

На правах рукописи



**ШАФИКОВ Игорь Наилевич**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ  
ПОГРУЖНЫХ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ**

**Специальность:**

**05.09.03 — Электротехнические комплексы и системы**

**Автореферат**

**диссертации на соискание ученой степени**

**кандидата технических наук**

**Уфа – 2020**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент  
**Хакимьянов Марат Ильгизович**  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный  
нефтяной технический университет»

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Сушков Валерий Валентинович**  
профессор кафедры «Электроэнергетика»  
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный  
университет»

доктор технических наук, профессор  
**Хамитов Рустам Нуриманович**  
профессор кафедры «Электрическая техника»  
ФГБОУ ВО «Омский государственный  
технический университет»

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный  
университет (национальный исследовательский  
университет)» (г. Челябинск)

Защита диссертации состоится «02» октября 2020 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.288.02 на базе ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» по адресу: 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» и на сайте [www.ugatu.su](http://www.ugatu.su).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук, доцент



А. Ю. Демин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время вопросы, связанные с повышением энергоэффективности технологических процессов нефтедобычи, стали особенно актуальными. Это обусловлено завершением эпохи высоких цен на углеводородное сырье, падением мировых цен на нефть, а также постоянным ростом тарифов на электроэнергию.

Основным способом механизированной добычи нефти в нашей стране является использование скважинных электроцентробежных насосов (ЭЦН) с приводом от погружных электродвигателей (ПЭД). Данным способом эксплуатируется свыше 55% фонда скважин и добывается около 410 млн. т. нефти в год, что составляет 75% от всего объема добычи в стране.

Однако механизированная эксплуатация скважин является самым энергоемким из технологических процессов нефтедобычи. Хотя электродвигатели скважинных насосов и имеют небольшую мощность (от 5 до 250 кВт), большое количество скважин и рассредоточенность на огромных территориях делают их основными потребителями электроэнергии.

Среди получивших распространение способов скважинной добычи использование ЭЦН является одним из самых энергозатратных. Энергопотребление значительно возрастает при разработке месторождений с высоковязкой или сильнообводненной продукцией. Таким образом, затраты на электроэнергию сейчас составляют значительную часть в себестоимости добываемой нефти, а во многих случаях и определяют рентабельность эксплуатации отдельных скважин и месторождений в целом.

Основным способом повышения энергоэффективности эксплуатации фонда скважин является оптимизация режимов работы нефтедобывающего оборудования, обеспечивающая работу насоса и электродвигателя при полной загрузке и, соответственно, максимальных значениях КПД, минимизацию потерь в кабеле, трансформаторе, фильтрах и станции управления (СУ). Для определения таких режимов и обеспечения работы оборудования в них необходима разработка и внедрение современных систем управления и скважинной автоматики, методик оценки энергоэффективности работы скважинных насосов, алгоритмов оптимизации режимов работы электроприводов.

**Степень разработанности темы исследования.** Исследованиями в области управления электроприводами скважинных насосов и повышения их энергоэффективности занимались такие ученые, как Гиматудинов Ш.К., Мищенко И.Т., Neely A.B., McCoy J.N., Гольдштейн Е.И., Тагирова К.Ф., Ивановский В.Н., Садов Б.В., Мугалимов Р.Г., Гинзбург М.Я., Блантер С.Г., Суд И.И., Меньшов Б.Г., Ершов М.С., Егоров А.В., Шпилевой В.А., Абрамович Б.Н., Чаронов В.Я., Зюзев А.М., Козярук А.Е., Сушков В.В., Нурбосынов Д.Н., Хамитов Р.Н.

**Цель работы** заключается в повышении энергоэффективности приводов скважинных электроцентробежных насосов для механизированной добычи нефти.

Для достижения поставленной цели в работе были поставлены и решены следующие задачи:

1. Произвести анализ структуры потерь мощности при механизированной добыче скважинной продукции установками ЭЦН, разработать методику оценки энергетической эффективности электроприводов скважинных насосов на основе анализа структуры энергопотребления, позволяющую с повышенной точностью учитывать потери в электрооборудовании.

2. Исследовать энергоэффективность установки ЭЦН на основе разработанной методики оценки энергетической эффективности электроприводов скважинных насосов. Получить эмпирические зависимости между основными технологическими параметрами скважин и энергетическими характеристиками электроприводов скважинных насосов.

3. Предложить структуру энергоэффективного электропривода установки ЭЦН на основе высоковольтного преобразователя частоты, в которой отсутствует двухступенчатая трансформация напряжения, снижающая общий КПД установки. Выполнить исследование надежности, ресурса и экономических затрат на реализацию предложенной структуры энергоэффективного электропривода установки ЭЦН на основе высоковольтного преобразователя частоты.

4. Разработать способ диагностики высоковольтного преобразователя частоты, реализация которого позволит контролировать не только состояние и температуру силовых полупроводниковых элементов, но и состояние входного многообмоточного трансформатора путем определения остаточного ресурса изоляции.

#### **Научная новизна.**

1. Предложены методика оценки энергетической эффективности электроприводов скважинных насосов и алгоритм уточненного определения потребляемой электроприводом погружного насоса мощности, которые, в отличие от известных, учитывают целый ряд технологических параметров и позволяют повысить точность расчета потерь в электрооборудовании насосной установки: в погружном электродвигателе, кабеле, трансформаторе, фильтрах и станции управления.

2. На основе исследования с использованием методики оценки энергетической эффективности электроприводов скважинных насосов установлены зависимости между основными технологическими параметрами скважин, позволяющие оптимизировать энергопотребление установок ЭЦН.

3. Предложена структура электропривода ЭЦН на основе высоковольтного преобразователя частоты, отличающаяся отсутствием двухступенчатой трансформации напряжения и позволяющая получить более высокий общий КПД установки, а также улучшить характеристики электропривода при работе на низких скоростях вращения.

4. Новизна предложенного способа диагностики высоковольтного преобразователя частоты для регулируемого привода ЭЦН заключается в том, что кроме состояния и температуры силовых полупроводниковых элементов дополнительно контролируется состояние входного многообмоточного транс-

форматора путем оценки остаточного ресурса изоляции, который определяется интегрально через время работы трансформатора при превышениях напряжения и температуры (патент РФ № 2548015).

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

1. Разработанная методика оценки энергоэффективности работы скважинных насосов позволяет повысить точность определения нормативных удельных энергозатрат на скважинную добычу нефти (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2014615663).

2. Результаты анализа полученных эмпирических зависимостей между основными технологическими параметрами скважин и энергетическими характеристиками их электроприводов позволяют повысить точность определения энергозатрат на скважинную добычу нефти.

3. Предложенная структура электропривода ЭЦН на основе высоковольтного преобразователя частоты позволяет повысить общий КПД установки и улучшить характеристики электропривода при работе на низких скоростях вращения.

4. Предложенный способ диагностики высоковольтного преобразователя частоты обеспечивает повышение надежности регулируемых электроприводов, позволяет своевременно определять дефекты и прогнозировать их выход из строя (патент РФ № 2548015).

Разработанная методика оценки энергетической эффективности электроприводов скважинных насосов использована в контроллерах станций управления скважинами производства ООО НПФ «Экситон-автоматика».

**Методология и методы исследования.** Для решения поставленных задач использовались теоретические и эмпирические методы исследования, базирующиеся на фундаментальных положениях теории электромеханического преобразования энергии, теории электропривода, теории подъема жидкости в скважинах, а также методы математического моделирования с использованием пакетов компьютерных программ Matlab, MathCad и Microsoft Excel.

#### **Основные положения и результаты, выносимые на защиту:**

1. Разработанная методика оценки энергоэффективности электроприводов скважинных насосов, обеспечивающая повышенную точность определения нормативных удельных затрат энергии на скважинную добычу нефти.

2. Результаты анализа эмпирических зависимостей между основными технологическими параметрами скважин и энергетическими характеристиками их электроприводов, обеспечивающие повышение точности определения энергетических затрат на скважинную добычу нефти.

3. Предложенная структура энергоэффективного электропривода установки ЭЦН на основе высоковольтного преобразователя частоты.

4. Предложенный способ диагностики высоковольтного преобразователя частоты, позволяющий дополнительно контролировать состояние вторичных обмоток входного многообмоточного трансформатора.

**Соответствие диссертации специальности 05.09.03 - Электротехнические комплексы и системы.** Рассматриваемые в работе задачи соответствуют

паспорту специальности 05.09.03 - Электротехнические комплексы и системы - п. 3 «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления»; п. 4 «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях».

**Степень достоверности результатов:**

– при математическом описании и моделировании элементов электротехнического комплекса скважинной насосной установки использованы общепринятые в электроприводе и теоретической электротехнике допущения, проверенные практическими разработками;

– адекватность разработанных математических моделей, результаты моделирования и теоретических исследований подтверждены экспериментальными данными, полученными автором;

– основные положения диссертации докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях различного уровня и опубликованы в печати, в том числе в изданиях, рекомендованных ВАК и входящих в системы цитирования SCOPUS и Web of Science.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: I и III Международной (IV и VI Всероссийской) научно-технических конференциях «Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий» (УГНТУ, г. Уфа, 2013, 2017 гг.); Всероссийской научно-практической интернет-конференции «Проблемы автоматизации технологических процессов добычи, транспорта и переработки нефти и газа» (УГНТУ, г. Уфа, 2013 г.); VI, VII и VIII Международных научно-практических конференциях молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники» (УГНТУ, г. Уфа, 2013, 2014, 2015 гг.); Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 50-летию ТИИ-ТюмГНГУ (ТюмГНГУ, г. Тюмень, 2013 г.); XX Губкинские чтения «Фундаментальный базис инновационных технологий поисков, разведки и разработки месторождений нефти и газа и приоритетные направления развития ресурсной базы ТЭК России» (РГУНиГ им. И.М. Губкина, Москва, 2013 г.); Одиннадцатой Всероссийской конференции молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности» (газ, нефть, энергетика) (РГУНиГ им. И.М. Губкина, Москва, 2015 г.); 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2015) (Omsk State Technical University, Omsk, 2015); IX Международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводе АЭП-2016 (ICPDS'2016) (г. Пермь, 2016); Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг-2017» (г. Челябинск, 2017), Международном семинаре «Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering» (г. Красноярск, 2019).

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 19 печатных работ, из них 5 работ опубликованы в изданиях, входящих в международ-

ные системы цитирования SCOPUS и Web of Science, 5 работ – в изданиях, рекомендованных ВАК, получено одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ и один патент на изобретение.

**Личный вклад автора.** В работах, выполненных в соавторстве, соискателю принадлежит: в работах [1], [4], [7], [11], [13], [14], [16] – анализ распределения потерь мощности в элементах установок ЭЦН; [2] – анализ эмпирических зависимостей между технологическими параметрами скважин и энергетическими характеристиками электроприводов; [3], [6] – исследование зависимости КПД электродвигателя от нагрузки; [10], [19] – получение зависимостей удельного расхода энергии от плотности и обводненности нефти; [8] – спектральный анализ графиков потребления электродвигателем активной мощности; [9] – исследование потерь в кабельных линиях ЭЦН; [12] – формулировка формулы изобретения; [17] – анализ функций управления систем автоматизации ЭЦН.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, четырех приложений, изложенных на 176 страницах машинописного текста, содержит 48 рисунков, 17 таблиц, список используемой литературы из 127 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, определены цели, методы исследования, научная новизна и практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена анализу современного состояния проблемы повышения энергоэффективности электроприводов ЭЦН.

Рассматривается роль погружных электроцентробежных насосных установок в нефтедобывающей промышленности РФ, выделяются основные проблемы при эксплуатации скважин установками ЭЦН. Сделан анализ комплекса скважинной нефтедобывающей электроцентробежной насосной установки, рассмотрены характеристики и функциональные возможности применяемых в нефтяной промышленности станций управления электроприводами ЭЦН.

Большая часть фонда нефтедобывающих скважин в нашей стране эксплуатируется при помощи бесштанговых глубиннонасосных установок или погружных ЭЦН. Так в целом по России доля нефтедобывающих скважин, оборудованных ЭЦН, составляет свыше 55%, а доля добываемой из таких скважин нефти превышает 75%. Наиболее широко погружные ЭЦН используются на месторождениях Западной Сибири, в таких компаниях как «Роснефть», «Лукойл», «Газпром нефть» и других. Также ЭЦН широко используются на месторождениях Восточной Сибири, Татарстана, Удмуртии, Оренбургской области, Башкортостана и в других регионах.

Добыча углеводородного сырья является чрезвычайно энергоемким технологическим процессом, что проиллюстрировано диаграммой на рисунке 1. Из приведенной на рисунке 1 диаграммы потребления электроэнергии нефтегазо-

добывающим предприятием видно, что, несмотря на небольшие мощности, основными потребителями являются электроприводы скважинных насосов (56,7%) ввиду их многочисленности. Из этих 56,7% большая часть приходится на скважинные установки ЭЦН, так как именно они в настоящее время являются доминирующим способом нефтедобычи на отечественных месторождениях.

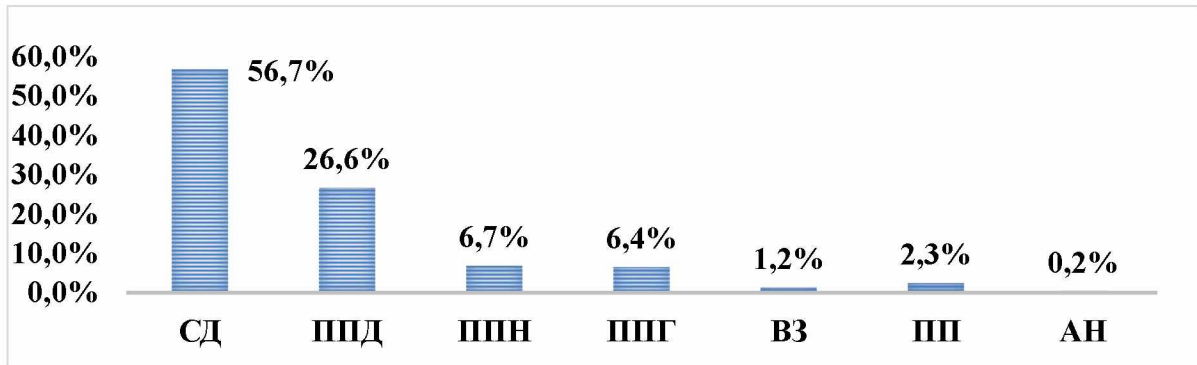


Рисунок 1 – Диаграмма потребления электроэнергии различными технологическими процессами при добыче углеводородного сырья: СД – скважинная добыча; ППД – поддержание пластового давления; ППН – подготовка и перекачка нефти; ППГ – подготовка и перекачка газа; ВЗ – водозабор; ПП – прочие процессы; АН – административные нужды

Это доказывает целесообразность разработки энергосберегающих оптимизационных мероприятий именно для погружных электроцентробежных насосов. Обеспечить наибольший эффект энергосбережения позволяют современные системы управления электроприводами скважинных насосов, которые способны вести эксплуатацию в режимах максимальных КПД насосов и электродвигателей, приводить отбор продукции в соответствие с притоком жидкости из пласта, исключить работу в аварийных условиях.

На рисунке 2 представлена схема комплекса скважинной нефтедобывающей электроцентробежной насосной установки. Комплекс электроцентробежной насосной установки может быть рассмотрен как совокупность гидравлической и электрической подсистем.

Гидравлическая подсистема состоит из скважины, центробежного насоса, колонны насосно-компрессорных труб (НКТ), устьевой арматуры. В скважину из пласта попадают нефть, вода, газ и механические примеси, далее газожидкостная смесь попадает в насос, поднимается по колонне НКТ и через устьевую арматуру поступает в систему сбора и подготовки.

Электрическая подсистема включает в себя преобразователь частоты, синусный фильтр, трансформатор, кабельную линию и ПЭД. Погружной электродвигатель подвергается воздействию высокой температуры от забоя скважины.

Связь между гидравлической и электрической подсистемами выражается в передаче момента и скорости вращения от ПЭД центробежному насосу, а также момента сопротивления от насоса к двигателю.



В систему управления с погружной телеметрии поступает информация о давлении, температуре и расходе на приеме насоса, температуре обмоток и виброскорости ПЭД. Также поступает информация о давлении, температуре и расходе на устье скважины. Система управления формирует управляющие воздействия для преобразователя частоты.

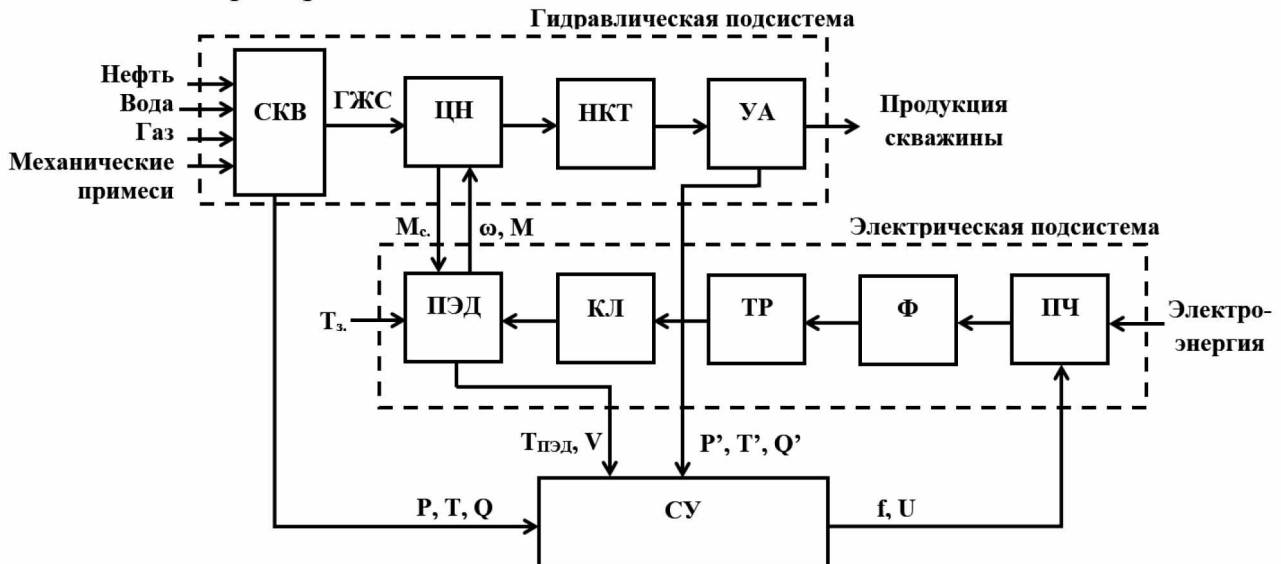


Рисунок 2 – Схема комплекса скважинной нефтедобывающей электроцентробежной насосной установки

СКВ – скважина; ЦН – центробежный насос; ГЖС – газожидкостная смесь; НКТ – насосно-компрессорные трубы; УА – устье скважины; ПЭД – погружной электродвигатель; КЛ – кабельная линия; ТР – трансформатор; Ф – фильтр; ПЧ – преобразователь частоты; СУ – система управления;  $M_c$  – момент сопротивления;  $M$  – момент, передаваемый от ПЭД;  $\omega$  – скорость вращения;  $T_z$  – температура на забое;  $P, T, Q$  – давление, температура и расход на забое;  $P', T', Q'$  – давление, температура и расход на устье;  $T_{пэд}$  – температура обмоток ПЭД;  $V$  – виброскорость;  $f$  – частота;  $U$  – напряжение

Качество поступающей электроэнергии также оказывает влияние на работу установок ЭЦН. Отклонения напряжения, частоты, наличие высших гармоник и несинусоидальность влияют на величину потерь в трансформаторе, кабеле и электродвигателе, понижают КПД трансформатора и электродвигателя.

Разработкой и производством систем и станций управления ЭЦН занимаются многие отечественные и зарубежные компании, рассмотрены их характеристики, сделан анализ достоинств и недостатков. На основании проведенного анализа сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

**Во второй главе** описывается модель энергопотребления электротехнического комплекса установки ЭЦН, а также приводится разработанная на ее основе методика оценки энергоэффективности работы скважинных насосов.

Подъем жидкости сопровождается потерями мощности во всех элементах установки, через которые либо проходит скважинная жидкость, либо передается электрическая и механическая энергия. Такими элементами являются: насос, предварительно включенное устройство, протектор, погружной двигатель, кабельная линия, повышающий трансформатор, выходной и сетевой фильтры,

станция управления и различные другие элементы скважинной насосной установки. Таким образом, суммарная потребляемая установкой мощность может быть описана выражением:

$$P_{\Sigma} = P_{ПМ} + \sum_{i=1}^n \Delta P_i, \quad (1)$$

где  $P_{ПМ}$  – полезная мощность, затрачиваемая непосредственно на лифтинг скважинного флюида,  $\Delta P_i$  – потери мощности в  $i$ -ом элементе скважинной насосной установки.

Было получено аналитическое выражение, позволяющее определить мощность, необходимую скважинному центробежному насосу для подъема скважинной жидкости с учетом давлений (буферного, затрубного и насыщения), плотности флюида, динамического уровня, диаметра и длины НКТ, гидравлического сопротивления, фактической подачи насоса и других факторов:

$$P_{ЦН} = \frac{(g \cdot \rho_{ж} \cdot H_{д} + p_{буф} - p_{затр}) \cdot (9 \cdot 10^{10} \cdot d^5 \cdot (1 + p_{нас}) \cdot B \cdot 0,6 \cdot G + \dots}{4,6656 \cdot 10^{15} \cdot \eta_{ЦН} \times \dots} + \frac{+3,92 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_{ж} \cdot \lambda \cdot L_{НКТ} \cdot Q_{ф}^2 \cdot G \cdot p_{нас}}{\times d^5 \cdot (1 + p_{нас}) \cdot B \cdot G} \cdot Q_{ф} \cdot 10^{-3}, \quad (2)$$

где  $\rho_{ж}$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $H_{д}$  – динамический уровень жидкости в скважине, м;  $p_{буф}$  – буферное давление, Па;  $p_{затр}$  – затрубное давление, Па;  $p_{нас}$  – давление насыщения, Па;  $\lambda$  – коэффициент гидравлических сопротивлений, ( $\lambda = 0,02-0,035$ );  $L_{НКТ}$  – длина НКТ, м;  $g$  – ускорение свободного падения,  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup>;  $d$  – внутренний диаметр НКТ, м;  $Q_{ф}$  – фактическая подача насоса, м<sup>3</sup>/с;  $B$  – объемный коэффициент жидкости на буфере;  $G$  – газовый фактор;  $\eta_{ЦН}$  – КПД погружного центробежного насоса при данной подаче.

Выражение (2) было получено на основе исследования работающих в осложненных условиях промысловых газожидкостных подъемников и отличается от известных тем, что позволяет повысить точность определения затрачиваемой скважинным центробежным насосом мощности за счет учета основных геологических и технологических параметров скважины, свойств ее продукции, а также характеристик используемого нефтедобывающего оборудования.

Активная мощность, потребляемая электродвигателем, складывается из мощностей, потребляемых насосом, протектором и предварительно включенным устройством, а также включает в себя потери в двигателе:

$$P_{ПЭД} = P_{ЦН} + P_{ПУ} + P_{ПР} + \Delta P_{ПЭД} = \left( \frac{P_{ЦН} + P_{ПУ} + P_{ПР}}{\eta_{ПЭД.ф.}} \right), \quad (3)$$

где  $P_{ЦН}$  – мощность, потребляемая насосом, кВт;  $P_{ПР}$  – мощность, потребляемая протектором, кВт;  $P_{ПУ}$  – мощность, потребляемая предварительно включенным устройством, кВт;  $\eta_{ПЭД.ф.}$  – фактический КПД электродвигателя.

Активная мощность, потребляемая установкой ЭЦН описывается выражением:

$$P_{\Sigma} = P_{\text{ПЭД}} + \Delta P_{\text{КЛ}} + \Delta P_{\text{ТР}} + \Delta P_{\text{СУ}} + \Delta P_{\text{СФ}} + \Delta P_{\text{ВФ}} = \frac{(P_{\text{ПЭД}} + \Delta P_{\text{КЛ}} + \Delta P_{\text{ТР}})}{\eta_{\text{СУ}} \cdot \eta_{\text{СФ}} \cdot \eta_{\text{ВФ}}}, \quad (4)$$

где  $P_{\text{ПЭД}}$  – активная мощность, потребляемая электродвигателем, кВт;  $\Delta P_{\text{КЛ}}$  – потери активной мощности в кабельной линии, кВт;  $\Delta P_{\text{ТР}}$  – потери активной мощности в трансформаторе, кВт;  $\Delta P_{\text{СУ}}$  – потери активной мощности в станции управления, кВт;  $\Delta P_{\text{СФ}}$  – потери активной мощности в сетевом фильтре, кВт;  $\Delta P_{\text{ВФ}}$  – потери активной мощности во входном фильтре, кВт;  $\eta_{\text{СУ}}$  – фактический КПД станции управления;  $\eta_{\text{СФ}}$  – фактический КПД сетевого фильтра;  $\eta_{\text{ВФ}}$  – фактический КПД выходного фильтра.

На основе полученной структуры потерь мощности при подъеме скважинной жидкости установкой ЭЦН, а также аналитических выражений для определения потерь в каждом из элементов скважинной насосной установки была разработана методика оценки энергоэффективности работы скважинных насосов. Предложенная методика оценки энергоэффективности работы скважинных насосов была реализована в виде программы для скважинного контроллера, блок-схема которой приведена на рисунке 3.

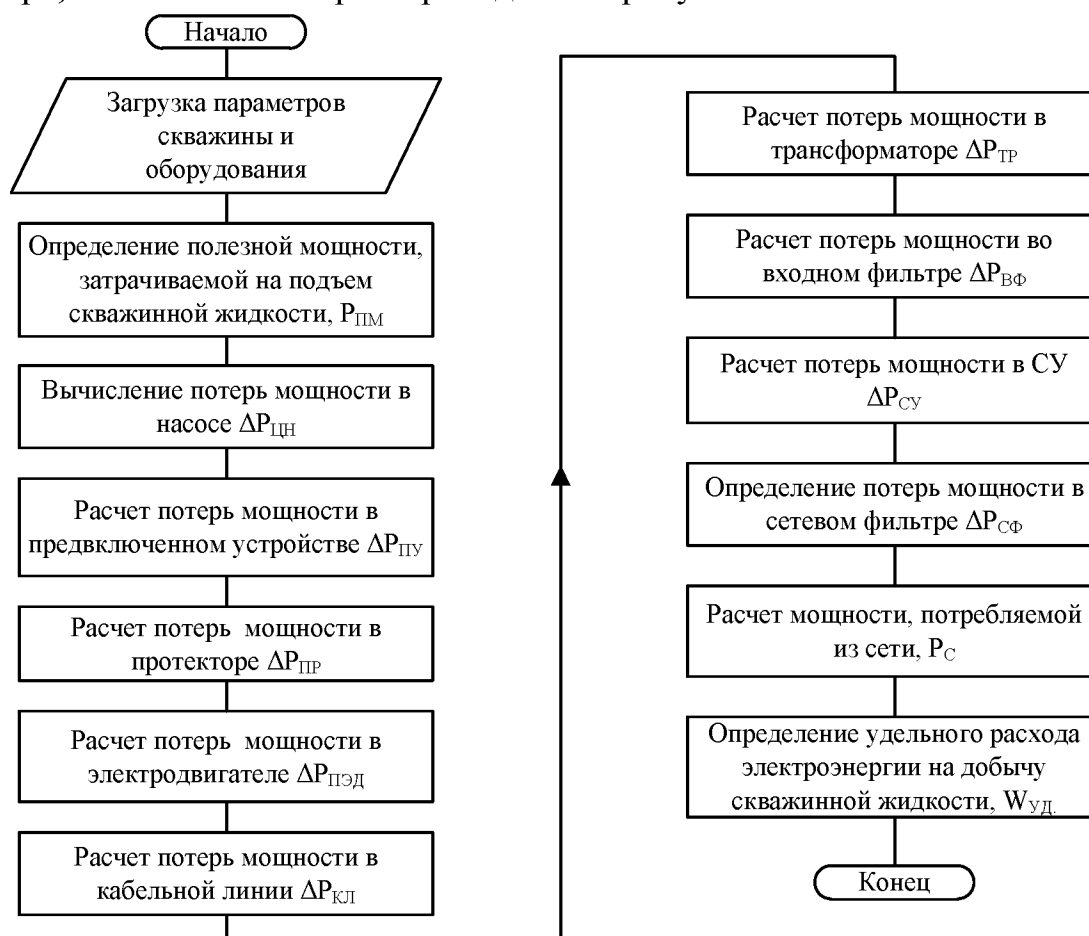


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма расчетов по методике определения нормативных затрат электроэнергии на механизированную добычу

Предложенная методика отличается от известных тем, что позволяет с более высокой точностью рассчитать потери в электрооборудовании установок ЭЦН: в ПЭД, кабеле, трансформаторе, фильтрах и станции управления.

Применение методики позволит оценить энергетическую эффективность эксплуатации фонда нефтедобывающих скважин, определить наличие и причины непродуктивных расходов энергии, и в конечном итоге снизить удельный расход электроэнергии на добычу скважинной жидкости, повысив рентабельность технологических процессов добычи нефти.

**В третьей главе** произведен синтез структуры энергоэффективного электропривода установки ЭЦН, выполнен анализ основных источников потерь в установках ЭЦН и потенциала энергосбережения, предложена структура электропривода ЭЦН на основе высоковольтного преобразователя частоты, произведено его исследование с точки зрения генерируемых высших гармоник и надежности, а также предложено устройство высоковольтного преобразователя частоты с системой диагностики.

Состав привода погружного насоса в упрощенном виде показан на рисунке 4. Он содержит преобразователь частоты (ПЧ), фильтр, повышающий трансформатор ТМПН, кабельную линию и ПЭД.



Рисунок 4 – Состав привода погружного насоса

Особенностями приводов ЭЦН являются: 1) наличие длинной кабельной линии между трансформатором и ПЭД (до 3 км), в которой происходят потери мощности и напряжения; 2) использование электродвигателей с нестандартным напряжением 0,7-3,0 кВ, что обуславливает необходимость установки повышающего трансформатора.

С точки зрения энергоэффективности привод ЭЦН имеет ряд недостатков: напряжение сети 6(10) кВ сначала снижается до напряжения 0,4 кВ, далее происходит преобразование частоты в низковольтном ПЧ, после чего напряжение повышается до необходимого для ПЭД. Последовательная трансформация напряжения приводит к снижению КПД, а также к ограничению нижнего диапазона регулирования скорости вращения из-за ухудшения характеристик трансформатора на низких частотах. Избавиться от этих недостатков можно используя электропривод на основе высоковольтного преобразователя частоты.

Для того, чтобы избавиться от двухступенчатой трансформации напряжений, предлагается изменить структуру электропривода ЭЦН: вместо входного трансформатора 6(10)/0,4 кВ использовать трансформатор, понижающий напряжение до номинального напряжения питания ПЭД 0,7...3 кВ с учетом падения напряжения в кабеле, а также использовать высоковольтный преобразователь частоты (ВПЧ) (рисунок 5).

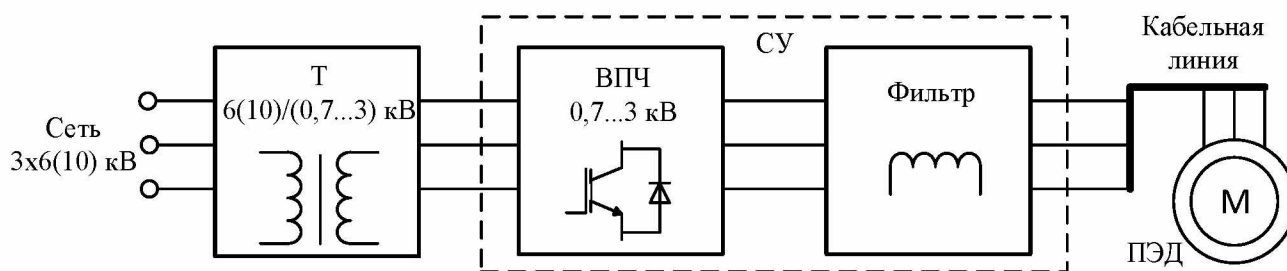


Рисунок 5 – Схема привода ЭЦН на основе высоковольтного ПЧ

В качестве ВПЧ может быть использован многоуровневый преобразователь частоты. Благодаря отсутствию двухступенчатой трансформации напряжения КПД такой структуры будет на 10-15% выше, форма выходного напряжения значительно ближе к синусоидальной. На рисунке 6 приведены спектры выходных напряжений высоковольтных ПЧ, выполненных по двухтрансформаторной (а) и многоуровневой (б) схемам.

Сравнивая спектр на рисунке 6, б со спектром на рисунке 6, а, можно увидеть, что амплитуды частот дополнительных гармоник у многоуровневого высоковольтного ПЧ на порядок ниже, чем у ПЧ, выполненного по двухтрансформаторной схеме. Следовательно, многоуровневые высоковольтные ПЧ обеспечивают значительно большую электромагнитную совместимость как с питающей сетью, так и с ПЭД.

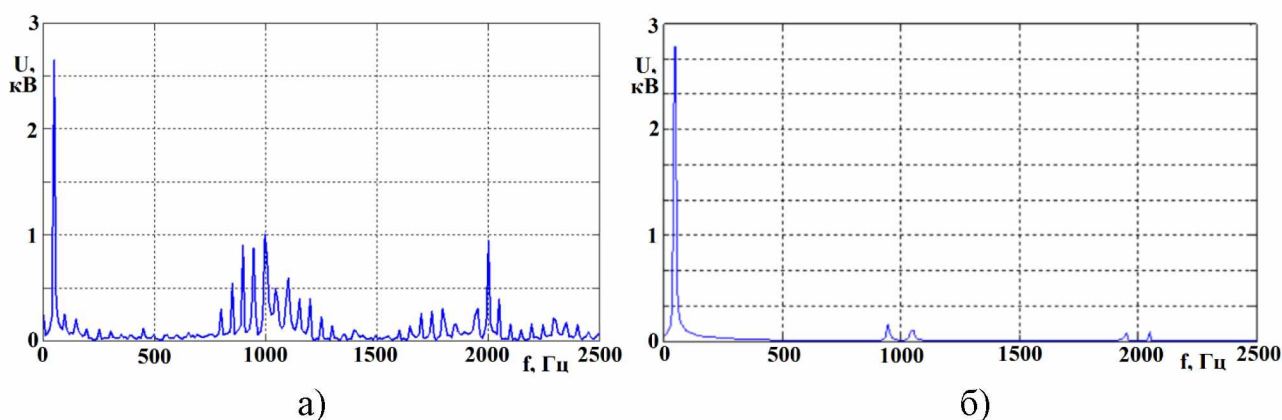


Рисунок 6 – Спектры выходных напряжений высоковольтных ПЧ, выполненных по двухтрансформаторной (а) и многоуровневой (б) схемам

Произведен расчет показателей надежности электропривода (ЭП), выполненных по двухтрансформаторной схеме и на основе ВПЧ. Установлено, что наработка на отказ ЭП первого типа не превышает 100 тыс. ч, а второго – достигает значений в 300 тыс. ч.

Вероятность безотказной работы при наработке в 40 тыс. ч составляет 0,617 и 0,765 соответственно. Таким образом, предлагаемая структура электропривода ЭЦН обладает более высокими значениями надежности и ресурса.

Затраты на реализацию можно представить как разницу в стоимости оборудования при выполнении регулируемого привода ЭЦН на основе ВПЧ и по традиционной двухтрансформаторной схеме аналогичной мощности. Экономич-

ческая эффективность внедрения электропривода ЭЦН на основе высоковольтного преобразователя частоты будет обусловлена экономией электроэнергии за счет более высокого КПД системы из-за отсутствия повышающего трансформатора.

Как показали расчеты, затраты на реализацию проекта составят 881 тыс. р. на одну скважину, при этом срок окупаемости проекта 1,6 лет, а экономический эффект составит 3 149 тыс. р. при времени эксплуатации объекта 10 лет. Поэтому данный проект является экономически эффективным и может быть внедрен в нефтедобывающей промышленности.

Высоковольтные ПЧ являются чрезвычайно ответственными элементами в общей структуре электропривода, поэтому вопросы их диагностики имеют важное значение. Автором предложен способ диагностики высоковольтных ПЧ, в котором помимо контроля исправности полупроводниковых ключей силовых ячеек осуществляется оценка остаточного ресурса изоляции входного многообмоточного трансформатора.

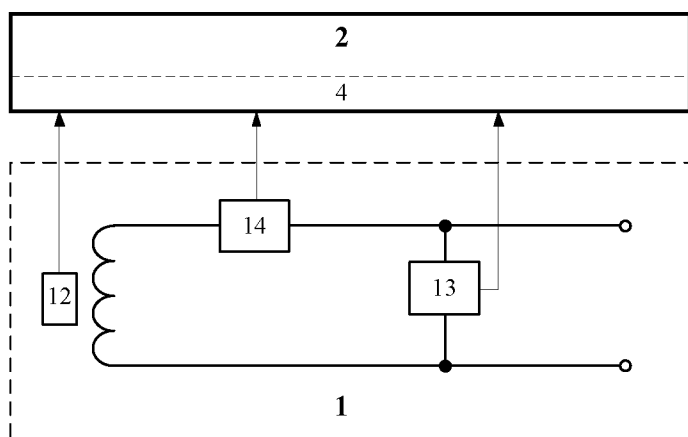


Рисунок 7 – Схема установки датчиков на одной из вторичных обмоток входного многообмоточного трансформатора: 1 – входной многообмоточный трансформатор; 2 – система диагностики ВПЧ; 12 – датчик температуры; 13 – датчик напряжения; 14 – датчик тока

дик в скважинном контроллере СУ и проверке на скважинах действующего фонда. Предложенные в работе алгоритмы и методики были использованы при разработке станции управления электроприводом скважинной насосной установки.

Были произведены исследования, заключающиеся в сравнении вычисленных значений энергопотребления с результатами замеров. В исследованиях анализировались данные по нескольким десяткам скважин с различных месторождений Республики Башкортостан и Западной Сибири. Погрешность определения расчетных значений удельного энергопотребления не превысила 5...10 %.

Для этого вторичные обмотки входного многообмоточного трансформатора оснащаются датчиками тока, напряжения и температуры, а в системе управления подсчитывается время работы обмоток трансформатора при превышениях напряжения и температуры, вызывающих старение изоляции, и определяется остаточный ресурс изоляции (рисунок 7). На данный способ диагностики многоуровневого ПЧ получен патент на изобретение № 2548015.

**Четвертая глава** посвящена практической реализации разработанных моделей и методик

С целью выявления закономерностей между технологическими параметрами скважин, установленного нефтедобывающего оборудования и энергетическими показателями установок ЭЦН был проведен анализ массива данных с параметрами скважин. Анализировались зависимости потерь мощности, удельных затрат на подъем скважинной жидкости и других параметров от динамического уровня, глубины скважины, мощности ПЭД и других факторов.

В результате были получены эмпирические зависимости энергетических показателей установок ЭЦН от технологических параметров скважин и установленного нефтедобывающего оборудования.

На рисунках 8 и 9 приведены зависимости удельного энергопотребления и потерь мощности в кабеле соответственно от объемного дебита нефти.

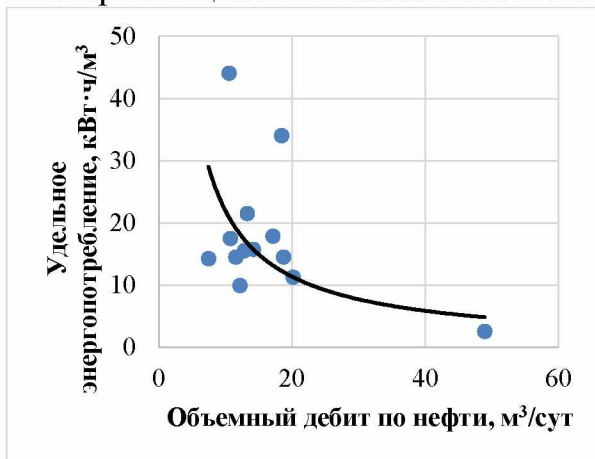


Рисунок 8 – Зависимость удельного энергопотребления от объемного дебита

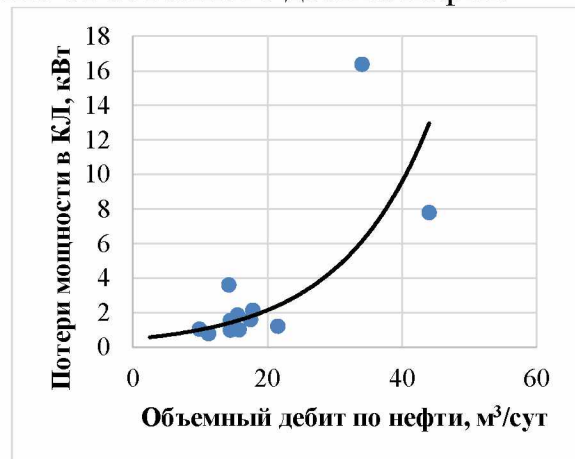


Рисунок 9 – Зависимость потерь мощности в кабеле от объемного дебита

Данные экспериментальные зависимости подтвердили адекватность разработанной модели энергопотребления электротехнического комплекса установки ЭЦН, а также разработанной на его основе методики оценки энергетической эффективности электроприводов скважинных насосов.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Произведен анализ структуры потерь мощности при механизированной добыче скважинной продукции установками ЭЦН, на основе которого разработаны методика оценки энергетической эффективности электроприводов скважинных насосов и алгоритм уточненного определения потребляемой электроприводом погружного насоса мощности, которые отличаются повышенной точностью расчета потерь в электрооборудовании установки ЭЦН: в погружном электродвигателе, в кабеле, в трансформаторе, в фильтрах и станции управления.

2. Исследована энергетическая эффективность установок ЭЦН на основе разработанной методики оценки энергетической эффективности электроприводов скважинных насосов, установлены эмпирические зависимости между основными технологическими параметрами скважин и энергетическими характе-

ристиками электроприводов скважинных насосов. Данные экспериментальные зависимости доказали адекватность разработанной модели энергопотребления электротехнического комплекса установки ЭЦН, а также разработанной на её основе методики оценки энергетической эффективности электроприводов скважинных насосов. Расхождения между вычисленными значениями удельных затрат электроэнергии на добычу скважинной жидкости и результатами измерений в подавляющем большинстве случаев не превысили 5...10%.

3. Получена и исследована новая структура электропривода установки ЭЦН на основе высоковольтного преобразователя частоты, в которой отсутствует двухступенчатая трансформация напряжения. Благодаря этому достигается более высокий общий КПД установки (выше на 10-15%), улучшаются характеристики электропривода при работе на низких скоростях вращения.

Новая структура электропривода обладает более высокой надежностью. Так сравнение показателей надежности ЭП, выполненных по двухтрансформаторной схеме и на основе ВПЧ, показало, что наработка на отказ ЭП первого типа не превышает 100 тыс. ч, а второго – достигает значений в 300 тыс. ч. Вероятность безотказной работы при наработке в 40 тыс. ч составляет 0,617 и 0,765 соответственно. Это доказывает, что новая структура электропривода ЭЦН обладает более высокими значениями надежности и ресурса.

Затраты на реализацию проекта составят 881 тыс. р. на одну скважину, при этом срок окупаемости проекта 1,6 лет, а экономический эффект составит 3 149 тыс. р. при сроке эксплуатации объекта 10 лет.

4. Предложена система диагностики высоковольтного преобразователя частоты, позволяющая контролировать работоспособность как полупроводниковых элементов в силовых ячейках, так и состояние входного многообмоточного трансформатора путем оценки остаточного ресурса изоляции, который определяется интегрально через время работы трансформатора при превышениях напряжения и температуры. Это позволит более эффективно осуществлять комплексную защиту высоковольтного преобразователя частоты, своевременно обнаруживая неисправности не только в силовых ячейках, но и во входном многообмоточном трансформаторе.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

### В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Шафиков, И.Н. Анализ потребления электроэнергии при механизированной добыче нефти электроцентробежными насосами / М.И. Хакимьянов, И.Н. Шафиков // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2013. – Т. 9. – №3. – С. 37-41.

2. Шафиков, И.Н. Энергетические характеристики электроприводов погружных нефтедобывающих насосов / Ф.А. Гизатуллин, М.И. Хакимьянов, Р.А. Семисынов, И.Н. Шафиков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – Т. 1. – № 4. – С. 24–32. DOI: 10.14529/power170403



3. Шафиков, И.Н. Проблемы повышения энергетических характеристик электроприводов скважинных штанговых насосов / М.И. Хакимьянов, Ф.Ф. Хусаинов, И.Н. Шафиков // Электротехнические системы и комплексы. 2017. – № 2 (35). – С. 35–40. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-35-40](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-35-40) (дата обращения 25.11.2019).

4. Шафиков, И.Н. Исследование энергетической эффективности электротехнических комплексов скважинных нефтедобывающих насосов / Гизатуллин Ф.А., Хакимьянов М.И., Хусаинов Ф.Ф., Шафиков И.Н. // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2018. – Т. 61. – № 1. – С. 61-67.

5. Шафиков, И.Н. Регулируемый привод скважинного электроцентробежного насоса на основе высоковольтного многоуровневого преобразователя частоты / И.Н. Шафиков // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2019. – Т. 15. – №3. – С. 53-60.

**В изданиях, индексируемых в базах Web of Science и SCOPUS:**

6. Shafikov I.N. Control of Sucker Rod Pumps Energy Consumption/ M.I. Khakimyanov, I.N. Shafikov, F.F. Khusainov // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. Omsk State Technical University. Russia, Omsk, May 21–23, 2015. IEEE Catalog Number: CFP15794-CDR. ISBN: 978-1-4799-7102-2. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?reload=true&arnumber=7147259> (дата обращения 25.11.2019).

7. Shafikov I.N. Electric Submersible Pumps in Oil Production and Their Efficiency Analysis / M. I. Khakimyanov, I. N. Shafikov, F. F. Khusainov // Proc. of the 4th International Conference on Applied Innovations in IT, E. Siemens (editor in chief) et al. Kothen, Anhalt University of Applied Sciences, 2016. – pp. 34-38.

8. Shafikov I.N. 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. 6 p.

9. Shafikov I.N. Analysis of losses in the cable line of well submersible electric motor/ F. A. Gizatullin, M. I. Khakimyanov, F. F. Khusainov, I. N. Shafikov // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2017. 4 p.

10. Gizatullin F. A. Energy efficiency of well electric submersible pumps for oil production / F. A. Gizatullin, M. I. Khakimyanov, I. N. Shafikov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2019. – Vol. 537. – № 6. – P. 062006.

**Патенты и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:**

11. Шафиков, И.Н. Расчет удельного энергопотребления установки погружного электроцентробежного насоса / М.И. Хакимьянов, И.Н. Шафиков // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. – № 2014615663. – Заявл. от 10.04.2014. Опубл. 30.05.2014.

12. Пат. № 2548015 РФ, H02M 5/458. Способ самодиагностики высоковольтного преобразователя частоты / М.И. Хакимьянов, В.А. Шабанов, И.Н. Шафиков. Заявл. 07.05.2013. Опубл. 10.04.2015. БИ №32.

**В других изданиях:**

13. Шафиков, И.Н. Структура энергопотребления электроцентробежных насосных установок добычи нефти/ М.И. Хакимьянов, И.Н. Шафиков // Современные технологии в нефтегазовом деле - 2013: сб. науч. тр. / редкол.: Мухаметшин В.Ш. и др.: в 3 т.- Уфа: Изд-во УГНТУ, 2013.-Т.2.- С. 230-234.

14. Шафиков, И.Н. Потребление электроэнергии установками электроцентробежных насосов / И.Н. Шафиков, М.И. Хакимьянов// Актуальные проблемы науки и техники: сборник научных трудов VI Международной научно-практической конференции молодых ученых.- Уфа: Нефтегазовое дело, 2013. – С. 23-25.

15. Шафиков, И.Н. Структура энергопотребления нефтегазодобывающих предприятий. Направления оптимизации // В сборнике: Новые технологии - нефтегазовому региону. Материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 50-летию ТИИ-ТюмГНГУ. 2013. С. 266-270.

16. Шафиков, И.Н. Потребление энергии погружными электроцентробежными насосами / И.Н. Шафиков, М.И. Хакимьянов // XX Губкинские чтения «Фундаментальный базис инновационных технологий поисков, разведки и разработки месторождений нефти и газа и приоритетные направления развития ресурсной базы ТЭК России» / Сборник тезисов.- М: РГУНиГ им. И.М. Губкина, 2013.- С. 259-260.

17. Шафиков, И.Н. Современное состояние автоматизации установок механизированной добычи нефти на территории СНГ / А.Г. Рзаев, М.Г. Резван, М.И. Хакимьянов, И.Н. Шафиков // Известия НАНА, серия физико-технических и математических наук, том XXXIII, №6, 2013. – С. 177-187.

18. Шафиков, И.Н. Пути повышения энергоэффективности электроприводов скважинных центробежных насосных установок // Электропривод, электро-технологии и электрооборудование предприятий: сборник научных трудов III Международной (VI Всероссийской) научно-технической конференции / отв. ред. В.А. Шабанов; редкол.: С.Г. Конесев, В.М. Сапельников, М.И. Хакимьянов, П.А. Хлюпин, Р.Т. Хазиева.- Уфа: Изд-во УГНТУ, 2017. – С. 156-160.

19. Шафиков, И.Н. Зависимость энергопотребления штанговых глубинных насосов от технологических параметров скважин / М.И. Хакимьянов, Ф.Ф. Хусаинов, И.Н. Шафиков // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2015. – №1. – С.533-563. URL: <http://ogbus.ru/article/view/zavisimost-energopotrebleniya-shtangovykh-glubinnykh-nasosov-ot-texnologicheskix-parametrov-skvazhintechnological-parameters-influence-of-oilwells-on-energy-consumption-sucker-rod-pumps> (дата обращения 25.11.2019).

Диссертант

И.Н. Шафиков