и замечания**

1. В теме диссертации заявлены «методы... повышения энергоэффективности...». Однако в работе рассматривается только один метод повышения энергоэффективности, который заключается в оптимизации тока намагничивания электродвигателя. Снижение потребления электроэнергии составило

при этом 1,6%. Автор не рассмотрел применение многих других методов: оценка сбалансированности и уравновешивание противовесов ШГН, частотное регулирование скорости качаний ШГН, регулирование скорости вращения двигателя внутри каждого цикла качания. Возможно, что применение этих методов позволит получить более весомую экономию затрат электроэнергии?

2. На стр. 9 автореферата автор пишет: «В идеальном случае насосный агрегат должен иметь длинный и медленный ход вверх, более быстрый и короткий ход вниз, низкий коэффициент крутящего момента на ходе вверх, уменьшенное ускорение в начале хода вверх». Но отсутствуют объяснения, почему сделаны такие выводы?

3. На стр. 10 автореферата рассматривается крутящий момент на редукторе. При этом на схеме (рис. 1) редуктор в виде отдельного элемента установки не выделен. Тем не менее, редуктор является важным элементом ШГНУ, на схеме его следовало бы показать отдельным блоком.

4. На стр. 11 автореферата автор приводит формулу "коэффициента работы". При этом понятие "коэффициента работы" не вводилось, не совсем понятен его физический смысл.

5. На стр. 12 автореферата для вычисления расстояний и построения вектора признаков используются точки  $(x_{sv,o}, y_{sv,o})$ ,  $(x_{sv,c}, y_{sv,c})$ ,  $(x_{tv,o}, y_{tv,o})$ ,  $(x_{tv,c}, y_{tv,c})$ , показанные на рис. 9. При этом на рис. 9 представлен график изменения активной мощности от времени либо от перемещения штока (непонятно, что отложено по горизонтальной оси). Непонятно, какая из осей (x, y) относится к мощности, какая ко времени (перемещению), какова размерность полученных расстояний? Киловатт-метр, киловатт-секунда?

6. График на рис. 12 непонятен. Это время одного цикла качания? Почему нет периодичности кривых. Момент должен изменяться аналогично мощности, почему он несколько раз становится равен 0? Что такое  $M_{p0}$  и  $M_{p1}$ ?

7. В таблице 3 приведены данные по объемной эффективности. Приведенные в таблице удельные затраты электроэнергии составляют 0,3 кВт·ч/м<sup>3</sup>. Это очень низкое значение, на практике ШГНУ потребляют в пределах 5...20 кВтч/м<sup>3</sup>, в десятки раз больше. Расход жидкости приведен в кубометрах, но непонятно, за какое время: час, сутки?

8. На стр. 20 диссертации в табл. 1 приведены глубины скважин для различных способов добычи нефти. При этом указаны глубины 6–19 тысяч метров, с которых добыча не производится, скважины такой глубины не бурятся. Скорее всего, глубина указана в футах.

Высказанные замечания никак не снижают качество и оригинальность подхода Текле С. И. к решению поставленных задач.

### **Общая оценка работы**

Анализ содержания диссертации Текле С. И. показывает, что работа написана логически последовательно, корректным с научной и технической точки зрения

языком, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, что свидетельствует о личном вкладе автора в науку, и соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней в ФГАОУ ВО «УрФУ», в том числе п. 9, 10 и 14.

Оценивая уровень работы в целом, считаю, что диссертация Текле С. И. «Development and research on fault diagnosis and energy efficiency improvement methods for sucker rod pumps driven by an induction motor / Разработка и исследование методов диагностики и повышения энергоэффективности штанговых глубинно-насосных установок с приводом от асинхронного двигателя», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, является законченной научно-квалификационной работой и вносит существенный вклад в решение важной научно-технической задачи повышения эффективности функционирования электротехнических комплексов ШГНУ, работа соответствует паспорту научной специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы, а её автор – Текле Самуэль Исаак, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

Официальный оппонент  
доктор технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой электротехники  
и электрооборудования предприятий  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный  
нефтяной технический университет»

M l  
24.04.2023

Хакимьянов Марат Ильгизович

Адрес: 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1 тел.: (347) 2420759;  
e-mail: [hakimyanovmi@gmail.com](mailto:hakimyanovmi@gmail.com)

Подпись Хакимьянова М.И.  
заверяю, проректор по научной  
и инновационной работе  
доктор технических наук, профессор

И.Г. Ибрагимов