

На правах рукописи



Казанцев Александр Андреевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДОБЫЧИ НЕФТИ
РЕГУЛИРОВАНИЕМ НАПРЯЖЕНИЯ
ПРОМЫСЛОВОЙ ПОДСТАНЦИИ**

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Самара – 2024

Работа выполнена на кафедре «Автоматизированные электро-энергетические системы» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет».

Научный руководитель: **Косорлуков Игорь Андреевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы», ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Официальные оппоненты: **Артюхов Иван Иванович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электроэнергетика и электротехника» ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», г. Саратов.

Кретов Дмитрий Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, кафедры «Электроснабжение и электротехника», ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», г. Тольятти.

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет»**, г. Тюмень.

Защита диссертации состоится 25 декабря 2024 в 11:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.377.06, при ФГБОУ ВО «СамГТУ» по адресу: г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, главный корпус, ауд. № 200.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «СамГТУ», по адресу: г. Самара, ул. Первомайская, 18, корпус № 1, а также на официальном сайте диссертационного совета по адресу <https://24237706.samgtu.ru/spisok-dissertatsii>.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенных печатью) просим направлять по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, СамГТУ, Главный корпус, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.377.06; тел.: (846)278-44-96, факс: (846)278-44-00, e - mail: a-ezhova@yandex.ru.

Автореферат разослан «___» ноября 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.377.06



Е.В. Стрижакова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В соответствии с Федеральным Законом РФ № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ» от 23.11.2009 г. повышение энергетической эффективности производственных процессов в нефтяной отрасли является актуальной задачей. Кроме того, в соответствии со Стратегией долгосрочного развития РФ с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г., от нефтегазодобывающих компаний требуют развития новых подходов к оптимизации потребления энергетических ресурсов при добыче и транспортировке углеводородного сырья.

Анализ затрат электроэнергии по производственным процессам нефтедобывающей компании показывает, что наиболее энергоемким является процесс добычи нефти, он составляет более 56 % от всех затрат. В связи с этим весьма актуальным является повышение энергетической эффективности электротехнического комплекса добычи нефти.

Степень разработанности проблемы. Методам оптимизации режимов работ в электроэнергетике посвящено большое количество исследований. Прежде всего, следует отметить работы таких ученых, как Мельников Н.А., Голованов А.П., Сушков В.В., Халилов Ф.Х., Строев В.А., Веников В.А., Хачатрян В.С., Бартоломей П.И., Арзамасцев Д.А., Горнштейн В.М., Идельчик В.И, Герасименко А.А, Абрамович Б.Н., Ершов М.С., Жежеленко И.В., Железко Ю.С., Кудрин Б.И., Конюхова Е.А., Мищенко И.Т., Хакимьянов М.И. При этом вопросам определения оптимального напряжения промышленной подстанции посвящены труды Нурбосынова Д.Н., Табачниковой Т.В., Швецковой Л.В., Мукани Э.Б.

Цель диссертационной работы — повышение энергетической эффективности электротехнического комплекса добычи нефти за счет квазиоптимального регулирования напряжения промышленной подстанции.

Задачи диссертационного исследования.

1. Определить зависимость средней скорости и потребляемой мощности асинхронного двигателя штанговой скважинной насосной установки при вариации напряжения статора.

2. Оценить влияние преобразователей частоты станций управления погружными насосами на потребляемую мощность электротехническими комплексами добывающих скважин.

3. Разработать методику и алгоритм расчета оптимального напряжения промышленной подстанции, учитывающие широкий спектр комплектации электротехнических комплексов добывающих скважин.

4. Определить влияние дискретности регулирования напряжения трансформаторами с РПН на прогнозируемую потребляемую мощность и потери в элементах отходящей линии и электротехнических комплексах добывающих скважин.

5. Провести апробацию разработанных технических решений сравнением результатов расчета с фактическими данными промышленной подстанции.

Объектом исследования являются электротехнические комплексы добывающих скважин нефтяного промысла.

Предметом исследования являются процессы обеспечения энергоэффективности электротехнического комплекса добычи нефти.

Методы исследования. Исследования проведены с использованием методов теории электрических цепей, теории электрических машин, теории электропривода, численного решения алгебраических и дифференциальных уравнений, математического и компьютерного моделирования.

Научная новизна.

1. Определены аналитические зависимости для расчета скорости и потребляемой мощности асинхронными двигателями штанговой скважинной насосной установки и погружного центробежного насоса при вариации питающего напряжения, отличающиеся учетом напорных характеристик насосов,

кинематики исполнительного механизма и особенностей преобразователей частоты (п. 1 паспорта специальности).

2. Определены условия, при которых применение преобразователя частоты в станции управления погружным центробежным насосом приводит к снижению затрат электрической энергии, отличающиеся учетом напорной характеристики насоса и дополнительных потерь в повышающем трансформаторе и погружном электродвигателе от высших гармоник в выходном напряжении преобразователя частоты (п. 2 паспорта специальности).

3. Разработаны методика и алгоритм расчета оптимальной величины напряжения промышленной подстанции, обеспечивающей минимум удельных затрат электроэнергии при добыче нефти, отличающиеся учетом особенностей напорных характеристик погружных насосов, преобразователей частоты станций управления и дискретности регулирования напряжения (п. 3 паспорта специальности).

Практическая значимость диссертационной работы.

1. Разработанная методика позволяет обосновано регулировать напряжение промышленной подстанции с целью снижения удельных затрат электрической энергии при добыче нефти.

2. Полученные аналитические зависимости позволяют определить целесообразность применения преобразователей частоты в станциях управления погружными центробежными насосами с позиции экономии электрической энергии.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Аналитические зависимости для расчета скорости и потребляемой мощности асинхронными двигателями штанговой скважинной насосной установки и погружного центробежного насоса при вариации питающего напряжения.

2. Методика и алгоритм расчета оптимальной величины напряжения промышленной подстанции, обеспечивающей минимум удельных затрат электроэнергии при добыче нефти, отличающиеся учетом особенностей

напорных характеристик погружных насосов и преобразователей частоты станций управления.

3. Методика и алгоритм расчета прогнозируемого потребления энергии электротехническими комплексами добывающих скважин, отличающиеся учетом дискретности регулирования напряжения промышленной подстанции.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректным использованием соответствующего математического аппарата, вычислительных программных комплексов и подтверждается удовлетворительным совпадением результатов расчетов и экспериментальных данных.

Реализация результатов работы. Основные результаты работы были использованы АО «Самарская сетевая компания» (г. Самара) и ООО «Сетевик» (г. Самара) для повышения надежности и эффективности электроснабжения электротехнических комплексов добывающих скважин, а также в учебном процессе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» (г. Самара), что подтверждается соответствующими актами внедрения.

Апробация работы. Отдельные результаты исследования докладывались и обсуждались на Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы и инновационные решения в нефтегазовой отрасли» (г. Москва, 2021 г.), на Международной научно-практической конференции «Ашировские чтения» (г. Самара, 2023 г.), на IV Всероссийской научно-практической конференции «Энергетика будущего – цифровая трансформация» (г. Липецк, 2023 г.), на Международной научно-технической конференции «Электротехнические комплексы и системы UralCon-2023» (г. Магнитогорск, 2023 г.), на научных семинарах кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 работ, в том числе 5 научных статей в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, 5 публикаций в материалах международных и всероссийских конференций.

Личный вклад автора в диссертационное исследование. В работах, опубликованных в соавторстве, автору принадлежат: разработка алгоритмов

расчета оптимального напряжения промышленной подстанции и прогнозируемой потребляемой мощности с учетом дискретности регулирования напряжения; аналитические выражения для расчета скорости асинхронных двигателей штанговых скважинных насосных установок и погружных двигателей с учетом напорных характеристик насосов и особенностей преобразователей частоты станций управления; результаты расчетов и их анализ.

Научная квалификационная работа на соискание степени кандидата технических наук выполнена в соответствии с паспортом специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы и отвечает направлениям: п. 1 «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем... и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем...», п. 2 «Разработка научных основ проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов, систем и их компонентов», п. 3 «Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления».

Структура и объем. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Основная часть работы изложена на 201 странице машинописного текста, иллюстрирована 38 рисунками и 20 таблицами. Библиографический список содержит 88 наименований на 10 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена общая характеристика работы, показана её актуальность, сформулированы цель и задачи исследования, основные положения научной новизны, отражена практическая ценность результатов и её достоверность, описана структура диссертации в целом.

В первой главе рассмотрены особенности схем электроснабжения электротехнических комплексов предприятий нефтедобывающей промышленности. Проанализированы известные направления повышения энергетической эффективности добычи нефти и оценен их вклад в решение

этой задачи. Рассмотрена известная математическая модель погружного асинхронного двигателя и двигателя штанговой скважинной насосной установки, которая адаптирована к задачам определения влияния изменения действующего значения напряжения на его скорость и потребления активной и реактивной мощности. Рассмотрен известный метод определения оптимального напряжения с целью обеспечения минимума потерь электрической энергии в распределительной электрической сети на основе анализа суточных графиков напряжений и токов промышленной подстанции.

Во второй главе рассмотрены напорные характеристики погружных центробежных насосов и аналитические зависимости для расчета момента и мощности на входном валу в зависимости от параметров рабочей точки насоса и особенностей добываемой жидкости. Из анализа семейств напорных характеристик центробежного насоса сделан вывод, что потребляемая мощность погружным асинхронным двигателем (ПЭД) с определенной степенью точности может быть описана зависимостью

$$P_{\text{ПЭД}} = \frac{k_M \omega_{\text{ПЭД}}^3 + M_{0\text{ПЭД}} \omega_{\text{ПЭД}}}{\eta_{\text{ПЭД}}}. \quad (1)$$

где k_M – коэффициент, связывающий изменение момента на валу насоса с изменением скорости; $\omega_{\text{ПЭД}}$ и $\eta_{\text{ПЭД}}$ – скорость вращения и коэффициент полезного действия (КПД) ПЭД; $M_{0\text{ПЭД}}$ – момент, необходимый для проворачивания вала двигателя совместно с насосом на холостом ходу (момент трогания).

В то же время скорость ПЭД зависит от момента на валу и напряжения. В связи с этим найдена аналитическая зависимость для расчета скорости ПЭД для случая, когда в станции управления не оснащена преобразователем частоты

$$\omega_{\text{ПЭД}} = \frac{\sqrt{M_{\text{ном}}^2 + 4k_M (\omega_{0_50} - \omega_{\text{ном}} - k_{\text{дв}}^U \Delta U_{1\text{ПЭД}})} \times \left[M_{\text{ном}} \omega_{0_50} - (\omega_{0_50} - \omega_{\text{ном}} - k_{\text{дв}}^U \Delta U_{1\text{ПЭД}}) M_{0\text{ПЭД}} \right] - M_{\text{ном}}}{2k_M (\omega_{0_50} - \omega_{\text{ном}} - k_{\text{дв}}^U \Delta U_{1\text{ПЭД}})}, \quad (2)$$

где $\omega_{ном}$ и $M_{ном}$ – номинальные значения скорости и момента ПЭД; ω_{0_50} – скорость идеального холостого хода двигателя при частоте питающего напряжения 50 Гц; $\Delta U_{1ПЭД}$ – отклонение фазного напряжения статора от номинального значения; k_{ω}^U – коэффициент, связывающий изменение скорости двигателя с изменением напряжения.

В случае, когда в станции управления погружным насосом установлен преобразователь частоты скорость может быть определена по формуле

$$\omega_{ПЭД} = -\frac{M_{ном}}{2k_M d_1} + \sqrt{\frac{M_{ном}^2}{4k_M^2 d_1^2} + \frac{2\pi f_1 M_{ном}}{k_M d_1 Z_p} - \frac{M_{0ПЭД}}{k_M}}, \quad (3)$$

где $d_1 = \omega_{0_50} - \omega_{ном} - k_{\omega}^U \Delta U_1$; f_1 – частота напряжения на статорных обмотках двигателя.

При этом при расчете потребляемой активной мощности должен использоваться коэффициент $k_{\etaПЭД}$, учитывающий увеличение потерь в погружном электродвигателе за счет действия высших гармоник в выходном напряжении преобразователя частоты.

Получены аналитические зависимости, позволяющие определить условия, при которых применение преобразователя частоты в станции управления погружным центробежным насосом приводит к снижению затрат электрической энергии по сравнению со способом достижения требуемой производительности насоса дросселированием штуцера, установленного на устье скважины.

Приведен пример расчета для гипотетической скважины и показана ожидаемая экономия электрической энергии в случае применения преобразователя частоты до 13 % и более в зависимости от требуемого дебета скважины.

Найдена зависимость потребляемой активной мощности асинхронным двигателем штанговой скважинной установкой с учетом напорной характеристики плунжерного насоса

$$P_{AD} = \frac{k_{M2}\omega_{AD}^2 + M_{0AD}\omega_{AD}}{\eta_{AD}}, \quad (4)$$

где $M_{0AD} = \frac{M_{G1} + M_{G2}}{2}$; M_{G1} – момент, создаваемый силами веса и буферного давления при движении штанг вверх; M_{G2} – момент, создаваемый силами веса при движении штанг вниз; k_{M2} – коэффициент, связывающий дополнительный момент на валу асинхронного двигателя, вызванный силами вязкого и сухого трения, со скоростью вращения.

При этом скорость двигателя ШСНУ рассчитывается по найденной зависимости

$$\omega_{AD} = \frac{M_{ном}\omega_0 - M_0(\omega_0^{50} - \omega_{ном} - k_{\partial y}^U \Delta U_{1AD})}{M_{ном} + k_{M2}(\omega_0^{50} - \omega_{ном} - k_{\partial y}^U \Delta U_{1AD})}, \quad (5)$$

В третьей главе сформулированы возможные критерии оптимизации для поиска оптимального напряжения промышленной подстанции. Это может быть минимум потерь в воздушных и кабельных линиях и трансформаторах $\Delta P_k(U_{ПС})$, минимум потребляемой от промышленной подстанции активной мощности $P_{ПС}(U_{ПС})$, минимум удельных затрат активной мощности на добычу кубометра жидкости $E_{aэ}(U_{ПС})$, минимум потребляемой полной мощности $S_{ПС}(U_{ПС})$ или удельных затрат полной мощности $E_{пэ}(U_{ПС})$. Рассмотрена гипотетическая отходящая линия с тремя электротехническими комплексами добывающих скважин (ЭКДС), каждый из которых содержит ПЭД, приводящий в движение погружной центробежный насос (рисунок 1).

Показано, что аналитического решения поиска оптимального напряжения, отвечающему какому-либо критерию оптимизации не существует. В связи с этим разработан алгоритм расчета оптимального напряжения промышленной подстанции для отходящей линии, содержащей произвольное количество ЭКДС с погружными центробежными насосами, но без преобразователей частоты в станциях управления.

Приведены примеры расчета оптимального напряжения промышленной подстанции для конкретных вариантов комплектации ЭКДС рассматриваемого типа. Показано, что регулирование напряжения промышленной подстанции позволяет снизить потребление активной мощности до 6 %, а полной

мощности – до 18 %, что значительно повышает энергетическую эффективность добычи нефти. Рассмотрена отходящая линия с тремя ЭКДС со штанговыми скважинными насосными установки (рисунок 2).

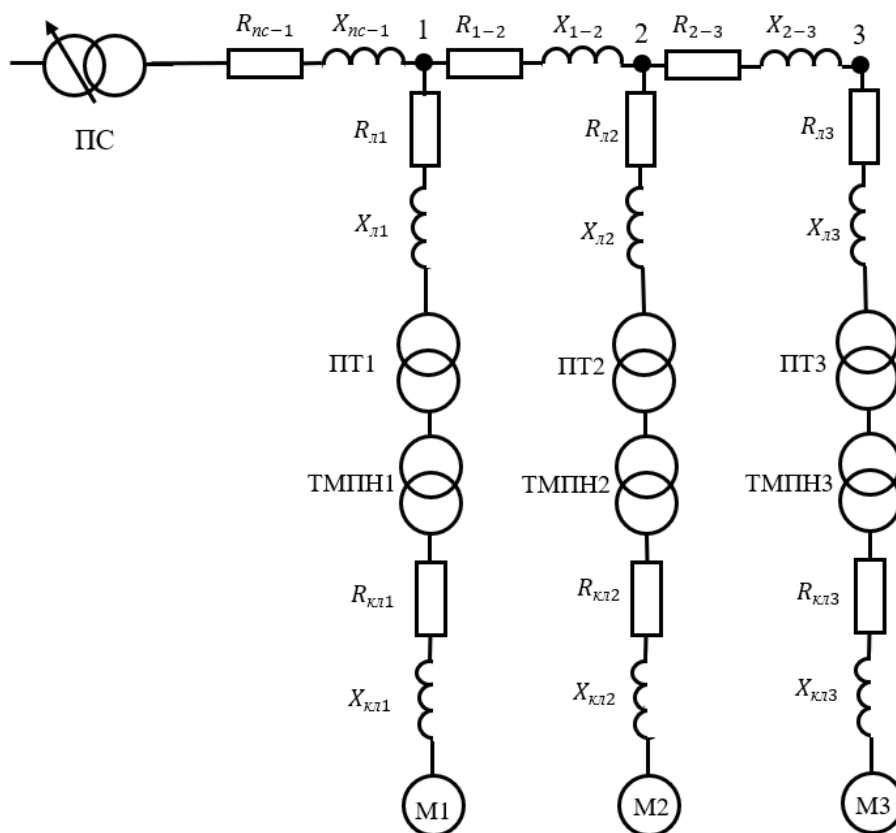


Рисунок 1 – Принципиальная схема гипотетической отходящей линии с тремя ПЭД

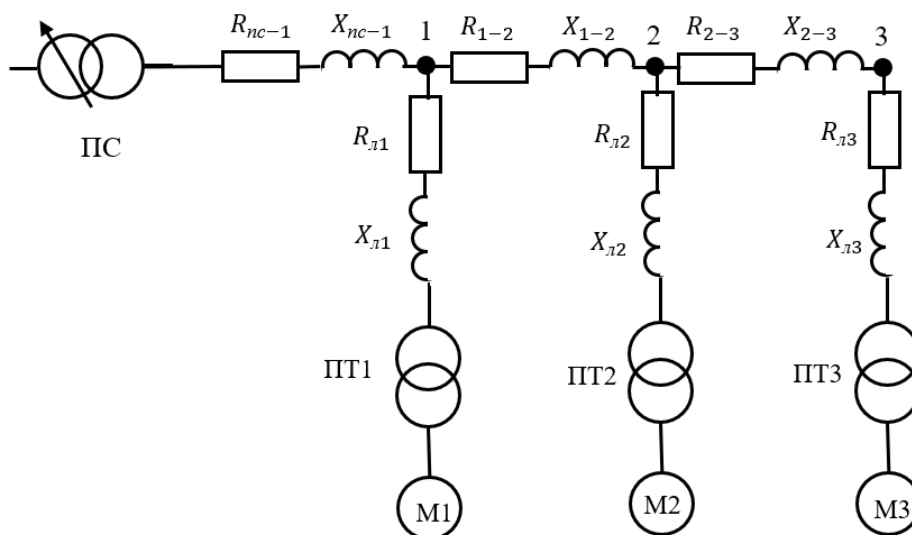
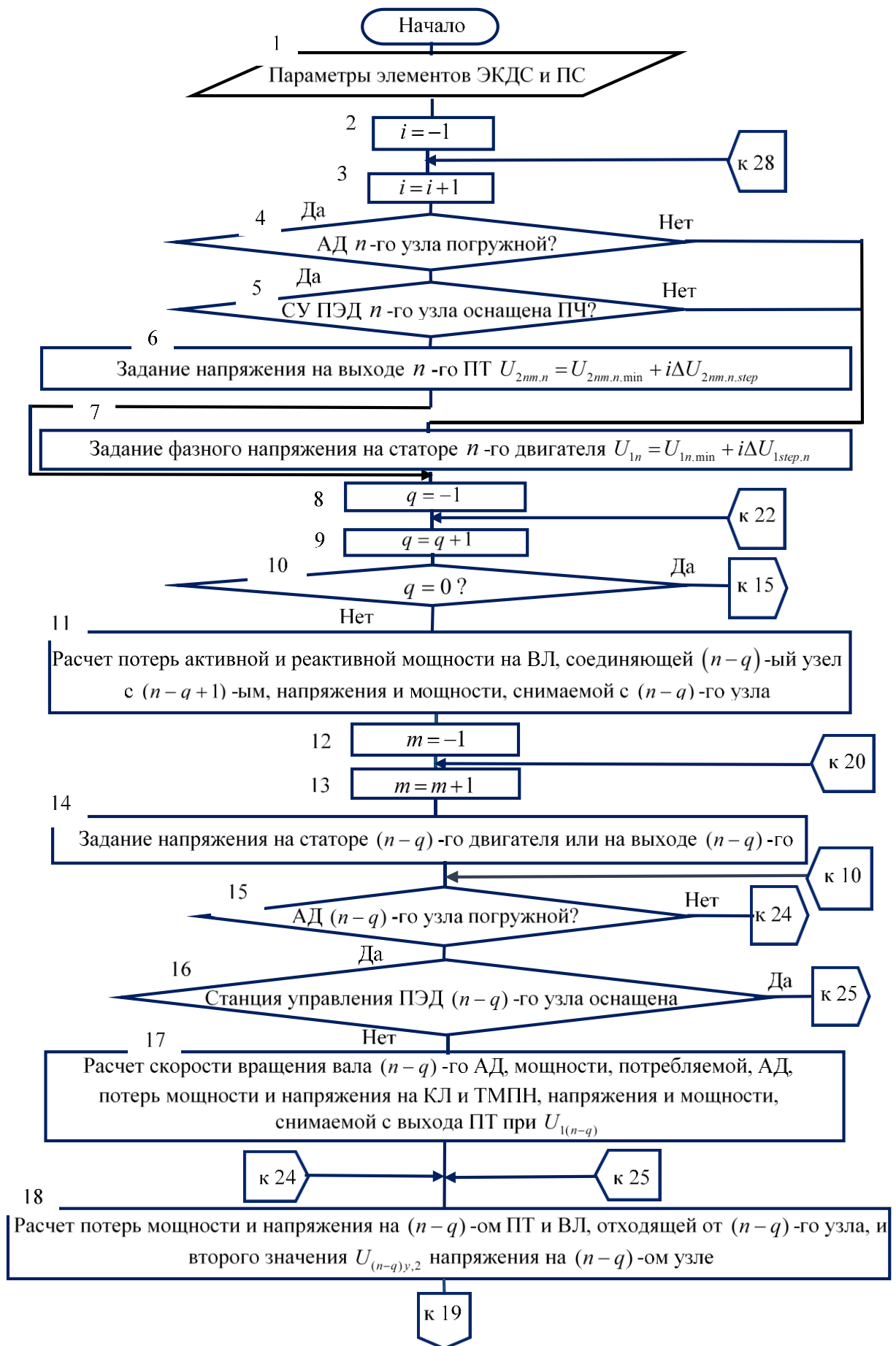


Рисунок 2 – Принципиальная схема гипотетической отходящей линии с тремя ПСНУ и конденсаторными батареями для компенсации реактивной мощности

Разработан алгоритм расчета оптимального напряжения промышленной подстанции для отходящей линии, содержащей произвольное количество ЭКДС с ШСНУ. Приведены примеры расчета оптимального напряжения промышленной подстанции, питающей отходящую линию такого типа. Приведен также пример расчета оптимального напряжения промышленной подстанции, питающей отходящую линию с ЭКДС с погружными центробежными насосами, станции управления которых оснащены преобразователями частоты. Показано, что алгоритм расчета в этом случае имеет свои особенности, связанные с функциональными возможностями преобразователей частоты.

Анализ расчетных данных показал, что оптимальная величина напряжения промышленной подстанции может находиться в широких пределах в зависимости от комплектации электротехнических комплексов добывающих скважин. В связи с этим разработан универсальный алгоритм расчета оптимального напряжения промышленной подстанции, учитывающий возможность любой комплектации ЭКДС с различными типами насосов и позволяющий производить оптимизацию по любому критерию (рисунок 3). Алгоритм содержит несколько циклов: цикл перебора напряжения на самом удаленном двигателе или станции управления; цикл перебора узлов отходящей линии и цикл перебора напряжения на двигателе или станции управления, подключенным к каждому промежуточному узлу.

В четвертой главе показано, что трансформаторы с РПН, используемые на промышленной подстанции имеют свою дискретность регулирования напряжения. Поэтому предложено выбирать такую ступень регулирования, которая дает ближайшее к оптимальному значение напряжения. В связи с этим разработан алгоритм расчета для прогнозирования ожидаемых квазиоптимальных потерь на элементах ЭКДС отходящей линии и потребляемой от промышленной подстанции мощности с учетом дискретности регулирования напряжения.



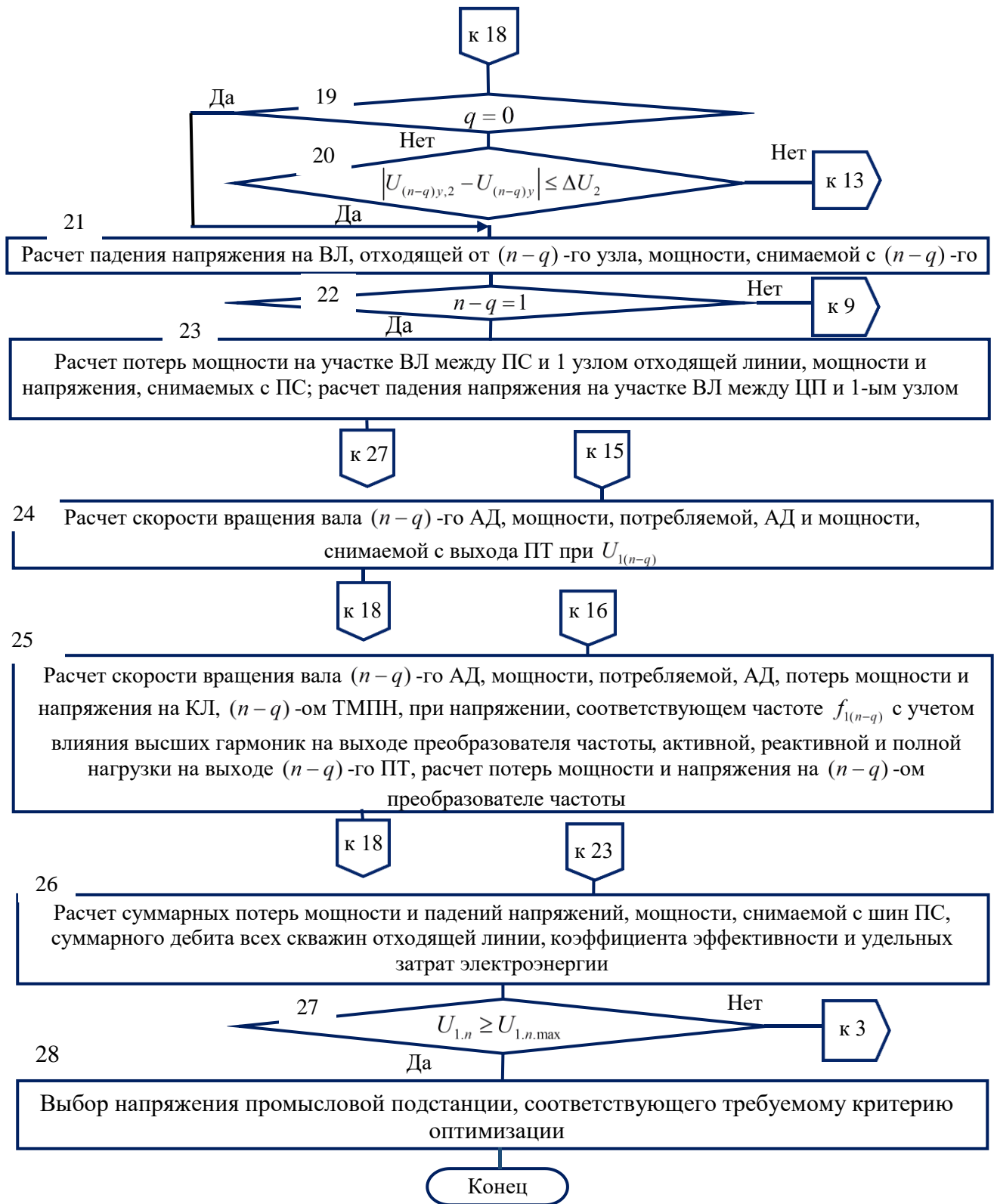


Рисунок 3 – Алгоритм расчета оптимального напряжения промышленной подстанции

Для оценки адекватности теоретических исследований и разработанных алгоритмов расчета рассмотрена реальная отходящая линия нефтяного промысла, содержащая 6 узлов, к которым подключены электротехнические комплексы 11-ти добывающих скважин (рисунок 4).

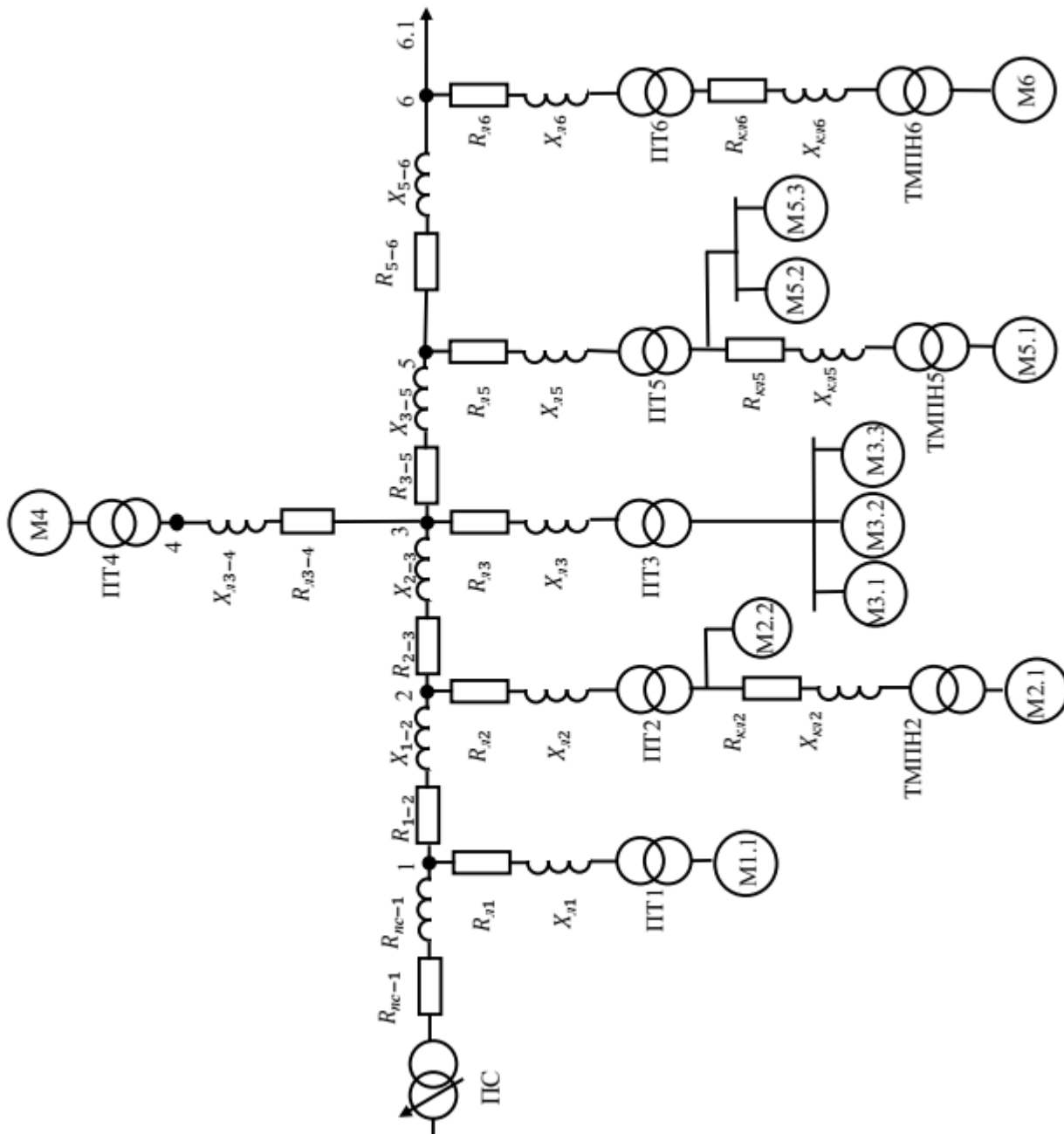


Рисунок 4 – Принципиальная схема реальной отходящей линии нефтяного промысла

Показано, что для расчета оптимального напряжения промысловой подстанции необходимо проанализировать применяемое подземное и наземное оборудование скважин, которые оснащены различными типами погружных

насосов, как центробежных с ПЭД, так и плунжерных со станками-качалками (таблица 1). Кроме того, надо знать технические характеристики понижающих и повышающих трансформаторов, воздушных линий и соединительных кабелей.

Для расчета оптимального значения напряжения промышленной подстанции необходимо определить значения коэффициентов k_M для центробежных насосов и k_{M2} для плунжерных, а также определить величину момента M_0 . Кроме того, необходимо знать параметры схем замещения асинхронных двигателей, как погружных, так и наземных, и коэффициенты $k_{\partial y}^U$.

Таблица 1 – Данные по погружным насосам, станкам-качалкам и двигателям, применяемым на скважинах

№ скважины	Тип насоса или станка-качалки	Тип двигателя	Мощность двигателя, кВт
1	СКДР6-3,0	АИР160М8	11
2.1	ЭЦНА5-125-1450	ЭДТ45-103М1	45
2.2	ПНШ 80-3-40-01	АИР200М8	18,5
3.1	УР-12Т-3000-5500	АИР200L8	22
3.2	УР-12Т-3000-5500	АИР200L8	22
3.3	УР-12Т-3000-5500	АИР200L8	22
4	УР-12Т-3000-5500	АИ250 S75-8	37
5.1	ЭЦНА5-30-1300	ЭДТ16-117М	16
5.2	ПНШ 80-3-40-01	АИР200М8	18,5
5.3	УР-12Т-3000-5500	АИ250 M75-8	45
6	ЭЦНА5-125-1450	ЭДТ45-103М1	45

Проведено компьютерное моделирование в программе Matlab Simulink всех электродвигателей, приводящих в движение погружные насосы рассматриваемой отходящей линии, необходимое для определения коэффициентов, связывающих изменение скорости двигателей с вариацией напряжения на статоре. Приведены расчетные модели погружных электродвигателей и электродвигателей станков-качалок, подключенных к рассматриваемой отходящей линии.

С помощью разработанного алгоритма произведен расчет оптимального напряжения промышленной подстанции и выбрана ступень регулирования трансформатора с РПН, дающая ближайшее большее напряжение. Приведены результаты расчета прогнозируемой потребляемой от промышленной подстанции активной мощности на этой ступени регулирования. Показано, что

обоснованный выбор напряжения для рассматриваемой отходящей линии позволил снизить удельные затраты активной мощности на добычу кубометра жидкости на 3,3 %, а полной мощности – на 25 %. Следовательно, регулирование напряжения промышленной подстанции и обеспечение оптимального напряжения повышает энергетическую эффективность добычи нефти.

Произведен также расчет потребляемой от промышленной подстанции активной мощности при выводе одной из скважин в ремонт. Показано, что расчетное снижение потребляемой активной мощности составляет $\Delta P_{ПС} = 49,6$ кВт. Фактические данные, полученные с промышленной подстанции (рисунок 5), говорят о том, что фактическое снижение потребляемой мощности составило $\Delta P_{ПС.факт} = 48,24$ кВт. Сравнение результатов расчета с фактическими данными показывает, что расхождение не превышает 2,8 %.

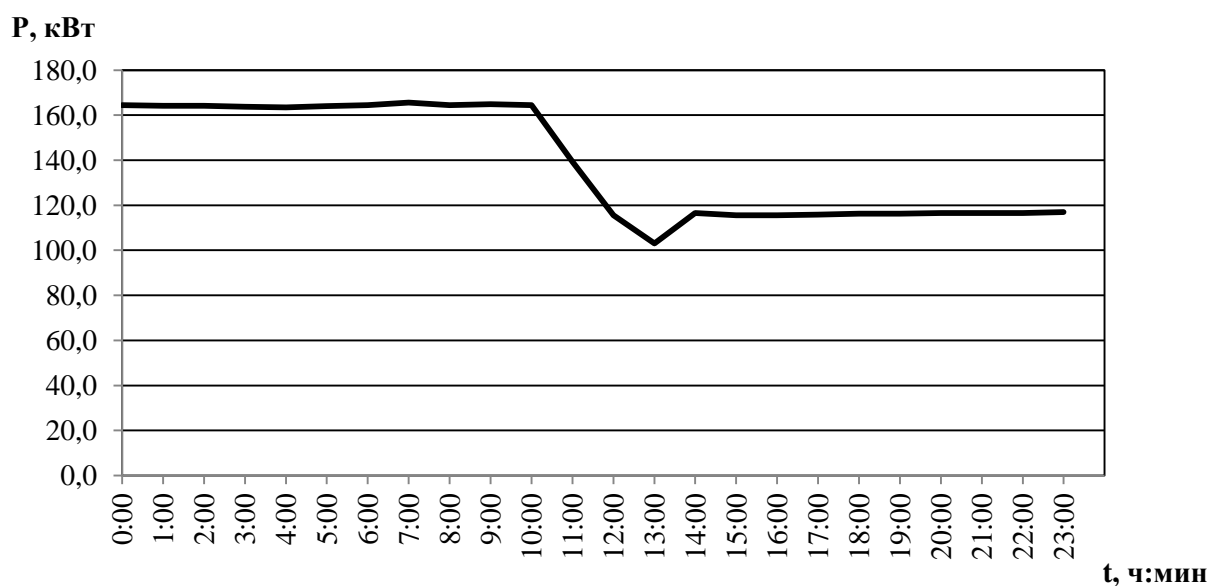


Рисунок 5 – График потребления активной мощности от промышленной подстанции 18.11.2023 г.

Для этой же скважины, оснащенной ПЭД с центробежным насосом, рассчитано потребление электрической энергии станцией управления при подаче на нее номинального напряжения, которое оказалось равно $P_{cy} = 47,7$ кВт. Фактические данные телеметрии со станции показали, что при фазном

напряжении 220 В, потребление активной мощности равно $P_{су.факт} = 46,7$ кВт. Следовательно, расхождение расчетных и экспериментальных данных составляет 2,14 %, что приемлемо для инженерных расчетов.

В итоге разработана универсальная методика расчета оптимального напряжения промышленной подстанции, питающей отходящую линию с электротехническими комплексами добывающих скважин, и ожидаемого потребления электрической энергии с учетом дискретности регулирования напряжения трансформаторами с РПН, которая содержит следующие этапы.

1. Анализ напорных характеристик погружных центробежных насосов, определение параметров рабочей точки насоса и расчет коэффициентов, необходимых для определения скорости вращения погружного двигателя.

2. Анализ параметров скважины, оснащенной плунжерными насосами, кинематических характеристик станков-качалок и станков с цепным приводом и расчет коэффициентов и момента, необходимых для расчета средней скорости асинхронных двигателей, приводящих в движение такого типа насосы.

3. Подготовка данных по техническим характеристикам погружных и наземных асинхронных двигателей, включая параметры Г-образных и Т-образных схем замещения двигателей.

4. Моделирование погружных и наземных асинхронных двигателей при номинальной нагрузке и определение начальных значений проекций потокосцеплений, и статора и ротора на оси системы координат, вращающейся вместе с магнитным полем статора при частоте питающего напряжения 50 Гц.

5. Расчет коэффициентов, связывающих изменение скорости вращения асинхронных двигателей с изменением фазного напряжения статора.

6. Подготовка данных по трансформаторам, преобразователям частоты станций управления погружными насосами, воздушным и кабельным линиям, входящим в состав отходящей линии и электротехнических комплексов добывающих скважин.

7. Расчет оптимальной величины напряжения промышленной подстанции с помощью разработанного алгоритма.

8. Анализ дискретности регулирования напряжения трансформатором с РПН, установленным на промысловой подстанции, и выбор ступени регулирования с ближайшим большим относительно оптимального напряжением.

9. Расчет ожидаемых значений потребляемой от промысловой подстанции мощности, объемов добываемой из скважин жидкости и определение удельных затрат электроэнергии при механизированной добыче нефти с помощью разработанного алгоритма.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных в диссертационной работе исследований, направленных на повышение энергоэффективности электротехнического комплекса добычи нефти регулированием напряжения промысловой подстанции получены следующие основные результаты:

1. Найдены граничные условия, при которых удельные затраты электроэнергии на добычу кубометра жидкости погружным центробежным насосом будут равны как в случае использования преобразователя частоты, так и без него, что позволяет обоснованно подходить к выбору комплектации станции управления.

2. Получены аналитические зависимости для расчета скорости и потребляемой мощности асинхронными двигателями штанговой скважинной насосной установки и погружного центробежного насоса при вариации питающего напряжения, которые учитывают особенности напорных характеристик насосов, кинематики исполнительного механизма и преобразователей частоты, обеспечивающие расхождение результатов расчета с фактическими данными с промысловой подстанции менее 2,2 %.

3. Разработана методика и алгоритм расчета оптимального напряжения промысловой подстанции, которая учитывает влияние особенностей напорных характеристик центробежных, плунжерных насосов и преобразователей частоты на потребление активной и реактивной мощности электротехническими комплексами добывающих скважин и позволяет снизить потребление

активной мощности до 6 %, что значительно повышает энергетическую эффективность добычи нефти.

4. Разработан алгоритм, позволяющий производить расчет ожидаемой суммарной потребляемой от промышленной подстанции мощности электротехническими комплексами добывающих скважин с учетом дискретности регулирования напряжения трансформаторами с РПН, причем расхождение расчетных значений с фактическими данными с промышленной подстанции при их сравнении не превышает 2,8 %.

5. Произведен расчет оптимального напряжения промышленной подстанции для реальной отходящей линии, который показал, что его применение позволяет снизить потребление активной мощности до 5 %, а удельных затрат электроэнергии на добычу кубометра жидкости – на 3,3 %. При этом возможное снижение потребления полной мощности составляет 30 %.

Рекомендации. Результаты проведенного научного исследования рекомендуется использовать при эксплуатации промышленных электрических сетей для повышения надежности и эффективности электроснабжения электротехнических комплексов добывающих скважин.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Дальнейшая разработка темы может быть направлена на совершенствование алгоритма, позволяющего производить расчет ожидаемой суммарной потребляемой от промышленной подстанции мощности электротехническими комплексами добывающих скважин с учетом дискретности регулирования по времени.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Стариков А.В., **Казанцев А.А.**, Косорлуков И.А., Табачникова Т.В. Алгоритм расчета оптимальной величины напряжения промышленной подстанции // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки, 2021. – № 4. – С. 116-131.

2. Стариков А.В., **Казанцев А.А.**, Косорлуков И.А. Расчет оптимальной величины напряжения промышленной подстанции с учетом особенностей

частотных преобразователей станций управления погружными насосами // Вопросы электротехнологии, 2022. – № 3(36). – С. 66-73.

3. Стариков А.В., **Казанцев А.А.**, Косорлуков И.А. Обоснование целесообразности применения частотных преобразователей в станциях управления погружными центробежными насосами // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки, 2022. – Т. 30. – № 4. – С. 115-126.

4. Козловский В.Н., **Казанцев А.А.**, Косорлуков И.А., Стариков А.В. Влияние дискретности регулирования напряжения промышленной подстанции на потребляемую мощность электротехническими комплексами погружных насосов // Известия Тульского государственного университета. Серия: Технические науки, 2023. – № 9. – С. 393-403.

5. Гольдштейн В.Г., **Казанцев А.А.**, Инаходова Л.М., Андреев А.Ю. Анализ современных конструкций силовых трансформаторов в распределительных сетях и системах электроснабжения // Известия высших учебных заведений. Электромеханика, 2016. – № 6. – С. 87-90.

- в других изданиях:

6. Romanov V., **Kazantsev A.**, Batishchev A., Starikov A. Calculation of the Optimum Value of the Voltage for a Field Substation Equipped with an On-Load Tap-Changing Voltage Controller, Taking Into Account the Features of Frequency Converters of Submersible Pump Control Stations // Proceedings - International Ural Conference on Measurements, UralCon, 2023. – pp. 1-6.

7. Inahodova L., **Kazantsev A.**, Yudin A. Research of Electric Modes when Using Innovative Designs of Power Transformers in Power Supply Systems of Oil and Gas Companies // Proceedings - International Ural Conference on Measurements, UralCon, 2023. – pp. 34-38.

8. Стариков А.В., **Казанцев А.А.**, Табачникова Т.В. Обоснование необходимости регулирования напряжения промышленной подстанции // Сборник трудов всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы и инновационные решения в нефтегазовой отрасли», Москва: Издательство «Перо», 2021. – С. 271-278.

9. Хассан М.Д., **Казанцев А.А.**, Стариков А.В. Исследование влияния напряжения промышленной подстанции на энергетическую эффективность механизированной добычи нефти // Труды Международной научно-практической конференции «Ашировские чтения». Самара: Изд. «СамГТУ», 2023. – Т. 2. – С. 235-241.

10. Косорлуков И.А, **Казанцев А.А.**, Хассан М.Д. Анализ влияния величины напряжения промышленной подстанции на изменение энергетической эффективности механизированной добычи нефти // Сборник научных трудов по материалам IV Всероссийской научно-практической конференции «Энергетика будущего – цифровая трансформация». Липецк: Изд. ЛГТУ, 2024. – С. 216-221.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета
24.2.377.06
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
(протокол № 6 от «22» октября 2024 г.)
Заказ № ____ Тираж 100 экз.
Формат 60x84/20. Отпечатано на ризографе.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
Отдел типографии и оперативной полиграфии
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244