

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

МИШУРИНСКИХ Сергей Владимирович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ
«ПОГРУЖНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ –
ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНЫЙ НАСОС» НА ОСНОВЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ
ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
ОБОРУДОВАНИЯ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель – д-р техн. наук, доцент Петроченков А.Б.

Пермь – 2021

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Потребление электрической энергии при добыче нефти является значительной статьей затрат отраслевых предприятий. Одними из важных задач государственной политики в вопросах энергетики при добыче полезных ископаемых, согласно официальным документам^{1,2}, являются повышение энергетической эффективности и интеллектуализация систем контроля и управления на объектах нефтедобычи. Решение данных задач может быть достигнуто за счет грамотного планирования технологического процесса и организации информационного сопровождения на всех его этапах.

Планирование режимов работы нефтяных скважин выполняется с учетом влияния изменения параметров электротехнологического оборудования на показатели технологического процесса, среди которых – электропотребление электротехнических комплексов (ЭТК) участков нефтяного месторождения. В настоящее время при добыче нефти широко применяются установки электроцентробежных насосов (УЭЦН). ЭТК УЭЦН состоит из набора типовых элементов. Однако разнообразие технологических и электрических параметров, а также наличие внешних факторов, в совокупности оказывающих значительное воздействие на работу оборудования, требуют адаптации типовых моделей элементов ЭТК под специфику рассматриваемого объекта, в том числе в условиях неопределенности и неполноты информации.

Помимо этого, должно быть формализовано, в виде аналитических зависимостей, взаимное влияние параметров технологического процесса, параметров электротехнического и технологического оборудования на величину электропотребления.

Энергетическая эффективность процесса добычи нефти УЭЦН поддерживается, кроме прочего, за счет своевременного получения информации о показателях энергоэффективности и виде и величине управляющих воздействий. Получение соответствующей информации должно обеспечиваться, в том числе, внедрением систем интегрированной логистической поддержки, которые являются современным инструментом «интеллектуализации» ЭТК отраслевых предприятий.

Степень разработанности темы исследования. Взаимодействие электромеханической и гидромеханической подсистем нефтяных месторождений рассматривается в работах Ш. К. Гиматудинова, В. Н. Ивановского, М. А. Караева, П. Д. Ляпкина, И. Т. Мищенко, И. М. Муравьева, Д. Н. Нурбосынова, *B. Guo, G. Tackacs, H. Mukherjee* и др.

Моделированию электрических машин посвящены работы А. И. Вольдека, И. П. Копылова, М. П. Костенко, В. Ф. Сивокобыленко и др.

Моделированию режимов функционирования ЭТК посвящены работы Г.И. Бабокина, В. А. Ведерникова, В. А. Веникова, Г. В. Веникова, М. С. Ершова, В.И. Идельчика, В.З. Ковалева, А. В. Ляхомского, Л. А. Плащанского, М. И. Хакимьянова, Ю.В. Шевырёва, *A. Kwasinsky, M. Paolone, A. Abur* и др.

Объектом исследования является электротехнический комплекс участка механизированной добычи нефтяного месторождения, оборудованного установками электроцентробежных насосов.

Предметом исследования является процесс потребления электроэнергии установкой электроцентробежного насоса.

1. Энергетическая стратегия России на период до 2035 года [утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. № 1523-р]. – Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/node/1026>.

2. План мероприятий («дорожная карта») «Энерджинет» Национальной технологической инициативы: [одобрена Президиумом Совета при Президенте РФ по модернизации экономики и инновационному развитию России 28.09.2016, Протокол №4]. – Режим доступа: https://nti2035.ru/markets/docs/DK_energynet.pdf.

Идея работы заключается в повышении энергетической эффективности установок электроцентробежных насосов за счет рациональных параметров режимов электротехнологического оборудования нефтяных скважин.

Целью работы является управление электропотреблением системы «погружной электрический двигатель – электроцентробежный насос» на основе рациональных параметров режимов электротехнологического оборудования нефтяных скважин для повышения энергетической эффективности процесса добычи нефти.

Для достижения сформулированной цели были поставлены и решены следующие **научные задачи**:

1) разработать метод повышения энергетической эффективности функционирования системы «погружной электрический двигатель – электроцентробежный насос» с учетом особенностей оборудования, используемого на объектах нефтедобычи, и существующих технологических ограничений;

2) разработать математические зависимости параметров функционирования погружного электрического двигателя и электроцентробежного насоса от текущих параметров технологического процесса и электрического режима;

3) разработать методику оптимизации электропотребления системы «погружной электрический двигатель – электроцентробежный насос», учитывающую параметры оборудования и технологические ограничения;

4) разработать цифровую модель системы «погружной электрический двигатель – электроцентробежный насос»; верифицировать результаты моделирования электропотребления системы «погружной электрический двигатель – электроцентробежный насос» на физической модели электротехнического комплекса участка нефтяного месторождения, а также в условиях промышленной эксплуатации.

Основные научные положения и результаты, выносимые на защиту, их новизна:

1) метод повышения энергетической эффективности с интегрированной логистической поддержкой функционирования системы «погружной электрический двигатель – электроцентробежный насос», *отличающийся от существующих* наличием индикативных показателей, позволяющих оценивать результативность управляющих воздействий на энергоэффективность электротехнологического оборудования с учетом существующих технологических ограничений;

2) математические зависимости параметров функционирования погружного электрического двигателя и электроцентробежного насоса от формы кривой коэффициента полезного действия, коэффициента загрузки двигателя и параметров электрического режима, *отличающиеся от существующих* тем, что на их основе возможна автоматическая коррекция параметров режимов системы «погружной электрический двигатель – электроцентробежный насос»;

3) методика оптимизации электропотребления системы «погружной электрический двигатель – электроцентробежный насос», *отличающаяся от существующих* тем, что применяется оригинальная зависимость требуемой глубины регулирования частоты от параметров технологического процесса, технологических ограничений и с учетом взаимодействия электротехнического и технологического оборудования;

4) цифровая модель системы «погружной электрический двигатель – электроцентробежный насос» с объектно-ориентированной структурой, *отличающаяся от существующих* тем, что учитывает взаимодействие с аналогичными системами участка механизированной добычи нефтяного месторождения при изменении параметров электрических режимов.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1) разработанный метод повышения энергетической эффективности с интегрированной логистической поддержкой функционирования системы «погружной электрический двигатель – электроцентробежный насос» позволяет оценивать результативность управляющих воздействий на энергоэффективность электротехнологического оборудования с учетом существующих технологических ограничений;

2) разработанная методика оптимизации электропотребления системы «погружной электрический двигатель – электроцентробежный насос» позволяет оценивать потенциал повышения энергетической эффективности УЭЦН, а также определять величину воздействия на электротехнологическое оборудование с учетом технологических ограничений;

3) разработанные математические зависимости являются основой для автоматической коррекции параметров режимов системы «погружной электрический двигатель – электроцентробежный насос»;

4) разработанная цифровая модель системы «погружной электрический двигатель – электроцентробежный насос» с объектно-ориентированной структурой позволяет учитывать взаимодействие с аналогичными системами участка механизированной добычи нефтяного месторождения при изменении параметров электрических режимов;

5) разработанная физическая модель системы «погружной электрический двигатель – электроцентробежный насос» позволяет натурно оценивать электропотребление погружного электродвигателя при различных параметрах технологического режима с учетом частотного регулирования на лабораторном стенде.

Модели элементов электротехнического оборудования используются группой предприятий «СПУТНИК» при проектировании электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли. Разработанные модели взаимодействия электромеханической и гидромеханической подсистем УЭЦН используются в «Объединенном инженерном тренажере» ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ». Методика оптимизации электропотребления системы «погружной электрический двигатель – электроцентробежный насос» используется при разработке интеллектуальных станций управления в НИОКТР по соглашению № 075-11-2021-052 от 24.06.2021 г. «Создание высокотехнологичного производства автономных энергосберегающих цифровых систем распределенного управления добывающим фондом скважин на основе элементов машинного обучения и искусственного интеллекта» в рамках Постановления №218 Правительства РФ от 09.04.2010 г.

Разработанные имитационные модели элементов ЭТК используются в учебном процессе электротехнического факультета ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач в работе использовались элементы теории электротехники, теории электрических машин, теории электропривода, теории оптимизации, теории центробежных насосов, теории подобия, теории физического моделирования, а также методы математического моделирования с использованием пакетов компьютерных программ *LabVIEW*, *MathCad* и *Microsoft Excel*.

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. 1 «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем»; п. 3 «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления».

Достоверность результатов подтверждается корректным использованием апробированного математического аппарата теории электротехники, электрических машин, электропривода, оптимизации, центробежных насосов, подобия, физического моделирования; сопоставлением результатов расчетов с данными, приведенными в технической литературе, и данными, полученными в результате инструментальных замеров на реальных технологических объектах и физической модели. 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: XVII Всероссийской научно-практической конференции «Планирование и обеспечение подготовки кадров для промышленно-экономического комплекса региона» (ЛЭТИ, г. Санкт-Петербург, 2018 г.); международной научной «Электроэнергетической конференции (ISEPC-2019)» (СПбПУ, г. Санкт-Петербург, 2019 г.); X и XI международных конференциях «Инновационная энергетика» (ПНИПУ, г. Пермь, 2019, 2020 гг.), XXVI, XXVIII и XXIX международных научных симпозиумах «НЕДЕЛЯ ГОРНЯКА» (НИТУ МИСИС, г. Москва, 2018, 2020, 2021 гг.), *International Conference on Applied Innovation in IT* (г. Кётен, ФРГ, 2020 г.), конференции молодых исследователей России по электротехнике и электронике *IEEE (2021 ElConRus)* (ЛЭТИ, г. Санкт-Петербург, 2021 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 7 работ (из них 2 работы опубликованы в изданиях, входящих в международные системы цитирования *SCOPUS* и *Web of Science*, 2 работы – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ), получено одно свидетельство о государственной регистрации базы данных.

Личный вклад автора состоит в анализе существующего программно-аппаратного обеспечения, используемого нефтедобывающими компаниями для моделирования и расчета электропотребления УЭЦН; разработке модели электроцентробежного насоса (ЭЦН), позволяющей учитывать влияние параметров электрических режимов на параметры механического оборудования; разработке модели погружного асинхронного электродвигателя (ПЭД), позволяющей учитывать изменение коэффициента мощности двигателя при отклонении напряжения на клеммах двигателя от номинального; разработке методики оптимизации электропотребления системы «погружной электрический двигатель – электроцентробежный насос»; проведении экспериментальных исследований на физической модели УЭЦН и в условиях промышленной эксплуатации. В работах в соавторстве личный вклад соискателя составляет не менее 75%.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 133 наименований, изложена на 173 страницах машинописного текста и включает 51 рисунок, 20 таблиц и 7 приложений.

Во введении представлено обоснование актуальности данной работы, поставлена цель и сформулированы научные задачи. Определены объект и предмет исследования, выделены научная новизна и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе на основе анализа состава ЭТК нефтяного месторождения (НМ) выполнена декомпозиция ЭТК и определена его типовая структура, в общем виде представленная на рисунке 1, которая разделяется на 3 уровня:

- уровень нагрузки;
- уровень комплектной трансформаторной подстанции (КТП);
- уровень подстанции (ПС).

На уровне нагрузки рассматривается совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих подсистем различной физической природы: гидромеханической и

электромеханической. Для построения моделей элементов ЭТК с учетом особенностей их взаимодействия ЭТК НМ разделен на 3 зоны:

– *A*: система электроснабжения НМ, где регулирование частоты не выполняется (электрическая подсистема). Контролируемый параметр – напряжение (U , В); наблюдаемые параметры: активная мощность (P , Вт), реактивная мощность (Q , ВАр), ток (I , А).

– *B*: электромеханическая подсистема нагрузки, где выполняется регулирование частоты и напряжения. Контролируемые параметры – напряжение (U , В), частота (f , Гц); наблюдаемые параметры: активная мощность (P , Вт), реактивная мощность (Q , ВАр), ток (I , А).

– *C*: гидромеханическая подсистема нагрузки, где регулирование технологических параметров выполняется за счет изменения параметров электромеханической подсистемы. Контролируемые параметры: динамический уровень ($H_{\text{дин}}$, м), буферное давление ($P_{\text{буф}}$, Па), дебит жидкости ($Q_{\text{ж}}$, м³/сут). Наблюдаемые параметры: плотность жидкости ($\rho_{\text{ж}}$, кг/м³), вязкость жидкости (ν , м²/с), объемный коэффициент расширения нефти (B , о.е.). Элементами, не входящими в состав ЭТК, являются рабочий механизм (ЭЦН, станок-качалка) и технологический объект – пласт. Пласт характеризуется свойствами жидкости и энергией пласта, которая выражается в виде пластового давления.

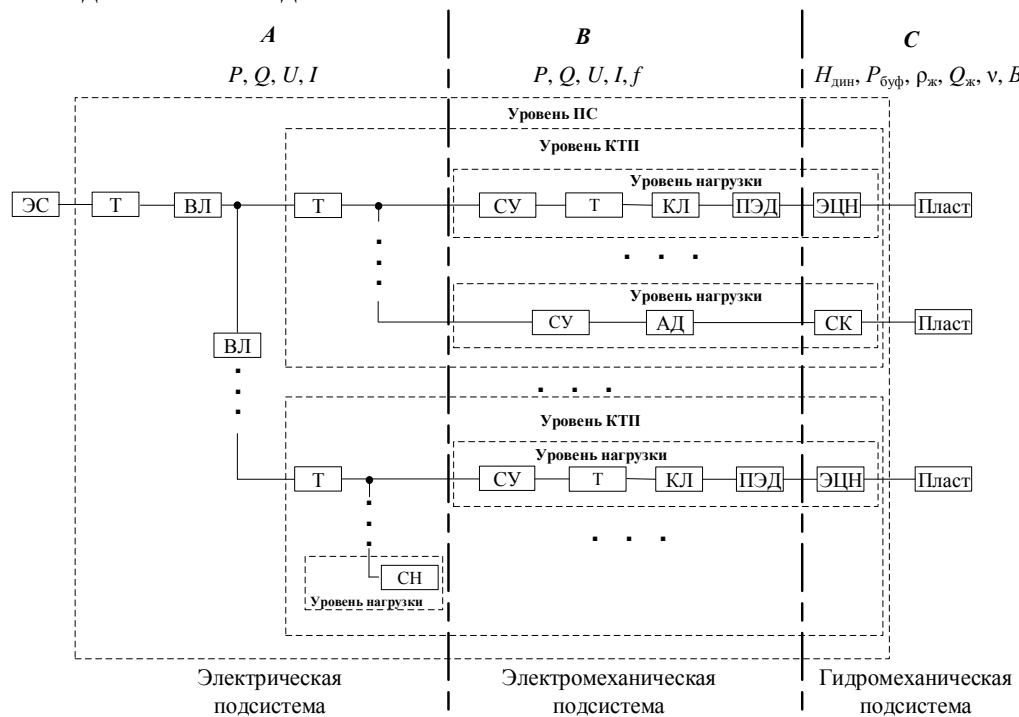


Рисунок 1 – Структурная схема электротехнического комплекса нефтяного месторождения (ЭС – внешняя энергосистема; Т – трансформатор; ВЛ – воздушная линия электропередачи; КЛ – кабельная линия электропередачи; ПЭД – погружной электродвигатель; СУ – станция управления; ЭЦН – электроцентробежный насос; СН – статическая нагрузка; СК – станок-качалка)

В основном, ЭТК НМ выполнены по магистральной схеме с сосредоточенными нагрузками с односторонним питанием. Данную особенность следует учитывать при выборе математического аппарата для расчета электропотребления УЭЦН.

Во второй главе разработаны модели элементов и модели взаимодействия элементов ЭТК объектов механизированной добычи НМ. При разработке моделей учитывались следующие аспекты: во-первых, расчет параметров электрического режима должен выполняться на основании текущих параметров технологического процесса; во-вторых, должно учитываться

влияние параметров электрического режима на энергетические характеристики насоса и двигателя.

На основании анализа методик расчета параметров электропотребления, с учетом структуры ЭТК НМ, выбран метод расчета электропотребления по известному напряжению в начале участка и мощности в конце участка.

На первом этапе задается начальное приближение напряжения потребителя $\dot{U}_j^{(0)}$, и определяется величина тока:

$$\dot{I}_{ij}^{(p)} = \frac{P_j - iQ_j}{\sqrt{3} \cdot \dot{U}_j^{(p-1)}}, \quad (1)$$

где i – узел начала элемента, j – узел конца элемента, p – номер итерации.

Определяются потери мощности:

$$\Delta \dot{S}_{ij}^{(p)} = \left(\frac{P_j^2 + Q_j^2}{(U_j^{(p-1)})^2} \right) \cdot \dot{Z}_{ij}, \quad (2)$$

где \dot{Z} – комплексное сопротивление ветви, Ом.

Определяется величина мощности на источнике:

$$\dot{S}_i^{(p)} = \dot{S}_j + \Delta \dot{S}_{ij}^{(p)}. \quad (3)$$

Определяется величина падения напряжения на элементе:

$$\Delta \dot{U}_{ij}^{(p)} = \dot{I}_{ij}^{(p)} \cdot \dot{Z}_{ij}. \quad (4)$$

Определяется напряжение в конце участка:

$$\dot{U}_j^{(p)} = \frac{\dot{U}_i^{(p)} - \Delta \dot{U}_{ij}^{(p)}}{K_T}, \quad (5)$$

где K_T – коэффициент трансформации ветви.

Данный цикл повторяется до тех пор, пока разница между значениями напряжения на различных итерациях для узлов нагрузки не окажется в рамках заданной погрешности ε :

$$|\dot{U}_j^{(p+1)} - \dot{U}_j^{(p)}| < \varepsilon. \quad (6)$$

В общем виде схема замещения элемента ЭТК НМ, используемая при расчете параметров электропотребления, представлена на рисунке 2.

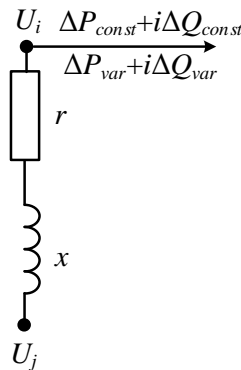


Рисунок 2 – Схема замещения элемента ЭТК НМ

(r – активное сопротивление элемента, Ом; x – реактивное сопротивления элемента, Ом;

U_i – напряжение в начале элемента, В; U_j – напряжение в конце элемента, В;

ΔP_{const} , ΔP_{var} – постоянные и переменные потери активной мощности, Вт;

ΔQ_{const} , ΔQ_{var} – постоянные и переменные потери реактивной мощности, ВАр)

Формулы для расчета параметров схем замещения элементов ЭТК НМ представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Формулы для расчета параметров схем замещения элементов ЭТК НМ

Элемент	Исходные данные	Активное сопротивление r , Ом	Реактивное сопротивление x , Ом	Потери активной мощности, Вт	Потери реактивной мощности, вар
Линия электропередачи (ЛЭП)	Удельное активное сопротивление r_0 , Ом/км Удельное реактивное сопротивление x_0 , Ом/км Длина l , км; Ток нагрузки I , А; Частота напряжения f , Гц; Температура окружающей среды T , °C; Температурный коэффициент электрического сопротивления α , °C ⁻¹	$r_{\text{ЛЭП}} = r_0 \cdot l_{\text{ЛЭП}} \times (1 + \alpha(T - 20))$	$x_{\text{ЛЭП}} = x_0 \cdot l_{\text{ЛЭП}} \cdot \frac{f}{50}$	$\Delta P_{\text{ЛЭП}} = 3 \cdot I^2 \cdot r_{\text{ЛЭП}}$	$\Delta Q_{\text{ЛЭП}} = 3 \cdot I^2 \cdot x_{\text{ЛЭП}}$
Трансформатор	Номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$, В Номинальная мощность $S_{\text{ном}}$, ВА Потери холостого хода $\Delta P_{\text{хх}}$, Вт Потери короткого замыкания $\Delta P_{\text{кз}}$, Вт Напряжение короткого замыкания $U_{\text{кз}}$, % Ток холостого хода $I_{\text{хх}}$, % Частота напряжения f , Гц Мощность нагрузки S , ВА	$r_{\text{T}} = \frac{\Delta P_{\text{кз}} \cdot U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}^2}$	$x_{\text{T}} = \sqrt{\left(\frac{U_{\text{кз}} \cdot U_{\text{ном}}^2}{100 \cdot S_{\text{ном}}} \right)^2 - r_{\text{T}}^2} \cdot \frac{f}{50}$	Постоянные потери $\Delta P_{\text{const}} = \Delta P_{\text{хх}} \cdot \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3}$ Переменные потери $\Delta P_{\text{var}} = \Delta P_{\text{кз}} \cdot \left(\frac{S}{S_{\text{ном}}} \right)^2$	Постоянные потери $\Delta Q_{\text{const}} = \frac{I_{\text{хх}} \cdot S_{\text{ном}}}{100}$ Переменные потери $\Delta Q_{\text{var}} = \frac{U_{\text{кз}} \cdot S^2}{100 \cdot S_{\text{ном}}}$
Станция управления	Активная мощность на входе станции управления $P_{\text{су}}$, Вт Реактивная мощность на входе станции управления $Q_{\text{су}}$, ВАр КПД станции управления $\eta_{\text{су}}$, о.е. Номинальный коэффициент мощности станции управления $\cos \varphi_{\text{суном}}$, о.е. Текущий коэффициент мощности на входе станции управления $\cos \varphi_{\text{су}}$, о.е.	$r_{\text{су}} = 0, x_{\text{су}} = 0,$ (станция управления представляется идеальным трансформатором с коэффициентом трансформации $k_{\text{су}} = f/50$)		$\Delta P_{\text{су}} = P_{\text{су}} \cdot \left(\frac{1}{\eta_{\text{су}}} - 1 \right)$	$\Delta Q_{\text{су}} = Q_{\text{су}} \times (\cos \varphi_{\text{су}} - \cos \varphi_{\text{суном}})$
Погружной электродвигатель*	Коэффициент загрузки K_3 , о.е. Номинальный коэффициент мощности двигателя $\cos \varphi_{\text{ном}}$, о.е. Номинальный ток двигателя $I_{\text{ном}}$, А Номинальное напряжение двигателя $U_{\text{ном}}$, В	$r_{\text{пэд}}, x_{\text{пэд}} = f(K_3, I_{\text{ном}}, \cos \varphi_{\text{ном}}, U_{\text{ном}})$		0	0
Статическая нагрузка*	Номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$, В Активная мощность P , Вт Реактивная мощность P , ВАр	$r_{\text{с.н.}} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{P}$	$x_{\text{с.н.}} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{Q}$	0	0

* разложение потребляемой мощности на полезную составляющую и потери в данном исследовании не выполнялось

Как уже отмечалось, при моделировании электропотребления ЭТК объектов механизированной добычи НМ необходимо учитывать взаимодействие гидромеханической и электромеханической подсистем, где ключевым элементом является погружной электрический двигатель.

Для учета взаимодействия указанных подсистем разработан следующий подход. Вычисляется механическая мощность, подводимая к ЭЦН, необходимая для поддержания заданных технологических параметров:

$$P_{\text{ЭЦН}} = \frac{\rho_{\text{ж}} \cdot g \cdot \left(\frac{P_{\text{буф}}}{\rho_{\text{ж}} \cdot g} + H_{\text{дин}} \right) \cdot Q_{\text{ЭЦН}} \cdot B}{\eta_{\text{ЭЦН}} \cdot K_{\text{пв}} \cdot 86400}, \quad (7)$$

где $\rho_{\text{ж}}$ – плотность поднимаемой жидкости, кг/м³; g – ускорение свободного падения, принимается равным 9,81 м²/сек; $P_{\text{буф}}$ – буферное давление, Па; $H_{\text{дин}}$ – динамический уровень жидкости в скважине, м; $Q_{\text{ЭЦН}}$ – заданный дебит насоса, м³/сут; B – объемный коэффициент расширения нефти, ед.; $\eta_{\text{ЭЦН}}$ – КПД насоса в заданной рабочей точке, о.е.; $K_{\text{пв}}$ – коэффициент, учитывающий изменение КПД насоса при работе на вязких жидкостях, о.е.

С целью автоматической коррекции параметров модели насоса зависимость его КПД от параметров технологического процесса и электрического режима описывается полиномом вида:

$$\eta_{\text{ЭЦН}} = a_0 + a_1 \left(\frac{50}{f} \right) \cdot \left(\frac{Q_{\text{ЭЦН}}}{Q_{\text{max}}} \right) + a_2 \left(\frac{50}{f} \right)^2 \cdot \left(\frac{Q_{\text{ЭЦН}}}{Q_{\text{max}}} \right)^2 + a_3 \left(\frac{50}{f} \right)^3 \cdot \left(\frac{Q_{\text{ЭЦН}}}{Q_{\text{max}}} \right)^3 + \\ + a_4 \left(\frac{50}{f} \right)^4 \cdot \left(\frac{Q_{\text{ЭЦН}}}{Q_{\text{max}}} \right)^4, \quad (8)$$

где a_0, \dots, a_4 – весовые коэффициенты полинома; f – частота напряжения питающей сети, Гц; Q_{max} – теоретически возможный максимальный дебит насоса при напоре, равном 0 м, м³/сут.

На основании рассчитанной механической мощности, подводимой к насосу, рассчитывается коэффициент загрузки ПЭД:

$$K_3 = \frac{P_{\text{ЭЦН}}}{P_{\text{ном}}}, \quad (9)$$

где $P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность ПЭД, Вт.

Параметры схемы замещения двигателя определяются из характеристик завода-изготовителя по формулам:

$$r_{\text{ПЭД}} = \frac{U_{\text{ном}}}{I_{\text{ПЭД}}} \cdot \cos \varphi_{\text{ПЭД}}, \\ x_{\text{ПЭД}} = \frac{U_{\text{ном}}}{I_{\text{ПЭД}}} \cdot \sin \varphi_{\text{ПЭД}}. \quad (10)$$

где $I_{\text{ПЭД}}$ – ток ПЭД при заданной нагрузке, А; $\cos \varphi_{\text{ПЭД}}$ – коэффициент мощности ПЭД при заданном коэффициенте загрузки и номинальном напряжении на клеммах двигателя, о.е.

Так как характер изменения нагрузочных характеристик одинаков для двигателей одного габарита, то с целью автоматизации расчетов зависимости параметров схемы замещения ПЭД от коэффициента загрузки (который, в свою очередь, определяется, исходя из параметров технологического процесса и параметров оборудования) записываются в виде:

$$r_{\text{ПЭД}} = \frac{U_{\text{ном}} \cdot (-0,866 \cdot K_3^2 + 1,694 \cdot K_3 + 0,156) \cos \varphi_{\text{ном}}}{(0,311 \cdot K_3^2 + 0,226 \cdot K_3 + 0,456) \cdot I_{\text{ном}}}, \quad (11)$$

$$x_{\text{ПЭД}} = \frac{U_{\text{ном}} \cdot \sin\left(\arccos\left(\left(-0,866 \cdot K_3^2 + 1,694 \cdot K_3 + 0,156\right) \cos \varphi_{\text{ном}}\right)\right)}{\left(0,311 \cdot K_3^2 + 0,226 \cdot K_3 + 0,456\right) \cdot I_{\text{ном}}} \quad (12)$$

Уточнен характер изменения коэффициента мощности ПЭД в зависимости от напряжения на клеммах двигателя:

$$\cos \varphi_U = \cos \varphi_{\text{ПЭД}} \cdot K_{\cos \varphi} \quad (13)$$

Для анализа результатов расчетов коэффициента $K_{\cos \varphi}$ построена поверхность отклика (рисунок 3). При построении поверхности отклика переменными являются: коэффициент загрузки (K_3) ПЭД (диапазон изменения принимается от 0,25 до 1), относительное напряжение ($U_{\text{отн}}$) на клеммах ПЭД (диапазон изменения принимается от 0,9 до 1,1).

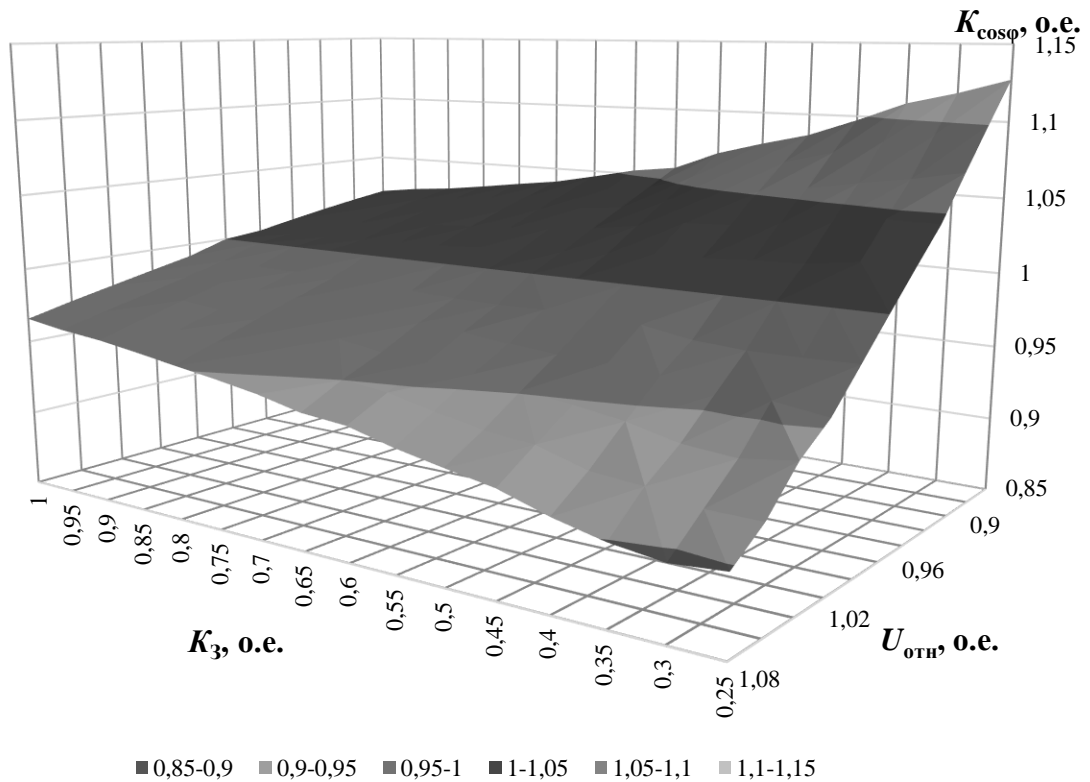


Рисунок 3 – Поверхность отклика относительного коэффициента мощности для ПЭД

Для автоматической коррекции параметров схемы замещения погружного двигателя получено уравнение поверхности отклика:

$$K_{\cos \varphi} = \left(-1,6001 + 1,4656 \cdot K_3 + 0,7753 \cdot K_3^2 - 0,9114 \cdot K_3^3\right) \cdot U_{\text{отн}} + \left(2,6152 - 1,5233 \cdot K_3 - 0,7248 \cdot K_3^2 + 0,8974 \cdot K_3^3\right) \quad (14)$$

В третьей главе разработана методика оптимизации электропотребления системы «погружной электрический двигатель – электроцентробежный насос», которая позволяет аналитически подбирать оптимальные параметры устьевой арматуры и частоты напряжения на выходе станции управления с учетом существующих технологических ограничений.

Предложены технологический и энергетический индикативные показатели технологического режима:

$$P_{\text{буф}} - P_{\text{лин}} \geq \Delta P_{\text{арм}(k+1)\Delta d} \quad (15)$$

$$\left(1 - \frac{W'_{уд}}{W_{уд}}\right) \cdot 100\% > 0, \quad (16)$$

где $P_{лин}$ – линейное давление; $\Delta P_{арм(k+1)\Delta d}$ – величина изменения давления при увеличении диаметра штуцера на одну ступень, относительно установленного; k – номер шага; Δd – шаг увеличения диаметра штуцера; $W_{уд}$, $W'_{уд}$ – удельное электропотребление УЭЦН до и после оптимизации.

В методике учитываются технологические ограничения по защите от срыва подачи, охлаждению двигателя, возможностям регулирования устьевой арматуры, минимально-допустимому напору, рабочему диапазону частот трансформатора, а также напорная характеристика насоса.

Требуемая глубина регулирования частоты определяется по формуле:

$$f_2 = \frac{Q_2}{Q_1} \cdot f_1 \cdot \left(1 + \frac{H_2 \cdot Q_1}{H_1 \cdot Q_2} - \frac{H_2}{H_1}\right), \quad (17)$$

где Q_1 – подача, при напоре, равном 0 на частоте 50 Гц, м³/сут; Q_2 – требуемая подача, м³/сут; f_1 – основная частота напряжения питающей сети (для России 50 Гц), Гц; H_1 – напор при заданной подаче на напорной характеристике насоса при 50 Гц, м; H_2 – желаемый напор, м.

Задача оптимизации электропотребления системы «ПЭД – ЭЦН» сводится к минимизации потребляемой УЭЦН мощности при сохранении объемов добычи. Потребляемая УЭЦН мощность вычисляется как:

$$P_{уэцн} = P_{пэд} + \Delta P_{лэп} + \Delta P_{т} + \Delta P_{су} \rightarrow \min. \quad (18)$$

Электропотребление УЭЦН вычисляется как:

$$W_{уэцн} = P_{уэцн} \cdot \Delta T, \quad (19)$$

где ΔT – рассматриваемый промежуток времени, ч.

Мощность, потребляемая электродвигателем, определяется по формуле:

$$P_{пэд} = \frac{\rho_{ж} \cdot g \cdot \left(\frac{P_{буф}}{\rho_{ж} \cdot g} + H_{дин}\right) \cdot Q_{эцн} \cdot B}{\sum_{i=0}^4 a_i \left(\frac{50}{f}\right)^i \cdot \left(\frac{Q_{эцн}}{Q_{max}}\right)^i \cdot K_{\eta v} \cdot \eta_{пэд}}. \quad (20)$$

где $\eta_{пэд}$ – КПД ПЭД при соответствующей нагрузке (согласно паспортным данным), о.е.

Потери активной и реактивной мощности в кабельной линии определяются по формулам:

$$\Delta P_{лэп} = 3 \cdot \left(\frac{P_{пэд}}{\sqrt{3} \cdot U_{пэд} \cdot \cos \varphi_U}\right)^2 \cdot r_{лэп}, \quad (21)$$

$$\Delta Q_{лэп} = 3 \cdot \left(\frac{P_{пэд}}{\sqrt{3} \cdot U_{пэд} \cdot \cos \varphi_U}\right)^2 \cdot x_{лэп}. \quad (22)$$

Потери мощности в трансформаторе определяются по формуле:

$$\Delta P_{т} = \Delta P_{хх} + \Delta P_{кз} \cdot \left(\frac{(P_{пэд} + \Delta P_{лэп})^2 + (P_{пэд} \cdot \operatorname{tg}(\arccos \varphi_U) + \Delta Q_{лэп})^2}{S_{ном}^2}\right). \quad (23)$$

Потери мощности в станции управления определяются по формуле:

$$\Delta P_{су} = (P_{пэд} + \Delta P_{лэп} + \Delta P_{т}) \cdot (1 - \eta_{су}). \quad (24)$$

Блок-схема алгоритма оптимизации электропотребления системы «ПЭД – ЭЦН» представлена на рисунке 4.

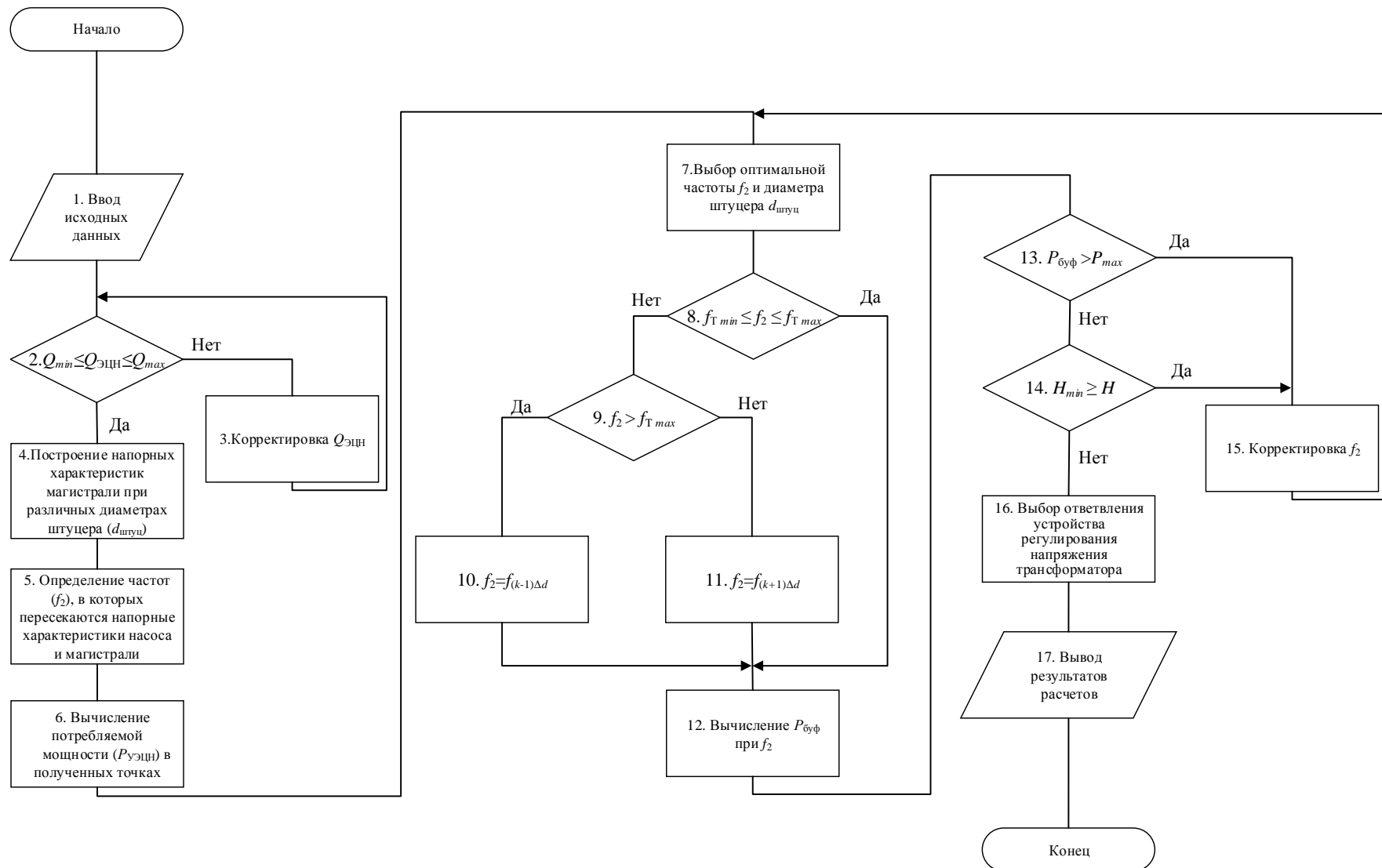


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма оптимизации электропотребления системы «ПЭД – ЭЦН»

(Q_{min} , Q_{max} – величины минимально- и максимально-допустимого дебита; f_{Tmin} , f_{Tmax} – минимально- и максимально-допустимые рабочие частоты трансформатора; P_{max} – максимально-допустимое буферное давление; H_{min} – минимально-допустимый напор насоса)

В четвертой главе на основании представленных во второй главе моделей элементов ЭТК НМ и моделей их взаимодействия разработана цифровая модель системы «ПЭД – ЭЦН» в среде графического программирования *LabVIEW* с применением объектно-ориентированного подхода. Сформированы классы объектов, а также их свойства и применяемые в них методы (таблица 2). Особенностью разработанной модели является то, что она учитывает взаимодействие нескольких УЭЦН участка механизированной добычи НМ при изменении параметров электрического режима. Блок-диаграмма реализованного в *LabVIEW* виртуального прибора (*vi* – *virtual instrument*) класса «Трансформатор» представлена на рисунке 5.

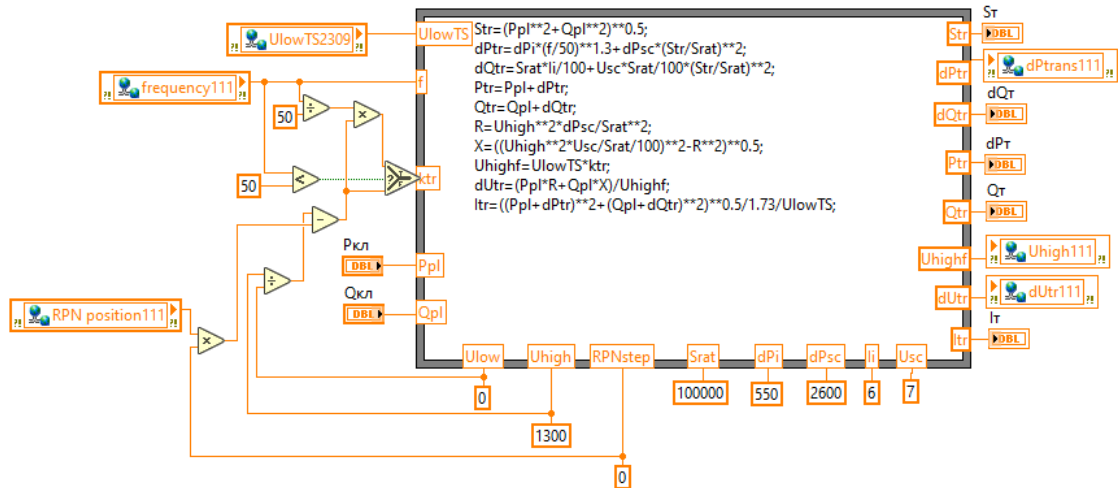


Рисунок 5 – Блок-диаграмма виртуального прибора класса «Трансформатор» в среде *LabVIEW*

Блок-диаграмма виртуального прибора «УЭЦН», реализующего взаимодействие оборудования на уровне нагрузки, представлена на рисунке 6.

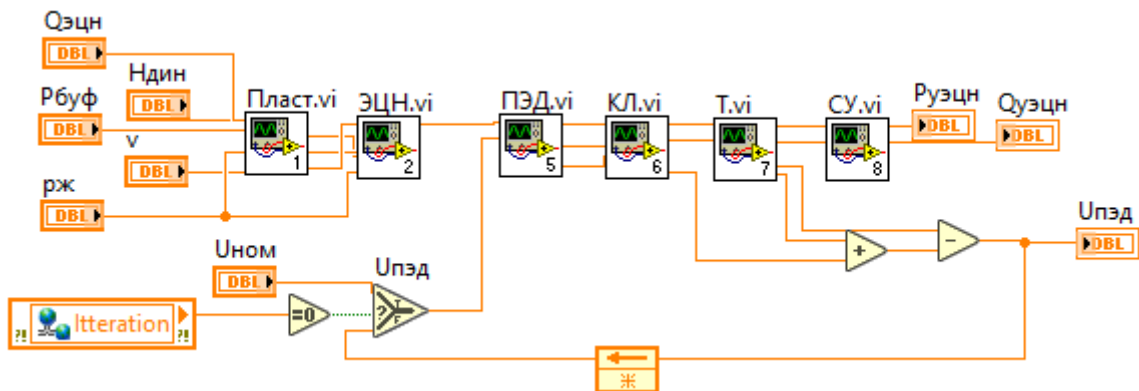


Рисунок 6 – Блок-диаграмма виртуального прибора «УЭЦН» в среде *LabVIEW*
($Q_{уэцн}$ – реактивная мощность, потребляемая УЭЦН)

Оценка адекватности разработанной цифровой модели проводилась путем сравнения данных моделирования с данными, полученными в результате инструментальных замеров на скважинах месторождения им. В. П. Сухарева ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» (таблица 3).

На цифровой модели УЭЦН была выполнена оценка величины дополнительных потерь в оборудовании УЭЦН, вызванных наличием высших гармоник (ВГ) в сети. Результаты моделирования представлены в таблице 4.

Таблица 2 – Описание элементов цифровой модели систем «ПЭД – ЭЦН» с объектно-ориентированной структурой

Класс	Свойства	Методы	Объект
Станция управления	Активная мощность на выходе станции управления; реактивная мощность на выходе станции управления; выходное напряжение станции управления; паспортные параметры оборудования	Потери активной мощности в станции управления; активная мощность на входе станции управления; реактивная мощность на входе станции управления; вычисление тока на входе станции управления	Тип станции управления
Линия электропередачи	Ток, протекающий в ЛЭП; активная мощность в конце ЛЭП; реактивная мощность в конце ЛЭП; частота питающего напряжения станции управления; паспортные параметры оборудования	Потери напряжения в ЛЭП; потери активной мощности в ЛЭП; потери реактивной мощности в ЛЭП; активная мощность в начале ЛЭП; реактивная мощность в начале ЛЭП; передача данных в следующий объект	Тип линии электропередачи
Трансформатор	Напряжение обмотки высокого напряжения трансформатора; напряжение обмотки низкого напряжения трансформатора; частота напряжения станции управления; активная мощность на вторичной обмотке трансформатора; реактивная мощность на вторичной обмотке трансформатора; номер ступени регулирования; паспортные параметры оборудования	Потери активной мощности в трансформаторе; потери реактивной мощности в трансформаторе; напряжение вторичной обмотки трансформатора; потери напряжения в трансформаторе; вычисление тока первичной обмотки трансформатора	Тип силового трансформатора
Статическая нагрузка	Мощность нагрузки; напряжение	Ток нагрузки	Греющий кабель, административно-бытовой комплекс и т.д.
Погружной электродвигатель	Частота питающего напряжения станции управления; мощность, потребляемая насосом; напряжение на клеммах двигателя; паспортные параметры оборудования	Коэффициент загрузки ПЭД; текущий КПД двигателя; активная мощность, потребляемая двигателем; реактивная мощность, потребляемая двигателем; текущий коэффициент мощности двигателя; текущий ток двигателя	Тип погружного электродвигателя
ЭЦН	Частота питающего напряжения станции управления; дебит; плотность жидкости; теоретически возможная подача насоса; вязкость; напор насоса; оптимальная подача насоса; коэффициенты полинома КПД насоса	Вычисление мощности, потребляемой насосом; вычисление КПД насоса	Тип ЭЦН
Пласт	Динамический уровень; буферное давление; плотность жидкости; дебит; вязкость жидкости; объемный коэффициент нефти	Вычисление напора, развиваемого насосом; передача данных в следующий объект	Пласт

Таблица 3 – Оценка погрешности результатов моделирования электропотребления УЭЦН

Точка замера	Электропотребление, кВт·ч/сут		Погрешность, %
	Результаты инструментальных замеров	Результаты моделирования	
Скважина №115	686,4	648,0	5,6
Скважина №119	453,6	480,0	5,8
Скважина №120	919,2	895,2	2,6
Скважина №318	775,2	700,8	9,6

Таблица 4 – Результаты оценки дополнительных потерь электроэнергии в элементах ЭТК УЭЦН, вызванных наличием ВГ

Условия расчета	Потери в элементе, кВт				
	$\Delta P_{\text{ЭЦН}}$	$\Delta P_{\text{ПЭД}}$	$\Delta P_{\text{КЛ}}$	$\Delta P_{\text{Т}}$	$\Delta P_{\text{СУ}}$
Без учета влияния ВГ	13,700	4,520	4,200	1,520	0,920
С учетом влияния ВГ	13,700	4,786	4,214	1,574	0,920
Дополнительные потери, вызванные влиянием ВГ	0,000	0,266	0,014	0,054	0,000

По результатам моделирования выявлено, что потери от влияния ВГ значительно меньше величины суммарных потерь во всех элементах ЭТК УЭЦН (в том числе в насосе), следовательно, ими можно пренебречь.

Методика оптимизации электропотребления системы «ПЭД – ЭЦН» была апробирована на УЭЦН месторождения им. В. П. Сухарева (Пермский край). Данные исходного режима, исходные параметры оборудования, рекомендуемые параметры оборудования и рассчитанные величины электропотребления, соответствующие представленным параметрам, приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты выбора рациональных параметров режимов электротехнологического оборудования при оптимизации электропотребления системы «ПЭД – ЭЦН»

Режим	Параметр	Номер скважины		
		115	120	318
Исходный	$d_{\text{штуц}}$, мм	5	4	5
	f , Гц	43	56	48
	$P_{\text{буф}}$, МПа	1,4	2,6	1,5
	$H_{\text{дин}}$, м	764	750	908
	$W_{\text{УЭЦН}}$, кВт·ч/сут	648,0	895,2	700,8
	$W_{\text{уд}}$, кВт·ч/м ³	11,24	13,95	10,46
Оптимизированный	$d_{\text{штуц}}$, мм	7	7	8
	f , Гц	42,2	54,6	47
	$P_{\text{буф}}$, МПа	1,050	1,000	0,917
	$H_{\text{дин}}$, м	767	755	900
	$W_{\text{УЭЦН}}$, кВт·ч/сут	631,0	781,9	680,2
	$W_{\text{уд}}$, кВт·ч/м ³	10,95	12,18	10,15
Снижение удельного электропотребления, %		2,59	12,68	2,74

Графическое представление выбора рациональных параметров режимов электротехнологического оборудования при оптимизации электропотребления системы «ПЭД – ЭЦН» на примере скважины № 115 представлено на рисунке 7, где: $H_{\text{исх}}$ – напор насоса в исходном режиме; $H_{\text{мин}}$ – минимально-допустимый напор насоса; $H_{\text{опт}}$ – напор насоса в рассчитанном оптимальном режиме; $H-Q(f)$ – напорные характеристики насоса при различных частотах напряжения питающей сети; $d_{\text{штуц}}$ – напорные характеристики скважины при различных диаметрах штуцера; $Q_{\text{ЭЦН}}$ – заданный дебит насоса.

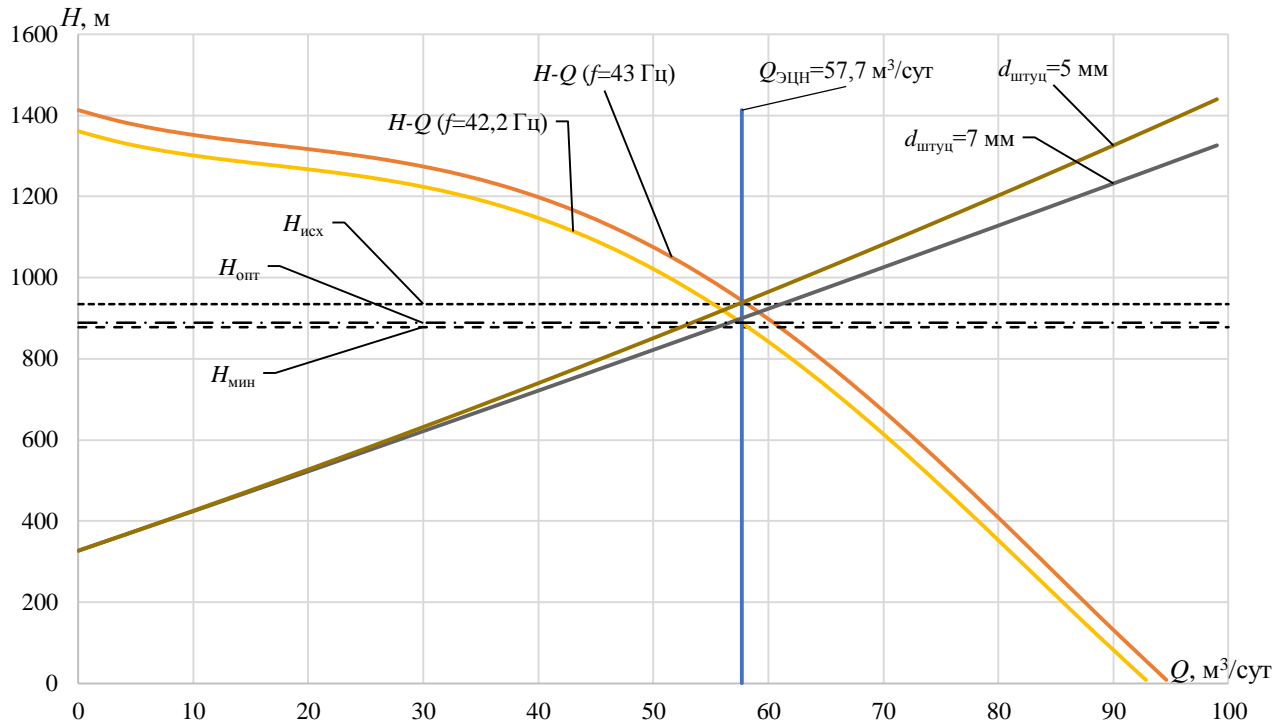


Рисунок 7 – Графическое представление выбора рациональных параметров режимов электротехнологического оборудования при оптимизации электропотребления системы «ПЭД – ЭЦН» на примере скважины №115

Методика оптимизации электропотребления системы «ПЭД – ЭЦН» используется при разработке интеллектуальных станций управления УЭЦН. Структурная схема управления процессом электропотребления системы «ПЭД – ЭЦН» представлена на рисунке 8, где: ПЛК – программируемый логический контроллер; ПЧ – преобразователь частоты; ТМС – телеметрическая система; x – множество параметров истинного состояния процесса (зависит от типа ТМС); $y = \{P_{\text{буф}}, T\}$ – множество измеряемых параметров; $u = \{f, d_{\text{штуц}}, W_{\text{УЭЦН}}\}$ – множество управляющих воздействий, формируемых ПЛК; F – множество параметров настройки модуля управления УЭЦН (зависит от типа станции управления УЭЦН); $e = \{H_{\text{дин}}, Q_{\text{ЭЦН}}, \rho_{\text{ж}}, v, B\}$ – множество параметров внешних систем измерения; $u' = \{f', d'_{\text{штуц}}, W'_{\text{УЭЦН}}\}$ – множество рациональных параметров режимов электро- технологического оборудования.

Разработанный метод повышения энергетической эффективности функционирования системы «ПЭД – ЭЦН» рассматривается с позиций интегрированной логистической поддержки (ИЛП) в части:

- диагностики состояния электротехнического оборудования;
- планирования процедур материально-технического обеспечения, определение состава и необходимого объема запасных частей;
- обучения обслуживающего персонала;
- разработки и сопровождения электронной эксплуатационной документации.

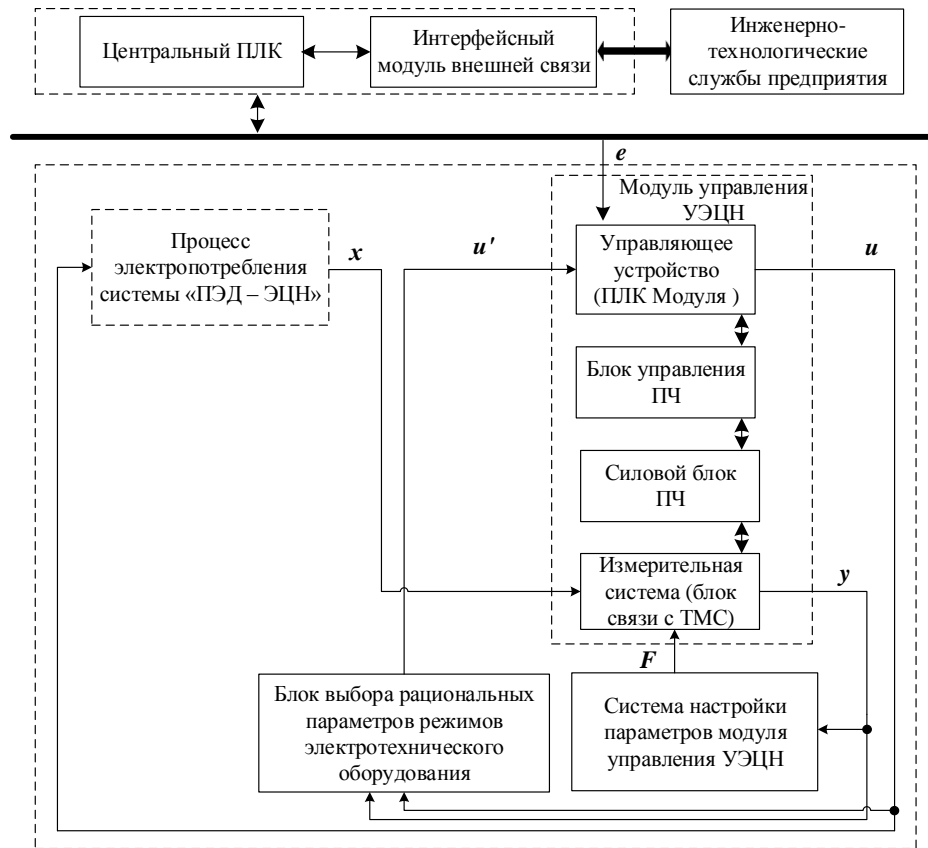


Рисунок 8 – Структурная схема управления электропотреблением системы «ПЭД – ЭЦН»

На лабораторном стенде выполнена оценка адекватности предложенного подхода к моделированию асинхронных электрических двигателей по нагрузочной характеристике. Внешний вид стенда и схема соответствия агрегатов лабораторного стенда реальному оборудованию НМ представлены на рисунке 9.

Машиной, соответствующей ПЭД, является асинхронный двигатель. Машиной, имитирующей нагрузку, является машина постоянного тока ПЗ2М. Индикатором загрузки асинхронного двигателя является ток якоря машины постоянного тока.

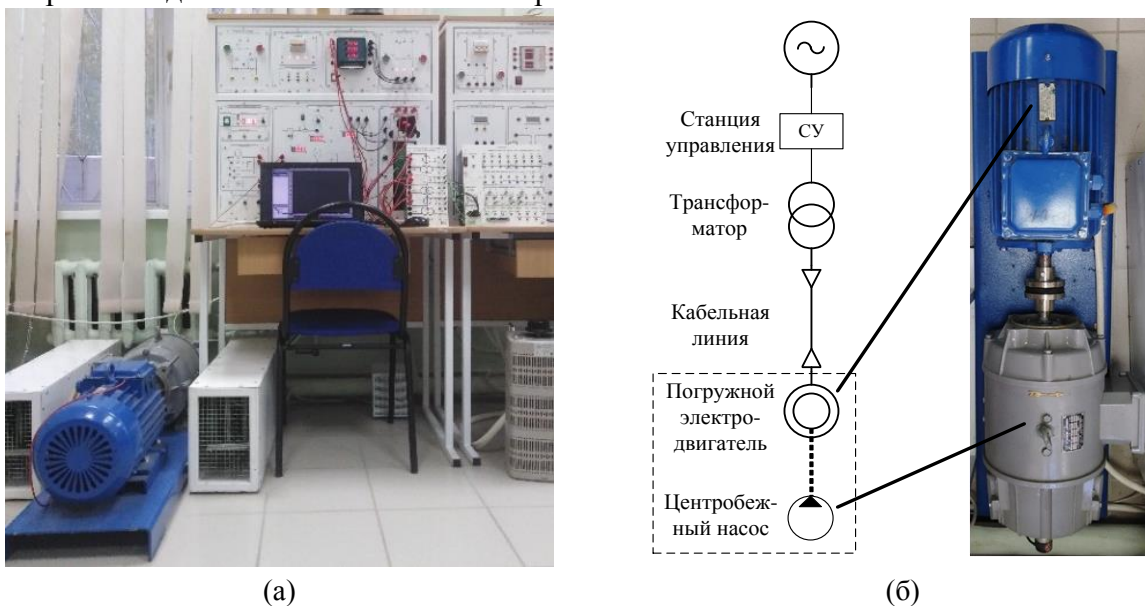


Рисунок 9 – Лабораторный стенд: (а) – внешний вид лабораторного стенда; (б) – схема соответствия агрегатов лабораторного стенда реальному оборудованию НМ

Результаты экспериментов показали, что при моделировании работы одного двигателя модуль относительной погрешности при определении тока составляет не более 3,61%, модуль относительной погрешности при определении коэффициента мощности составляет не более 4,64%.

При моделировании параллельной работы двигателей получено, что модуль относительной погрешности между результатами расчета и моделирования составляет: при определении величины тока – не более 3,53%, при определении коэффициента мощности – не более 4,91%.

Предложен и апробирован подход к построению физической модели системы «ПЭД–ЭЦН» на лабораторном стенде.

Выполнена оценка соответствия разработанных цифровой и физической моделей. Принято допущение, что характер изменения рабочих характеристик (коэффициент загрузки, коэффициент мощности, КПД) реального двигателя и лабораторного двигателя одинаковый. В таком случае, коэффициенты пропорциональности π между двигателями будут следующие (индекс «Р» соответствует реальному двигателю, индекс «Л» – лабораторному):

$$\pi_z = \frac{K_{зр}}{K_{зл}} = 1; \pi_{\cos \varphi} = \frac{\cos \varphi_r}{\cos \varphi_l} = 1; \pi_\eta = \frac{\eta_r}{\eta_l} = 1; \pi_p = \frac{P_r}{P_l} = var, \quad (25)$$

Для оценки эффективности частотного регулирования рассматривались 2 случая:

1) на основе усредненных параметров технологического процесса (КПД насоса принимается постоянным);

2) на основе параметров технологического процесса и оборудования, принятых из результатов расчетов оптимизации электропотребления системы «ПЭД–ЭЦН» в составе УЭЦН.

Результаты математического и физического моделирования электропотребления системы «ПЭД–ЭЦН» для указанных случаев приведены в таблицах 6 и 7.

Таблица 6 – Результаты моделирования электропотребления на основе усредненных параметров технологического процесса

Рассматриваемый случай	Исходные данные				Результаты	
	Режим	Q , м³/сут	H , м	π_p	Электропотребление, кВт·ч/сут	
					Математическая модель	Физическая модель
1	До оптимизации	40	1950	14,7	412,80±0,05	419,30±2,58
	После оптимизации	40	1400		338,40±0,05	344,70±3,98
Снижение потребления, %					18,03±0,02	17,76±1,45
2	До оптимизации	27	1700	14,7	319,20±0,05	318,30±2,39
	После оптимизации	27	1400		228,00±0,05	226,50±1,74
Снижение потребления, %					28,57±0,03	28,85±1,08

Таблица 7 – Результаты моделирования электропотребления на основе параметров технологического процесса и оборудования, принятых из результатов расчетов оптимизации электропотребления системы «ПЭД – ЭЦН»

Скважина	Исходные данные					Результаты	
	Режим	Q , м ³ /сут	$H_{\text{дин}}$, м	$P_{\text{буф}}$, МПа	π_p	Электропотребление, кВт·ч/сут	
						Математическая модель	Физическая модель
115	До оптимизации	57,7	764	1,40	26,7	416,20±0,05	410,80±2,01
	После оптимизации	57,7	764	1,05		399,40±0,05	395,40±0,43
Снижение потребления, %						4,04±0,03	3,74±0,58
120	До оптимизации	64,2	750	2,60	26,7	637,90±0,05	654,70±4,18
	После оптимизации	64,2	750	1,00		550,10±0,05	559,20±2,25
Снижение потребления, %						13,76±0,02	14,58±0,89
318	До оптимизации	67,0	908	1,50	30	422,20±0,05	430,20±1,89
	После оптимизации	67,0	908	0,92		395,00±0,05	403,10±1,00
Снижение потребления, %						6,42±0,03	6,31±0,63

Проведенная оценка соответствия разработанных цифровой и физической моделей системы «ПЭД – ЭЦН» подтверждает их адекватность (результаты математического моделирования принадлежат доверительному интервалу результатов физического моделирования при уровне доверительной вероятности 0,95).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом диссертационной работы является решение актуальной научной задачи, заключающейся в разработке научно-методического обоснования моделирования электропотребления системы «погружной электрический двигатель – электроцентробежный насос», позволяющего повысить энергетическую эффективность процесса добычи нефти. В ходе работы:

1) разработан метод повышения энергетической эффективности работы установки электроцентробежного насоса с интегрированной логистической поддержкой функционирования системы «погружной электрический двигатель – электроцентробежный насос», который позволяет на основе индикативных показателей оценивать результативность управляющих воздействий на энергоэффективность электротехнологического оборудования с учетом существующих технологических ограничений;

2) разработаны математические зависимости параметров функционирования погружного электрического двигателя и электроцентробежного насоса от текущих параметров технологического процесса и электрического режима, на основе которых возможна автоматическая коррекция параметров моделей элементов электротехнического комплекса нефтяного месторождения;

3) разработана методика оптимизации электропотребления системы «погружной электрический двигатель – электроцентробежный насос», позволяющая оценивать требуемую глубину регулирования частоты с учетом параметров технологического процесса, технологических ограничений и взаимодействия электротехнического и технологического оборудования;

4) разработана цифровая модель системы «погружной электрический двигатель – электроцентробежный насос» с объектно-ориентированной структурой, учитывающая взаимодействие с аналогичными системами участка механизированной добычи нефтяного месторождения. Погрешность моделирования электропотребления по сравнению с результатами инструментальных замеров составляет не более 10%.

Основные работы, опубликованные по теме диссертации

1. Experience in Developing a Physical Model of Submersible Electrical Equipment for Simulator Systems: Research and Training Tasks on the Agenda of a Key Employer / A. B. Petrochenkov, A. V. Romodin, S. V. Mishurinskikh, V. V. Seleznev, V. A. Shamaev // Proceedings of 2018 XVII Russian Scientific and Practical Conference on Planning and Teaching Engineering Staff for the Industrial and Economic Complex of the Region (PTES) [Electronic resource] : [Proc. of Conf.], St. Petersburg, Russia, Nov. 14-15, 2018 / IEEE Russia North-West section, St. Petersburg Electrotechn. Univ. LETI. - [S. l.] : IEEE, 2018. - P. 114-117. - Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8604169>. - Title from screen. - DOI: 10.1109/PTES.2018.8604169.

2. Practical aspects of modeling of the oil and gas producing enterprise's electrotechnical complexes / A. B. Petrochenkov, A. V. Romodin, S. V. Mishurinskikh // International Scientific Electric Power Conference ISEPC-2019 (23 — 24 May, 2019) / Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. - Saint-Petersburg. - 2019., DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012115, Scopus.

3. Development of the oil well electrotechnical complex model in LabVIEW: Application work package / A. Petrochenkov, A. Romodin, S. Mishurinskikh, P. Speshilov // Proceedings of the 8th International Conference on Applied Innovation in IT [Electronic resource] : Koethen. Germany. 10 March 2020 . Vol. 8, Iss. 1 / Anhalt Univ. of Applied Sciences, Perm Nat. Research Polytechnic Univ. - Koethen : Edition Hochschule Anhalt, 2020. - P. 101-106. - P. 87-94. - Mode of access: http://icait.org/issue.php?paper=8th_ICAIT_1/f - Title from screen. - DOI: 10.25673/32767.

4. Development of methods for modeling of oil and gas producing enterprises electrotechnical complexes / A. V. Romodin, D. Y. Leyzgold, S. V. Mishurinskikh, N. V. Pavlov, A. S. Semenov // Journal of Physics: Conference Series. - 2021. - Vol. 1886. - Art. 012003. 7 p., DOI: 10.1088/1742-6596/1886/1/012003 Scopus.

5. Development of a Method for Optimizing Power Consumption of an Electric Driven Centrifugal Pump / A. B. Petrochenkov, S. V. Mishurinskikh // 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), St. Petersburg, Russia, Jan. 26-29, 2021. - P. 1520-1524. - Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=9396730>. - Title from screen. - DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396730.

6. Ляхомский А.В., Петроченков А.Б., Перфильева Е.Н., Ромодин А.В., Мишуриных С.В. Об оценке электропотребления погружного электрооборудования на физической модели // Промышленная энергетика. – 2020. – №8. – С.26-33., DOI: 10.34831/EP.2020.18.90.004, ВАК.

7. Мишуриных С.В., Петроченков А.Б. Методические рекомендации по оценке реактивной мощности, потребляемой погружным асинхронным электродвигателем // Вестник ПНИПУ. – 2021. – №38. – С.175-194. DOI: 10.15593/2224-9397/2021.2.09, ВАК.

8. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2018620596. База данных схем электроснабжения и паспортных характеристик оборудования ООО «ЛЮКОЙЛ-ПЕРМЬ» / Селезнев В.В., Шамаев В.А., Гладков В.К., Черемных Д.Н., Петроченков А.Б., Ромодин А.В., Трушников К.П., Мишуриных С.В., опубли. 19.04.2018.