

На правах рукописи



АЛ АЛИ МАДЖИД АБДУЛХАМИД АБДУЛХАЙ

**СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УСТАНОВОК
ПОГРУЖНЫХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ НА ЭТАПЕ
ДОБЫЧИ НЕФТИ НА МЕСТОРОЖДЕНИИ РУМАЙЛА (ИРАК)**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования (ФГБОУ ВО) «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ» (КНИТУ-КАИ).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Корнилов Владимир Юрьевич.

Официальные оппоненты: **Цыгулев Николай Иосифович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Интеллектуальные электрические сети», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»;

Ахметшин Роберт Султанович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Набережно-челнинского института (филиала) ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

Ведущая организация: **ГБОУ ВО «Альметьевский государственный нефтяной институт».**

Защита состоится «24» сентября 2019 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.079.06 при ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ» по адресу: 420015, г. Казань, ул. Толстого, 15 (учебное здание №3, ауд. 216).

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью, просим присылать по адресу: 420111, г. Казань, ул. К.Маркса, 10, КНИТУ-КАИ, ученому секретарю диссертационного совета Д212.079.06.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет - КАИ» <http://old.kai.ru/science/disser/index.phtml>

Автореферат разослан « » июля 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного
совета, к.т.н.



Бердников А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Контракты и лицензии в Ираке в сфере нефтяного государственного сектора заключаются в соответствии с государственным стратегическим планом, который содержит все этапы нефтяных операций, начиная с построения геологических карт, разведки месторождения, бурения и нефтедобычи, транспортировки, торговли и инвестирования на основе современных технологий в промышленности.

Стратегия предполагает:

- увеличение финансовых доходов для развития нефтяного сектора и страны (повышение прибыли);
- поиск новых подходов, для инвестирования в технологии и использования попутного газа для обеспечения национальных нужд в чистом топливе и экспорте остатков газа;
- обеспечение ведущего места для Ирака на мировом нефтяном рынке, соответствующего фактическим разведанным запасам нефти и газа;
- привлечение мировых компаний в Ирак с целью освоения их технологического опыта и навыков;
- достижение баланса и стабильности на нефтяном мировом рынке, чтобы это отражалось на устойчивом развитии страны;
- активизацию и стимулирование трудового рынка и обновление рабочих мест, создание новых вакансий в нефтяных и иных отраслях, связанных с добычей нефти, при условии, что нефтяные компании обязаны предоставлять 85% рабочих мест иракцам.

Ирак в прошлом добывал ежедневно 1.9 млн. баррелей нефти с помощью Иракской нефтяной компании, до вступления в силу новых контрактов и нефтяных лицензии (привилегий).

Добыча нефти на скважинах Румайлы достигала 1 млн. баррелей в день.

Государственный контракт № 6.19 а обязывает оплачивать подрядчику все затраты за выполняемые услуги без денежных процентов от добываемой экспортируемой нефти. Такая схема затрат содержит в себе оплату потерь, которые можно представить как потери на эксплуатационные расходы, включая логистику, а также значительные потери электроэнергии на единицу добываемой продукции.

В настоящее время началось выполнение контрактов между:

Нефтяной компанией Басры и Бритиш Петролеум;

Генеральной компанией Ирака по торговле нефтяными продуктами и Компанией Петрочайна (договор и контракт с Китаем действует до 2034г).

Румайла является одним из крупнейших в мире, так называемых, супергигантских нефтяных месторождений, которые содержат более милли-

арда баррелей извлекаемой нефти. По оценкам, около 17 миллиардов баррелей нефти содержится в недрах Румайлы.

Расположение и площадь. Месторождение расположено в 50 км к западу от города Басра (Южный Ирак). В регионе Басра находятся все шесть портов Ирака, включая порт в Умм-Касре.

Румайла занимает площадь 1600 квадратных километров, простирающуюся примерно на 80 км с севера на юг и на 20 км с запада на восток, и состоит из двух основных районов: Южного и Северного.

Проведенный в рамках диссертационного исследования технико-экономический аудит нефтедобывающего комплекса Румайлы показывает, что внедрение новых способов повышения энергоэффективности электротехнической системы установок погружных центробежных насосов на этапе добычи нефти может обеспечить сокращение бюджетных расходов государства Ирак до 12 млн. долларов в год, при сохранении существующего объема добычи 1 млн. баррелей в сутки.

Таким образом, энергосберегающие мероприятия в электротехнической системе установок погружных центробежных насосов за счет повышения эффективности централизованной системы электроснабжения путем коррекции коэффициента мощности и фильтрации гармоник, а также за счет увеличения коэффициента загрузки автономных электрогенераторов (распределенная система электроснабжения), объединённых на кустовую (групповую) сеть электроснабжения экономят значительные финансовые средства и являются актуальным направлением исследования.

Объект исследования. Электротехническая система установок погружных центробежных насосов нефтяной компании Басры на месторождении Румайла.

Предмет исследования. Способы повышения энергоэффективности электротехнических комплексов основного оборудования нефтяных скважин на месторождении Румайла.

Цель диссертационной работы. Снижение удельных затрат электроэнергии на единицу добываемой продукции за счет создания центров генерации электрической энергии на основе автономных дизельных генераторов в распределенной системе электроснабжения и внедрения фильтрокомпенсирующих устройств в централизованной системе электроснабжения комплексов основного оборудования нефтяных скважин на месторождении Румайла.

Научная задача диссертации. Разработка способов по снижению потерь электроэнергии в распределенной системе электроснабжения и коррекции коэффициента мощности и фильтрации гармоник в системе централи-

зованного электроснабжения электротехнической системы установок погружных центробежных насосов на этапе добычи нефти.

Задачи исследования.

1. Исследование технико-экономических характеристик электротехнической системы погружных центробежных насосов на этапе добычи нефти на месторождении Румайла (Ирак, провинция Басра) и обоснование целесообразности разработки энергосберегающих мероприятий в согласованных районах нефтедобычи.

2. Разработка способа повышения энергоэффективности электротехнической системы установок погружных центробежных насосов на этапе добычи нефти на основе использования фильтрокомпенсирующих устройств в централизованной системе электроснабжения.

3. Разработка способа повышения энергоэффективности электротехнической системы погружных центробежных насосов на этапе добычи нефти путем создания центров генерации электрической энергии на основе автономных дизельных генераторов и оптимизированных по протяженности локальных сетей электроснабжения.

4. Разработка рекомендаций в Инженерную концепцию Румайла на предварительном этапе базового проекта модернизации (Pre-FEED).

Методы исследования. Представленные в работе результаты получены с использованием методов теории электрических и магнитных цепей, теории электропривода, теории автоматического управления, методов оптимизации систем электроснабжения, аналитических и численных методов прикладной математики, методов физического, математического и компьютерного моделирования, методов теории систем и системного анализа,

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается корректным применением апробированного математического аппарата и расчетных схем из области электротехники; обработкой многократно измеренных параметров энергопотребления электротехнических комплексов основного оборудования добывающих скважин на объектах нефтяной компании Басра, а также отчетными финансовыми документами об оплате электроэнергии, затраченной на обеспечение функционирования комплекса нефтедобычи на месторождении Румайла; высокой сходимостью результатов, полученных в диссертации с результатами теоретических и экспериментальных исследований других авторов.

Научная новизна.

1. Разработана методика снижения энергозатрат за счет совместной коррекции коэффициента мощности и фильтрации гармоник на стадии создания и эксплуатации электротехнического нефтедобывающего комплекса

на месторождении Румайла, получающего питание от централизованной системы электроснабжения государства Ирак.

2. Разработана методика повышения энергоэффективности электротехнической системы установок погружных центробежных насосов на этапе добычи нефти путем создания центров генерации электрической энергии на основе автономных дизельных генераторов и оптимизированных по протяженности локальных сетей электроснабжения.

Практическая ценность диссертации определяется разработанными рекомендациями по снижению удельных затрат на единицу добываемой продукции за счет внедрения фильтрокомпенсирующих установок при централизованном электроснабжении электротехнической системы УЭЦН и создания центров генерации электрической энергии на основе автономных дизельных генераторов и оптимизированных по протяженности локальных сетей электроснабжения. Предложенные рекомендации включены в Инженерную концепцию Румайла на предварительном этапе базового проекта модернизации (Pre-FEED).

Реализация результатов исследования. Научные и практические результаты диссертационной работы внедрены и использованы при создании центров генерации электрической энергии на основе автономных дизельных генераторов и оптимизированных по протяженности локальных сетей электроснабжения и при проведении энергосберегающих мероприятий с использованием фильтрокомпенсирующих установок при централизованном электроснабжении электротехнической системы установок электроцентробежных установок в нефтяной компании Басра при реализации проекта модернизации системы электроснабжения центробежных погружных насосов в районах Janubia и Ratqa месторождения Румайла.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Способ совместной коррекции коэффициента мощности и фильтрации гармоник на стадии создания и эксплуатации электротехнического комплекса добывающей скважины, получающего питание от централизованной системы электроснабжения.

2. Способ повышения энергоэффективности электротехнической системы погружных центробежных насосов на этапе добычи нефти путем создания центров генерации электрической энергии на основе автономных дизельных генераторов и оптимизированных по протяженности локальных сетей электроснабжения.

3. Результаты расчетно-экспериментальной проверки эффективности предложенных энергосберегающих мероприятий на предварительном этапе разработки Инженерной концепции Румайла (Ирак, Басра, Румайла).

Апробация работы. Основные положения проведенных исследований и результаты работы докладывались на аспирантско-магистерском семинаре в Казанском государственном энергетическом университете (декабрь 2017 г.); на 3-ей Поволжской научно-практической конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве».- Казань КГЭУ, 7-9 декабря 2017 г. (пленарный доклад); на 4-ой Национальной научно-практической конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве».- Казань КГЭУ, 6-7 декабря 2018 г. (пленарный доклад).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 3-х печатных работах, в том числе: 2 статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК, 1 статья в сборнике Thi Qar University (Ирак, Ти Кар).

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из трех глав, заключения, списка использованной литературы из 87 наименований. Основная часть диссертации изложена на 130 страницах машинописного текста, содержит 52 рисунка и 12 таблиц.

Личный вклад. Автор принимал непосредственное участие в постановке и реализации задач исследования. Провел исследование технико-экономических характеристик электротехнической системы установок погружных центробежных насосов на этапе добычи нефти на месторождении Румайла (Ирак, провинция Басра) и выполнил обоснование целесообразности разработки энергосберегающих мероприятий в согласованных районах нефтедобычи. Разработал способ и методику повышения энергоэффективности электротехнической системы установок погружных центробежных насосов на этапе добычи нефти на основе использования централизованной, групповых и индивидуальных установок компенсации реактивной мощности и фильтрации гармоник в стационарной системе электроснабжения, а также разработал способ и методику повышения энергоэффективности электротехнической системы установок погружных центробежных насосов на этапе добычи нефти путем создания центров генерации электрической энергии на основе автономных дизельных генераторов и оптимизированных по протяженности локальных сетей электроснабжения и разработал и представил предложения для Инженерной концепции Румайла на этапе предварительного создания базового проекта модернизации (Pre-FEED).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, объект и предмет исследования, сформулированы цель и научные задачи работы, раскрываются методы исследования, научная новизна и практическая значимость диссертации, обосновывается их достоверность, приводятся сведения о реализации и внедрении результатов работы, их апробации и опубликовании, а также основные положения, выносимые на защиту, дана информация о структуре и объеме диссертации.

В первой главе диссертации рассмотрены проблемы повышения энергоэффективности системы электроснабжения нефтедобывающего комплекса месторождения Румайла (Ирак). Подробно описана структура нефтегазодобывающего комплекса Румайлы. Рассмотрены технологии добычи нефти и подготовка к переработке.

Проведен технико-экономический аудит централизованной системы электроснабжения, в результате которого выявлен низкий (0,6-0,65) коэффициент мощности. Проведен технико-экономический аудит распределенной системы электроснабжения, который выявил ряд проблем: загрузка генераторов не выше 50% (рис. 1); суммарная установленная мощность дизель-генераторов (125000 кВА) содержит избыточную мощность (98000 кВА), поскольку требуемая мощность составляет 27000 кВА (рис. 2); имеют место непроизводительные затраты на электроэнергию, горюче-смазочные материалы, обслуживающий персонал, логистику и т.п.

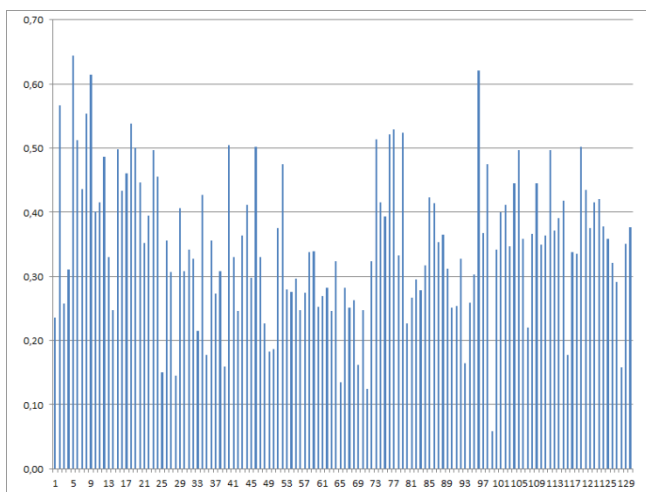


Рис. 1. Коэффициент загрузки дизель-генераторов



Рис. 2. Проектная, фактическая и избыточная полные мощности

В результате анализа структуры нефтегазодобывающего комплекса Румайла был выявлен ряд противоречий, для устранения которых предлагается разработка комплекса энергосберегающих мероприятий по модернизации централизованной и распределенной систем электроснабжения нефтедобывающего комплекса Румайла.

Во второй главе диссертации разработан способ повышения энергоэффективности электротехнической системы погружных центробежных насосов на этапе добычи нефти на основе использования централизованной, групповых и индивидуальных установок компенсации реактивной мощности и фильтрации гармоник в стационарной системе электроснабжения.

Изучены вопросы компенсации реактивной мощности в централизованной и распределенной системах электроснабжения нефтегазодобывающего комплекса Румайлы и современные технологии повышения качества электроэнергии. Установлено, что на 22 подстанциях средневзвешенный коэффициент мощности равен 0.6, установки компенсации на них отсутствуют, следовательно низкое значение коэффициента мощности увеличивают потери мощности в линии между источником питания и точкой, в которой осуществляется компенсация реактивной мощности.

Снижение потерь Δp после коррекции коэффициента мощности выражается формулой:

$$\Delta p = p_1 \left(1 - \left(\frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi_2} \right)^2 \right), \quad (1)$$

где: p_1 - потери до коррекции коэффициента мощности; $\cos \varphi_1$ – коэффициент мощности до коррекции; $\cos \varphi_2$ - коэффициент мощности после коррекции.

Потери линейного напряжения можно рассчитать следующим образом:

$$\delta U = \frac{P}{U_n} (R + Xtg\varphi), \quad (2)$$

где: R и X - активное и реактивное сопротивление линии; P - передаваемая активная мощность; U_n – номинальное напряжение питания.

Выражение (2) показывает, что чем меньше угол φ , то есть угол сдвига фаз между напряжением и током, тем меньше потери напряжения δU .

Исходя из проведенного анализа влияния коэффициента мощности на потери в линии и в трансформаторах, в диссертационной работе на основе проведенного сбора информации по потреблённой полной и активной энергии были проведены расчеты ожидаемого потребления полной энергии за месяц после коррекции средневзвешенного коэффициента мощности с уровня 0,6 до уровня 0,9. Полученные результаты приведены в таблице 1. Анализ ожидаемого потребления полной электрической энергии показывает, что значение полной потребляемой мощности обследованных подстанций Северной и Южной Румайлы сокращается более чем на 30%, что позволяет практически свести к нулю оплаты по штрафам, предусмотренным при значениях коэффициента мощности менее 0,9.

Предлагаемый в диссертации способ повышения энергоэффективности электротехнической системы установок погружных центробежных насосов на этапе добычи нефти на основе использования фильтрокомпенсирующих устройств в централизованной системе электроснабжения базируется на разработанной автором методике совместной коррекции коэффициента мощности и фильтрации гармоник. Предлагаемая методика отвечает решаемой в диссертации задаче повышения энергоэффективности систем электроснабжения электротехнического комплекса нефтедобывающего предприятия, использующего технологию ESP. Методика основана на рассмотрении явлений компенсации реактивной мощности при помощи конденсаторных батарей с одновременной защитой их от резонансных токов. Но, как показывает анализ, последовательное включение реактора и конденсатора при совпадении резонансной частоты с частотой подавляемой гармоники позволяет устранить данную гармонику без какого либо влияния на всю сеть. Следовательно, таким путем может быть уменьшена неактивная

составляющая полной мощности, что обеспечивает повышение коэффициента мощности сети.

Таблица 1

Район Румайлы	Наименование подстанции с узлами учета электроэнергии	Потребители, получающие питание от подстанции	Потребление активной электроэнергии за месяц, кВт*ч	Потребление полной электроэнергии за месяц, кВА*ч	Ожидаемое потребление полной электроэнергии за месяц после компенсации (cosφ = 0.9), кВА*ч
Северная Румайла	CPS1 (T1)	CPS1	1782000	2921000	1980000
	CPS1 (T2)	CPS1	2126000	3429000	2362222
	CPS2 (T1)	CPS2, CS5	18000	29000	20000
	CPS2 (T2)	CPS2, CS5	4725000	7875000	5250000
	CPS3 (T1)	CPS3,DS5	3079000	5048000	3421111
	CPS3 (T2)	CPS3,DS5	19000	31000	21111,11
	CPS4	CPS4	6828000	10668000	7586667
	CPS5 (T1)	CPS5, CS2,	868000	1335000	964444,4
	CPS5 (T2)	CPS5, CS2,	5137000	8026000	5707778
	CPS9	CPS9	28000	44000	31111,11
	CS4	CS4, DS4, NIDS	1431000	2271000	1590000
	DS2 (T1)	DS2, SIDS	298000	473000	331111,1
	DS2 (T2)	DS2, SIDS	4000	6000	4444,444
	Old Rum (T1)	DS1,DS3	1630000	2587000	1811111
Old Rum (T2)	DS1,DS3	1038000	1622000	1153333	
Южная Румайла	Janubia	Janubia CS, Janubia DS, Ratga DS	673200	1085800	748000
	Markzia	Markzia CS, Markzia DS	1302400	2019200	1447111
	Shamia	Shamia CS, Shamia DS	360800	572700	400888,9
	M. Shamia	M. Shamia DS	66000	105000	73333,33
	Qurinat (T1)	Qurinat CS, Qurinat DS,	245000	376000	272222,2
	Qurinat (T2)	Qurinat CS, Qurinat DS,	1560000	2399000	1733333
	M. Qurinat	M. Qurinat DS	2100	3300	2333,333
ИТОГО			33220500	52926000	36911667

Основные положения методики:

1. Оценить питающую сеть по величине нелинейных искажений THD_i и THD_u и в случае превышения уровней 10% и 5%, соответственно, принять решение о гармоническом анализе кривых токов и напряжений:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}{I_1}, \quad (3)$$

$$THD_u = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} U_k^2}}{U_1}, \quad (4)$$

где: THD_i – коэффициент искажения синусоидальности тока; THD_u – коэффициент искажения синусоидальности напряжения; I_k , U_k – соответственно, действующие значения тока и напряжения отдельных гармоник.

2. Гармонический анализ кривых токов и напряжений может быть выполнен при помощи различных программ обработки массивов измеренных мгновенных значений токов и напряжений (например, LabView).

3. Выделить гармоники с существенной амплитудой и рассчитать реактивные сопротивления последовательных контуров для частот подавляемых гармоник, добываясь последовательного резонанса. Резонанс происходит на определенной частоте f_r , когда индуктивное X_L и емкостное X_C сопротивления равны:

$$X_L = X_C, \quad (5)$$

где: $X_L = \omega_r \cdot L$; $X_C = 1 / \omega_r \cdot C$; $\omega_r = 2 \cdot \pi \cdot f_r$ или $f_r = f_1 \cdot (X_{C1} / X_{L1})^{0.5}$.

f_1 , X_{C1} , X_{L1} – частота основной гармоники, емкостное и индуктивное сопротивления сети на основной частоте.

4. Пересчитать коэффициенты нелинейных искажений после подавлении выбранных гармоник и по достижении допустимых значений коэффициентов перейти к коррекции коэффициента мощности ($\cos \varphi$) на основной частоте, рассчитав необходимую реактивную мощность Q_c :

$$Q_c = (tg \varphi_1 - tg \varphi_2) P, \quad (6)$$

где: φ_1 – угол сдвига фаз до коррекции коэффициента мощности; φ_2 – угол сдвига фаз который требуется получить в результате коррекции коэффициента мощности; P – установленная активная мощность.

Эту мощность должны обеспечить конденсаторы. Для схемы соединения конденсаторной батареи «треугольник» емкость батареи:

$$C_A = Q_{cA} / 3 \cdot \omega \cdot U^2, \quad (7)$$

где: ω – основная частоты; U – линейное напряжение сети.

5. На основании справочных данных по конденсаторным батареям и реакторам осуществить выбор стандартных изделий, обеспечивающих по-

давление гармоник с существенными амплитудами и повышение коэффициента мощности до уровня $\cos \varphi \geq 0,9$.

Для повышения показателей качества электроэнергии в централизованной системе электроснабжения объектов нефтедобывающего комплекса Румайла был предложен вариант размещения фильтрокомпенсирующих устройств для района Ратка (рис. 3).

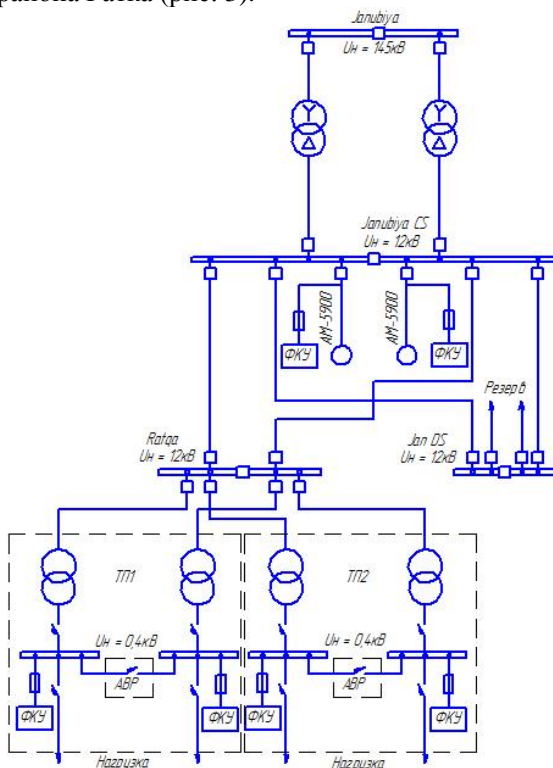


Рис. 3. Схема подключения фильтрокомпенсирующих устройств района Ратка

В условиях длительного искажения синусоидальности формы тока и напряжения для анализа требуется вести более общие определения мощностей.

Когда в цепи кроме основной гармонической составляющей присутствуют другие гармоники, полная мощность в условиях длительного искажения синусоидальности формы тока и напряжения отличается от полной мощности основной гармоники, её можно представить в виде:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2, \quad (8)$$

где D – мощность искажений, которая учитывает искажения формы напряжения и тока.

$$A = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad (9)$$

где A - полная мощность основной гармоники.

Сумма квадратов реактивной мощности Q и мощности искажений D даёт квадрат неактивной мощности N

$$N^2 = Q^2 + D^2. \quad (10)$$

Термин «неактивная мощность» получил такое название, поскольку выражается разностью между квадратами полной мощности S и активной мощности P :

$$N^2 = S^2 - P^2. \quad (11)$$

Для синусоидальной трехфазной системы токов и напряжений коэффициент мощности совпадает по величине с $\cos \varphi$, который равен:

$$\cos \varphi = \frac{P}{A}. \quad (12)$$

При наличии мощности искажений коэффициент мощности равен:

$$\cos \zeta = \frac{P}{S}. \quad (13)$$

Между коэффициентом мощности $\cos \zeta$ и коэффициентом мощности $\cos \varphi$ основной гармоники имеет место следующее соотношение:

$$\cos \zeta = \cos \varphi \cdot \cos \psi \quad (14)$$

где коэффициент искажений $\cos \psi$ учитывает мощность искажений D и по определению равен:

$$\cos \psi = \frac{A}{S}. \quad (15)$$

Таким образом, разработанная методика совместной коррекции коэффициента мощности включает в себя два основных этапа.

Первый этап: выбор фильтров высших гармонических составляющих для компенсации мощности искажений, что в свою очередь приводит к снижению неактивной мощности и увеличению коэффициента мощности.

Второй этап: выбор устройств компенсации реактивной мощности на частоте основной гармоники, что обеспечивает снижение полной мощности и способствует еще большему увеличению коэффициента мощности.

Для подтверждения работоспособности предложенной методики было проведено моделирование в программах ETAP, MTE, Mius кольцевой системы электроснабжения с типовыми центробежными насосами ESP (Electric Submersible Pump) при питании от двух независимых источников (групп дизель-генераторов) для нормального и аварийного режимов работы, по результатам которых выбраны фильтрокомпенсирующие устройства, обеспечивающие заданный уровень нелинейных гармонических искажений. Также в программе ETAP проведено моделирование системы электроснабжения

насосов ESP для расчета нагрузок, токов короткого замыкания и падений напряжений в различных режимах работы и сценариях. Сценарий А - нормальная рабочая конфигурация системы электроснабжения, при которой она разделяется на два радиальных канала с допустимым падением напряжения 5% на наиболее удаленных насосах ESP. Сценарий В - ненормальная конфигурация системы электроснабжения, при которой электропитание всех насосов ESP подается с одного конца кольцевой системы электроснабжения, путем имитации ошибки на крайнем насосе ESP.

В таблице 2 приведено падение напряжения на понижающих трансформаторах, расположенных на наиболее близкой и наиболее отдаленной нефтяных скважинах. Для сценария А допустимое падение напряжения – 5%, для сценария В -15% на наиболее удаленном насосе ESP

Таблица 2. Результаты расчета падений напряжений

Описание	Сценарий А		Сценарий В	
	Оборудование	А	Оборудование	А
Допустимое напряжение (%)	Скважина R023	102.6 %	Скважина R023	102.2 %
	Скважина R551	99.8 %	Скважина R504	91.48 %

В программе МТЕ проведено моделирование гармонических составляющих в распределенной электрической системе, питающей насосы ESP с индивидуальной фильтрокомпенсацией (табл. 3-5).

Таблица 3. Результаты гармонических исследований с ФКУ типа МТЕ

	Нагрузка 50 %			Нагрузка 100 %		
	Без ФКУ	с ФКУ	Предел по ПЕЕ519 2014	Без ФКУ	с ФКУ	Предел по ПЕЕ519 2014
Коэффициент искажения по напряжению, %	5.06%	0.86 %	5 %	8.11 %	1.41 %	5 %
Коэффициент искажения по току, %	42.22 %	4.03 %	12 %	34.15 %	4.08 %	8 %

Таблица 4. Коэффициенты искажения по току и напряжению при нагрузке 50%

Значение	Без ФКУ	с ФКУ
Коэффициент искажения по току на вторичной обмотке трансформатора, %	42,22	4,03
Коэффициент искажения по току на первичной обмотке трансформатора, %	40,53	3,87
Коэффициент искажения по напряжению, %	5,06	0,86

Таблица 5. Коэффициенты искажения на нагрузке

Значение	без ФКУ	с ФКУ
Коэффициент искажения по току на входе ФКУ, %	42.22%	4.03%
Среднеквадратичное значение тока гармоник, А	114.91	10.96
Среднеквадратичный ток нагрузки, А	295.41	272.37
Коэффициент искажения по току на нагрузке	2.33	0.22
Коэффициент мощности	0.92	1.00

В результате моделирования гармонических составляющих распределенной системы электроснабжения с фильтрокомпенсирующими устройствами было установлено, что необходимо выполнить подавление гармоник с существенными амплитудами. Моделирование подтвердило, что при применении фильтрокомпенсирующих устройств снижается влияние гармоник до уровней, установленных международным стандартом IEEE 519 2014.

В программе Mirus проведено моделирование гармонических составляющих в распределенной электрической системе, питающей насосы ESP с групповой фильтрокомпенсацией (табл. 6, рис. 4-5).

Таблица 6. Результаты гармонических исследований с ФКУ типа Mirus

	Нагрузка 40 %			Нагрузка 100 %		
	Без ФКУ	с ФКУ	Предел по IEEE519 2014	Без ФКУ	с ФКУ	Предел по IEEE519 2014
Коэффициент искажения по напряжению, %	4.7%	1.6 %	5 %	9.7 %	2.6 %	5 %
Коэффициент искажения по току, %	44.3 %	11.2 %	12 %	38.3 %	6.9 %	8 %

Полученные результаты позволяют включить в предложение по модернизации системы электроснабжения с типовыми насосами ESP использование разработанной в диссертации методики совместной коррекции коэффициента мощности и фильтрации гармоник при помощи фильтрокомпенсирующих устройств.

На основе анализа теории и практики применения фильтрокомпенсирующих устройств установлено, что: а) наилучший результат подавления высших гармонических составляющих дает применение активных фильтрокомпенсирующих устройств, но стоимость подобных устройств наиболее высокая; б) широкое распространение получили пассивные фильтрокомпенсирующие устройства, которые выпускаются серийно ведущими электротехническими компаниями, они доступны по цене, но обладают существенным ограничением на диапазон подавляемых гармоник (в основном 3-я, 5-я, 7-я); в) гибридные фильтрокомпенсирующие устройства имеют достоинства

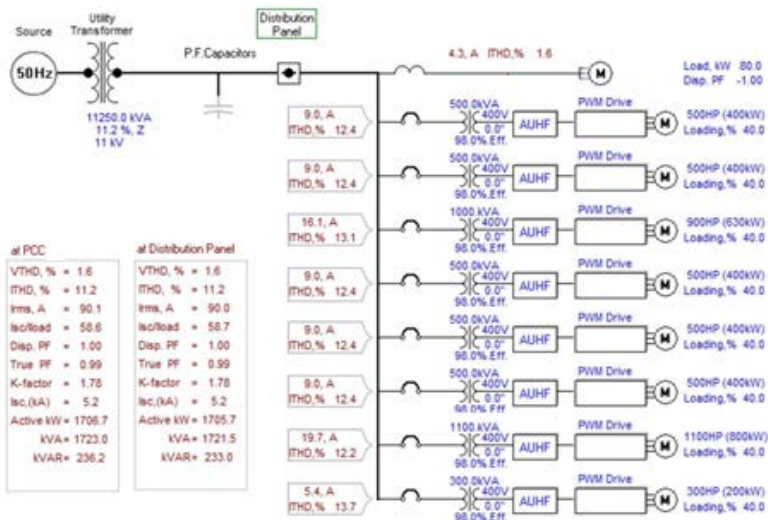


Рис. 4. Моделирование гармоник с нагрузкой 40% с ФКУ

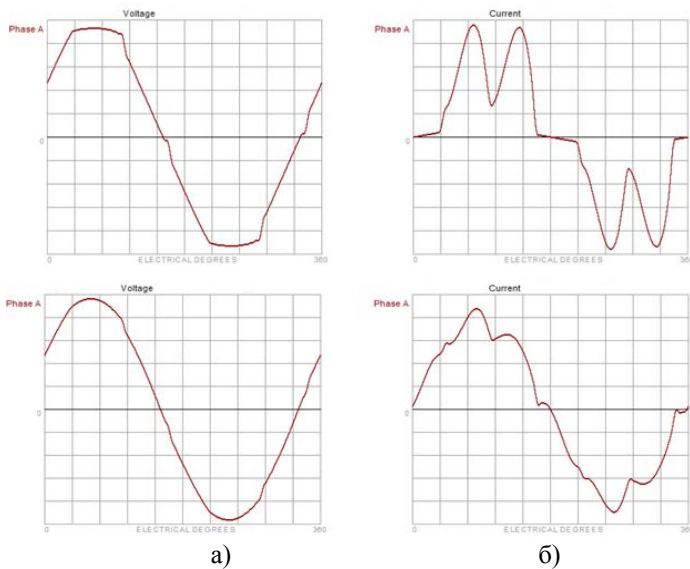


Рис. 5. Гармоническое исследование при 40% нагрузке без ФКУ и с ФКУ:
а) – напряжение сети; б) – ток в линии.

как активных, так и пассивных, а именно более низкая стоимость по сравнению с активными фильтрами из-за снижения размеров активной части.

Анализ существующих подходов к компенсации реактивной мощности и фильтрации гармоник показывает, что наиболее целесообразным является применение фильтров высших гармоник в сочетании с устройствами компенсации на базе конденсаторных батарей, что позволяет добиваться заданных значений коэффициента мощности и снижения суммарных искажений, вносимых высшими гармоническими составляющими токов и напряжений.

В третьей главе диссертации предложено повышение энергоэффективности электротехнической системы погружных центробежных насосов путем создания центров генерации электрической энергии на основе автономных дизельных генераторов и оптимизированных по протяженности локальных сетей электроснабжения. Рассмотрены технико-экономические преимущества создания центров генерации электрической энергии на основе автономных дизельных генераторов. В результате высвобождаются 124 дизель-генератора из 184, работающих на скважинах по автономной схеме электроснабжения. Должны быть выделены шесть зон во всех районах Румайлы, расположенные вблизи отделений АЗС и электрических воздушных линий электропередач (напряжение 11 кВ, 6,6 кВ). Каждая зона состоит из 10 дизель-генераторов единичной мощностью 550 кВА.

Для синхронизации и контроля нагрузки используем систему синхронизации и контроля нагрузки MSLC-2 и цифровой синхронизатор для управления нагрузкой DSLC-2. На рисунке 6 показана схема синхронизации и контроля нагрузки двух групп генераторов. Каждая группа состоит из 5 дизель-электрических генераторов. Группы генераторов установлены параллельно друг другу в одном месте, чтобы быть одним источником питания, а затем это напряжение будет повышаться через трансформаторы напряжения до среднего напряжения (11 кВ), которое должно передаваться по воздушной линии электропередач до зон в соответствии с количеством скважин.

На основе изучения известных решений задачи Штейнера на евклидовой плоскости разработан модифицированный алгоритм прокладки линий электроснабжения, оптимизированных по длине, с привязкой центра генерации на ближайшем к центру электрических нагрузок ребре оптимального дерева Штейнера.

Проблема Штейнера известна как формирование дерева с абсолютно минимальной суммарной длиной. Дано множество узлов $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, расположенных на одной плоскости: требуется найти дерево $T = (X, U)$ с

множеством вершин X и множеством ребер U , для которого $P \subset X$ и суммарная длина ребер U минимальна.

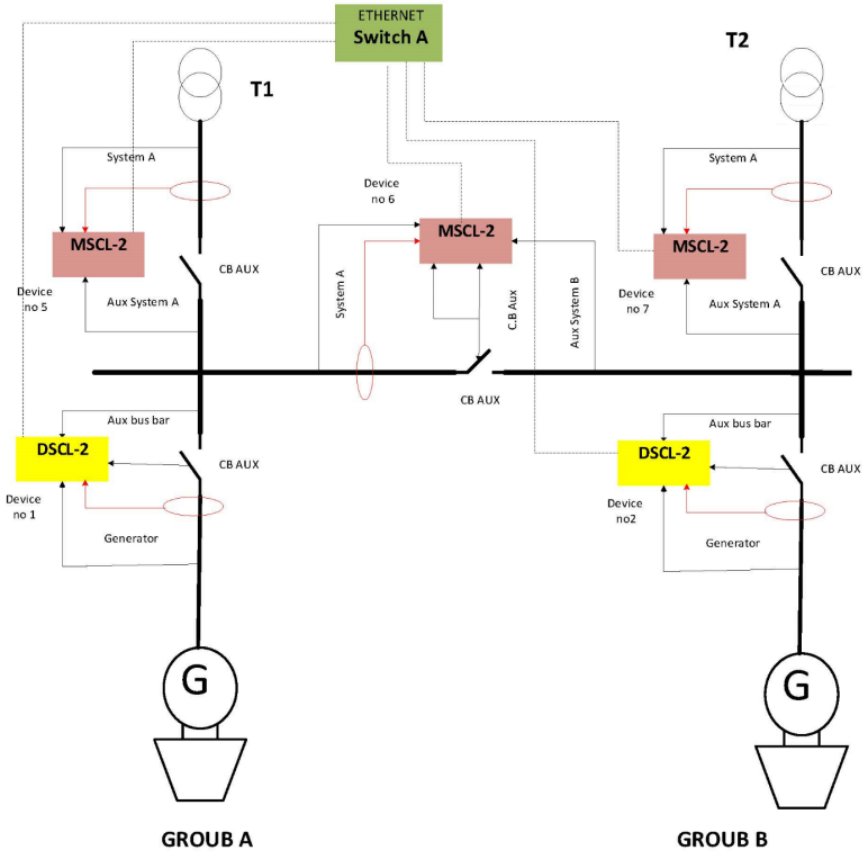


Рис.6. Синхронизация генераторов

Существенным отличием от минимального связывающего дерева является возможность введения неограниченного числа дополнительных узлов. Использование дерева Штейнера позволяет существенно улучшить характеристики проводных соединений, в частности, уменьшить затраты на систему электроснабжения.

Для разработки алгоритма использованы следующие ограничения и вспомогательные переменные:

g_{ij} - вес соединения между заданными выводами (точками, вершинами) i и j , в котором учтены особенности, заключающиеся в наличии у электрического соединения различных сечений, мест прокладки и т.д.

$$g_{ij} = \mu_0 \cdot g_s \cdot l_{ij} \quad (16)$$

где μ_0 - особенности соединения (i, j) , являющийся исходными данными; g_s - погонная масса эквивалентного провода, $к\Omega/м$; l_{ij} - длина электрического соединения, которая находится по формуле для ортогональной метрики:

$$L_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}. \quad (17)$$

Алгоритм построения дерева включает следующие операции.

1. Пронумеровать по часовой стрелке, по спирали точки (выводы электрической цепи) множества $P = \{p_i\}, i = 1, 2, \dots, n$.

2. Определить вес соединений между всеми заданными точками множества $P = \{p_i\}, i = 1, 2, \dots, n$ по формуле (16).

3. Составить матрицу весов соединений $G = |g_{ij}|_{ij}$.

4. Определить минимальный элемент матрицы $G = |g_{ij}|_{ij}$. При одинаковом значении минимальных весов соединений выбирается элемент с наименьшим значением номера вывода (точки). Каждому элементу матрицы $G = |g_{ij}|_{ij}$ соответствует две точки.

5. Построить фрагмент дерева, соединяющий две точки p_i и p_j минимального элемента матрицы G , для которого $g_{ij} = \min$.

6. Всем точкам ортогональной сетки, через которые прошел фрагмент дерева, присвоить наименьший из номеров концевых точек фрагмента.

7. Операции 2 - 6 выполнять для остальных точек до тех пор, пока не будут построены фрагменты для всех точек $p_i, i = 1, 2, \dots, n$ и пока все $p_i, i = 1, 2, \dots, n$ не получают номер 1.

В конце решения алгоритма получаем одно единственное дерево, связывающее все точки множества $P = \{p_i\}, i = 1, 2, \dots, n$ и имеющее наименьший вес соединений.

На рис. 7 представлен пример разводки электрической цепи с центром генерации электрической энергии.

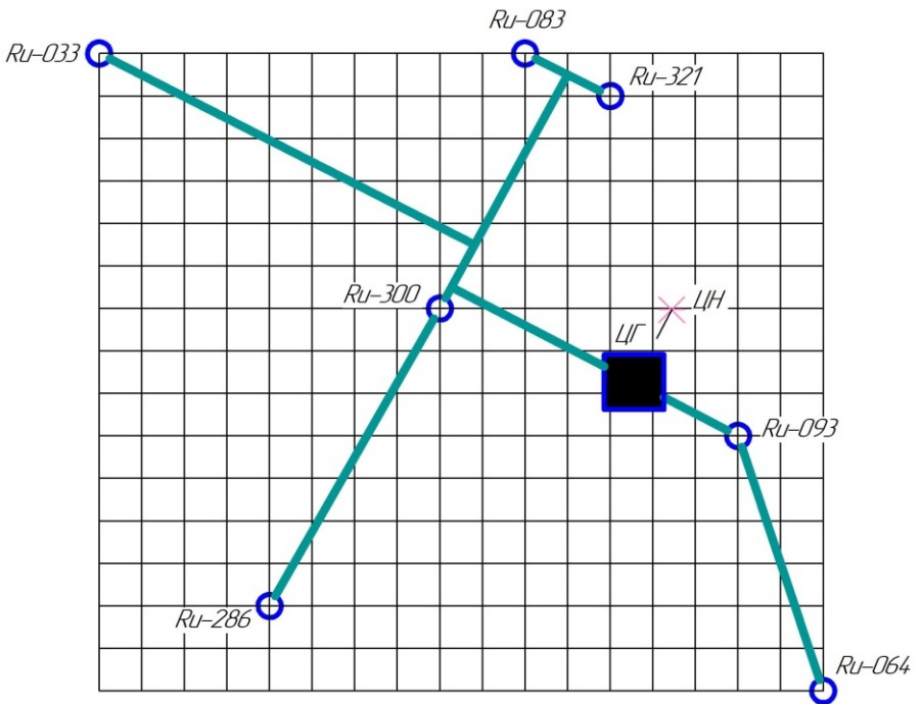


Рис. 7. Центр генерации электрической энергии

Нефтеносный район Румайла при разработке проекта модернизации системы электроснабжения было предложено разделить на десять зон. Примерный размер одной зоны составляет 10 на 20 км. В каждой зоне спроектирована площадка для размещения автономных источников электрической энергии (дизельных генераторов).

На рис. 8 представлена схема электроснабжения района Ратка.

Система управления центра генерации имеет две активные подсистемы управления, которые всегда работают: система управления, регулирующая напряжение в цепи возбуждения генератора и система управления топливом, регулирующая частоту вращения двигателя.

Для успешного распределения нагрузки необходимо учитывать, как совместную активную, так и реактивную мощность нагрузки в условиях как стационарного, так и переходного режимов.

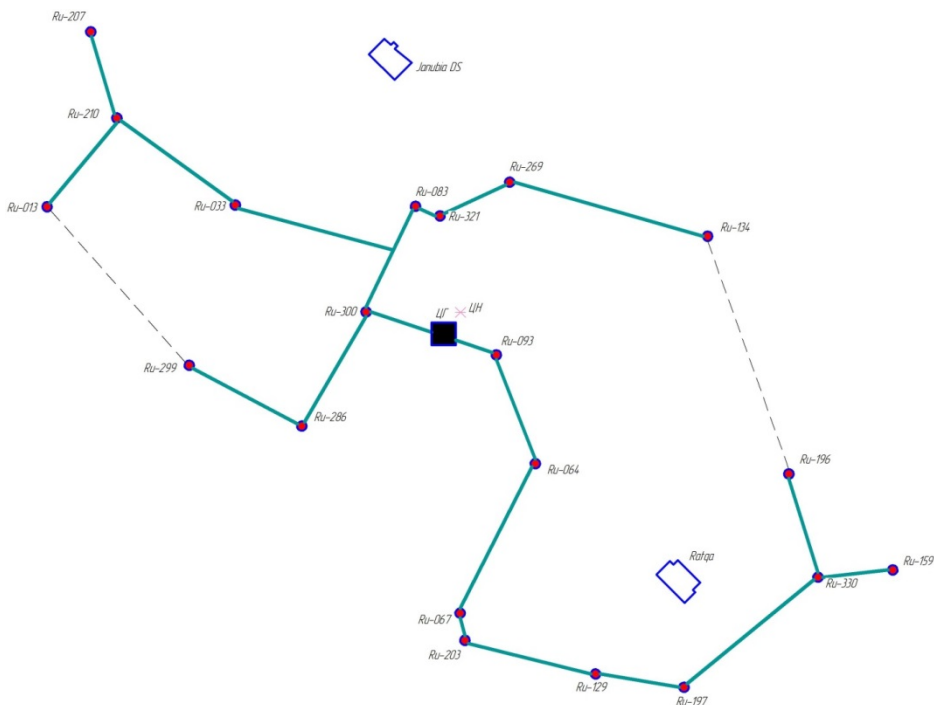


Рис. 8. Схема системы электроснабжения района Ратка, оптимизированная по длине

Выходное напряжение генератора 0,4 кВ будет повышаться до 11 кВ трансформатором высокого напряжения 0,4/11 кВ для дальнейшей подачи на сборную шину. Эта электрическая мощность на шине будет распределяться на нагрузку, как показано на рис. 9.

Таким образом, разработаны методика и способ повышения энергоэффективности электротехнической системы погружных центробежных насосов на этапе добычи нефти путем создания центров генерации электрической энергии на основе автономных дизельных генераторов и оптимизированных по протяженности локальных сетей электроснабжения на основе предложенного модернизированного алгоритма разводки сети. Также сформулированы практические рекомендации в Инженерную концепцию Румайла на предварительном этапе базового проекта модернизации.

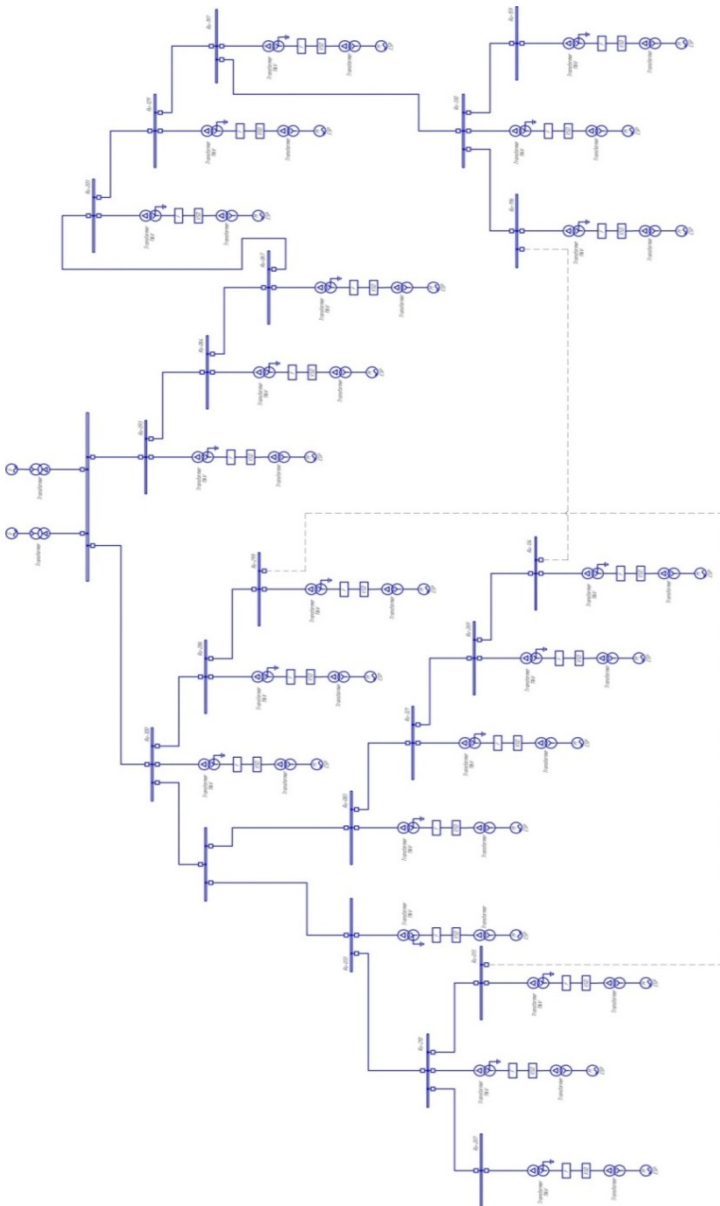


Рис. 9. Однолинейная схема электроснабжения района Ратка, оптимизированная по длине

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. В диссертационной работе проведены исследования структуры нефтегазодобывающего комплекса Румайлы и его энергоэффективности по критерию удельных затрат электроэнергии на единицу добываемой продукции. Для этого проведен технико-экономический аудит централизованной и распределенной системы электроснабжения установок погружных центробежных насосов, в результате которого выявлены: невысокий коэффициент мощности (0,6 - 0,65), низкая загрузка генераторов (0,05 - 0,55), непроизводительные затраты на электроэнергию, горюче-смазочные материалы, обслуживающий персонал, логистику и т.п.

2. В результате анализа структуры нефтегазодобывающего комплекса Румайлы был выявлен ряд противоречий, для устранения которых обоснована необходимость разработки комплекса энергосберегающих мероприятий по модернизации централизованной и распределенной систем электроснабжения нефтедобывающего комплекса Румайла, а именно:

- первое противоречие заключается в том, что государственная энергосистема Ирака, обеспечивающая электроснабжение объектов месторождения Румайла гарантирует обеспечение электроэнергией в полном объеме и по твердым расценкам, однако при обследовании электрических сетей по показаниям узлов учета выявлены низкие значения средневзвешенного коэффициента мощности (0,6 - 0,65), что обусловлено преобладанием активно-индуктивной нагрузки электрооборудования нефтедобывающего комплекса. Кроме того, централизованная система электроснабжения не обеспечивает должный уровень надежности, что приводит к потерям объемов нефтедобычи по причине несанкционированных отключений;

- второе противоречие заключается в том, что автономный характер электроснабжения электрооборудования добывающих скважин обеспечивает высокую степень надежности функционирования системы погружных электроцентробежных насосов, однако, суммарная установленная мощность дизель-генераторов значительно (более чем на 75%) превышает полную потребляемую мощность, фактически затрачиваемую на добычу нефти по технологии ESP, а также имеют место непроизводительные затраты на обеспечение функционирования нефтедобывающего комплекса Румайлы.

С учетом проведенного анализа и выявленных противоречий была сформулирована цель исследования по уменьшению удельных затрат электроэнергии на единицу добываемой продукции, для достижения которой были сформулированы и решены задачи исследования, а именно:

- выполнено исследование технико-экономических характеристик электротехнической системы погружных центробежных насосов на этапе

добычи нефти на месторождении Румайла (Ирак, провинция Басра) и обоснована целесообразность разработки энергосберегающих мероприятий в согласованных районах нефтедобычи;

- разработан способ повышения энергоэффективности электротехнической системы установок погружных центробежных насосов на этапе добычи нефти на основе сформулированной методики снижения энергозатрат за счет совместной коррекции коэффициента мощности и фильтрации гармоник на стадии создания и эксплуатации электротехнического нефтедобывающего комплекса на месторождении Румайла, получающего питание от централизованной системы электроснабжения государства Ирак;

- разработан способ и методика повышения энергоэффективности электротехнической системы погружных центробежных насосов на этапе добычи нефти путем создания центров генерации электрической энергии на основе автономных дизельных генераторов и оптимизированных по протяженности локальных сетей электроснабжения.

- разработан модифицированный алгоритм Штейнера для разводки оптимизированной по длине сети электроснабжения комплексов основного оборудования нефтяных скважин месторождения Румайла;

- разработанные способы повышения энергоэффективности предложены в Инженерную концепцию Румайла на предварительном этапе базового проекта модернизации системы электроснабжения нефтедобывающего комплекса.

3. Результаты диссертационной работы внедрены и использованы при создании центров генерации электрической энергии на основе автономных дизельных генераторов и оптимизированных по протяженности локальных сетей электроснабжения и при проведении энергосберегающих мероприятий с использованием фильтрокомпенсирующих установок при централизованном электроснабжении электротехнической системы установок электроцентробежных установок в нефтяной компании Басра при обосновании Инженерной концепции Румайла на предварительном этапе разработки базового проекта модернизации. Ориентировочная экономическая эффективность проекта модернизации нефтедобывающего комплекса Румайла оценивается 1 млн.долларов в месяц.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованные в ВАК

1. Abdulhy Al-Ali Majid Abdulhameed Optimal operation of electrical power generators for oil wells operated by artificial lifting at Rumila field / Abdulhy Al-Ali Majid Abdulhameed, Kornilov V.Yu., Gorodnov A.G. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. Казань: Казанский государственный энергетический университет. – 2018. - № 11-12. – С. 127 – 132.

2. Abdulhy Al-Ali Majid Abdulhameed Optimize the performance of electrical equipment in gas separation stations (degassing station DS) and electrical submersible pumps of oil equipment for oil Rumaila field / Abdulhy Al-Ali Majid Abdulhameed, Kornilov V.Yu., Gorodnov A.G. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. Казань: Казанский государственный энергетический университет. – 2019. - № 1-2. – С. 141 – 145.

Публикации в других научных изданиях

3. Abdulhy Al-Ali Majid Abdulhameed Optimal operation of electrical power generators for oil wells operated by artificial lifting / Abdulhy Al-Ali Majid Abdulhameed // Journal of Thi_Qar Science / University of Thi_Qar / Republic of Iraq. – 2016. Vol. 5. - № 4. - P. 67-76.

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл.печ.л.1,4. Тираж 100 экз. Заказ Г64.

Издательство КНИТУ-КАИ
420111, г.Казань, К.Маркса, 10