

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
**ТЮМЕНСКИЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

На правах рукописи



**Копырин Владимир Анатольевич**

**УЛУЧШЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ УСТАНОВОК  
ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ ДОБЫЧИ НЕФТИ ПРИ  
ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВНУТРИСКВАЖИННЫХ КОМПЕНСАТОРОВ  
РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Смирнов Олег Владимирович

Тюмень - 2019

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4	
ГЛАВА 1 ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОБЫЧИ НЕФТИ УСТАНОВКАМИ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ.....		12
1.1 Энергоэффективное оборудование .....	13	
1.1.1 Погружные электроцентробежные насосы .....	14	
1.1.2 Погружные электродвигатели .....	15	
1.1.3 Система электроснабжения УЭЦН .....	16	
1.2 Энергоэффективный дизайн .....	19	
1.3 Компенсация реактивной мощности внутри скважины .....	21	
1.4 Выводы по главе 1.....	29	
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА И АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ.....		30
2.1 Разработка математической модели и схемы замещения электротехнического комплекса УЭЦН .....	30	
2.2 Обоснование места подключения компенсирующего устройства в ЭТК УЭЦН.....	40	
2.3 Разработка методики определения напряжения на выходе питающего трансформатора .....	53	
2.4 Выводы по главе 2.....	58	
ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА С ВНУТРИСКВАЖИННЫМ КОМПЕНСАТОРОМ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ		59
3.1 Разработка имитационной модели электротехнического комплекса установки электроцентробежного насоса с внутрискважинным компенсатором..	59	

3.2 Исследование энергетических и силовых показателей электротехнического комплекса УЭЦН при изменении частоты напряжения питания .....	70
3.3 Разработка математической модели электротехнического комплекса УЭЦН для исследования резонансных явлений .....	73
3.4 Исследование устойчивости погружного асинхронного электродвигателя при использовании внутрискважинного компенсатора .....	81
3.5 Выводы по главе.....	90
ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА ВНУТРИСКВАЖИННЫХ КОМПЕНСАТОРОВ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СОСТАВЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ПОГРУЖНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ДОБЫЧИ НЕФТИ .....	91
4.1 Разработка компоновочной схемы энергоэффективной погружной установки для добычи нефти .....	91
4.2 Разработка конструктивных и технологических требований к внутрискважинным компенсаторам .....	92
4.3 Разработка конструкции и выбор электрической схемы внутрискважинного компенсатора .....	94
4.4 Выводы по главе 4.....	100
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ .....	101
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	102
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	113
ПРИЛОЖЕНИЕ Б .....	116
ПРИЛОЖЕНИЕ В .....	120
ПРИЛОЖЕНИЕ Г .....	124
ПРИЛОЖЕНИЕ Д .....	133

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** В настоящее время вопросы энергосбережения и повышения энергоэффективности производства являются первостепенными, так как способствуют достижению основных целей энергетической политики Российской Федерации [16, 66]:

- повышение конкурентоспособности промышленности;
- повышение энергетической безопасности;
- уменьшение вредных экологических воздействий.

Под энергетической эффективностью понимаются характеристики, отражающие отношение полезного эффекта от использования энергетических ресурсов к затратам энергетических ресурсов, произведенных в целях получения такого эффекта, применительно к продукции, технологическому процессу и т.д. Основными характеристиками энергетической эффективности в электроэнергетике и электротехнике являются коэффициент полезного действия и коэффициент мощности.

В нефтедобывающей отрасли при эксплуатации нефтяных скважин наибольшее распространение получили установки погружных электроцентробежных насосов (УЭЦН), которыми оснащено свыше 65 % мирового фонда нефтедобывающих скважин [3, 5, 6, 28, 69, 85]. В России эксплуатационный фонд скважин компании ПАО «ЛУКОЙЛ» в четвертом квартале 2016 года составил 30000 единиц, а доля скважин, оборудованных УЭЦН – свыше 60 %. На месторождениях АО «Сургутнефтегаз» из 22929 скважин более 75 % оборудованы УЭЦН. Тем не менее, данные установки имеют крайне низкий коэффициент полезного действия: в пределах от 20 % до 30 %.

В связи с этим для нашей страны, как одного из лидеров добычи нефти, актуальной задачей является снижение доли электрических потерь в нефтегазовой отрасли от общего энергопотребления, особенно при механизированной добыче нефти установками электроцентробежных насосов.

Известно, что основная доля потерь от общего энергопотребления приходится на потери: в электроцентробежном насосе – до 36 %; в погружном асинхронном электродвигателе – до 20 %; в питающем кабеле – до 15 %; в станции управления, трансформаторе и насосно-компрессорных трубах – до 9 % [60, 75, 89, 90].

Потери активной мощности в питающем кабеле обусловлены ограничением напряжения питания и низким коэффициентом мощности погружного электродвигателя, ограничением сечения токопроводящих жил кабеля и его длиной, которая может достигать 3500 м [45]. Разработанные технические устройства для повышения коэффициента мощности сети устанавливаются только на трансформаторных подстанциях или на станциях управления скважинами. Тем не менее, такое решение не позволяет компенсировать реактивную мощность непосредственно у потребителя – погружного асинхронного электродвигателя (ПЭД).

В связи с этим актуальной задачей является разработка внутрискважинных компенсаторов реактивной мощности [56-59] и исследование их влияния на энергетические и силовые показатели электротехнических комплексов (ЭТК) установок электроцентробежных насосов.

**Степень изученности проблемы.** Существенный вклад в исследование проблемы повышения эффективности механизированной добычи нефти установками электроцентробежных насосов внесли многие ученые и промысловые работники: Абрамович Б.Н., Балакирев Ю.А., Андреева Е.Г., Ведерников В.А., Егоров А.В., Ершов М.С., Ивановский В.Н., Ковалев А.Ю., Ковалев В.З., Козярук К.В., Кузнецов Е.М., Нурбосынов В.В., Сушков В.В., Якимов С.Б., Kloeppe F., Drehsler P. и другие. Опубликованные авторами работы в первую очередь направлены на повышение эксплуатационных характеристик УЭЦН, подбор оптимального оборудования с точки зрения обеспечения максимального коэффициента полезного действия, а также частотное регулирование скорости вращения погружного электродвигателя.

Однако, несмотря на наличие научных работ и публикаций в области повышения энергетической эффективности добычи нефти УЭЦН, вопрос о

внутрискважинной компенсации реактивной мощности не достаточно проработан, ввиду отсутствия на рынке таких устройств. Тем не менее, применение внутрискважинных компенсаторов реактивной мощности (ВКРМ) позволяет компенсировать реактивную мощность в скважине, тем самым уменьшить ток, протекающий по токопроводящим элементам электротехнического комплекса, за счет чего увеличить энергетическую эффективность.

Исходя из проведенного анализа состояния и технического уровня разработок в области повышения энергетической эффективности механизированной добычи нефти УЭЦН, выбран объект и предмет диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи.

**Объект исследования.** Электротехнический комплекс установки электроцентробежного насоса для добычи нефти.

**Предмет исследования.** Энергетические и силовые показатели электротехнического комплекса УЭЦН с устройством и без устройства внутрискважинной компенсации реактивной мощности.

**Методы исследования.** Для решения задач диссертационной работы использованы методы математического анализа, положения теоретических основ электротехники, теории электрических машин и электропривода. Математическое и имитационное моделирование проводилось в программном комплексе Matlab.

**Цель работы.** Повышение показателей энергетической эффективности добычи нефти установками электроцентробежных насосов путем использования внутрискважинных компенсаторов реактивной мощности.

### **Задачи исследования:**

1. Провести критический анализ существующих способов, направленных на повышение энергетической эффективности эксплуатации нефтяных скважин, оборудованных установками электроцентробежных насосов;

2. Разработать математическую модель электротехнического комплекса УЭЦН и обосновать рациональное место подключения компенсирующего устройства с точки зрения энергетической и экономической выгоды;

3. Разработать в среде MATLAB Simulink имитационную модель расчета энергетических и силовых показателей электротехнического комплекса УЭЦН с внутрискважинным компенсатором реактивной мощности при изменении частоты и напряжения источника питания;

4. Провести исследование влияния внутрискважинного компенсатора реактивной мощности на статическую и динамическую устойчивости погружного асинхронного электродвигателя при провалах напряжения;

5. Разработать конструкцию внутрискважинного компенсатора реактивной мощности с учетом скважинных условий.

#### **Научная новизна:**

1. Предложен и экспериментально апробирован способ повышения энергетической эффективности ЭТК УЭЦН за счет использования компенсаторов реактивной мощности, *отличающийся тем, что компенсирующее устройство установлено непосредственно в скважине и подключено к зажимам погружного электродвигателя*;

2. Получены зависимости показателей энергетической эффективности ЭТК УЭЦН, включая изменение величины коэффициента запаса динамической устойчивости погружного асинхронного электродвигателя, при использовании внутрискважинных компенсаторов реактивной мощности, *отличающиеся тем, что получены при сочетании различных параметров погружного асинхронного электродвигателя, длин и сечений кабельной линии, параметров внутрискважинного компенсатора реактивной мощности*;

3. Разработана в среде MATLAB Simulink имитационная модель ЭТК УЭЦН для определения потребляемой полной, активной и реактивной мощностей, коэффициента мощности, коэффициента полезного действия комплекса и отдельных его элементов, *отличающаяся тем, что дополнительно содержит модель внутрискважинного компенсатора реактивной мощности, подключенного параллельно погружному асинхронному электродвигателю*.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Способ улучшения энергетических показателей ЭТК УЭЦН, заключающийся в переносе компенсирующего устройства в скважину;
2. Зависимости энергетической эффективности потребляемой активной мощности ЭТК УЭЦН при использовании ВКРМ для различных параметров ЭТК, включающего в себя источник питания, питающий трансформатор, кабельную линию, погружной асинхронный электродвигатель и внутрискважинный компенсатор реактивной мощности;
3. Результаты моделирования энергетических и силовых показателей ЭТК УЭЦН с внутрискважинным компенсатором реактивной мощности при изменении частоты и напряжения источника питания, полученные на разработанной имитационной модели в среде MATLAB Simulink;
4. Результаты исследования влияния внутрискважинного компенсатора реактивной мощности на статическую и динамическую устойчивости погружного асинхронного электродвигателя при провалах напряжения.

**Практическая значимость работы.** Результаты диссертационной работы можно использовать при проектировании электрооборудования, систем электроснабжения погружных установок для добычи нефти с целью повышения коэффициента полезного действия установок, снижения потребляемой мощности и уменьшения эксплуатационных затрат за счет снижения потерь электроэнергии.

Разработаны конструкции внутрискважинных компенсаторов реактивной мощности, новизна и приоритет которых подтверждены патентом на изобретение №2595256 «Погружное фильтро-компенсирующее устройство» и тремя патентами на полезную модель №145053 «Внутрискважинный компенсатор реактивной мощности», №159860 «Погружной компенсатор реактивной мощности», №159811 «Погружная насосная установка с повышенным коэффициентом мощности», разработана компьютерная программа «DRPC calculate» (Расчет энергетической эффективности использования внутрискважинных компенсаторов реактивной мощности) – свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019612165 (Приложение Г).

**Достоверность полученных результатов.** В диссертации были использованы положения теоретических основ электротехники, корректные допущения при составлении математических моделей, что подтверждается проверкой результатов с помощью компьютерного моделирования, стендовых и опытно-промышленных испытаний (Приложение Д).

Исходные данные для составления моделей отдельных элементов электротехнического комплекса УЭЦН получены из протоколов приемо-сдаточных испытаний заводов-изготовителей оборудования для добычи нефти, имеющих лицензированные лаборатории и аттестованных специалистов.

#### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности.**

Рассматриваемая область исследования энергетических показателей электротехнического комплекса УЭЦН при использовании внутристекажинного компенсатора реактивной мощности соответствует паспорту специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы, а именно: 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. 4 «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях».

**Реализация и внедрение результатов работы.** Результаты диссертационной работы внедрены в производственную деятельность ООО «Алмаз» в части разработки, изготовления и испытания опытного образца внутристекажинного компенсатора реактивной мощности, в программу опытно-промышленных испытаний внутристекажинных компенсаторов реактивной мощности на объектах ПАО «Варьеганнефтегаз», а также используются при подготовке студентов по направлению подготовки бакалавриата 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» и магистратуры 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» Омского государственного технического университета.

**Апробация работы.** Основные результаты и научные положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих мероприятиях: I Всероссийская научно-практическая конференция «Современное состояние и перспективы развития электротехнических систем и комплексов» (Тюмень, 2014 г.); Международная научно-техническая конференция «Нефть и газ Западной Сибири» (Тюмень, 2015 г.); Всероссийская научно-практическая конференция «Арктика – национальный мегапроект: кадровое обеспечение и научное сопровождение» (Архангельск, 2016 г.); Международная научно-практическая конференция «Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе» (Тюмень, 2014 г., 2016 г.); Юбилейная 70-я (71-я) Международная молодежная научная конференция «Нефть и газ – 2016» (Москва, 2016 г., 2017 г.); I Международная молодежная научно-практическая конференция «Арктические исследования: от экстенсивного освоения к комплексному развитию» (Архангельск, 2018 г.); Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Актуальные вопросы энергетики» (Омск, 2018 г.); Международная научно-практическая конференция «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении 2018» (Севастополь, 2018 г.).

**Личный вклад соискателя** заключается в постановке и решении задач исследования, выборе методов и методик исследования, разработке математической и имитационной моделей ЭТК УЭЦН для определения энергетических и силовых показателей комплекса и отдельных его элементов, проведении научно-исследовательских работ по сбору и обработке статистических данных, верификации данных, полученных на имитационной модели с результатами экспериментов, разработке, проведении стеновых и опытно-промышленных испытаний опытных образцов внутристеклянных компенсаторов реактивной мощности.

**Публикации.** По теме исследования опубликовано 23 печатных работы, из них 6 статей в журналах, рекомендованных ВАК, 3 работы в изданиях, индексируемых в международных базах Web of Science и Scopus, 9 публикаций в других научных изданиях. Получены патент на изобретение, 3 патента на полезную модель и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав основного текста, заключения, библиографического списка, включающего 97 наименований. Диссертация изложена на 137 страницах машинописного текста, включает 28 рисунков, 11 таблиц, 5 приложений на 25 страницах.

# ГЛАВА 1 ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОБЫЧИ НЕФТИ УСТАНОВКАМИ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ

Несмотря на мощный импульс, заданный в последние годы Правительством Российской Федерации в области энергосбережения, до сих пор недостаточно проработаны способы повышения эффективности механизированной добычи нефти, особенно установками электроцентробежных насосов.

При механизированной добыче нефти установками электроцентробежных насосов из 100 % потребляемой электрической энергии 29 % приходится на потери в насосе, 14 % в погружном асинхронном электродвигателе, 9 % в трансформаторе, станции управления (СУ), насосно-компрессорных трубах и до 15 % в питающем кабеле [60, 75, 89, 90].

Таким образом, из 100 % затрачиваемой электроэнергии лишь 33 % расходуется на подъем жидкости.

Существующие способы повышения эффективности механизированной добычи нефти, в первую очередь, направлены на увеличение эксплуатационной надежности погружных установок [13, 72, 73] и энергетической эффективности производства: применение энергоэффективного оборудования с максимально высоким коэффициентом полезного действия [27, 30, 55, 90], оптимизация подбора скважинного оборудования [48, 51, 75, 76], энергомониторинг, создание регламентов по выполнению энергоэффективного дизайна [51, 75], внедрение концепции интеллектуальных месторождений и увеличение сечения питающего кабеля [89-91].

В данной главе проводится обзор основных способов повышения энергетической эффективности УЭЦН, применяемых в настоящее время. Выявлены достоинства и недостатки рассмотренных способов. Предложен способ улучшения энергетических показателей электротехнических комплексов УЭЦН, заключающийся в переносе компенсирующего устройства в скважину.

## 1.1 Энергоэффективное оборудование

Современная установка электроцентробежного насоса представляет собой линейную конструкцию из последовательно соединенных между собой элементов. Установка состоит из наземной и погружной части. Принципиальная схема УЭЦН приведена на рисунке 1.1.

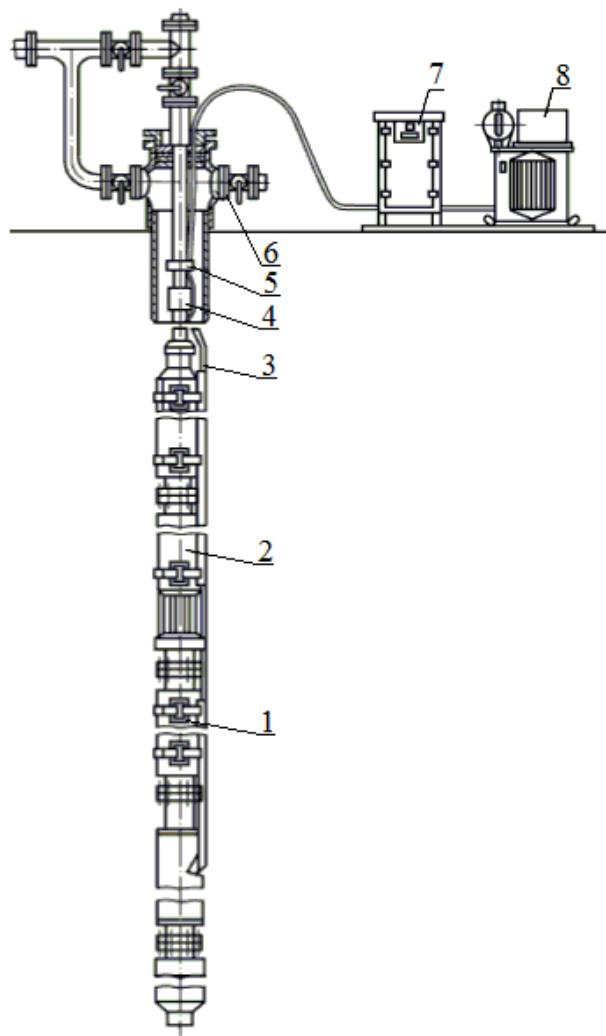


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема УЭЦН: 1,2,3 – погружной агрегат, 4 – питающий кабель, 5 – насосно-компрессорные трубы (НКТ), 6 – арматура устья, 7 – станция управления, 8 – автотрансформатор

Наземная часть включает арматуру устья 6, станцию управления 7, автотрансформатор 8, иногда кабельный барабан. Погружная часть включает погружной электродвигатель 1, гидрозащиту 2, многоступенчатый центробежный насос 3, оборудованный приемной сеткой и обратным клапаном, погружной

кабель 4 и колонны НКТ 5. Также в комплект погружной установки может входить сливной клапан, предназначенный для сливания жидкости из НКТ при подъеме установки. Погружной электродвигатель 1 соединен с узлом гидрозащиты 2, который соединен с центробежным насосом 3.

В качестве погружных электродвигателей УЭЦН в настоящее время в основном используются асинхронные трехфазные электродвигатели с короткозамкнутым ротором. Существуют и другие типы погружных электродвигателей одними, из которых являются вентильные электродвигатели. Однако они получили меньшее распространение в связи с высокой стоимостью и сложной системой управления по сравнению с асинхронными электродвигателями, несмотря на высокий коэффициент полезного действия (КПД) 88 – 94 % [82, 83].

Основными производителями погружных электродвигателей являются: ООО «Алмаз», ООО «ПК «Борец», ГК «Новомет», ГК «Римера», Schlumberger и Baker Hughes. На их долю приходится порядка 90 % рынка, прочие российские и зарубежные производители занимают менее 10 %.

### **1.1.1 Погружные электроцентробежные насосы**

Погружной электроцентробежный насос (ЭЦН) конструктивно представляет собой совокупность ступеней небольшого диаметра, состоящих, в свою очередь, из рабочих колес и направляющих аппаратов, размещаемых в корпусе насоса (трубе).

Отечественная промышленность выпускает ЭЦН обычного и износостойкого исполнения, а также повышенной коррозийной стойкости. По размеру насоса выделяют следующие габариты от 69 мм до 185 мм.

По назначению – обычные, подпорные и для систем поддержания пластового давления. Производительности насосов варьируется от 15 м<sup>3</sup>/сут до 1250 м<sup>3</sup>/сут. По температуре пластовой жидкости: обычного 110 °С, теплостойкого 135 °С или особо теплостойкого 170 °С исполнении.

Коэффициент полезного действия выпускаемых отечественной промышленностью электроцентробежных насосов с подачей от 100 м<sup>3</sup> до 500 м<sup>3</sup> варьируется от 50 % до 69 %, с подачей от 500 м<sup>3</sup> до 1250 м<sup>3</sup> от 67 % до 76 %, что соответствует среднему мировому уровню.

### **1.1.2 Погружные электродвигатели**

Основным видом погружных электродвигателей, служащих для привода электроцентробежных насосов являются асинхронные маслонаполненные двигатели с короткозамкнутыми роторами. Скорость вращения вала ПЭД зависит от частоты тока, при частоте переменного тока 50 Гц синхронная скорость составляет 3000 об/мин. Мощность двигателей может достигать 550 кВт. Номинальное напряжение двигателей варьируется от 400 до 3000 В, номинальный ток от 10 до 100 А и зависят от типоразмера двигателя. Величина скольжения составляет до 6 %.

Выпускаемые ПЭД комплектуются датчиками давления, температуры и другими приборами, фиксирующиеся на глубине спуска агрегата, с передачей сигналов по электрическому кабелю на поверхность (станцию управления). Такие электродвигатели предназначены для работы при температуре окружающей среды до 120 °С и даже до 170 °С в особо температуростойком исполнении. Электродвигатели выпускаются в одно-, двух- и трехсекционной компоновке в зависимости от мощности электроцентробежного насоса. В зависимости от требуемой мощности распределение габаритов, выпускаемых погружных электродвигателей, выглядит следующим образом:

- 81 габарит до 180 кВт;
- 100 габарит до 210 кВт;
- 103 габарит до 210 кВт;
- 117 габарит до 360 кВт;
- 130 габарит до 500 кВт.

Сравнительный анализ технических характеристик погружных электродвигателей, выпускаемых отечественной промышленностью показал, что

коэффициент полезного действия для асинхронных ПЭД варьируется от 80,5 % до 84,5 % и от 88 % до 94 % для вентильных электродвигателей, что соответствует среднему мировому уровню для данных устройств.

Анализ технических характеристик погружных электродвигателей, опубликованных в каталогах производителей погружного оборудования, показал, что коэффициент полезного действия ПЭД на протяжении последних лет не имеет роста. Это связано с тем, что повышение коэффициента полезного действия погружных электродвигателей за счет снижения механических потерь и потерь в обмотках и магнитопроводе электродвигателя не представляется возможным и экономически не обоснованным, ввиду применения более дорогих марок электротехнической стали с меньшей толщиной листа [12].

### **1.1.3 Система электроснабжения УЭЦН**

Питание электроэнергией ПЭД осуществляется от промысловой сети 380 В. Более мощные установки питаются от сети напряжением 6(10) кВ. Система электроснабжения состоит из станции управления, повышающего трансформатора и питающего кабеля.

Станции управления предназначены для управления, защиты и контроля параметров установок электроцентробежных насосов и могут работать в ручном и автоматическом режиме, а также позволяют получать сведения о работе погружного оборудования, поддерживать и изменять технологический режим работы скважины в зависимости от текущих пластово-скважинных условий и обеспечивать безаварийную работу оборудования на месторождении.

Начиная с 2010 года, с развитием информационных технологий существует тенденция к переходу к интеллектуальным станциям управления (ИСУ) способным обеспечивать изменение режимов работы УЭЦН под воздействием внешних факторов в соответствии с заданными оптимизационными критериями, без участия оператора. Для таких станций можно выделить основные функциональные возможности [14, 15]:

- режим исследования притока скважины и настройки УЭЦН на максимальный дебит;
- автоматический вывод УЭЦН на режим (в том числе «щадящий»);
- автоматическая оптимизация потребления электроэнергии;
- уход от аварийных режимов работы УЭЦН;
- обеспечение работы насоса на границе срыва подачи;
- управление работой УЭЦН в циклическом режиме и автоматический переход из циклического режима в непрерывный и обратно при наличии соответствующих предпосылок;
- воспроизводить процессы управления реальных скважин, используя историю их работ.

Основными производителями станций управления являются: ООО «ПК «Борец», ГК «Новомет», ООО «НПО «Эталон», ООО «Орион», ГК «Римера», ЗАО «Электон». Например, ЗАО «Электон» выпускает станции управления «Электон-7», рассчитанные на номинальное напряжение 380 В, токи силовой цепи от 400 А до 1600 А при коэффициенте полезного действия СУ не ниже 97 %.

Для поддержания рабочего напряжения на каждом конкретном погружном электродвигателе с учетом потерь напряжения в питающем кабеле применяются трехфазные масляные трансформаторы серии ТМПН и ТМПНГ. Трансформаторы выполняются с естественным масляным охлаждением. Масло, заполняющее трансформатор, имеет пробивное напряжение 40 кВ.

Трансформаторы в исполнении АУХЛ1 предназначены для работы в составе частотно-регулируемого асинхронного электропривода. При этом между частотным преобразователем и трансформатором должны быть установлены фильтры гармоник. Исходя из условия получения постоянной перегрузочной способности при вентиляторной нагрузке, на частоте ниже номинальной должен соблюдаться закон регулирования  $U/f=\text{const}$ , при частоте выше номинальной должен соблюдаться закон регулирования  $U=\text{const}$ .

Подача питающего напряжения на клеммы ПЭД осуществляется по кабельной линии, которая состоит из основного питающего кабеля (плоского или

круглого) и соединенного с ним плоского кабеля – удлинителя с муфтой кабельного ввода. Соединение основного кабеля с кабелем-удлинителем осуществляется при помощи соединительной муфты. Длина кабельной линии обычно находится в пределах от 500 м до 2000 м и может достигать 3500 м. Поэтому к кабелю предъявляются жесткие требования: малые электрические потери, высокие диэлектрические свойства изоляции и т.д.

В настоящее время погружные кабели для питания электронасосов выпускаются с полиэтиленовой, полипропиленовой или фторопластовой изоляцией жил, покрытых сверху металлической броней [79]. Поверхностное бронирование погружного кабеля осуществляется стальной оцинкованной профилированной лентой, что предотвращает токоведущие жилы от механических повреждений при спуске и подъеме установки. Конструкция кабеля может быть плоской (например, кабель марки КПБП) или круглой (КПБК). В отличие от круглого кабеля плоский кабель имеет меньшие радиальные габариты, поэтому его размещают в эксплуатационной колонне. Кабель крепится к колонне насосно-компрессорных труб в двух местах: над соединительной муфтой и под соединительной муфтой. В настоящее время преимущественно применяются кабели с полиэтиленовой и полипропиленовой изоляцией.

Основными производителями кабелей для питания ПЭД среди отечественных компаний являются: ООО «Алмаз», АО «РОССКАТ», АО «Сибкабель», входящее в ООО «Холдинг кабельный Альянс» и ООО «УГМК-Холдинг», ООО «Камский кабель», ООО «УК «Кавказкабель».

Компанией ООО «Алмаз» выпускаются кабели, кабельные линии и удлинители к ним, предназначенные для питания погружных электродвигателей, на напряжение переменного тока частотой от 30 Гц до 200 Гц для кабелей номинальным сечением  $3 \times 7 \text{ mm}^2$ ,  $3 \times 8 \text{ mm}^2$ ,  $3 \times 10 \text{ mm}^2$ ,  $3 \times 13,3 \text{ mm}^2$ ,  $3 \times 16 \text{ mm}^2$ ,  $3 \times 21,15 \text{ mm}^2$ ,  $3 \times 25 \text{ mm}^2$ ,  $3 \times 35 \text{ mm}^2$ , номинальным напряжением 3300 В, 4000 В, 4500 В и 5000 В, эксплуатируемых в определенных скважинных условиях. Вид климатического исполнения – УХЛ, категория размещения 1 и 5 по ГОСТ 15150-69 и в пластовой жидкости.

## 1.2 Энергоэффективный дизайн

В 2009 году компания ОАО «ТНК-ВР» запустила масштабный проект, направленный на повышение энергоэффективности производства. Основной частью, которого стала оптимизация подбора скважинного оборудования – реализация идеи «энергоэффективного дизайна». Проект включает в себя организацию всех необходимых условий (включая регламенты, обучение специалистов и т.д.) для спуска в скважины оборудования, скомплектованного по принципам энергосберегающего дизайна, и мониторинг параметров его работы, а также создание системы мониторинга энергопотребления [76].

Для реализации проекта компанией были выделены следующие этапы:

- выполнение энергосберегающих дизайнов по отказавшим УЭЦН;
- анализ потерь в кабельных линиях, оптимизация распределения кабеля по сечению, рекомендации по корректировке заявки на закупку;
- анализ гидравлических потерь в НКТ по высокопроизводительным скважинам, рекомендации по корректировке заявок на закупку;
- создание системы учета и выявления скважин-кандидатов на снижение энергопотребления;
- создание системы мониторинга энергопотребления;
- создание регламента по выполнению энергосберегающего дизайна ЭЦН и штанговых глубинных насосов.

Специалистами ОАО «ТНК-ВР» выделены основные принципы энергоэффективного дизайна:

- недопущение снижения добычи жидкости, установленной геологической службой;
- обеспечение загрузки двигателя на уровне 80-90 %, коэффициента мощности cosφ на уровне 0,8-0,84 и коэффициента полезного действия ПЭД не ниже 85%;
- снижение потерь электрической энергии путем увеличения сечения кабеля;

- заглубление установки под динамический уровень в стабильно работающих скважинных в пределах 150-300 м;
- выбор ПЭД с максимальным возможным напряжением и минимальным током;
- в ряде случаев отказ от использования дополнительных газосепараторов и обратных клапанов.

В ходе реализации проекта на предприятии ОАО «Самотлорнефтегаз» на первом этапе было выполнено 75 дизайнов. Суммарное снижение энергопотребления составило 22128 кВт·ч в сутки, а удельное энергопотребление на кубический метр добываемой жидкости снизилось с 9,6 до 7,4 кВт·ч. В денежном выражении экономия составила 1,3 млн руб. на 1 февраля 2010 года.

На втором этапе «энергоэффективный дизайн» был проведен на 104 скважинах. Экономия составила 3,5 млн руб. [75].

В 2011 года предприятие ОАО «Газпромнефть-Муравленко» приняло решение о внедрении программного продукта компании ЗАО «ГИС-АСУпроект» «OIS Технолог». Основной целью использования программного продукта является повышение эффективности эксплуатации глубинного насосного оборудования и сокращение затрат на электроэнергию и механизированную добычу с оценкой экономической эффективности от проводимых мероприятий по замене УЭЦН на оптимальную комплектацию с точки зрения энергоэффективности [51]. Подсистема «OIS Технолог» позволяет:

- производить расчеты оптимального режима работы УЭЦН;
- визуализация вариантов расчета оборудования;
- возможность настройки ограничений при подборе (например, только импортные или отечественные установки, оборудование, которое находится на складе);
- расчет нормативных и фактических потерь и их мониторинг;
- расчет среднего удельного потребления на добычу жидкости и на добычу воды;
- расчет энергоэффективности работы оборудования;

- расчет совокупной стоимости владения и эксплуатации каждого УЭЦН и всего фонда скважин;
- расчет экономической эффективности от замены оборудования.

В совокупности возможности программного продукта «OIS Технолог» позволяют выполнить основные принципы «энергоэффективного дизайна».

Одной из простых технологий, позволяющих уменьшить энергопотребление УЭЦН, является выбор питающего кабеля большего сечения. Известно, что доля потерь в питающем кабеле составляет 3 – 15 % от суммарной активной мощности, потребляемой УЭЦН [36, 38, 89, 91]. Разработанный специалистами компании ПАО «НК «Роснефть» алгоритм для выявления скважин с высоким потенциалом энергосбережения и планирования потребности в закупке питающего кабеля большего сечения позволяет за год сократить потери активной мощности на 45,1 тыс. кВт·ч на одну скважину, что эквивалентно 94,6 тыс. руб. Экономия достигается за счет увеличения сечения кабеля с 16 мм<sup>2</sup> до 25 мм<sup>2</sup>. Увеличение сечения питающего кабеля оказалось экономически целесообразным для 2808 скважин с потенциальным эффектом энергосбережения 78714 тыс. кВт·ч [89].

Таким образом, внедрение «энергоэффективного дизайна» позволяет повысить энергоэффективность производства за счет оптимизации подбора скважинного оборудования и мониторинга энергопотребления.

Тем не менее, отсутствие технических регламентов и методик оптимальной комплектации УЭЦН, применимых к конкретной скважине, не позволяет в полной мере реализовать концепцию энергоэффективного дизайна и снизить удельное энергопотребление на тонну добытой пластовой жидкости. Также для внедрения данной технологии требуется обучения специалистов и создание специализированной лаборатории.

### **1.3 Компенсация реактивной мощности внутри скважины**

Как отмечалось выше, основные потери энергии при эксплуатации скважин с УЭЦН приходятся на потери в насосе, погружном электродвигателе,

трансформаторе, станции управления, насосно-компрессорных трубах и питающем кабеле. По физической природе потери энергии можно классифицировать в следующие группы:

- гидравлические – потери в насосе, НКТ, обусловленные гидравлическим сопротивлением;
- механические – потери в насосе, погружном электродвигателе, обусловленные шероховатостью движущихся поверхностей;
- электрические – потери в СУ, трансформаторе, питающем кабеле, погружном электродвигателе, обусловленные наличием активного сопротивления в токоведущих частях.

В токопроводящей сети процессы в нагрузке имеют активную, реактивную (емкостную и индуктивную) составляющие. Активная мощность (полезная мощность) в электроприемниках преобразуется в другие виды энергии: механическую, тепловую и т.д. Реактивная мощность преобразуется в энергию электрических и магнитных полей в элементах электрической сети и электроприемниках.

Магнитные поля создаются в индуктивных элементах сети, например в трансформаторах, реакторах, электродвигателях и других элементах. Реактивная индуктивная мощность  $Q_L=I^2 \cdot x_L$  определяется квадратом тока  $I$ , протекающего через индуктивный элемент сопротивлением  $x_L$ .

В конденсаторах, кабельных и воздушных линиях и другом электрооборудовании, которое характеризуется емкостным сопротивлением  $x_C$ , реактивная мощность  $Q_C=U^2/x_C$ , определяемая квадратом приложенного напряжения к емкостному сопротивлению, расходуется на создание электрического поля.

Загрузка системы электроснабжения реактивными токами приводит к ухудшению качества электроэнергии, увеличению потерь активной мощности в элементах системы, к необходимости увеличения сечений проводов и токопроводящих жил кабелей, увеличению капитальных затрат на внешние и внутриплощадочные сети.

В индуктивных элементах ток отстает от напряжения – имеет положительное значение, а в емкостных опережает напряжение, то есть имеет отрицательное значение. Отсюда следует, что взаимное воздействие индуктивных и емкостных элементов в электрической цепи имеет компенсирующее действие  $Q=Q_L-Q_C$ . Данное свойство реактивных элементов используется для компенсации реактивной мощности и снижения потерь электроэнергии.

Существует целый ряд подходов к определению реактивной мощности, которые можно разделить на три группы: спектральные, интегральные и энергопотоковые методы расчета. К спектральным методам расчета реактивной мощности относятся методы, предложенные C. Budeanu, D. Sharon, N. L. Kusters and W. J. M. Moore и в стандарте IEEE 1459-2000 «Опытный стандарт IEEE для стандартных определений по измерению электрической мощности при синусоидальных, несинусоидальных, симметричных или несимметричных режимах» [94]. К интегральным методам относятся – мощность по О.А. Маевскому и М. Iliovici. К энергопотоковым методам относятся – мощность по S. Fryze, L. Czarnecki и теория мгновенной мощности.

Классическое определение полной мощности при синусоидальном напряжении и токе описывается выражением [4]:

$$S = \sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2}, \quad (1.1)$$

где  $S$  – полная мощность, ВА;

$P$  – активная мощность, Вт;

$Q_L$  – индуктивная мощность, вар;

$Q_C$  – емкостная мощность, вар.

Одним из важных параметров, который характеризует, насколько эффективно активная мощность передается потребителю электрической сети, является коэффициент мощности  $\cos\varphi$ . Коэффициент мощности определяется по известному выражению:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2}}. \quad (1.2)$$

Из выражения (1.2) следует, что чем меньше разность  $Q_L - Q_C$ , тем больше коэффициент мощности и при нулевой реактивной мощности будет достигнута максимальная эффективность использования электроэнергии.

Для управления УЭЦН все чаще используются системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель (ПЧ-АД), которые генерируют в сеть высшие гармонические составляющие. Высшие гармонические составляющие искажают форму напряжений и токов в цепи «СУ – питающий трансформатор – кабельная линия – ПЭД», что приводит к дополнительным неактивным потерям в электротехническом комплексе УЭЦН [8, 11, 86-88, 97].

Согласно [94] полная мощность определяется по выражению:

$$S^2 = (U \cdot I)^2 = S_I^2 + S_N^2, \quad (1.3)$$

где  $S_I$  – фундаментальная полная мощность равная произведению напряжения на ток для основной гармоники;

$S_N$  – нефундаментальная фиксируемая мощность, обусловленная наличием высших гармоник.

Нефундаментальная фиксируемая мощность определяется по выражению:

$$S_N^2 = D_I^2 + D_U^2 + S_H^2 = (U_1 \cdot I_H)^2 + (U_H \cdot I_1)^2 + (U_H \cdot I_H)^2, \quad (1.4)$$

где  $D_I, D_U$  – составляющие текущей мощности и мощности искажения равные произведению действующего напряжения и тока основной гармоники на сумму составляющих тока и напряжения высших гармоник соответственно;  $S_H$  – полная мощность высших гармоник.

$U_1, I_1, U_H, I_H$  – напряжение и ток основной гармоники, сумма составляющих напряжения и тока высших гармоник.

Коэффициенты гармонических искажений напряжения и тока определяются по выражению:

$$K_{HU} = \frac{U_H}{U_1} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1}, \quad K_{HI} = \frac{I_H}{I_1} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} \quad (1.5)$$

где  $n$  – номер гармоники.

С учетом высших гармонических составляющих в кривых напряжения и тока, активная мощность, потребляемая УЭЦН, равна среднему значению мгновенной мощности за полный период:

$$P = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt. \quad (1.6)$$

Если мгновенные значения напряжения и тока выразить в виде тригонометрических рядов получим [4]:

$$P = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \left[ \sum_{n=0}^{\infty} U_n \cdot \sin(n \cdot \omega t) \right] \cdot \left[ \sum_{n=0}^{\infty} I_n \cdot \sin(n \cdot \omega t + \varphi_n) \right] dt. \quad (1.7)$$

где  $U_n, I_n$  – амплитуда напряжения и тока соответствующей гармоники.

Проинтегрировав выражение (1.7) получим:

$$P = \sum_{n=0}^{\infty} U_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n = \sum_{n=0}^{\infty} P_n. \quad (1.8)$$

Из выражения (1.8) следует, что средняя активная мощность с учетом высших гармонических составляющих равна сумме средних мощностей отдельных гармоник.

Активная и реактивная мощности основной гармоники могут быть определены как:

$$P_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1, Q_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1. \quad (1.9)$$

При работе УЭЦН характер потребляемой мощности активно-индуктивный. Для увеличения коэффициента мощности компенсируют индуктивную составляющую.

Разработанные на данный момент технические устройства для компенсации реактивной мощности (УКРМ) устанавливаются только на трансформаторных подстанциях или на станциях управления скважинами [33]. УКРМ в процессе работы увеличивает коэффициент мощности сети обычно до величины 0,95. Регулирование коэффициента мощности происходит под управлением специального микропроцессорного регулятора, который отслеживает в реальном времени значение коэффициента мощности и корректирует его за счёт подключения или отключения необходимого числа батарей конденсаторов.

Однако такое решение не позволяет компенсировать реактивную мощность в питающих кабелях УЭЦН, длина которых может достигать 3500 м [45]. Это приводит к необходимости увеличения сечений питающих кабелей и к повышенным потерям активной мощности в них до 15% [38, 41, 89, 91].

Предлагается перенести компенсирующее устройство с поверхности в непосредственную близость к ПЭД (в скважину), что позволит снизить энергопотребление за счет уменьшения потерь активной мощности в токопроводящих элементах электротехнического комплекса УЭЦН [39].

На сегодняшней день на рынке нефтяного оборудования такие компенсаторы не представлены в виде серийного изделия.

Известна модель погружного электродвигателя с повышенным коэффициентом мощности [59, 74], авторы которой предлагают разместить в корпусе ПЭД низковольтный косинусный конденсатор, тем самым уменьшить потребление реактивной мощности.

К недостатку данного устройства можно отнести размещение косинусного конденсатора в корпусе ПЭД, что снижает их ремонтопригодность.

В данной диссертационной работе для повышения энергетической эффективности добычи нефти установками электроцентробежных насосов предлагается использовать разработанные внутрискважинные компенсаторы реактивной мощности [56, 58] в составе энергоэффективных УЭЦН [57]. Размещение косинусных конденсаторов в отдельном герметичном корпусе позволяет повысить ремонтопригодность ВКРМ и сделать его универсальным, работающим с погружными электродвигателями различных производителей.

Электротехнический комплекс энергоэффективной УЭЦН включает в себя источник питания (шины КТП 10/0,4 кВ), станцию управления, питающий трансформатор, кабельную линию, погружной асинхронный электродвигатель и внутрискважинный компенсатор реактивной мощности.

Для обоснования рационального места установки компенсирующего устройства (КУ) в цепи ЭТК УЭЦН предложено рассмотреть энергетическую эффективность  $\mathcal{E}_P$  как величину, характеризующую энергосберегающий эффект от изменения места установки КУ. Подключение КУ производится в 3 разных точках: после КТП перед СУ, после ТМПН перед ОКЛ, после ОКЛ перед ПЭД (рис. 1.2).

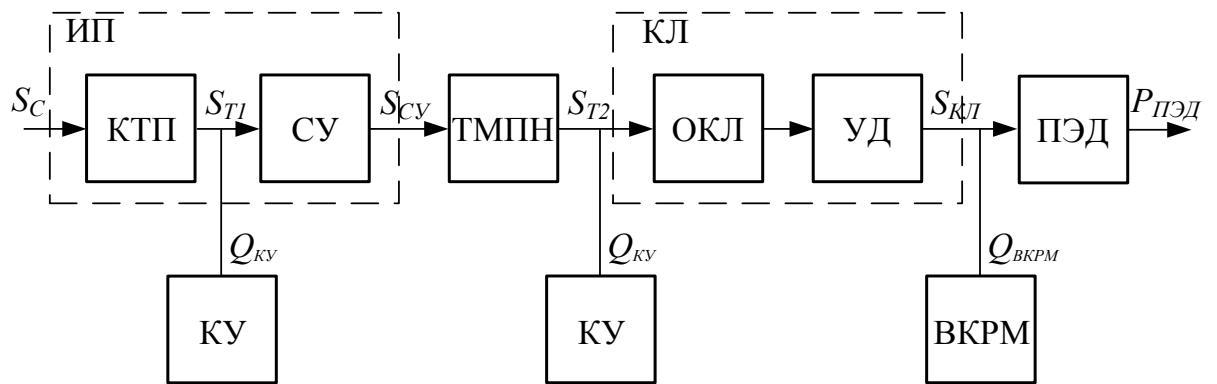


Рисунок 1.2 – Обобщенная функциональная схема УЭЦН: ИП – источник питания; КТП – комплектная трансформаторная подстанция; СУ – станция управления; ТМПН – повышающий трансформатор; КЛ – кабельная линия; ОКЛ – основная кабельная линия; УД – удлинитель; ПЭД – погружной асинхронный электродвигатель; КУ – компенсирующее устройство; ВКРМ –

внутрискважинный компенсатор реактивной мощности;  $S, P, Q$  – полная, активная и реактивная мощности на входе и выходе элементов соответственно, ВА, Вт, вар

Очевидно, что перенос КУ приведет к изменению потребляемой электроэнергии. Тогда функцию энергетической эффективности  $\mathcal{E}_P$  предложено определять как:

$$\mathcal{E}_P = \frac{W_{план} - W_{нов}}{W_{план}} = \frac{(P_{план} - P_{нов}) \cdot t}{P_{план} \cdot t} = 1 - \frac{P_{нов}}{P_{план}}, \quad (1.10)$$

где  $W_{план}$  – плановый расход электрической энергии, рассчитанный при стандартной схеме установки КУ (на КТП), кВт·ч;

$W_{нов}$  – расход электрической энергии при изменении места установки КУ, кВт·ч;

$P_{план}, P_{нов}$  – активная плановая и полученная мощность соответственно, кВт.

Из анализа выражения (1.10) следует, что чем меньше потребляемая активная мощность  $P_{нов}$ , тем выше энергетическая эффективность  $\mathcal{E}_P$ . Данное утверждение является основополагающим диссертационной работы и может быть записано как:

$$\begin{cases} P_{нов,k} \rightarrow \min \\ \mathcal{E}_P = 1 - \frac{P_{нов,k}}{P_{план}} \rightarrow \max \end{cases} \quad (1.11)$$

где  $k$  – место установки компенсирующего устройства,  $k=1, 2, 3$ .

Таким образом, предложенный показатель энергоэффективности  $\mathcal{E}_P$  позволяет оценить энергосберегающий эффект от изменения места подключения КУ и сделать вывод целесообразности комплектации УЭЦН внутрискважинными компенсаторами реактивной мощности.

В общем случае активная мощность, потребляемая УЭЦН, расходуется на подъем нефтесодержащей жидкости из скважины на поверхность и активные

потери в токопроводящих элементах электротехнического комплекса. Коэффициент полезного действия современных СУ находится в пределах 0,93-0,98, поэтому потерями электрической мощности в станции управления можно пренебречь [29, 70]. Тогда потребляемая активная мощность определяется по выражению:

$$P = P_d + \sum \Delta P = P_d + \Delta P_T + \Delta P_{KL} + \Delta P_o, \quad (1.12)$$

где  $P_d$  – активная мощность, потребляемая погружным электродвигателем;  $\Delta P_T$ ,  $\Delta P_{KL}$ ,  $\Delta P_o$ , – потери активной мощности в трансформаторе, кабельной линии, погружном электродвигателе соответственно.

#### **1.4 Выводы по главе 1**

1. Анализ современных способов, направленных на повышение энергетической эффективности добычи нефти установками электроцентробежных насосов, показал, что потенциал увеличения коэффициента полезного действия существующего погружного оборудования ограничен, а порой экономически не оправдан ввиду применения дорогостоящих материалов и технологий;
2. Отсутствие технических регламентов и методик оптимальной комплектации УЭЦН, применимых к конкретной скважине, не позволяют в полной мере реализовать концепцию энергоэффективного дизайна;
3. Предложен показатель энергетической эффективности, позволяющий оценить энергосберегающий эффект от переноса места подключения компенсирующего устройства и сделать вывод целесообразности внедрения внутрискважинных компенсаторов реактивной мощности на нефтяных месторождениях с энергетической точки зрения.

## ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА И АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

### **2.1 Разработка математической модели и схемы замещения электротехнического комплекса УЭЦН**

В общем случае под математическим моделированием в технике понимают адекватную замену исследуемого технического устройства или процесса соответствующей математической моделью и ее последующее изучение методами вычислительной математики с привлечением современных средств вычислительной техники [26].

Согласно рекомендациям [26, 35] математические модели элементов ЭТК УЭЦН строятся на следующих общих требованиях:

1. Выбор модели производится исходя из полноты получаемых характеристик технического объекта и их точности, в совокупности с минимизацией затрат на вычислительные ресурсы;
2. Адекватность математической модели – способность описывать параметры технического объекта с относительной погрешностью не более некоторого заданного значения, принятого в инженерной практике (не более 10 %);
3. Работоспособность математической модели – способность нивелировать погрешности и не допускать их чрезмерного влияния на результат вычислительного эксперимента по отношению к погрешностям исходных данных;
4. Продуктивность – необходимость выбора достаточно достоверных исходных данных, точность определения которых выше чем требуемая точность расчета.

Назначение ЭТК УЭЦН заключается в следующем [31, 70]:

- прием электрической энергии от комплектной трансформаторной подстанции до станции управления посредством кабельной линии;

- выпрямление и преобразование переменного напряжения в постоянное и постоянное в переменное трехфазное напряжение;
- преобразование трехфазного напряжения одного уровня в трехфазное напряжение другого более высокого уровня;
- передача электрической энергии на ПЭД посредством кабельной линии;
- преобразование электрической энергии в механическую энергию посредством ПЭД;
- регулирование частоты вращения и момента ПЭД;
- целенаправленное воздействие на баланс реактивной мощности в узле нагрузки «ПЭД–ВКРМ», с целью снижения потерь электроэнергии посредством внутрискважинного компенсатора реактивной мощности.

Электротехнический комплекс УЭЦН включает в себя: источник питания (шины комплектно-трансформаторной подстанции (КТП) 10/0,4 кВ); станцию управления, питающий трансформатор серии ТМПН, кабельную линию, погружной асинхронный электродвигатель и компенсирующее устройство (внутрискважинный компенсатор реактивной мощности).

Питание кустов нефтяных скважин, оборудованных УЭЦН, как правило, осуществляется по линии электропередач от понижающей подстанции 35/6 кВ до комплектных трансформаторных подстанций блочного модульного исполнения с трансформаторами серии ТМГ мощностью 630 кВА и 1000 кВА. Количество и мощность КТП выбирается с учетом максимальной загрузки трансформаторов в рабочем режиме – не более 70 %.

По статистическим данным, полученным в ходе проектирования нефтедобывающих объектов ООО «РН-Юганскнефтегаз», трансформаторы выбираются с большим запасом – коэффициент загрузки менее 50 %. Исходя из этого, трансформатор, установленный на КТП, незначительно влияет на характер процессов в системе и его можно рассматривать как идеальный источник без потерь напряжения и мощности [68, 80].

Станции управления предназначены для защиты погружного оборудования, регулирования частоты вращение вала ПЭД в соответствии с заданным законом

регулирования. Тем не менее, преобразователь частоты в составе станции управления, будучи нелинейным звеном, является источником ряда гармоник напряжения или тока различных частот [8, 87].

Наличие высших гармонических составляющих на выходе преобразователя частоты в цепи «фильтр – питающий трансформатор – кабельная линия» приводит к искажению форм и величин напряжения и тока ПЭД. Данное обстоятельство влияет на энергетические характеристики системы такие как: увеличение потерь активной мощности в элементах системы, наличие квазистатических и динамических потерь в силовых элементах самого преобразователя частоты.

Применение режима широтно-импульсной модуляции при формировании выходного напряжения в современных СУ и использование входных и выходных фильтров позволяет снизить коэффициент искажения синусоидальности кривой выходного напряжения до величины менее 5 %.

Коэффициент полезного действия современных станций управления УЭЦН находится в пределах от 93 % до 98 % и зависит от многих конструктивных параметров, например, наличия преобразователя частоты, входных и выходных фильтров [29, 70].

В связи с незначительным влиянием станции управления и трансформатора, установленного на КТП, на энергетические показатели электротехнического комплекса УЭЦН принято допущение, что данные элементы комплекса представляют в совокупности идеальный источник синусоидального напряжения без электрических потерь.

Питающий трансформатор, как отмечалось в первой главе, предназначен для поддержания рабочего напряжения на конкретном ПЭД. В электротехническом комплексе УЭЦН питающий трансформатор представляет собой преобразователь трехфазного напряжения низкого уровня в трехфазное напряжение более высокого уровня без регулирования его частоты. Расчетным эквивалентом энергетических и электромагнитных параметров, протекающих в питающем трансформаторе, является Т-образная схема замещения [4, 80]. Данная

схема позволяет исследовать статические режимы работы и переходные процессы в питающем трансформаторе, и принята для дальнейшего исследования.

При разработке математической модели кабельной линии необходимо учитывать активно-индуктивное продольное сопротивление линии и активно-емкостное поперечное. Согласно теоретической электротехнике, адекватной моделью КЛ является модель линии с сосредоточенными параметрами [4].

В ходе моделирования КЛ принято допущение, что величина активной поперечной проводимости равна бесконечности  $g_k = \infty$ , ввиду применения современных изоляционных материалов и следствие малого тока проводимости.

Погружные электродвигатели предназначены для передачи энергии электроцентробежным насосам, регулирования подачи и напора. В качестве погружных электродвигателей УЭЦН в основном используются асинхронные трехфазные электродвигатели с короткозамкнутым ротором. Поэтому для дальнейшего исследования принимается данный тип двигателей.

В работах В.А. Ведерникова, О.А. Лысовой и А.В. Мамченкова приводится Т-образная схема замещения погружного электродвигателя, которая удовлетворяет принятым общим требованиям к математическим моделям [47]. Рассмотренная Т-образная схема применима для исследования как статического, так и динамических режимов работы ПЭД и принята для дальнейшего исследования [34].

Внутрискважинные компенсаторы реактивной мощности предназначены для поддержания высокого коэффициента мощности сети на уровне 0,92–0,95 в точке подключения – на зажимах ПЭД.

На рисунке 2.1 приведена разработанная электрическая схема ЭТК УЭЦН, соответствующая обобщенной функциональной схеме (рис. 1.2). Эквивалентная схема замещения одной фазы комплекса, с учетом принятых допущений, приведена на рисунке 2.2.

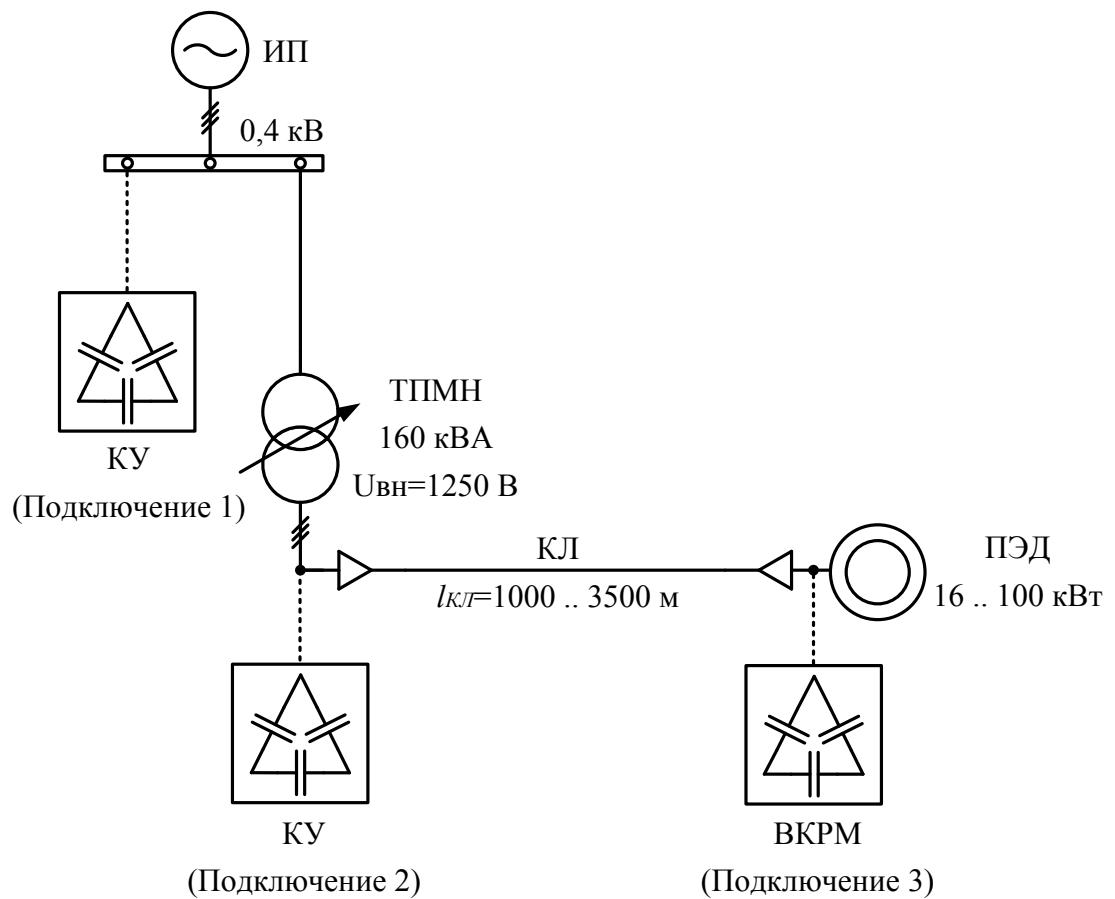


Рисунок 2.1 – Электрическая схема электротехнического комплекса УЭЦН  
для добычи нефти

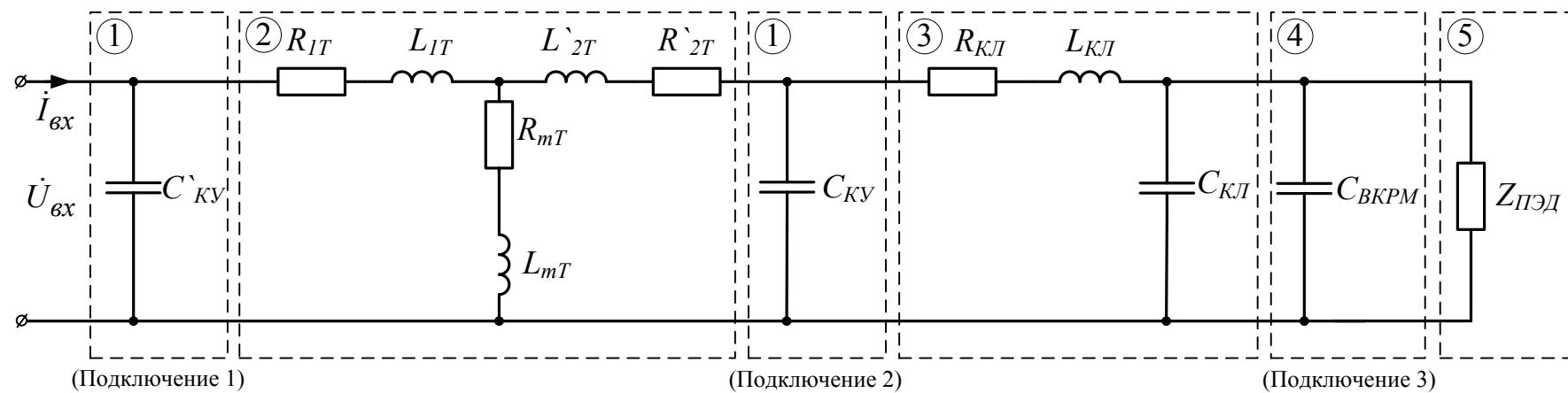


Рисунок 2.2 – Схема замещения одной фазы электротехнического комплекса УЭЦН

где 1 – компенсирующее устройство, устанавливаемое на поверхности; 2 – питающий трансформатор; 3 – кабельная линия; 4 – внутрискважинный компенсатор реактивной мощности; 5 – погружной асинхронный электродвигатель;  $\dot{U}_{ex}$ ,  $\dot{I}_{ex}$  – входные комплексные напряжение и ток;  $Z$ ,  $R$ ,  $L$ ,  $C$  – полное и активное сопротивления, индуктивность и емкость соответствующих элементов.

В соответствии со схемой замещения (рис. 2.2) разработана математическая модель, позволяющая определить рациональное место подключения компенсирующего устройства с точки зрения минимизации потерь в ЭТК УЭЦН в соответствие с выражениями (1.10), (1.11) и величины напряжения и тока в элементах комплекса.

Модель источника синусоидального напряжения описывается выражением [4]:

$$u_{ex} = U_{ex} \cdot \sin(\omega t + \psi), \quad (2.1)$$

где  $U_{ex}$  – амплитудное значение напряжения фазы источника синусоидального напряжения, В;

$\omega = 2\pi f$  – угловая частота, рад/с;

$f$  – частота напряжения источника питания, Гц;

$\psi$  – начальная фаза, рад/с или градусы.

Модель питающего трансформатора описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} i_{1T} - i_{mT} - i_{2T} = 0 \\ u_{1T} - i_{1T} \cdot r_{1T} = L_{1T} \cdot \frac{di_{1T}}{dt} + i_{mT} \cdot r_{mT} + L_{mT} \cdot \frac{di_{mT}}{dt} \\ u_{2T} + i_{2T} \cdot r_{2T} = i_{mT} \cdot r_{mT} + L_{mT} \cdot \frac{di_{mT}}{dt} - L_{2T} \cdot \frac{di_{2T}}{dt} \end{cases}, \quad (2.2)$$

где  $u_{1T}$ ,  $u_{2T}$  – мгновенные значения векторов напряжений первичной и приведенного вторичной обмоток соответственно, В;

$i_{1T}$ ,  $i_{2T}$  – мгновенные значения векторов токов первичной и вторичной обмоток соответственно, А;

$r_{1T}$ ,  $r_{2T}$  – активные сопротивления первичной и приведенное активное сопротивление вторичной обмоток соответственно, Ом;

$L_{1T}$ ,  $L_{2T}$  – индуктивность первичной и приведенная индуктивность вторичной обмоток соответственно, Гн;

$r_{mT}$  – активное сопротивление, учитывающее тепловые потери в сердечнике, Ом;

$L_{mT}$  – индуктивность, учитывающая реактивную мощность, затрачиваемую на создание магнитного поля в сердечнике, Гн;

$i_{mT}$  – ток намагничивания, А.

Для перевода реальных параметров и величин электрической цепи вторичной обмотки к приведенным используются соотношения  $r_{2T} = k^2 \cdot r_{2T}$ ,

$L_{2T} = k^2 \cdot L_{2T}$ ,  $i_{2T} = \frac{i_{2T}}{k}$ ,  $u_{2T} = \frac{u_{2T}}{k}$ , где  $k$  - коэффициент трансформации [80].

Модель кабельной линии описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} i_{1KL} - i_c - i_{2KL} = 0 \\ u_{1KL} = i_{1KL} \cdot R_{KL} + L_{KL} \cdot \frac{di_{1KL}}{dt} + \frac{1}{C_{KL}} \cdot \int i_c dt, \\ u_{2KL} = \frac{1}{C_{KL}} \cdot \int i_c dt \end{cases} \quad (2.3)$$

где  $u_{1KL}$ ,  $u_{2KL}$  – мгновенные значения векторов напряжений в начале и конце кабельной линии, В;

$R_{KL}$ ,  $L_{KL}$ ,  $C_{KL}$  – активное сопротивление, индуктивность и емкость кабельной линии, соответственно, Ом, Гн, Ф.

Модель погружного асинхронного электродвигателя описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{i}_{1\partial} - i_{m\partial} + i`_{2\partial} = 0 \\ u_\partial = i_{1\partial} \cdot R_{1\partial} + L_{1\partial} \cdot \frac{di_{1\partial}}{dt} + i_{m\partial} \cdot R_{m\partial} + L_{m\partial} \cdot \frac{di_{m\partial}}{dt} \\ 0 = -i_{m\partial} \cdot R_{m\partial} - L_{m\partial} \cdot \frac{di_{m\partial}}{dt} + i`_{2\partial} \cdot R`_{2\partial}/s - L`_{2\partial} \cdot \frac{di`_{2\partial}}{dt} \end{cases}, \quad (2.4)$$

где  $u_\partial$  – мгновенное значение вектора напряжения на электродвигателе, В;  
 $R_{1\partial}$ ,  $L_{1\partial}$ , – активное сопротивление и индуктивность обмотки статора ПЭД, соответственно, Ом, Гн;  
 $R`_{2\partial}$ ,  $L`_{2\partial}$ , – приведенные активное сопротивление и индуктивность обмотки ротора ПЭД, соответственно, Ом, Гн;  
 $R_{m\partial}$ ,  $L_{m\partial}$ , – активное сопротивление и индуктивность контура намагничивания ПЭД, соответственно, Ом, Гн.

Модель компенсирующего устройства (внутрискважинного компенсатора) описывается выражением:

$$\frac{1}{C_{KU}} \int i_{KU} dt = u_{KU}, \quad (2.5)$$

где  $u_{KU}$ ,  $i_{KU}$  – мгновенное значение векторов напряжения и тока компенсирующего устройства соответственно, В, А;  
 $C_{KU}$  – емкость компенсирующего устройства, Ф.

Для определения потребляемой активной мощности УЭЦН согласно выражению (1.12) требуется определить потери активной мощности в токопроводящих элементах электротехнического комплекса.

Потери активной мощности в трансформаторе складываются из потерь в обмотках трансформатора в «меди» и потеря в магнитопроводе в «стали» и определяются по выражению:

$$\Delta P_T = \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe} = 3 \cdot (i_{1T}^2 \cdot r_{1T} + i_{2T}^2 \cdot r_{2T} + i_{mT}^2 \cdot r_{mT}), \quad (2.6)$$

где  $\Delta P_{Cu}$  - потери активной мощности в меди, обусловленные активным сопротивлением обмоток, Вт;  
 $\Delta P_{Fe}$  - потери активной мощности в стали, обусловленные электромагнитными процессами в магнитопроводе, Вт.

Потери активной мощности в одной фазе кабельной линии определяются по выражению:

$$\Delta P_{KL} = 3 \cdot i_{1KL}^2 \cdot R_{KL}. \quad (2.7)$$

Активная мощность  $P_\partial$ , потребляемая погружным электродвигателем, расходуется на создание электромагнитного момента и активные потери в обмотках статора и ротора (потери в меди), магнитопроводе (потери в стали), а также механические потери на трение  $\Delta P_{mex}$ . Активная мощность, без учета потерь на трение, определяется по выражению:

$$P_\partial + \Delta P_\partial = i_{1\partial}^2 \cdot R_{1\partial} + i_{m\partial}^2 \cdot R_{m\partial} + i_{2\partial}^2 \cdot R_{2\partial} / s. \quad (2.8)$$

Предложенная математическая модель позволяет определить потребляемую активную мощность УЭЦН, с учетом потерь в электротехническом комплексе, а также оценить энергосберегающий эффект и сделать вывод целесообразности внедрения внутрискважинных компенсаторов реактивной мощности как на существующих нефтедобывающих объектах, так и на вновь проектируемых.

## 2.2 Обоснование места подключения компенсирующего устройства в ЭТК УЭЦН

Выбор рационального места подключения устройств компенсации реактивной мощности является важной задачей при проектировании и эксплуатации различных электротехнических комплексов предприятий, позволяющий существенно снизить энергопотребление.

Для обоснования места установки компенсирующего устройства рассмотрим три случая подключения КУ: после ИП перед ТМПН (подключение 1), после ТМПН перед КЛ (подключение 2), после КЛ перед ПЭД (подключение 3). Выбранное место установки считается рациональным, если удовлетворяет утверждению (1.11), то есть ситуации, когда полученная после установки компенсирующего устройства потребляемая активная мощность имеет минимальное значение:  $P_{нов1} < P_{нов2}, P_{нов3}, P_{план}$ ;  $P_{нов2} < P_{нов1}, P_{нов3}, P_{план}$  или  $P_{нов3} < P_{нов1}, P_{нов2}, P_{план}$ .

В исследуемом электротехническом комплексе питание электроэнергией УЭЦН осуществляется от источника питания бесконечной мощности напряжением 0,4 кВ, частотой 50 Гц.

Поддержание необходимого уровня напряжения на ПЭД осуществляется посредством питающего трансформатора, в котором за счет наличия ступеней регулирования обеспечивается необходимый коэффициент трансформации.

В качестве питающего трансформатора выбран трансформатор марки ТМПН-160/3, паспортные данные которого приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Основные технические характеристики трансформатора ТМПН-160/3

Мощность, кВА	Сочетание напряжений, кВ		Схема и группа соединения обмоток	Потери, кВт		Напряжение к.з., %	Ток холостого хода, %
	ВН	СН		холостого хода	короткого замыкания		
160	1,25	0,4	Ун/У-0	0,44	2,65	5,5	1,7

Параметры схемы замещения питающего трансформатора приводятся к уровню напряжения высшей ступени, соответствующего номинальному напряжению питания ПЭД (1250 В).

Так как ток холостого хода выбранного трансформатора составляет 1,7 % от номинального значения, а полное сопротивление ветви намагничивания на несколько порядков больше полных сопротивлений первичной и вторичной обмоток  $Z_{mT} \gg Z_{1T} \approx Z_{2T}$ , то ветвь намагничивания можно исключить из схемы замещения трансформатора. В этом случае, схема замещения преобразуется к эквивалентному сопротивлению:

$$Z_{\text{экT}} = Z_{1T} + Z_{2T}, \quad (2.9)$$

где  $Z_{\text{экT}}$ ,  $Z_{1T}$ ,  $Z_{2T}$  – эквивалентное сопротивление, сопротивление первичной и приведенное вторичной обмоток соответственно, Ом.

Данное допущение широко используется на практике для расчета характеристик силовых трансформаторов и незначительно влияет на точность определения потребляемой активной мощности ЭТК УЭЦН.

Приведенные к напряжению 1,25 кВ эквивалентные активное и реактивное сопротивления силового трансформатора составляют:

$$R_{\text{экT}} = R_{1T} + R_{2T} = \frac{\Delta P_k \cdot U_{\text{вн.ном}}^2 \cdot 10^3}{S_{\text{ном}}^2} = \frac{2,65 \cdot 1,25^2 \cdot 10^3}{160^2} = 0,162 \text{ (Ом);}$$

$$x_{\text{экT}} = x_{1T} + x_{2T} = \frac{u_k \% \cdot U_{\text{вн.ном}}^2 \cdot 10^3}{100 \cdot S_{\text{ном}}} = \frac{5,5 \cdot 1,25^2 \cdot 10^3}{100 \cdot 160} = 0,537 \text{ (Ом).}$$

где  $\Delta P_k$  – потери короткого замыкания, кВт;

$U_{\text{вн.ном}}$  – номинальное напряжение высшей ступени трансформатора, кВ;

$S_{\text{ном}}$  – полная мощность трансформатора, кВА;

$u_k \%$  – напряжение короткого замыкания, %.

Определим параметры схемы замещения кабельной линии, питающей ПЭД.

Для построения семейства характеристик, отражающих потери активной мощности в токопроводящих жилах кабелей, в зависимости от выбранной номинальной мощности электродвигателя, зададимся несколькими значениями сечений и длин кабельной линии. В качестве питающего кабеля выбран кабель марки КПБП с медными жилами. Исходные данные для исследования и результаты расчетов сведены в таблицу 2.2.

Таблица 2.2

## Расчетные параметры кабельной линии

Длина кабеля, м	Удельное сопротивление проводника при 20 С°, Ом·мм <sup>2</sup> /м	Погонное индуктивное сопротивление проводника при 50 Гц, Ом/км	Активное сопротивление токопроводящей жилы при 70 С°, Ом				Реактивное сопротивление проводника, Ом
			$S_{KL} = 16 \text{ мм}^2$	$S_{KL} = 21,15 \text{ мм}^2$	$S_{KL} = 25 \text{ мм}^2$	$S_{KL} = 35 \text{ мм}^2$	
1000	0,0172	0,0757	1,290	0,975	0,826	0,590	0,076
1500	0,0172	0,0757	1,935	1,464	1,238	0,885	0,114
2000	0,0172	0,0757	2,581	1,952	1,651	1,179	0,151
2500	0,0172	0,0757	3,225	2,440	2,064	1,474	0,189
3000	0,0172	0,0757	3,870	2,928	2,477	1,769	0,227
3500	0,0172	0,0757	4,515	3,415	2,890	2,064	0,265

Активное и реактивное сопротивления токопроводящих жил кабеля определяются по выражениям [28, 54]:

$$R_{KL} = 10^3 \cdot \rho \cdot \left( \frac{l_1}{S_1} + \frac{l_2}{S_2} \right) \cdot [1 + 0,004 \cdot (T - 20)]; \quad (2.10)$$

$$x_{KL} = x_o \cdot (l_1 + l_2), \quad (2.11)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление проводника, Ом·мм<sup>2</sup>/м;

$l_1, l_2$  – длина основного кабеля и кабеля–удлинителя соответственно, км;

$S_1, S_2$  – сечение токопроводящей жилы основного кабеля и кабеля–удлинителя соответственно, мм<sup>2</sup>;

$T$  – температура токопроводящих жил кабелей, °С;

$x_o$  – погонное индуктивное сопротивление кабельной линии, Ом/км.

За расчетную температуру  $T$  токопроводящих жил кабелей принимается температура наиболее нагретого участка кабельной линии. Если сечение токопроводящих жил основного кабеля и кабеля-удлинителя отличаются не более чем на один порядок (например, 16 и 10  $\text{мм}^2$ ), то активное сопротивление жилы кабельной линии рассчитывается как для основного кабеля [28].

Ввиду того, что погонная емкость принятого кабеля КПБП составляет 0,1  $\mu\text{Ф}/\text{км}$ , а емкостное сопротивление при частоте 50 Гц равно 31,847  $\text{kОм}/\text{км}$  и на порядок выше активного и индуктивного сопротивления, то ее можно исключить из схемы замещения (рис. 2.2) и не учитывать при расчетах. Принятое допущение незначительно повлияет на точность определения потребляемой активной мощности ЭТК УЭЦН.

При эксплуатации УЭЦН с асинхронными ПЭД максимальная энергоэффективность использования электрической энергии достигается при номинальной выходной мощности на валу погружного электродвигателя в диапазоне от 65 % до 95 % [28]. Снижение нагрузки ПЭД до 50 % от номинала приводит к снижению коэффициента полезного действия на 3 – 5 % и к резкому снижению коэффициента мощности с 0,84 до 0,45, что увеличивает реактивные потери в ЭТК УЭЦН.

Для определения параметров электрической схемы погружного асинхронного электродвигателя проведем замену схемы замещения электродвигателя эквивалентным сопротивлением  $Z_\delta$ , отражающим диапазон номинальных мощностей электродвигателей от 16 до 100 кВт, с учетом электрических и механических потерь.

При работе УЭЦН коэффициент мощности установок электроцентробежных насосов, определяемый в основном коэффициентом мощности ПЭД, находится в пределах 0,7-0,85 при номинальной нагрузке и может снижаться до 0,6-0,75 при снижении нагрузки [1]. На практике фактический коэффициент мощности ниже номинального значения. Это обусловлено тем, что выбранное оборудование работает в неоптимальных рабочих зонах, а порой морально и физически устарело.

В ходе анализа статистических данных энергетических показателей добывающих скважин (8310 скважин) одной из нефтедобывающих компаний установлено, что среднее значение коэффициента мощности погружных асинхронных электродвигателей составляет 0,735. Данное обстоятельство связано с тем, что средний коэффициент загрузки ПЭД составляет 0,65. В связи с этим, для дальнейшего исследования коэффициент мощности ПЭД был принят  $\cos\varphi_\delta=0,735$ .

Полная потребляемая мощность погружным электродвигателем определяется по выражению:

$$S_\delta = \frac{P_{\text{д.ном}}}{\cos\varphi_\delta \cdot \eta_\delta}, \quad (2.12)$$

где  $S_\delta$  – полная мощность потребляемая ПЭД, кВА;

$P_{\text{д.ном}}$  – номинальная мощность погружного электродвигателя, кВт;

$\cos\varphi_\delta$  – коэффициент мощности погружного электродвигателя;

$\eta_\delta$  – коэффициент полезного действия погружного электродвигателя.

Эквивалентное полное сопротивление погружного электродвигателя:

$$Z_\delta = \frac{10^3 \cdot m \cdot U_{\text{д.ном}}^2}{S_\delta}. \quad (2.13)$$

где  $U_{\text{д.ном}}$  – номинальное фазное напряжение ПЭД,  $U_{\text{д.ном}}=1,25/\sqrt{3}$  кВ;

$m$  – число фаз,  $m=3$ .

Ток, потребляемый погружным электродвигателем:

$$i_\delta = \frac{S_\delta}{3 \cdot U_{\text{д.ном}}} = \frac{S_\delta}{3 \cdot (U_{\text{bx}} - \Delta U_T - \Delta U_{KL})}, \quad (2.14)$$

где  $\Delta U_T$  – потери напряжения в обмотках трансформатора, кВ;

$\Delta U_{KL}$  – потери напряжения в кабельной линии, которые зависят от длины кабеля, температуры пластовой жидкости и номинального тока ПЭД, кВ.

Одной из основных функций внутристекажинного компенсатора реактивной мощности является способность задавать необходимые компенсационные токи для поддержания рационального коэффициента мощности сети на уровне 0,95 [24, 25, 81]. Для обоснования рационального места подключения компенсирующего устройства рассмотрим случай, когда КУ представляет собой нерегулируемую компенсирующую установку с соединением конденсаторов по схеме «треугольник».

Необходимая реактивная мощность КУ, с учетом принятого коэффициента мощности ПЭД, может быть определена по выражению:

$$\begin{aligned} Q_{KU} &= P_{\text{д.ном}} \cdot (\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2) = P_{\text{д.ном}} \cdot \left( \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi_d} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi_c} - 1} \right) = \\ &= P_{\text{д.ном}} \cdot \left( \sqrt{\frac{1}{0,735^2} - 1} - \sqrt{\frac{1}{0,95^2} - 1} \right) = 0,59 \cdot P_{\text{д.ном}} \end{aligned} \quad (2.15)$$

где  $Q_{KU}$  – реактивная мощность компенсирующего устройства (ВКРМ), квр;  $\operatorname{tg}\varphi_1$ ,  $\operatorname{tg}\varphi_2$  – действующий и требуемый коэффициент реактивной мощности сети соответственно;

$\cos\varphi_c$  – коэффициент мощности в месте подключения компенсирующего устройства.

Фазное номинальное значение емкостного сопротивления ВКРМ определяется по выражению:

$$x_{BKPM}^\Delta = \frac{10^3 \cdot U_{BKPM.\text{ном}}^2}{Q_{BKPM}}, \quad (2.16)$$

где  $U_{BKPM.\text{ном}}$  – номинальное напряжение ВКРМ,  $U_{BKPM.\text{ном}} = 1,25$  кВ.

Приведенное емкостное сопротивление компенсирующего устройства, установленного на стороне 0,4 кВ (подключение 1), определяется по выражению:

$$x_{KY}^{\Delta} = \frac{1}{\omega \cdot C_{KY}} \cdot \left( \frac{1,25}{0,4} \right)^2 = \frac{9,766}{\omega \cdot C_{KY}}, \quad (2.17)$$

где  $C_{KY}$  – приведенное фазное значение емкости компенсирующего устройства.

Фазное значение емкости КУ (ВКРМ) определяется по выражению:

$$C_{BKPM}^{\Delta} = \frac{1}{3 \cdot \omega \cdot x_{BKPM}^{\Delta}}. \quad (2.18)$$

Схема замещения для расчета потребляемой мощности ЭТК УЭЦН с учетом принятых допущений приведена на рисунке 2.3.

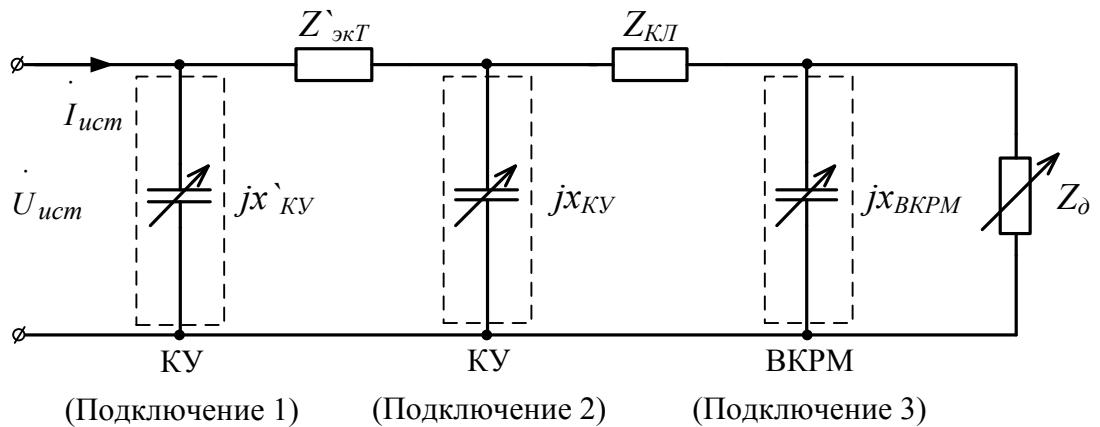


Рисунок 2.3 – Расчетная схема замещения ЭТК УЭЦН

где  $j$  – символ мнимой части комплексного числа.

Расчет параметров электрической цепи удобнее производить в комплексной форме. Для этого запишем полные сопротивления элементов цепи ЭТК УЭЦН через действительную и мнимую части, соответствующие активной и реактивной составляющей:

$$Z_{\vartheta \kappa T} = R_{\vartheta \kappa T} + jx_{\vartheta \kappa T} = 0,162 + j0,537 \text{ Ом}; \quad (2.19)$$

$$Z_{KL} = R_{KL} + jx_{KL}; \quad (2.20)$$

$$Z_\delta = \frac{10^3 \cdot m \cdot U_{\partial, \text{ном}}^2}{S_\delta} \cdot \cos \varphi_\delta + j \frac{10^3 \cdot m \cdot U_{\partial, \text{ном}}^2}{S_\delta} \cdot \sin \varphi_\delta; \quad (2.21)$$

$$x_{KY}^\Delta = -\frac{j}{\omega \cdot C_{KY}}; \quad (2.22)$$

$$x_{KY}^\Delta = -\frac{9,766j}{\omega \cdot C_{KY}}. \quad (2.23)$$

Полная мощность, потребляемая УЭЦН в  $k$ -ой точке подключения КУ, определяется по выражению:

$$\dot{S}_k = 3 \cdot \dot{U}_{ex,k} \cdot \bar{I}_{ex,k} = 3 \cdot \dot{U}_{ex,k} \cdot \bar{U}_{ex,k} \cdot \bar{Y}_{obu,k} = 3 \cdot Z_{obu,k} \cdot \dot{I}_{ex,k} \cdot \bar{I}_{ex,k}, \quad (2.24)$$

где  $\dot{U}_{ex,k}$ ,  $\bar{U}_{ex,k}$  – комплексные и комплексно-сопряженные векторы напряжения источника питания, соответствующие  $k$ -ой ( $k=1..3$ ) точке подключения компенсирующего устройства, В;

$\dot{I}_{ex,k}$ ,  $\bar{I}_{ex,k}$  – комплексные и комплексно-сопряженные векторы тока источника питания соответственно, А;

$Z_{obu,k}$ ,  $\bar{Y}_{obu,k}$  – полное сопротивление и комплексно-сопряженная проводимость ЭТК УЭЦН соответственно, Ом, См.

Определим полную мощность, потребляемую УЭЦН при подключении КУ в точке 1, с учетом потерь в ЭТК УЭЦН и (2.12), (2.15), (2.23):

$$\begin{aligned} \dot{S}_1 &= \dot{S}_\delta + Q_{KY} + \Delta \dot{S}_{T,1} + \Delta \dot{S}_{KL,1} = P_\delta + jQ_\delta + 3 \cdot \bar{I}_\delta \cdot \dot{I}_\delta \cdot (Z_{\vartheta \kappa T} + Z_{KL}) + \frac{|\dot{U}_\delta + \Delta \dot{U}_T + \Delta \dot{U}_{KL}|^2}{\bar{x}_{KY}^\Delta} = \\ &= P_\delta + jQ_\delta + 3 \cdot \left| \frac{\overline{P_\delta + jQ_\delta}}{\sqrt{3} \cdot \dot{U}_\delta} \right|^2 \cdot (Z_{\vartheta \kappa T} + Z_{KL}) + \frac{\left| \dot{U}_{\partial, \text{ном}} + \left( \frac{\overline{P_\delta + jQ_\delta}}{\sqrt{3} \cdot \dot{U}_\delta} \right) \cdot (Z_{\vartheta \kappa T} + Z_{KL}) \right|^2}{\bar{x}_{KY}^\Delta} ; \quad (2.25) \end{aligned}$$

где  $Q_\partial$  – номинальная реактивная мощность ПЭД, вар;

$\dot{U}_\partial$  – комплексное номинальное значение напряжения ПЭД, В;

$\dot{I}_\partial, \bar{I}_\partial$  – комплексное и сопряженное комплексные значения тока ПЭД соответственно, А;

$\bar{x}_{KY}^\Delta$  – комплексное сопряженное приведенное сопротивление КУ, Ом.

Определим полную мощность, потребляемую УЭЦН, в зависимости от мощности ПЭД при подключении КУ в точке 2 с учетом (2.12), (2.15), (2.22):

$$\begin{aligned} \dot{S}_2 &= \dot{S}_\partial + Q_{KY} + \Delta \dot{S}_{T.2} + \Delta \dot{S}_{KL.2} = P_\partial + jQ_\partial + .. \\ .. + 3 \cdot \bar{I}_{T.2} \cdot \dot{I}_{T.2} \cdot Z_{\vartheta KT} + 3 \cdot \bar{I}_\partial \cdot \dot{I}_\partial \cdot Z_{KL} + \frac{|\dot{U}_\partial + \Delta \dot{U}_{KL.2}|^2}{\bar{x}_{KY}^\Delta} &= P_\partial + jQ_\partial + .. \\ .. + 3 \cdot \left| \left( \frac{\dot{U}_\partial + \left( \frac{P_\partial + jQ_\partial}{\sqrt{3} \cdot \dot{U}_\partial} \cdot Z_{KL} \right)}{\bar{x}_{KY}^\Delta} \right) \right|^2 \cdot Z_{\vartheta KT} + .. &; (2.26) \\ .. 3 \cdot \left| \left( \frac{\dot{U}_\partial + \left( \frac{P_\partial + jQ_\partial}{\sqrt{3} \cdot \dot{U}_\partial} \cdot Z_{KL} \right)}{\bar{x}_{KY}^\Delta} \right) \right|^2 \cdot Z_{KL} + \frac{|\dot{U}_\partial + \left( \frac{P_\partial + jQ_\partial}{\sqrt{3} \cdot \dot{U}_\partial} \cdot Z_{KL} \right)|^2}{\bar{x}_{KY}^\Delta} & \end{aligned}$$

где  $\Delta \dot{U}_{KL.2}$  – потери напряжения в кабельной линии при втором способе подключения КУ, В;

$\dot{I}_{T.2}, \bar{I}_{T.2}$  – комплексное и сопряженное комплексное значения тока трансформатора соответственно ( $\dot{I}_{T.2} = \dot{I}_{ex.2}$ ), А.

Определим полную мощность, потребляемую УЭЦН, в зависимости от мощности ПЭД при подключении КУ в точке 3 с учетом (2.12), (2.15), (2.22):

$$\begin{aligned}
 \dot{S}_3 &= \dot{S}_\partial + Q_{BKPM} + \Delta \dot{S}_{T.3} + \Delta \dot{S}_{KL.3} = P_\partial + jQ_\partial + \dots \\
 \dots + 3 \cdot \bar{I}_{ex.3} \cdot \dot{I}_{ex.3} \cdot (Z_{ekT} + Z_{KL}) + \frac{|\dot{U}_\partial|^2}{\bar{x}_{KY}^\Delta} &= P_\partial + jQ_\partial + \dots \quad (2.27) \\
 \dots + 3 \cdot \left| \left( \frac{P_\partial + jQ_\partial}{\sqrt{3} \cdot \dot{U}_\partial} \right) + \frac{\dot{U}_\partial}{x_{KY}^\Delta} \right|^2 \cdot (Z_{ekT} + Z_{KL}) + \frac{|\dot{U}_\partial|^2}{\bar{x}_{KY}^\Delta}
 \end{aligned}$$

В полученных уравнениях (2.25), (2.26), (2.27), согласно теоретическим основам электротехники, действительная часть комплексной мощности соответствует потребляемой активной мощности, а мнимая – реактивной. Величину активной и реактивной мощности можно определить посредством операторов выделения действительной и мнимой части комплексного числа  $\text{Re}(\dot{S}_k)$  и  $\text{Im}(\dot{S}_k)$  соответственно.

Результаты расчета потребляемой активной мощности УЭЦН, в зависимости от мощности ПЭД, с учетом потерь активной мощности в питающем трансформаторе и кабельной линии при различных точках подключения КУ и длин кабельных линий, представлены на графиках (рис. 2.4) и в Приложении А.

Моделирование производилось при принятом коэффициенте реактивной мощности погружного электродвигателя  $\text{tg}\varphi_\partial = 0,923$  и требуемом коэффициенте реактивной мощности сети в точке подключения компенсирующего устройства  $\text{tg}\varphi_c = 0,33$ . Выбор мощности компенсирующего устройства произведен с учетом задания необходимых компенсационных токов в соответствие с выражением (2.15).

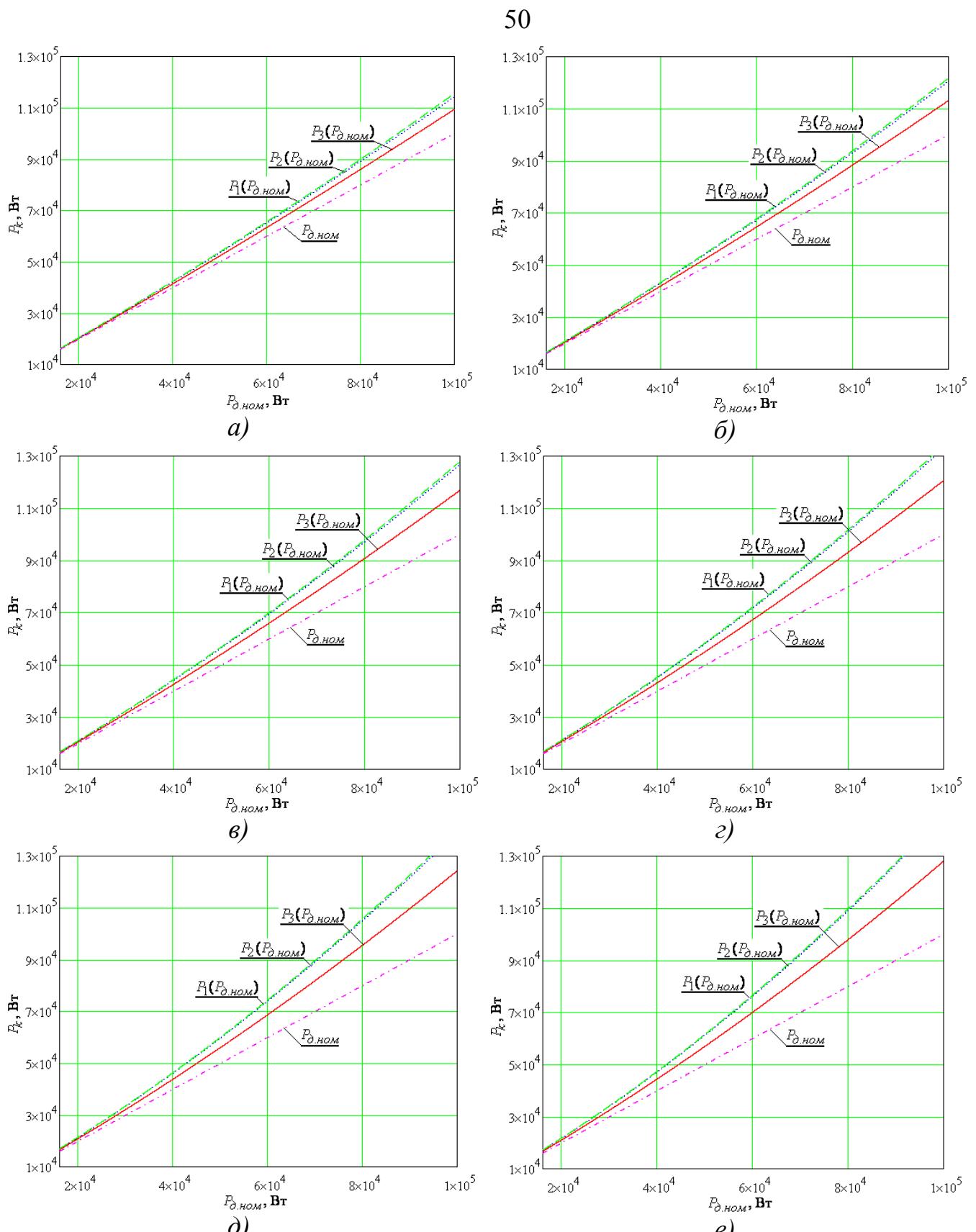


Рисунок 2.4 – Графики потребляемой активной мощности ЭТК УЭЦН при  $U_{0,nom}=1250$  В,  $S_T=100$  кВА,  $S_{KL}=16$  мм<sup>2</sup>: *a)*  $l_{KL}=1000$  м, *б)*  $l_{KL}=1500$  м, *в)*  $l_{KL}=2000$  м, *г)*  $l_{KL}=2500$  м, *д)*  $l_{KL}=3000$  м, *е)*  $l_{KL}=3500$  м

Анализ зависимостей показал, что при подключении компенсирующего устройства до (подключение 1) и после питающего трансформатора (подключение 2), потребляемые активные мощности  $P_1$  и  $P_2$  отличаются незначительно – менее 1 %. Это связано с применением в трансформаторах ТПМН современных изоляционных и электропроводящих материалов, позволяющих уменьшить потери мощности в обмотках. Исходя из этого, можно сделать вывод, что  $P_1 \approx P_2$ . В свою очередь, максимальное снижение потребляемой активной мощности достигается при установке компенсирующего устройства в скважине (подключение 3)  $P_3 < P_1 \approx P_2$ . Такое расположение внутрискважинного компенсатора удовлетворяет требованиям (1.11) и принято для дальнейшего исследования.

Для оценки энергетической эффективности воспользуемся принятым в первой главе показателем энергетической эффективности  $\mathcal{E}_P$  (1.10).

На рисунке 2.5 приведены графики функций энергетической эффективности в зависимости от мощности ПЭД, для различных длин и сечений кабельной линии.

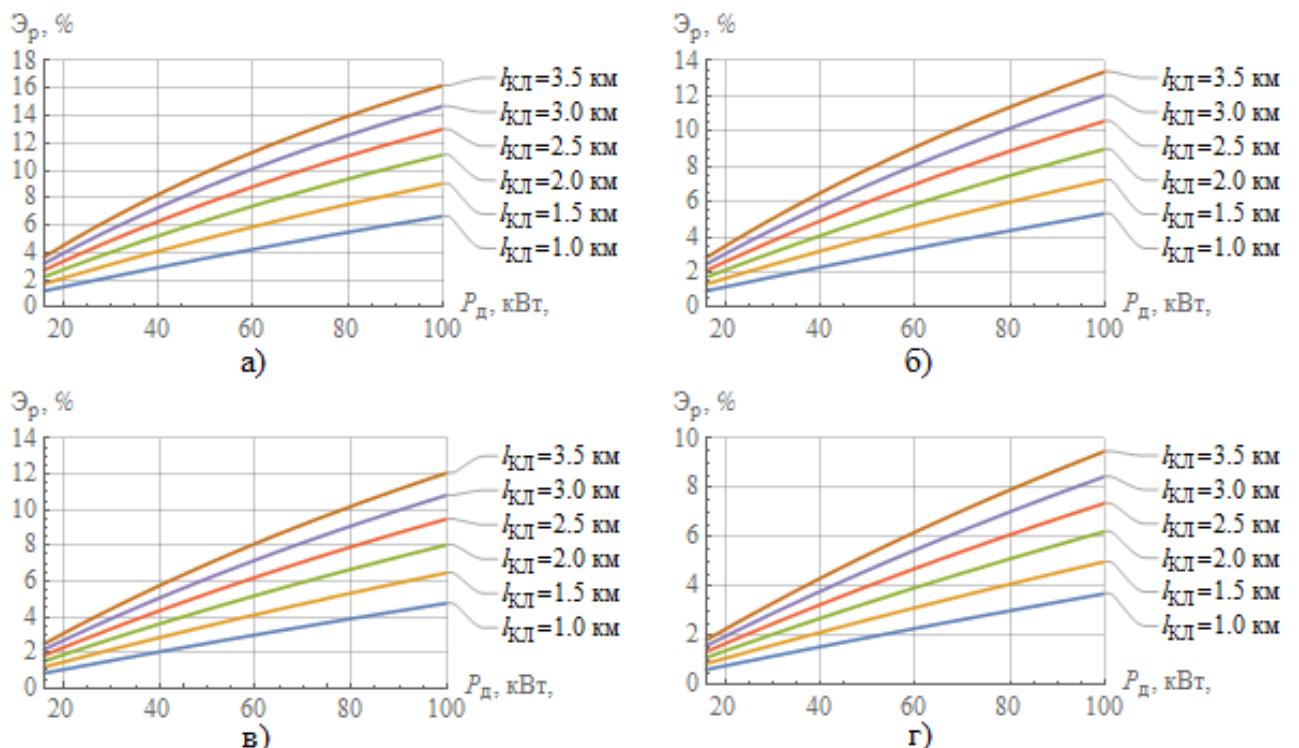


Рисунок 2.5 – Графики функций энергетической эффективности  $\mathcal{E}_P(P_4)$ :

а)  $S_{KL}=16 \text{ mm}^2$ ; б)  $S_{KL}=21,15 \text{ mm}^2$ ; в)  $S_{KL}=25 \text{ mm}^2$ ; г)  $S_{KL}=35 \text{ mm}^2$

Анализ графиков (рис. 2.5) показал, что расчетное значение энергетической эффективности  $\mathcal{E}_P$  при использовании внутрискважинных компенсаторов реактивной мощности варьируется от 0,6 % до 15,8 % в зависимости от мощности погружного электродвигателя, длины и сечения кабельной линии. Например, для УЭЦН, оснащенной погружным электродвигателем мощностью 60 кВт и внутрискважинным компенсатором мощностью 35,4 квар, снижение потерь активной мощности в кабельной линии длиной 2000 м, сечением токопроводящей жилы 16 мм<sup>2</sup>, составило 5,3 кВт, а энергоэффективность составила 7,4 %.

На рисунке 2.6 приведены поверхности функции энергетической эффективности  $\mathcal{E}_P(P_o; \cos\varphi_c)$  в зависимости от мощности погружного асинхронного электродвигателя и требуемого коэффициента мощности сети в точке подключения внутрискважинного компенсатора.

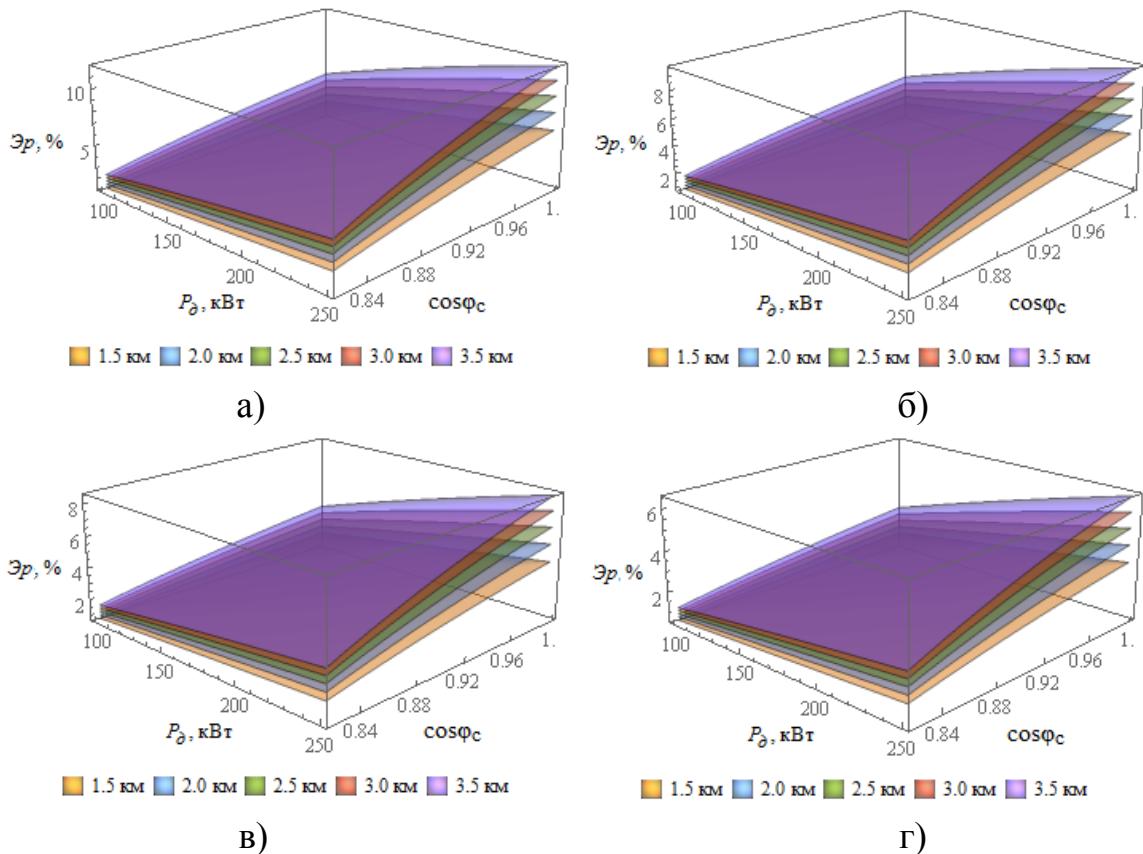


Рисунок 2.6 – Поверхности функции энергетической эффективности  $\mathcal{E}_P(P_o; \cos\varphi_c)$ :  
 а)  $S_{KL}=16 \text{ mm}^2$ ; б)  $S_{KL}=21,15 \text{ mm}^2$ ; в)  $S_{KL}=25 \text{ mm}^2$ ; г)  $S_{KL}=35 \text{ mm}^2$

Установлено, что с увеличением длины питающего кабеля расчетное значение энергетической эффективности возрастает и, наоборот, с увеличением

сечения кабельной линии значение энергетической эффективности снижается при той же мощности ПЭД и длине кабельной линии.

Анализ поверхностей (рис. 2.6) показал, что максимальное значение функции  $\mathcal{E}_P$  достигается при  $\cos\varphi_c=1$  для всех диапазонов изменения мощности погружных асинхронных электродвигателей, длин и сечений кабельных линий. При  $\cos\varphi_c=1$  реактивная мощность внутрискважинного компенсатора составляет  $0,92 \cdot P_{d.nom}$  при принятом коэффициенте мощности ПЭД 0,735.

Например, для УЭЦН, оснащенной погружным электродвигателем мощностью 200 кВт, кабельной линией длиной 2000 м сечением токопроводящей жилы 16  $\text{мм}^2$  и внутрискважинным компенсатором мощностью 184 квар, расчетный показатель энергетической эффективности составил 6,4 %. Расчет экономической эффективности внедрения ВКРМ на нефтедобывающих скважинах приведен в Приложении В. Для расчета были использованы справочные данные [10, 71].

### **2.3 Разработка методики определения напряжения на выходе питающего трансформатора**

Для поддержания заданного напряжения на погружном электродвигателе выбор напряжения отпайки трансформатора следует производить с учетом падения напряжения на обмотках трансформатора и кабельной линии.

Если при подготовке, запуске, выводе на режим и эксплуатации скважин, оборудованных УЭЦН не учитывать тот факт, что использование внутрискважинных компенсаторов приводит к снижению падения напряжения в узлах электротехнического комплекса за счет уменьшения потребляемого тока [44, 81, 96], может произойти ситуация, когда напряжение на погружном электродвигателе будет выше заданного значения. Это может привести к снижению ресурса погружного электрооборудования и нарушению технологии добычи. В связи с этим, исследование влияния внутрискважинного компенсатора на падение напряжения в электротехническом комплексе УЭЦН является важной задачей. Для батарей конденсаторов, являющихся чувствительными к повышению напряжения

[81], в некоторых случаях допускается превышение уровня напряжения на 10 % выше номинального продолжительностью не более 8 часов.

В настоящее время поддержание номинального напряжения на погружном электродвигателе достигается изменением отпайки питающего трансформатора или изменением напряжения на выходе станции управления, оборудованной преобразователем частоты [42].

Напряжение на выходе питающего трансформатора определяется по выражению:

$$U_{TMPIH} = |\dot{U}_{\partial, nom} + \Delta \dot{U}_T + \Delta \dot{U}_{KL}|. \quad (2.28)$$

Падение напряжения в обмотках трансформатора без учета ветви намагничивания, ввиду его незначительного влияния, определяется по выражению:

$$\Delta \dot{U}_T = \frac{\dot{S}}{U_{TMPIH}} \cdot (R_{\partial T} + j \cdot x_{\partial T}) = \dot{I}_c \cdot (R_{\partial T} + j \cdot x_{\partial T}), \quad (2.29)$$

где  $\dot{S}$  – полная мощность, потребляемая УЭЦН, кВт;

$\dot{I}_c$  – ток сети, А.

Падение напряжения в кабельной линии определяется по выражению:

$$\Delta \dot{U}_{KL} = \dot{I}_c \cdot (R_{KL} + j \cdot x_{KL}). \quad (2.30)$$

Ток сети, с учетом принятых допущений, согласно I-му закону Кирхгофа определяется по выражению:

$$\dot{I}_c = \dot{I}_{BKPM} + \dot{I}_{\partial, nom}. \quad (2.31)$$

Согласно схеме замещения (рис. 2.2) напряжение на внутрискважинном компенсаторе равно напряжению на погружном электродвигателе. Токи, потребляемые внутрискважинным компенсатором и погружным электродвигателем, определяются по выражениям:

$$\dot{I}_{BKPM} = \frac{j \cdot Q_{BKPM}}{\sqrt{3} \cdot \dot{U}_{\text{д.ном}}} ; \quad (2.32)$$

$$\dot{I}_{\text{д.ном}} = \frac{\tilde{S}_{\text{д.ном}}}{\sqrt{3} \cdot \dot{U}_{\text{д.ном}}} = \frac{\overline{P_{\text{д.ном}} + j \cdot Q_{\text{д.ном}}}}{\sqrt{3} \cdot \dot{U}_{\text{д.ном}}}, \quad (2.33)$$

где  $\dot{S}$  – комплексно-сопряженная полная мощность, потребляемая погружным электродвигателем.

Преобразуем выражение (2.28) согласно (2.29), (2.30), (2.31), (2.32) и (2.33):

$$U_{TMPIH} = \left| \dot{U}_{\text{д.ном}} + \left( \frac{P_{\text{д.ном}}}{\sqrt{3} \cdot \dot{U}_{\text{д.ном}}} + \frac{j \cdot Q_{BKPM} - j \cdot Q_{\text{д.ном}}}{\sqrt{3} \cdot \dot{U}_{\text{д.ном}}} \right) \cdot (Z_{ekT} + Z_{KL}) \right|, \quad (2.34)$$

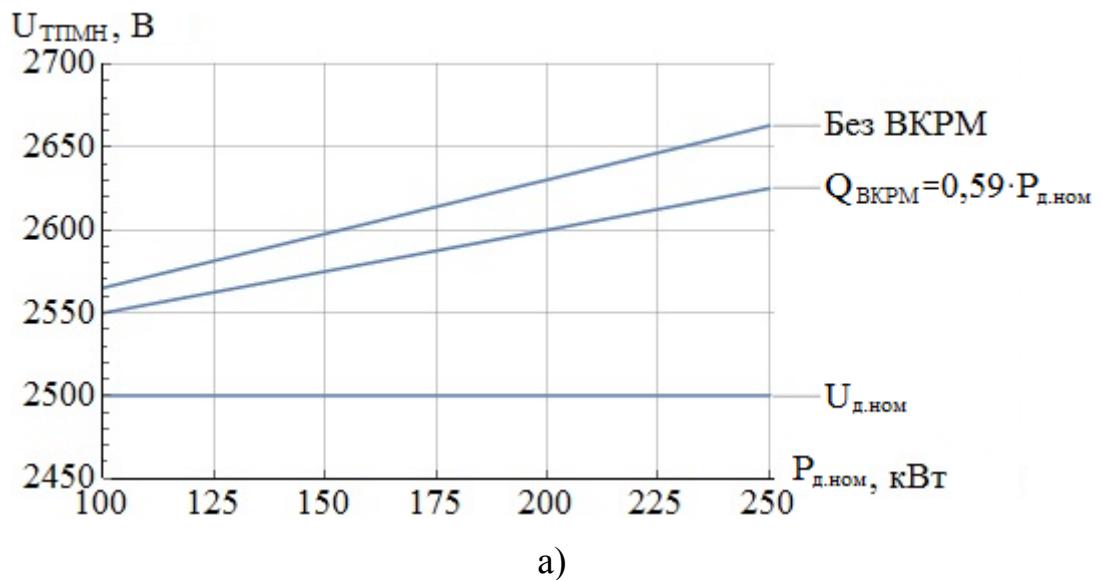
Полученное выражение позволяет определить напряжение на выходе питающего трансформатора с учетом внутрискважинного компенсатора реактивной мощности и подобрать отпайку трансформатора.

Для определения влияния внутрискважинного компенсатора на потери напряжения в узлах электротехнического комплекса, рассмотрим УЭЦН, оснащенную трансформатором марки ТМПН 400/3. Напряжение отпайки трансформатора принимается 2,5 кВ. Расчетное полное эквивалентное сопротивление трансформатора равно:

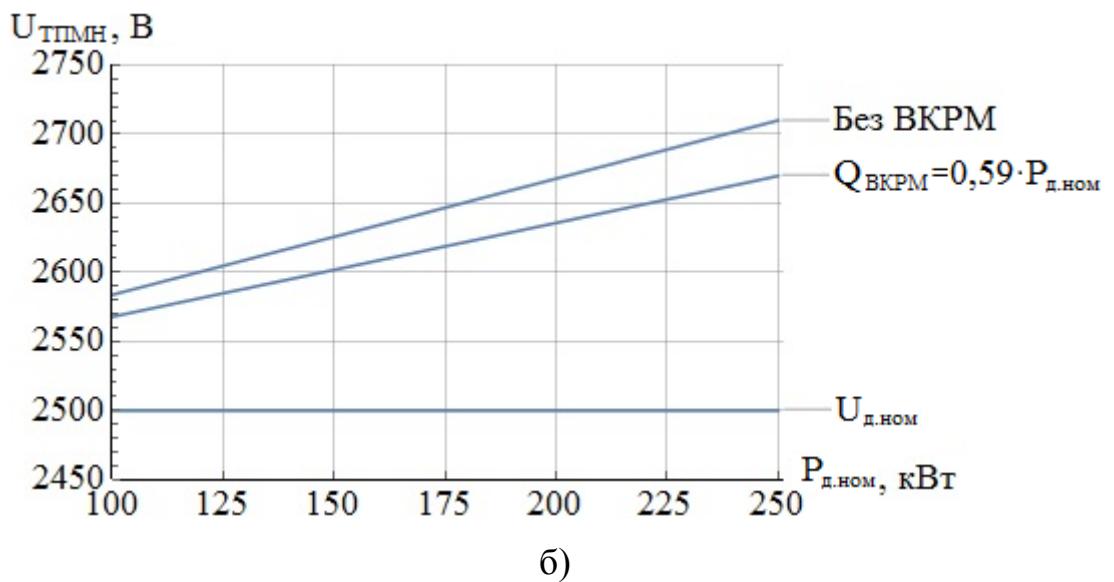
$$Z_{ekT} = 0,23 + j0,859 \text{ (Ом)}$$

Диапазон изменения мощностей погружного электродвигателя принимается от 100 до 250 кВт. Коэффициент мощности ПЭД принимается 0,735. Требуемый коэффициент мощности сети в точке подключения внутрискважинного компенсатора принимается равным 0,95.

Зависимости напряжения на выходе питающего трансформатора с использованием и без использования внутрискважинного компенсатора при различных параметрах кабельной линии приведены на рисунке 2.7 и в Приложении Б. Температура пластовой жидкости для определения сопротивления токопроводящих жил кабельной линии принимается 70 °С.



a)



б)

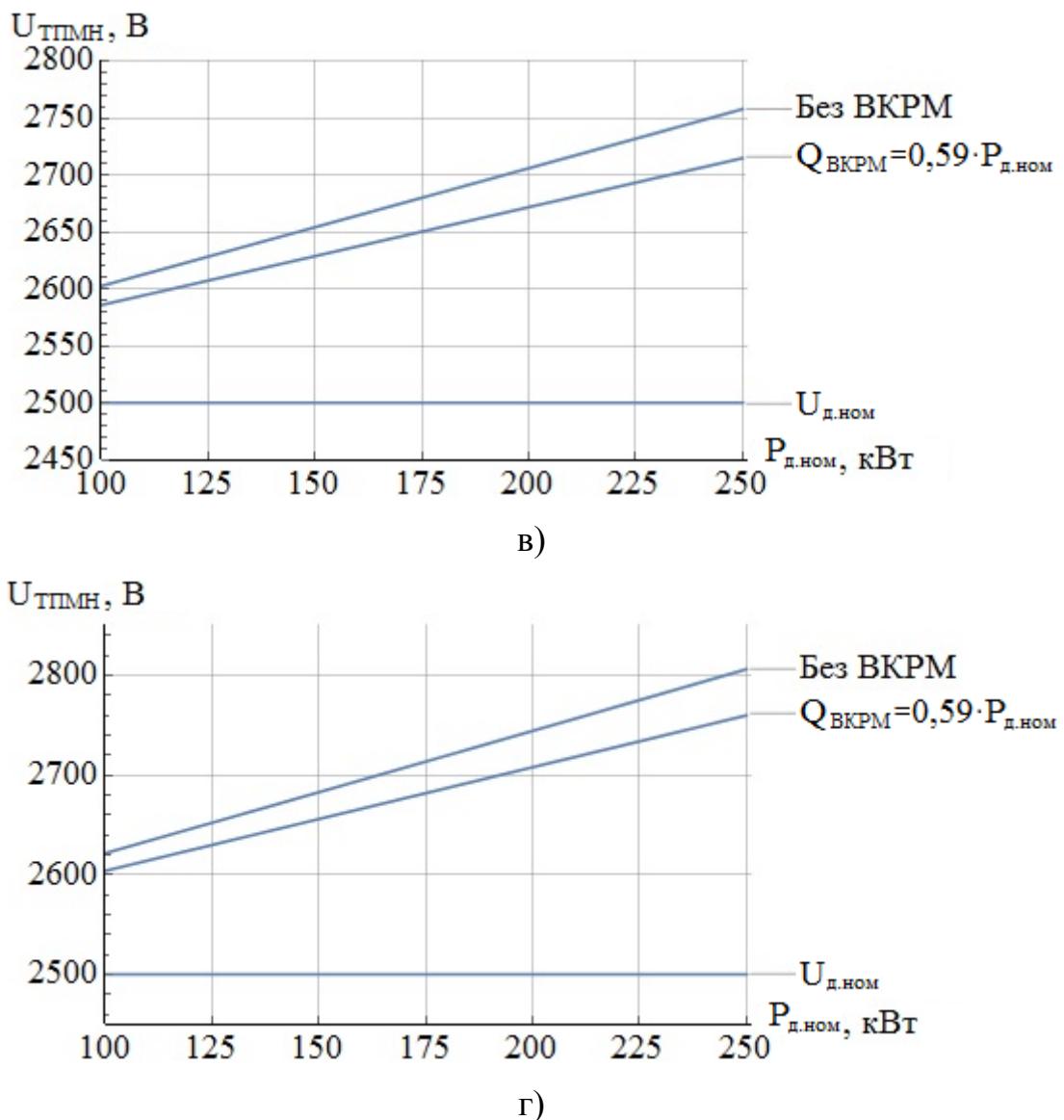


Рисунок 2.7 – Зависимости напряжения на выходе питающего трансформатора до и после компенсации реактивной мощности внутри скважины при  $S_{KL}=16 \text{ мм}^2$ : а)  $l_{KL}=1000 \text{ м}$ ; б)  $l_{KL}=1500 \text{ м}$ ; в)  $l_{KL}=2000 \text{ м}$ ; г)  $l_{KL}=2500 \text{ м}$

Анализ кривых (рис. 2.7) показал, что использование внутристекажинного компенсатора приводит к снижению напряжения на выходе питающего трансформатора во всех диапазонах мощностей погружных электродвигателей, длин и сечений кабельной линии. Например, для УЭЦН, оснащенной погружным электродвигателем мощностью 200 кВт, кабельной линией длиной 1500 м, сечением токопроводящих жил  $16 \text{ мм}^2$ , необходимое напряжение на выходе трансформатора до компенсации реактивной мощности внутри скважины составило 2667 В, после компенсации 2635 В.

Существующие технические регламенты большинства нефтедобывающих компаний по ремонту, обслуживанию и выводу на режим нефтяных скважин с УЭЦН составлены без учета компенсации реактивной мощности внутри скважины. Поэтому разработанная методика имеет практический интерес для инженеров и энергетиков нефтедобывающих и сервисных компаний при корректировке технических регламентов в части определения напряжения на выходе питающего трансформатора.

## 2.4 Выводы по главе 2

1. Разработана схема замещения электротехнического комплекса установки электроцентробежного насоса и на ее основе математическая модель, которая позволяет исследовать энергетические показатели комплекса и определить энергетическую эффективность использования внутрискважинных компенсаторов реактивной мощности.
2. Теоретически подтверждено сформулированное в первой главе утверждение о целесообразности, с энергетической точки зрения, переноса места установки компенсирующего устройства с поверхности непосредственно в скважину.
3. Установлено, что расчетный показатель энергетической эффективности при использовании внутрискважинных компенсаторов реактивной мощности, варьируется от 0,6 % до 15,8 %.
4. Получены зависимости напряжения на выходе питающего трансформатора от мощности ПЭД при компенсации реактивной мощности внутри скважины. Установлено, что при использовании внутрискважинных компенсаторов падение напряжения в узлах ЭТК УЭЦН снижается.

## ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА С ВНУТРИСКВАЖИННЫМ КОМПЕНСАТОРОМ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

### 3.1 Разработка имитационной модели электротехнического комплекса установки электроцентробежного насоса с внутрискважинным компенсатором

В настоящее время со значительным повышением вычислительной мощности электронно-вычислительных машин все чаще для изучения сложных технических и технологических объектов используется имитационное моделирование, позволяющее при минимальных затратах решить проблемы построения, функционирования и модернизации данных объектов.

Существующие на данный момент программные средства для исследования электротехнических систем представлены следующими продуктами: LabVIEW, MATLAB, System View, WorkBench, PDS, Visual System Simulator и другие. Данные программные комплексы имеют в своем составе готовые блоки различных электротехнических устройств. Одним из популярных программных продуктов в научно-техническом сообществе является пакет MATLAB. Входящие в MATLAB расширенные библиотеки Power System Blockset, Control System Toolbox, Filter Design Toolbox и т.д., позволяют моделировать с достаточной степенью точности процессы, проходящие в электротехнических устройствах, а также разрабатывать гибкие системы управления [19, 84].

В разделе 2.6 установлено, что наименьшее энергопотребление ЭТК УЭЦН достигается при подключении компенсирующего устройства непосредственно в скважине. На рисунке 3.1 приведена принятая для исследования схема электроснабжения УЭЦН с внутрискважинным компенсатором реактивной мощности.

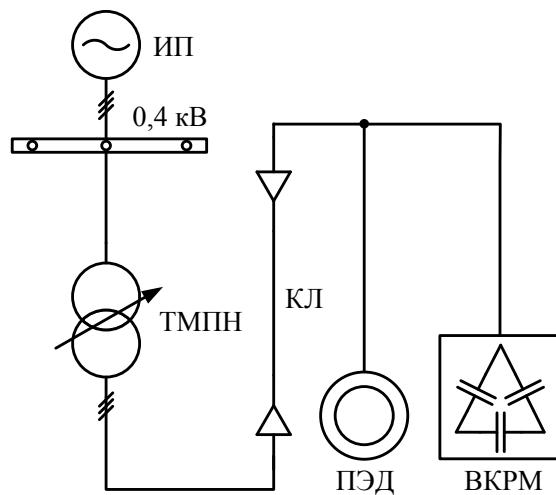


Рисунок 3.1 – Принятая однолинейная схема электроснабжения УЭЦН

Для построения имитационной модели исследуемого ЭТК УЭЦН с внутристекажинным компенсатором реактивной мощности воспользуемся готовыми блоками электротехнических устройств, входящих в библиотеку SimPowerSystem: three-phase programmable voltage source (трехфазный программируемый источник напряжения); three-phase transformer (two windings) (трехфазный двухобмоточный трансформатор); three-phase PI section line (линия с сосредоточенными параметрами); asynchronous machines squirrel cage (асинхронная машина с короткозамкнутым ротором) и three-Phase Series RLC Load (трехфазная последовательная RLC–нагрузка). Для измерения мгновенных значений токов и напряжений участков цепи используем блок three-phase U-I measurement (трехфазный измеритель тока и напряжения сети) [84].

Рассмотрим установку электроцентробежного насоса, оснащенную погружным электродвигателем ПЭД-Я 63-117 М5В5, мощностью 63 кВт. Питание ПЭД осуществляется от трансформатора мощностью 100 кВА, серии ТМПН, по кабельной линии длиной 2000 м.

Начальные условия асинхронной машины могут быть определены по методике, изложенной в [77, 95], или при помощи блока powergui. Исходными данными являются: номинальная мощность  $P_{d,nom}$ , Вт; номинальное линейное напряжение  $U_{d,nom}$ , В; частота на выходе источника питания  $f_{ИП}$ , Гц; номинальная частота вращения вала  $n_{nom}$  об/мин; число пар полюсов  $p$ ; номинальный

коэффициент полезного действия  $\eta_{\text{ном}}$ , о.е.; номинальный коэффициент мощности  $\cos\varphi_{\text{д.ном}}$ , о.е.; номинальный ток статора  $I_{\text{д.ном}}$ , А; номинальное скольжение  $s_{\text{ном}}$ , %; кратность пускового тока  $k_I$ , о.е.; кратность пускового момента  $m_H$ , о.е.; кратность максимального момента  $m_{\text{max}}$ , о.е.; момент инерции  $J$ , кг·м<sup>2</sup>.

Исходные данные и рассчитанные параметры в абсолютных и относительных единицах погружного электродвигателя ПЭД-Я 63-117 М5В5 приведены в таблице 3.1 и таблице 3.3 соответственно [37].

Таблица 3.1

Технические характеристики погружного электродвигателя  
ПЭД-Я 63-117 М5В5

Характеристика	Значение
Номинальное напряжение $U_{\text{д.ном}}$ , В	1040
Номинальная мощность на валу $P_{\text{д.ном}}$ , кВт	63
Номинальная частота вращения $n_{\text{ном}}$ , об/мин	2910
Номинальный КПД $\eta_{\text{ном}}$ , %	84,5
Номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi_{\text{д.ном}}$	0,84
Номинальный ток $I_{\text{д.ном}}$ , А	51
Номинальный момент $M_{\text{д.ном}}$ , Н·м	212
Кратность пускового тока $k_I$	5,1
Кратность пускового момента $m_H$	1,5
Кратность максимального момента $m_{\text{max}}$	2,3
Момент инерции $J$ , кг·м <sup>2</sup>	0,46
Номинальное скольжение $s_{\text{ном}}$ , %	3,0
Критическое скольжение $s_{kp}$ , %	23,8
Сопротивление обмоток статора $R_{ld}$ при 84 °C, Ом	1,35

Переход к относительным единицам осуществляется по выражению:

$$Y_{\delta}^* = \frac{Y}{Y_{\delta}}, \quad (3.1)$$

где  $Y$  – значение физической величины в абсолютных единицах;

$Y_{\delta}$  – базисное значение физической величины, выраженное в той же системе единиц и принятое в качестве единицы измерения величины  $Y$  в системе относительных единиц.

Выражения для определения базисных величин и их значения приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2

## Базисные единицы

Параметр	Расчетное выражение	Значение	Единицы измерения
Мощность	$S_{\delta} = \frac{P_{\delta, \text{ном}}}{m} = \frac{88757}{3}$	29586	ВА
Напряжение	$U_{\delta} = \frac{U_{\delta, \text{ном}}}{\sqrt{3}} = \frac{1040}{\sqrt{3}}$	600,4	В
Ток	$I_{\delta} = \frac{S_{\delta}}{U_{\delta}} = \frac{29586}{600,4}$	49,3	А
Частота	$f_{\delta} = f_{\text{ИП}}$	50	Гц
Полное сопротивление	$Z_{\delta} = \frac{U_{\delta}}{I_{\delta}} = \frac{600,4}{49,3}$	12,8	Ом
Активное сопротивление	$R_{\delta} = \frac{U_{\delta}}{I_{\delta}} = \frac{600,4}{49,3}$	12,8	Ом
Индуктивность	$L_{\delta} = \frac{Z_{\delta}}{2 \cdot \pi \cdot f_{\delta}} = \frac{12,8}{2 \cdot 3,14 \cdot 50}$	0,039	Гн
Угловая частота вращения магнитного поля статора	$\Omega_{\delta} = \Omega_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 50}{1}$	314,2	рад/с
Момент	$M_{\delta} = \frac{S_{\delta} \cdot m}{\Omega_{\delta}} = \frac{29586 \cdot 3}{314,2}$	282,5	Н·м

Номинальная полная мощность ПЭД потребляемая из сети:

$$S_{\delta, \text{ном}} = \frac{P_{\delta, \text{ном}}}{\cos \varphi_{\delta, \text{ном}} \cdot \eta_{\text{ном}}} = \frac{63000}{0,84 \cdot 0,845} = 88757 \text{ ВА.}$$

Таблица 3.3

Параметры схемы замещения погружного электродвигателя в абсолютных и относительных единицах

Параметр	В физических единицах, Ом	В относительных единицах, о.е.
Активное сопротивление обмотки статора:	$R_{1\delta} = 1,35$	$R_{1\delta}^* = \frac{R_{1\delta}}{Z_{\delta}} = \frac{1,35}{12,8} = 0,105$

Индуктивное сопротивление обмотки статора:	$X_{1\delta} = 0,995$	$X_{1\delta}^* = \frac{X_{1\delta}}{Z_6} = \frac{0,995}{12,8} = 0,077$
Приведенное активное сопротивление обмотки ротора:	$R'_{2\delta} = 0,676$	$R_{2\delta}^* = \frac{R'_{2\delta}}{Z_6} = \frac{0,676}{12,8} = 0,053$
Приведенное индуктивное сопротивление обмотки ротора:	$X'_{2\delta} = 0,995$	$X_{2\delta}^* = \frac{X'_{2\delta}}{Z_6} = \frac{0,995}{12,8} = 0,077$
Индуктивное сопротивление контура намагничивания:	$X_{m\delta} = 21,05$	$X_{m\delta}^* = \frac{X_{m\delta}}{Z_6} = \frac{21,05}{12,8} = 1,64$

Для проверки адекватности получаемых данных на имитационной модели о режимах работы ПЭД проведена верификация рабочих характеристик погружного электродвигателя. На рисунке 3.2 приведены рабочие характеристики электродвигателя ПЭД-Я 63-117 М5В53, полученные в ходе приемо-сдаточных испытаний согласно протоколу № 29988 от 31.08.2015 г. ООО «Алмаз».

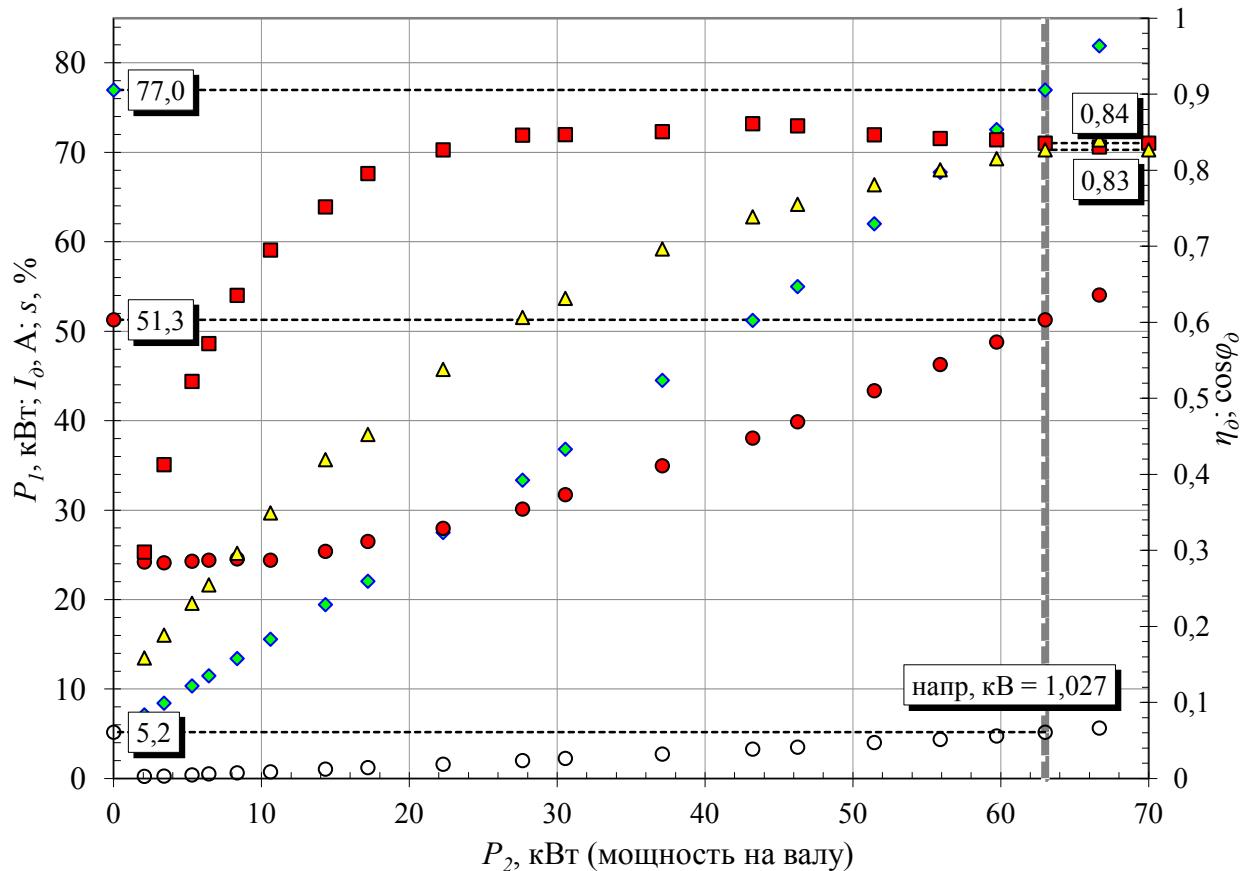


Рисунок 3.2 – Рабочие характеристики погружного электродвигателя  
ПЭД-Я 63-117 М5В5 (экспериментальные)

Имитационная модель ПЭД приведена на рисунке 3.3. Сравнение экспериментальных рабочих характеристик (данные – 1) с полученными на имитационной модели (данные – 2) приведено в таблице 3.4. Исследование проводилось в установившемся режиме работы ПЭД при приложении статического момента на уровне 40 %, 60 %, 80 %, 100 %, 120 % от номинального.

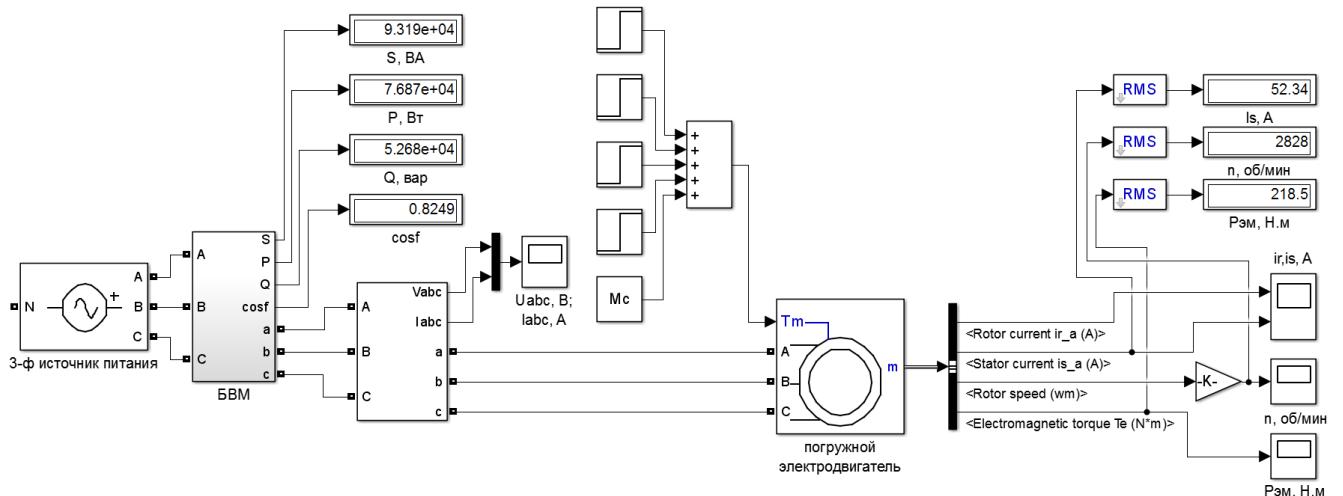


Рисунок 3.3 – Имитационная модель ПЭД

Таблица 3.4

Сравнение экспериментальных и полученных характеристик

Мс, %	Частота вращения, об/мин			Ток, А			Потребляемая активная мощность, кВт			Коэффициент мощности ПЭД		
	1	2	$\Delta, \%$	1	2	$\Delta, \%$	1	2	$\Delta, \%$	1	2	$\Delta, \%$
40	2943	2936	0,1	30,2	31,9	-5,3	31,9	31,8	0,1	0,56	0,55	1,8
60	2911	2903	0,3	36,5	37,4	-2,4	46,4	46,3	0,2	0,70	0,69	1,4
80	2882	2869	0,4	44,1	44,2	-0,2	61,8	61,3	0,8	0,77	0,77	0,3
100	2844	2827	0,6	53,0	52,4	1,1	77,2	76,9	0,4	0,82	0,82	0,68
120	2811	2788	0,8	61,7	61,0	1,2	93,1	93,3	-0,2	0,85	0,85	-0,2

Анализ полученных данных (таблица 3.4) показал, что разработанная имитационная модель погружного электродвигателя ПЭД-Я 63-117 М5В5 с достаточной степенью точности воспроизводит характеристики электродвигателя в установившемся режиме. В номинальном режиме различие между экспериментальными данными и расчетными для тока составляет 1,1 %, для потребляемой активной мощности – 0,4 %. Максимальная погрешность с учетом допустимых погрешностей измерений на испытательных стендах – не более 0,5 %, соответствующая области малых нагрузок, составляет для тока минус 5,8 % и уменьшается с увеличением нагрузки до 1,6 %.

Рабочие характеристики погружного электродвигателя ПЭД-Я 63-117 М5В5 приведены на рисунке 3.4.

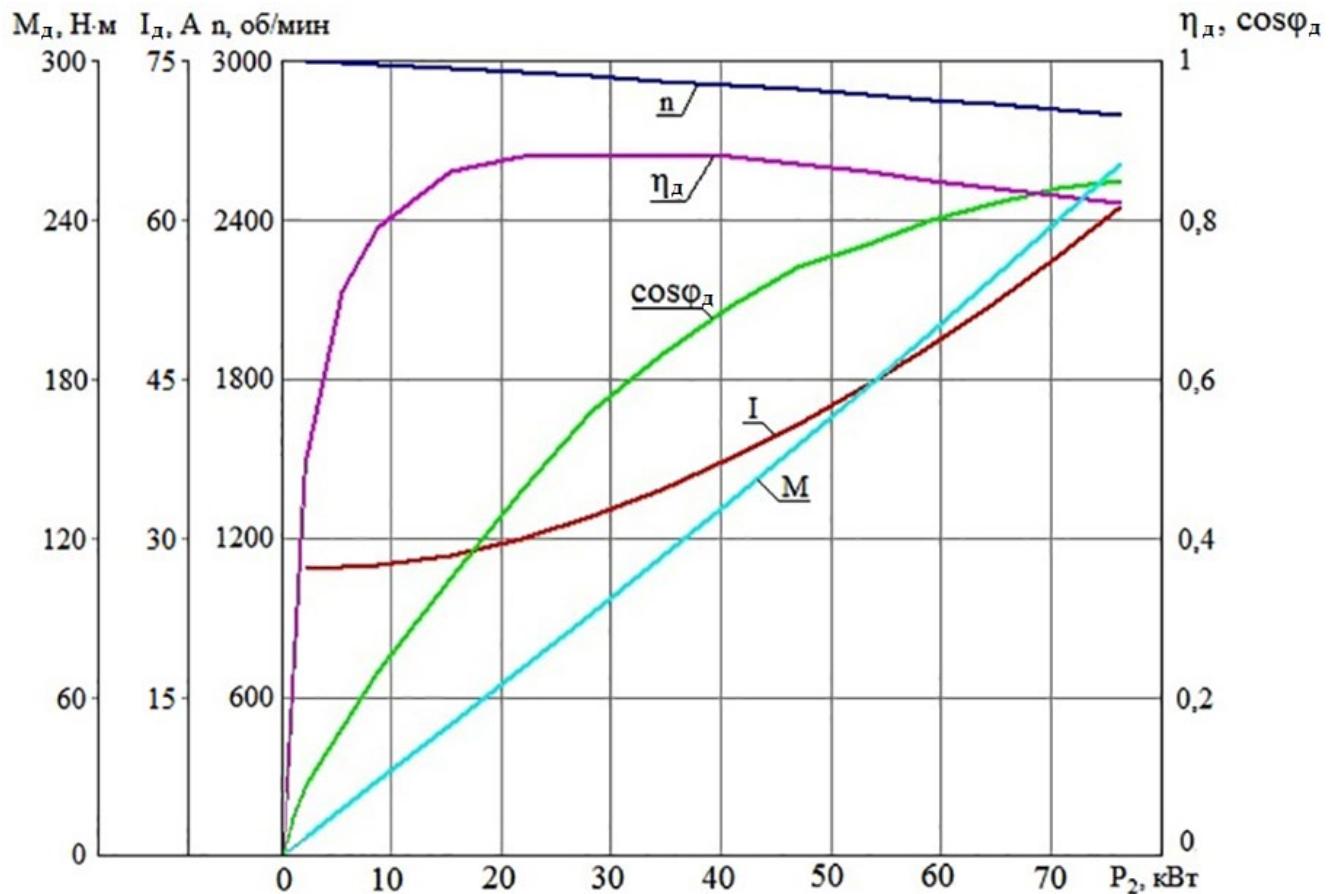


Рисунок 3.4 – Рабочие характеристики погружного электродвигателя ПЭД-Я 63-117 М5В5 (имитационные)

В ходе верификации рабочих характеристик (рис. 3.2 и 3.4) установлено, что полученные характеристики с достаточной степенью точности отображают физические процессы в исследуемом погружном электродвигателе, следовательно, разработанная имитационная модель адекватно отображает электромеханические процессы ПЭД.

В основу блока three-phase transformer (two windings) (трехфазного двухобмоточного трансформатора) положена Т-образная схема замещения, которая построена на основе трех однофазных трансформаторов. В модели учтена нелинейность характеристики намагничивания материала сердечника. Вводимые данные записываются в относительных единицах. При этом за базисные величины принимаются номинальные значения действующего номинального

напряжения  $U_{T,nom}$ , В; номинальной мощности  $S_{T,nom}$ , ВА; частоты на выходе источника питания  $f_{ill}$ , Гц, которые могут быть определены по каталожным данным.

Паспортные данные и рассчитанные параметры трансформатора марки ТМПН-100/3 приведены в таблицах 3.5, 3.6 соответственно.

Таблица 3.5

### Основные технические характеристики трансформатора ТМПН-100/3

Мощность, кВА	Сочетание напряжений, кВ		Схема и группа соединения обмоток	Потери, кВт		Напряжение к.з., %	Ток холостого хода, %
	ВН	СН		холостого хода	короткого замыкания		
100	1,25	0,4	Ун/У-0	0,29	1,97	5,5	1,9

Таблица 3.6

### Параметры трансформатора в относительных единицах

Активные сопротивления обмоток $R_{1T} = R_{2T}$ , о.е.	Индуктивность первичных и вторичных обмоток $L_{1T} = L_{2T}$ , о.е.	Активное сопротивление цепи намагничивания $R_{mT}$ , о.е.	Индуктивность, учитывающая реактивные потери в сердечнике $L_{mT}$ , о.е.
0,00985	0,0255	337	52

Блок three-phase PI section line (линия с сосредоточенными параметрами) позволяет имитировать кабельную линию с учетом межфазной емкости. Модель включает в себя одну секцию. Для создания модели из нескольких секций следует последовательно включить необходимое количество блоков. Параметры кабельной линии исследуемого электротехнического комплекса приведены в таблице 2.2.

Параметры внутрискважинного компенсатора реактивной мощности приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7

### Технические характеристики внутрискважинного компенсатора

#### реактивной мощности

Характеристика	Значение
Номинальное напряжение ВКРМ $U_{BKRM.nom}$ , В (50 Гц)	1040
Номинальная мощность компенсирующего устройства $Q_{BKRM.nom}$ , квар	30,0
Номинальный рабочий ток $I_{BKRM.nom}$ , А	16,7

Разработанная в среде MATLAB Simulink имитационная модель электротехнического комплекса установки электроцентробежного насоса с внутристекажинным компенсатором реактивной мощности приведена на рисунке 3.8.

Для вычисления полной, активной и реактивной мощностей и коэффициента мощности разработан блок вычисления мощности, который включает блоки Power (блок вычисления активной и реактивной мощностей по значениям синусоидальных тока и напряжения за один период) и блоки математических операций библиотеки Math.

Для наблюдения за изменениями исследуемых сигналов в функции времени в процессе моделирования использован блок Scope (осциллограф). Для отображения значение исследуемого сигнала в виде числа использован блок Display (цифровой дисплей).

В качестве нагрузки погружного асинхронного электродвигателя выступает электроцентробежный насос, механическая характеристика которого описывается выражением [21]:

$$M_c = M_0 + (M_{h.nom} - M_0) \cdot \frac{\omega}{\omega_{h.nom}} \cdot \sqrt{\frac{H_0 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_h}\right)^2 - H_c}{H_0 - H_c}}, \quad (3.2)$$

где  $M_{h.nom}$  – момент сопротивления при номинальной нагрузке;

$M_0$  – пусковой момент в режиме холостого хода;

$\omega$  – угловая скорость вращения вала электроцентробежного насоса;

$\omega_{h.nom}$  – номинальная угловая скорость вращения вала электроцентробежного насоса;

$H_0$  – напор УЭЦН при нулевой подаче;

$H_c$  – статический напор.

В имитационной модели ЭТК УЭЦН функцию электроцентробежного насоса выполняет блок Fcn (блок задания функции).

Исходя из условия получения постоянной перегрузочной способности при вентиляторной нагрузке, изменения частоты и напряжения источника питания следует задавать по закону регулирования  $U_{1\Phi}/f_1^2 = \text{const}$  в диапазоне от 35 Гц до 50 Гц. Тогда напряжение источника питания определяется по выражению:

$$U_{ИП} = 380 \cdot \left( \frac{f}{f_{ИП}} \right)^2. \quad (3.3)$$

где  $U_{ИП}$  – напряжение на выходе СУ, В;

$f_{ИП}$  – номинальная частота питающей сети, Гц;

$f$  – текущая частота напряжения питания Гц.

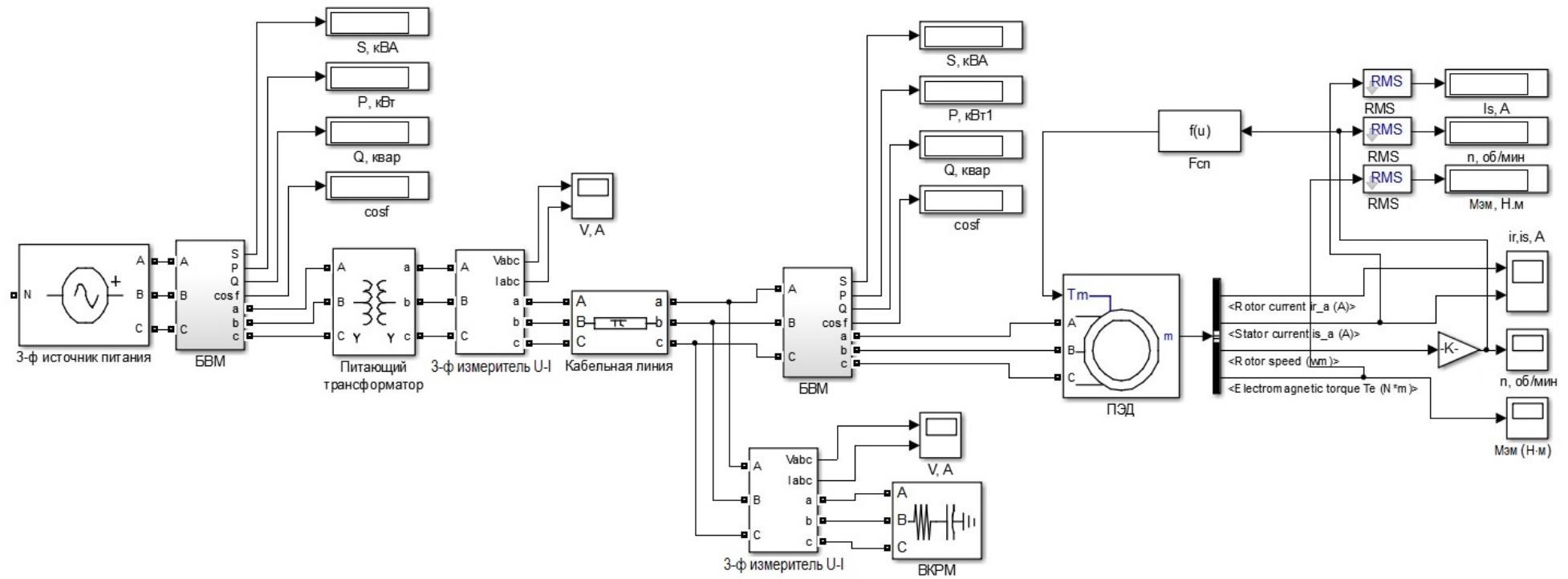


Рисунок 3.8 – Имитационная модель ЭТК УЭЦН с внутрискважинным компенсатором реактивной мощности

### **3.2 Исследование энергетических и силовых показателей электротехнического комплекса УЭЦН при изменении частоты напряжения питания**

Известно, что изменение частоты и напряжения источника питания с помощью преобразователя частоты в составе станции управления, оказывает влияние на энергетические и силовые показатели электротехнических комплексов: потребляемые активная и реактивная мощности, коэффициент мощности, коэффициент полезного действия, потребляемые токи и т.д.

При эксплуатации УЭЦН с помощью частотно-регулируемого привода для достижения максимального дебита скважины и сохранения работоспособности погружного оборудования необходимо учитывать ограничивающие факторы как при снижении частоты напряжения питания ниже номинальной, так и при ее повышении. Например, повышение частоты приводит к кубическому росту мощности потребляемой электроцентробежным насосом, в то время как мощность погружного электродвигателя изменяется линейно. Возможна ситуация, когда мощности на валу ПЭД будет недостаточно и станция управления выдаст сигнал на остановку погружного электродвигателя из-за превышения допустимой токовой нагрузки. При понижении частоты может произойти обратная ситуация, когда защита может выдать сигнал на остановку ПЭД из-за снижения тока меньше минимально-допустимого значения. Данное обстоятельство связано с тем, что напор насоса зависит от квадрата частоты вращения рабочего колеса и может произойти момент времени, когда энергии насоса будет недостаточно, чтобы поднять столб жидкости с динамического уровня.

Поэтому минимально-допустимая частота напряжения питания, рекомендуемая заводами-изготовителями для погружного оборудования, составляет 35 Гц. Максимально-допустимая частота напряжения питания согласно техническим регламентам эксплуатации скважин, оборудованных УЭЦН, для отечественного погружного оборудования – 60 Гц, для импортного – 70 Гц.

При работе УЭЦН на частоте выше номинальной, если это задано технологическим процессом, погружной электродвигатель должен быть выбран таким образом, чтобы выдаваемая им мощность на частоте регулирования не превышала номинальную мощность электродвигателя.

В тоже время реактивная мощность внутрискважинного компенсатора зависит от частоты и величины подводимого напряжения. В зависимости от выбранного закона регулирования на частотах выше частоты резонанса, может произойти явление перекомпенсации реактивной мощности и положительный экономический эффект нивелируется. Также может произойти перегрузка по току погружного электродвигателя и внутрискважинного компенсатора в результате неправильно выбранного допустимого диапазона регулирования.

На рисунке 3.9 представлены кривые потребляемой реактивной мощности погружным электродвигателем  $Q^*_{\delta}$ , внутрискважинным компенсатором  $Q^*_{BKPM}$  и электротехническим комплексом  $Q^*_{ЭТК}$  в зависимости от частоты напряжения питания. Зависимости активной мощности, потребляемой электротехническим комплексом УЭЦН, погружным электродвигателем, а также зависимости коэффициента мощности  $\cos\varphi_{ЭТК}$  и коэффициента полезного действия  $\eta_{ЭТК}$  от частоты приведены на рисунке 3.10. Все измеренные энергетические показатели выражены в относительных единицах и приведены к номинальным параметрам ПЭД при номинальной частоте напряжения питания 50 Гц.

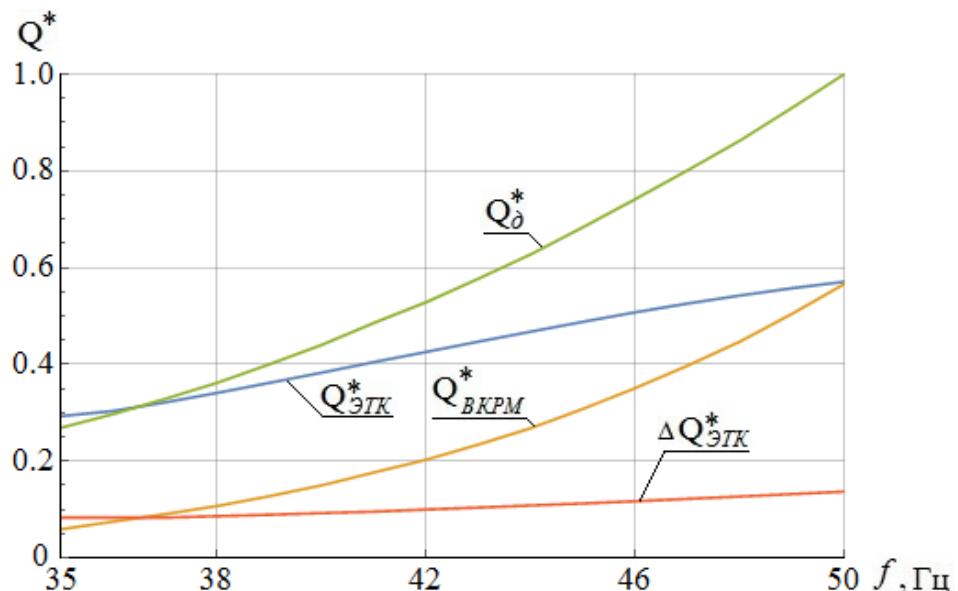


Рисунок 3.9 – Кривые зависимостей реактивной мощности  $Q^*$  от частоты

Анализ кривых (рис. 3.9) показал, что при изменении частоты от 35 Гц до 50 Гц реактивная мощность ПЭД увеличилась с 0,27 о.е. до 1,0 о.е., а реактивная мощность ВКРМ с 0,06 о.е. до 0,57 о.е. В тоже время, реактивная мощность, потребляемая ЭТК УЭЦН, увеличилась с 0,29 о.е. до 0,57 о.е.

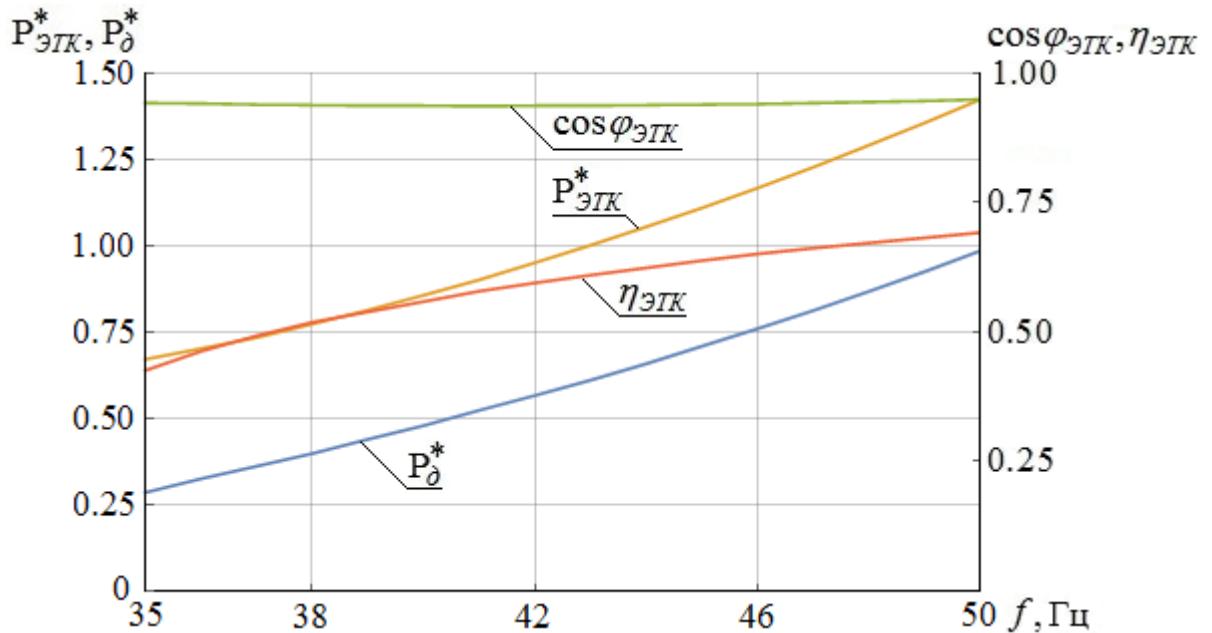


Рисунок 3.10 – Кривые зависимостей активной мощности  $P^*_{\text{ЭТК}}$ ,  $P^*_{\delta}$ , коэффициента мощности  $\cos\varphi_{\text{ЭТК}}$  и коэффициента полезного действия  $\eta_{\text{ЭТК}}$  от частоты

Анализ кривых (рис. 3.10) показал, что коэффициент полезного действия ЭТК УЭЦН на частоте 35 Гц составляет 0,43 и возрастает до 0,69 на частоте 50 Гц. Коэффициент мощности электротехнического комплекса УЭЦН на интервале от 35 Гц до 50 Гц варьируется от 0,94 до 0,95, что считается рациональным в системах электроснабжения.

На рисунке 3.11 приведены зависимости потребляемого тока погружным электродвигателем и внутристекажинным компенсатором в зависимости от частоты напряжения питания, выраженные в относительных единицах относительно своих номинальных параметров, при номинальной частоте напряжения питания 50 Гц.

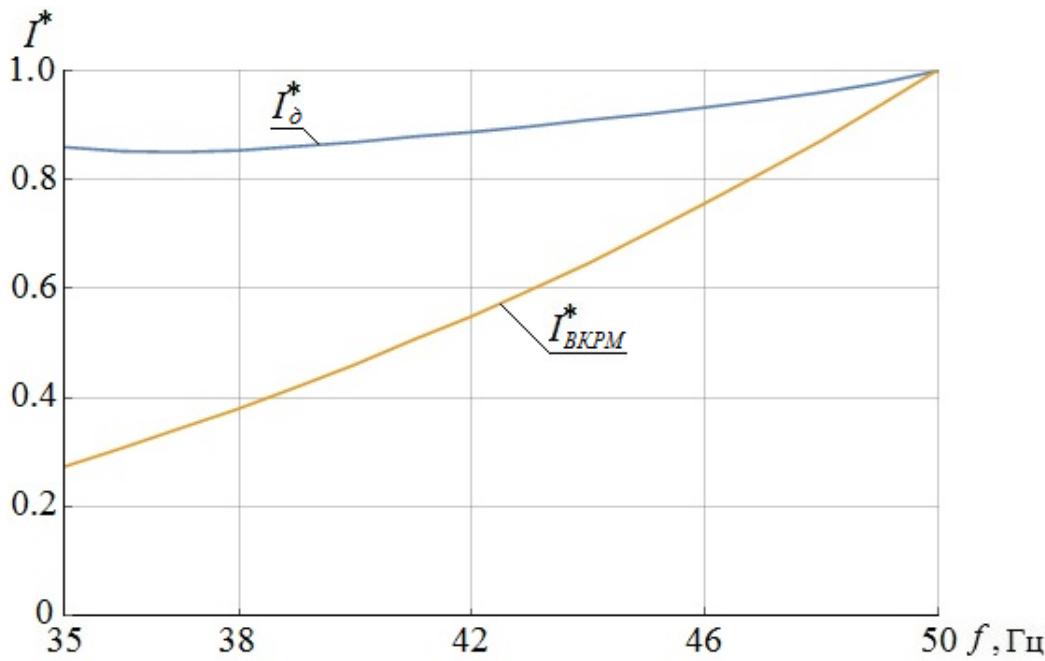


Рисунок 3.11 – Кривые зависимостей тока ПЭД и ВКРМ от частоты

В ходе анализа силовых показателей установлено, что при изменении частоты напряжения питания в выбранном диапазоне регулирования, ток ПЭД изменяется с 0,86 о.е. до 1,0 о.е., а ток ВКРМ от 0,27 о.е. до 1,0 о.е.

При работе УЭЦН от станции управления допускается превышение потребляемого тока ПЭД на 10 % относительно номинального. Согласно [17] для конденсаторов при работе в продолжительном режиме допускается превышение тока не более 30 % (включая гармоники) относительно номинального. Учитывая ограничивающие факторы, проведено исследование по определению максимальной частоты регулирования напряжения питания, исследуемого электротехнического комплекса УЭЦН. Максимальная частота регулирования напряжения питания составляет 53 Гц.

### 3.3 Разработка математической модели электротехнического комплекса УЭЦН для исследования резонансных явлений

Основным негативным эффектом при повсеместном внедрении преобразователей частоты в составе СУ УЭЦН является генерирование в сеть высших гармонических составляющих токов и напряжений. Гармонический резонанс на частоте одной из гармоник негативно сказывается на работе

электрооборудования. Имеет место увеличение токов и напряжений на отдельных элементах электрической сети, снижается эффективность передачи и использования электроэнергии, ускоряются процессы старения изоляции электрооборудования, происходит перегрузка токами высших гармоник конденсаторов и, как следствие, преждевременный выход их из строя [81].

В работах [32, 33] приведены результаты экспериментальных исследований гармонического состава тока и напряжения в различных точках электротехнического комплекса УЭЦН, даны рекомендации по повышению качества электроэнергии.

Целью данного раздела является исследование резонансных явлений в цепи «СУ–Т–КЛ–ВКРМ–ПЭД» на частоте одной из гармоник (3-я, 5-я, 7-я, 11-я, 13-я, 17-я, 23-я и 25-я), с учетом регулирования частоты напряжения питания погружного электродвигателя в диапазоне от 35 Гц до 60 Гц, с шагом 0,1 Гц.

Для математического описания сложных электротехнических систем, к которым относится ЭТК УЭЦН, целесообразно использовать метод узловых потенциалов. Данный метод позволяет определить токи и напряжения в рассматриваемых ветвях элементов комплекса через известные потенциалы узлов и проводимости соответствующих ветвей.

При исследовании гармонического резонанса в исследуемом электротехническом комплексе УЭЦН необходимо учитывать параметры источника питания. Учтем влияние электроэнергетической системы через электродвижущую силу (ЭДС) источника питания  $E$ , входные активное  $r_{bh}$  и реактивное  $x_{bh}$  сопротивления. Разработанная схема замещения электротехнического комплекса УЭЦН приведена на рисунке 3.12.

В матричном виде система уравнений для метода узловых потенциалов выглядит следующим образом:

$$AYA^tU_0 = -A(J+YE), \quad (3.4)$$

где  $A, A^t$  - матрица узловых проводимостей ветвей размера  $(q-1) \times p$  ( $q$  - количество узлов,  $p$  - количество ветвей) и транспонированная матрица узловых проводимостей ветвей при  $\varphi_0 = 0$ ;  
 $Y$  - диагональная матрица проводимостей ветвей размера  $p \times p$ ;  
 $U_0$  - матрица-столбец узловых потенциалов размером  $(q-1) \times 1$ ;  
 $J$  - матрица-столбец источников тока размером  $p \times 1$ ;  
 $E$  - матрица-столбец источников ЭДС размером  $p \times 1$ .

Составим узловую матрицу согласно разработанной схеме замещения:

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Определим транспонированную матрицу узловых проводимостей  $A^t$ , диагональную матрицу проводимостей ветвей  $Y$ , матрицу-столбец узловых токов тока  $J$ , матрицу-столбец источников электродвижущей силы  $E$ , матрицу-столбец узловых потенциалов  $U_0$ :

$$A^t = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, J = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, U_0 = \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \varphi_4 \end{bmatrix},$$

$$Y = \begin{bmatrix} \dot{Y}_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{Y}_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{Y}_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dot{Y}_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{Y}_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{Y}_6 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{Y}_7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{Y}_8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{Y}_9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{Y}_{10} \end{bmatrix},$$

где Е – ЭДС источника питания;

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$  – потенциалы соответствующих ветвей;

$\dot{Y}_1, \dot{Y}_2, \dot{Y}_3, \dot{Y}_4, \dot{Y}_5, \dot{Y}_6, \dot{Y}_7, \dot{Y}_8, \dot{Y}_9, \dot{Y}_{10}$  – комплексные проводимости соответствующих ветвей определяются как:

$$\begin{aligned} \dot{Y}_1 &= \frac{1}{r_{\text{бн}} + j \cdot x_{\text{бн}} + R_{1T} + j \cdot \omega_c \cdot L_{1T}}, & \dot{Y}_2 &= \frac{1}{R'_{2T} + j \cdot \omega_c \cdot L'_{2T}}, & \dot{Y}_3 &= \frac{1}{R_{mT} + j \cdot \omega_c \cdot L_{mT}}, \\ \dot{Y}_4 &= \dot{Y}_6 = \frac{j \cdot \omega_c \cdot C_{KL}}{2}, & \dot{Y}_5 &= \frac{1}{R_{KL} + j \cdot \omega_c \cdot L_{KL}}, & \dot{Y}_7 &= \left( \frac{1}{j \cdot \omega_c \cdot C_{BKPM}} \right)^{-1}, \\ \dot{Y}_8 &= \frac{1}{R_{1\partial} + j \cdot \omega_c \cdot L_{1\partial}}, & \dot{Y}_9 &= \frac{1}{R'_{2\partial} + R'_{2\partial} \cdot \frac{1-s}{s} + j \cdot \omega_c \cdot L'_{2\partial}}, & \dot{Y}_{10} &= \frac{1}{R_{m\partial} + j \cdot \omega_c \cdot L_{m\partial}}. \end{aligned}$$

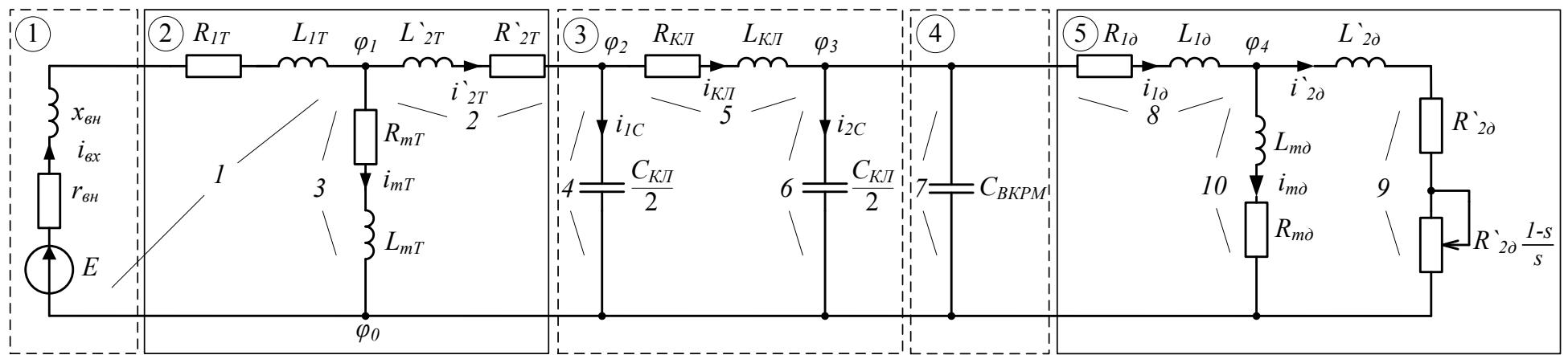


Рисунок 3.12 – Схема замещения ЭТК УЭЦН для исследования резонансных явлений

где 1 – источник питания, 2 – питающий трансформатор; 3 – кабельная линия; 4 – внутрискважинный компенсатор реактивной мощности; 5 – погружной асинхронный электродвигатель;  $E$  – электродвижущая сила источника питания;  $i$ ,  $\varphi$  – ток и потенциал соответствующих ветвей и узлов;  $R$ ,  $r$ ,  $x$ ,  $L$ ,  $C$  – активные и реактивные сопротивления, индуктивность и емкость соответствующих элементов,  $s$  – скольжение ПЭД.

Перемножаем матрицы в соответствии с матричным уравнением (3.4):

$$\begin{aligned} \mathbf{AY} &= \begin{bmatrix} -\dot{Y}_1 & \dot{Y}_2 & \dot{Y}_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\dot{Y}_2 & 0 & \dot{Y}_4 & \dot{Y}_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\dot{Y}_5 & \dot{Y}_6 & \dot{Y}_7 & \dot{Y}_8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\dot{Y}_8 & \dot{Y}_9 & \dot{Y}_{10} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{AYA}^t &= \begin{bmatrix} \dot{Y}_1 + \dot{Y}_2 + \dot{Y}_3 & -\dot{Y}_2 & 0 & 0 \\ -\dot{Y}_2 & \dot{Y}_2 + \dot{Y}_4 + \dot{Y}_5 & -\dot{Y}_5 & 0 \\ 0 & -\dot{Y}_5 & \dot{Y}_5 + \dot{Y}_6 + \dot{Y}_7 + \dot{Y}_8 & -\dot{Y}_8 \\ 0 & 0 & -\dot{Y}_8 & \dot{Y}_8 + \dot{Y}_9 + \dot{Y}_{10} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{AYA}^t \mathbf{U}_0 &= \begin{bmatrix} (\dot{Y}_1 + \dot{Y}_2 + \dot{Y}_3) \cdot \varphi_1 - \dot{Y}_2 \cdot \varphi_2 \\ -\dot{Y}_2 \cdot \varphi_1 + (\dot{Y}_2 + \dot{Y}_4 + \dot{Y}_5) \cdot \varphi_2 - \dot{Y}_5 \cdot \varphi_3 \\ -\dot{Y}_5 \cdot \varphi_2 + (\dot{Y}_5 + \dot{Y}_6 + \dot{Y}_7 + \dot{Y}_8) \cdot \varphi_3 - \dot{Y}_8 \cdot \varphi_4 \\ -\dot{Y}_8 \cdot \varphi_3 + (\dot{Y}_8 + \dot{Y}_9 + \dot{Y}_{10}) \cdot \varphi_4 \end{bmatrix}, \quad -\mathbf{A}(\mathbf{J} + \mathbf{YE}) = \begin{bmatrix} \dot{Y}_1 \cdot E \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Система уравнений в матричной форме для метода узловых потенциалов исследуемой схемы замещения принимает вид:

$$\begin{bmatrix} (\dot{Y}_1 + \dot{Y}_2 + \dot{Y}_3) \cdot \varphi_1 - \dot{Y}_2 \cdot \varphi_2 \\ -\dot{Y}_2 \cdot \varphi_1 + (\dot{Y}_2 + \dot{Y}_4 + \dot{Y}_5) \cdot \varphi_2 - \dot{Y}_5 \cdot \varphi_3 \\ -\dot{Y}_5 \cdot \varphi_2 + (\dot{Y}_5 + \dot{Y}_6 + \dot{Y}_7 + \dot{Y}_8) \cdot \varphi_3 - \dot{Y}_8 \cdot \varphi_4 \\ -\dot{Y}_8 \cdot \varphi_3 + (\dot{Y}_8 + \dot{Y}_9 + \dot{Y}_{10}) \cdot \varphi_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_1 \cdot E \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3.5)$$

Определим напряжения на соответствующих узлах:

$$U_i = A^t U_0 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \varphi_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\varphi_1 \\ \varphi_1 - \varphi_2 \\ \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_2 - \varphi_3 \\ \varphi_3 \\ \varphi_3 \\ \varphi_3 - \varphi_4 \\ \varphi_4 \\ \varphi_4 \end{bmatrix}, \quad (3.6)$$

где  $U_i$  – напряжение на  $i$  узле,  $i=1..10$ .

Определим токи в ветвях через потенциалы узлов и проводимости соответствующих ветвей:

$$I_i = Y \left( A^t U_0 + E \right) = \begin{bmatrix} \dot{Y}_1 \cdot (-\varphi_1 + E) \\ \dot{Y}_2 \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) \\ \dot{Y}_3 \cdot \varphi_1 \\ \dot{Y}_4 \cdot \varphi_2 \\ \dot{Y}_5 \cdot (\varphi_2 - \varphi_3) \\ \dot{Y}_6 \cdot \varphi_3 \\ \dot{Y}_7 \cdot \varphi_3 \\ \dot{Y}_8 \cdot (\varphi_1 - \varphi_4) \\ \dot{Y}_9 \cdot \varphi_4 \\ \dot{Y}_{10} \cdot \varphi_4 \end{bmatrix}. \quad (3.7)$$

где  $I_i$  – ток  $i$  ветви,  $i=1..10$ .

Амплитудно-частотные характеристики входного гармонического сигнала в узлах схемы замещения исследуемого ЭТК УЭЦН, в соответствии с выражениями (3.5)-(3.7), приведены на рисунке 3.12. Исследуемый электротехнический

комплекс УЭЦН оснащен погружным электродвигателем марки ПЭД-Я 63-117 М5В5, мощностью 63 кВт,итающим трансформатором мощностью 100 кВА и кабельной линией длиной 2000 м.

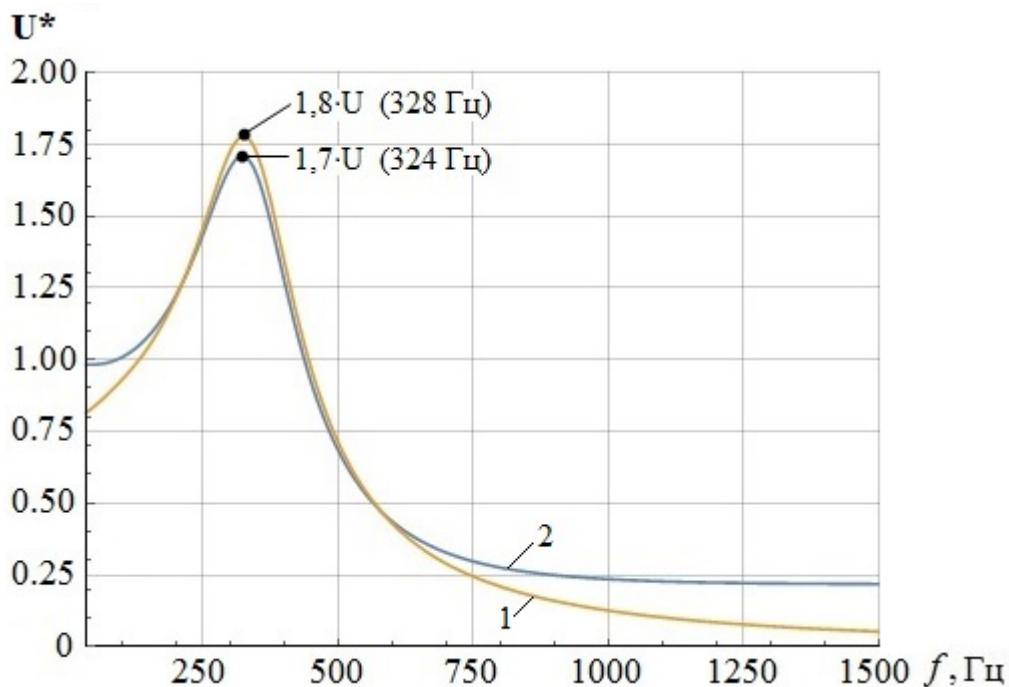


Рисунок 3.12 – Амплитудно-частотные характеристики напряжений на входах элементов ЭТК УЭЦН: 1 – погружной электродвигатель;  
2 – кабельная линия

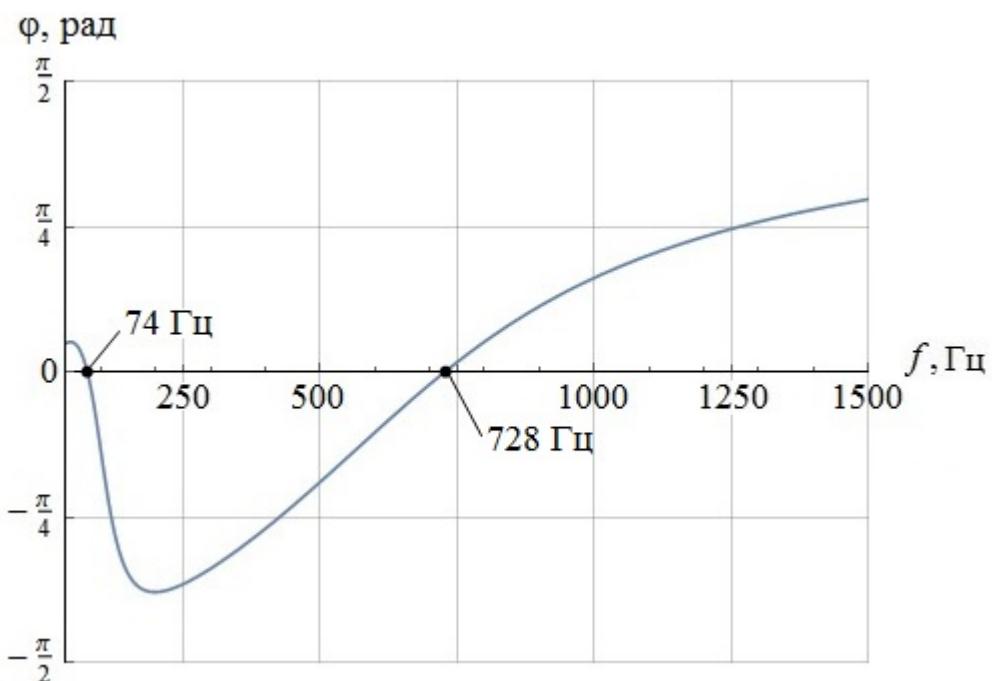


Рисунок 3.13 – Фазо-частотная характеристика цепи «КЛ-ВКРМ-ПЭД»

Анализ частотных характеристик (рис. 3.12) показал, что на частотах 324 Гц и 328 Гц имеет место превышение входного гармонического сигнала на 1,7 и 1,8 единиц соответственно. Следовательно, для исключения опасных перенапряжений на шинах ПЭД и КЛ необходимо установить синусный фильтр на выходе станции управления для подавления высших гармонических составляющих, попадающих в область частот близких к 324 Гц и 328 Гц.

Анализ фазо-частотной характеристики (рис. 3.13) цепи «КЛ-ВКРМ-ПЭД» показал, что в диапазоне от 74 Гц до 728 Гц характер цепи имеет активно-емкостной характер, в диапазоне от 35 Гц до 74 Гц и от 728 Гц до 1500 Гц – активно-индуктивный характер.

Таким образом, разработанная математическая модель ЭТК УЭЦН позволяет рассчитать величины перенапряжений на элементах комплекса, исследовать резонансные явления, по результатам которых предложить рекомендации для их устранения.

### **3.4 Исследование устойчивости погружного асинхронного электродвигателя при использовании внутрискважинного компенсатора**

В настоящее время с ростом потребления электроэнергии крупными промышленными предприятиями, усложнением и повсеместным внедрением автоматизированных систем управления технологических процессов, происходят конфликты между функциональными возможностями энергосистем и потребностями бесперебойной работы потребителей непрерывных производств, приводящие к нарушениям устойчивости электротехнических систем предприятий [20].

Для нефтедобывающих объектов кратковременные нарушения электроснабжения, проявляющиеся в виде провалов напряжения на узлах нагрузки и на вводах электроприемников, не смотря на их малую длительность, могут приводить к нарушениям устойчивости электротехнических систем, сопровождаемым массовым отключением электрооборудования и т.д. [21-23]. Простой оборудования, во время проведения мероприятий по восстановлению

нормальной работы технологических процессов, приводит к существенным экономическим и амортизационным потерям. Поэтому исследование устойчивости электротехнических систем является важной задачей при изменении схемы электроснабжения объекта и внедрении нового оборудования.

Нефтедобывающие объекты, как правило, относятся к первой категории по надежности электроснабжения, которая допускает прерывание электроснабжения не более чем на время его автоматического восстановления [61]. При этом время автоматического ввода резерва может достигать нескольких секунд.

Количество нарушений электроснабжения длительностью менее одной минуты может достигать 50 % от общего числа нарушений [49]. Однако за это время погружные электродвигатели могут потерять устойчивость из-за малого значения электромеханической постоянной времени [2].

В работах [2, 46] приведены результаты исследований динамической устойчивости ПЭД в зависимости от коэффициента загрузки электродвигателя и длины питающего кабеля. Предложенные математические модели позволяют определить допустимую длительность провала напряжения по условию сохранения динамической устойчивости ПЭД. Тем не менее, данные математические модели не учитывают влияние внутрискважинного компенсатора реактивной мощности, подключенного параллельно обмоткам статора погружного электродвигателя, который существенно влияет на его статическую и динамическую устойчивость.

В данном разделе приведены результаты исследования по определению границ динамической устойчивости и коэффициента запаса устойчивости по напряжению установки электроцентробежного насоса, оснащенной нерегулируемым электроприводом, при использовании внутрискважинного компенсатора реактивной мощности.

Для исследования переходных процессов в цепях переменного тока, в связи с периодическим изменением во времени анализируемых величин и наличием электрических машин, целесообразно перейти к координатной системе, жестко

связанной с ротором машины и вращающейся с угловой частотой  $\omega_{dq}$ . Ортогональные оси обозначаются по продольной оси -  $d$ , по поперечной оси -  $q$ .

Аналитическая зависимость между составляющими  $d$ ,  $q$  и мгновенными значениями величин в трехфазной системе имеет вид:

$$\begin{cases} u_d = \frac{2}{3} \cdot \left( u_a \cdot \cos(\omega_{dq}t) + u_b \cdot \cos(\omega_{dq}t - \frac{2\pi}{3}) + u_c \cdot \cos(\omega_{dq}t + \frac{2\pi}{3}) \right) \\ u_q = \frac{2}{3} \cdot \left( u_a \cdot \sin(\omega_{dq}t) + u_b \cdot \sin(\omega_{dq}t - \frac{2\pi}{3}) + u_c \cdot \sin(\omega_{dq}t + \frac{2\pi}{3}) \right) \end{cases}, \quad (3.8)$$

где  $u_a, u_b, u_c$  - мгновенные значения векторов фазных напряжений;  $u_d, u_q$  - проекция векторов фазных напряжений на соответствующие оси.

Обратное преобразование осуществляется в соответствии с выражением:

$$\begin{cases} u_a = u_d \cdot \cos(\omega_{dq}t) + u_q \cdot \sin(\omega_{dq}t) \\ u_b = u_d \cdot \cos(\omega_{dq}t - \frac{2\pi}{3}) + u_q \cdot \sin(\omega_{dq}t - \frac{2\pi}{3}) \\ u_c = u_d \cdot \cos(\omega_{dq}t + \frac{2\pi}{3}) + u_q \cdot \sin(\omega_{dq}t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases}. \quad (3.9)$$

Аналогичное выражение для токов получается путем соответствующей замены.

Модель погружного асинхронного электродвигателя для исследования переходных процессов описывается уравнениями Парка-Горева. Уравнения включают в себя электрическую и механическую составляющие. Механическая часть асинхронного электродвигателя описывается выражениями [9]:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1}{2H} \cdot (T_e - F \cdot \omega_m - T_m) \\ \frac{d}{dt} \theta_m = \omega_m \end{cases}, \quad (3.10)$$

где  $\omega_m$  – угловая скорость ротора;  
 $\theta_m$  – угловое положение ротора;  
 $T_e$  – электромагнитный момент;  
 $T_m$  – механический момент на валу;  
 $H$  – суммарная инерционная постоянная машины и нагрузки;  
 $F$  – суммарный коэффициент вязкого трения (машины и нагрузки).

Электрическая часть ПЭД описывается выражениями [9]:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d}{dt} \psi_{qs} + \omega \cdot \psi_{qs} \\ u_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} \psi_{ds} - \omega \cdot \psi_{qs} \\ 0 = R'_r \cdot i'_{qr} + \frac{d}{dt} \psi'_{qr} + (\omega - \omega_r) \psi'_{dr}, \\ 0 = R'_r \cdot i'_{dr} + \frac{d}{dt} \psi'_{dr} - (\omega - \omega_r) \psi'_{dr} \\ T_e = 1,5 \cdot (\psi_{ds} \cdot i_{qs} - \psi_{qs} \cdot i_{ds}) \end{array} \right. \quad (3.11)$$

где  $u_{ds}, u_{qs}, i_{ds}, i_{qs}$  – проекция векторов напряжения и тока статора на соответствующие оси;  
 $i'_{dr}, i'_{qr}$  – проекция векторов тока ротора на соответствующие оси;  
 $R_s, L_{ls}, R'_r, L'_{lr}$  – активное сопротивление и индуктивность рассеяния статора и ротора соответственно;  
 $L_m$  – индуктивность цепи намагничивания;  
 $L_s, L'_r$  – полные индуктивности статора и ротора;  
 $\psi_{ds}, \psi_{qs}, \psi'_{dr}, \psi'_{qr}$  – проекция векторов потокосцепления статора и ротора на соответствующие оси;

$\omega, \omega_r$  – угловая частота напряжения питания и электрическая угловая скорость вращения ротора.

Потокосцепление статора и приведенное потокосцепление ротора, а также индуктивность статора и приведенная индуктивность ротора определяются по выражениям:  $\psi_{ds} = L_s \cdot i_{qs} + L_m \cdot i'_{dr}$ ,  $\psi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + L_m \cdot i'_{qr}$ ,  $\psi'_{dr} = L'_r \cdot i_{dr} + L_m \cdot i_{ds}$ ,  $\psi'_{qr} = L'_r \cdot i'_{qr} + L_m \cdot i_{qs}$ ,  $L_s = L_{ls} + L_m$ ,  $L'_r = L'_{ls} + L_m$  соответственно.

В исследуемом электротехническом комплексе УЭЦН параллельно обмоткам статора ПЭД подключено устройство компенсации реактивной мощности. Математическая модель узла нагрузки «ПЭД-ВКРМ» будет включать уравнения переходных процессов на емкостном элементе и алгебраическую сумму токов в узле согласно I-му закону Кирхгофа:

$$\begin{cases} \frac{1}{C_{BKPM}^{\Delta}} \int i_{dc} dt = -u_q \\ \frac{1}{C_{BKPM}^{\Delta}} \int i_{qc} dt = u_d \\ i_d = i_{ds} + i_{dc} \\ i_q = i_{qs} + i_{qc} \end{cases}, \quad (3.12)$$

где  $u_{dc}, u_{qc}$  – проекция векторов напряжения внутрисважинного компенсатора на соответствующие оси;

$u_d, u_q$  – проекция векторов напряжения сети на соответствующие оси;

$i_{dc}, i_{qc}$  – проекция векторов тока внутрисважинного компенсатора на соответствующие оси.

В качестве модели питающего кабеля используется П-образная схема замещения с постоянными активным, индуктивным и емкостными элементами. С учетом уравнений баланса токов в узлах схемы замещения (рис. 3.12), получим следующую систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{KL} \frac{di_{dk}}{dt} = u_{1d} - u_{2d} - r_{KL} \cdot (i_{dKL} - i_{qKL}) \\ L_{KL} \frac{di_{qk}}{dt} = u_{1q} - u_{2q} - r_{KL} \cdot (i_{qKL} + i_{dKL}) \\ \frac{1}{C_{KL}} \int i_{1dKLc} dt = x_{1KLc} \cdot i_{1dc} - u_{1q} \\ \frac{1}{C_{KL}} \int i_{1qKLc} dt = x_{1KLc} \cdot i_{1qc} + u_{1d} \\ \frac{1}{C_{KL}} \int i_{2dKLc} dt = x_{2KLc} \cdot i_{2dc} - u_{2q} \\ \frac{1}{C_{KL}} \int i_{2qKLc} dt = x_{2KLc} \cdot i_{2qc} + u_{2d} \\ i_{dKL} = i_d + i_{2dc} \\ i_{qKL} = i_q + i_{2qc} \\ i_{ducst} = i_{dKL} + i_{1dKLc} \\ i_{qucst} = i_{qKL} + i_{1qKLc} \end{array} \right. , \quad (3.13)$$

где  $i_{dKL}$ ,  $i_{qKL}$  – проекция векторов тока в кабельной линии на соответствующие оси;

1, 2 (индексы) – к началу и к концу кабельной линии соответственно;

$i_{ducst}$ ,  $i_{qucst}$  – проекция векторов тока сети на соответствующие оси;

$L_{KL}$ ,  $C_{KL}$ ,  $r_{KL}$ ,  $x_{KLc}$  – индуктивность и емкость кабельной линии соответственно;

$r_{KL}$ ,  $x_{KLc}$  – активное и емкостное сопротивление КЛ.

Полученные системы дифференциальных уравнений (3.12), (3.13) с уже известными системами дифференциальных уравнений (3.10), (3.11) для электротехнического комплекса УЭЦН позволяют исследовать динамическую устойчивость погружного асинхронного электродвигателя с учетом компенсации реактивной мощности внутри скважины.

Произведем моделирование процессов самозапуска ПЭД в составе УЭЦН в зависимости от мощности внутрискважинного компенсатора при провалах

напряжения. В качестве объекта исследования выбран электродвигатель марки ПЭД-Я 90-117 М1В5, паспортные данные которого приведены в таблице 3.8.

Таблица 3.8

## Паспортные данные погружного электродвигателя ПЭД-Я 90-117 М1В5

Номинальная мощность при 50 Гц, кВт	Номинальное напряжение, В	Номинальный ток, А	Коэффициент мощности	Коэффициент полезного действия, %	Номинальное скольжение, %
90	1800	44,2	0,84	84	5

В исследуемом ЭТК УЭЦН питание ПЭД осуществляется от питающего трансформатора марки ТМПН-160/3 питающим кабелем марки КПБП 3х25 длиной 2000 м. Исходные данные питающего трансформатора и кабельной линии приведены в таблицах 2.1 и 2.2 соответственно. Коэффициент мощности погружного электродвигателя принимается равным 0,735.

В результате моделирования получены кривые динамической устойчивости погружного асинхронного при различных значениях мощности внутрискважинного компенсатора (25, 32,5, 45, 50, 55 квар) (рис. 3.14).

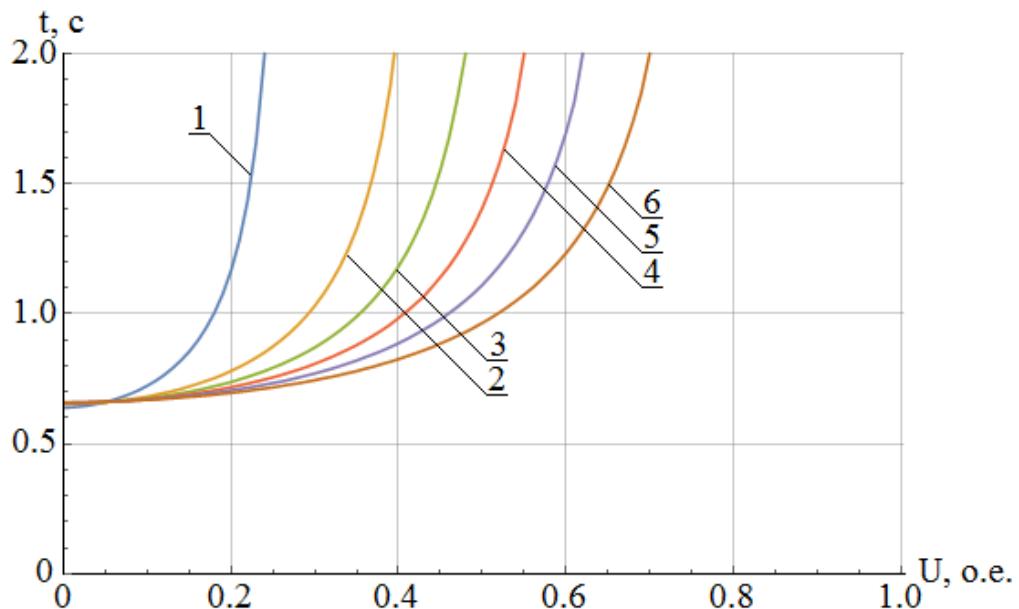


Рисунок 3.14 – Границы динамической устойчивости узла «ПЭД-ВКРМ» (1 - без ВКРМ, 2 - мощность ВКРМ 25 квар, 3 – мощность ВКРМ 32,5 квар, 4 - мощность ВКРМ 45 квар, 5 - мощность ВКРМ 50 квар, 6 - мощность ВКРМ 55 квар)

Анализ кривых динамической устойчивости показал, что с увеличением мощности внутристкважинного компенсатора происходит увеличение напряжения статической устойчивости погружного электродвигателя. Например, увеличение мощности ВКРМ с 25 до 32,5 квар приводит к увеличению напряжения статической устойчивости ПЭД с 0,41 о.е. до 0,48 о.е., а при увеличении мощности ВКРМ с 25 квар до 45 квар – с 0,41 о.е. до 0,55 о.е. соответственно.

Одним из основных показателей устойчивости является коэффициент запаса устойчивости по напряжению, который определяется по выражению [21]:

$$k_y = \frac{S_{ycm}}{S_{общ}} = 1 - \left( \frac{1 - t_{np} / \tau_0}{1 / e_{cy} - t_{np} / \tau_0} - \frac{\tau_0 \cdot e_{cy}}{t_{np}} \cdot \left[ \frac{1 - t_{np} / \tau_0}{1 / e_{cy} - t_{np} / \tau_0} + (e_{cy} - 1) \cdot \ln \left| 1 - \frac{1 - t_{np} / \tau_0}{(1 / e_{cy} - t_{np} / \tau_0) \cdot e_{cy}} \right| \right] \right), \quad (3.14)$$

где  $S_{ycm}$  – площадь области устойчивой работы, ограниченная кривой динамической устойчивости и единицей по оси напряжения;

$S_{общ}$  – площадь области, ограниченная единицей по оси напряжения и временем ввода резерва  $t_{np} = 2$  с по оси длительности провала напряжения;

$t_{np}$  – предельное время срабатывания штатной или резервной защиты;

$\tau_0$  – время динамической устойчивости асинхронной электротехнической системы при провале напряжения до нулевого значения;

$e_{cy}$  – напряжение статической устойчивости.

Графическая интерпретация выражения (3.14) коэффициента запаса устойчивости  $k_y$  приведена на рисунке 3.15 [21].

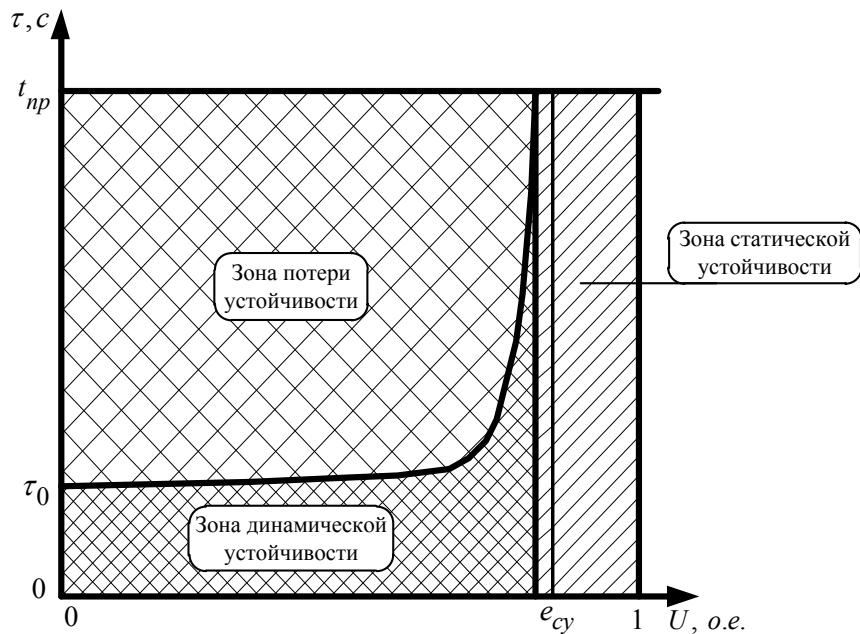


Рисунок 3.15 – Области устойчивости и неустойчивости асинхронных электротехнических систем

Рассчитанные значения коэффициентов запаса устойчивости погружного асинхронного электродвигателя по напряжению в зависимости от мощности внутрискважинного компенсатора приведены в таблице 3.9.

Таблица 3.9

Коэффициенты запаса устойчивости ПЭД по напряжению в зависимости от мощности ВКРМ

Реактивная мощность ВКРМ, квар	0	25	32,5	45	50	55
$k_y$	0,874	0,79	0,745	0,706	0,667	0,624

Физический смысл полученных коэффициентов запаса устойчивости можно трактовать следующим образом [40]:

- кривая вероятности сохранения динамической устойчивости работы ПЭД при единичном внешнем возмущении и единичной вероятности срабатывания противоаварийной автоматики в питающей энергосистеме подчиняется экспоненциальному закону;

– чем выше реактивная мощность внутрискважинного компенсатора, тем ниже допустимое снижение напряжения на узле нагрузки «ВКРМ–ПЭД», то есть выше вероятность опрокидывания и снижения возможности самозапуска ПЭД при восстановлении электроснабжения.

### **3.5 Выводы по главе**

1. Разработана в среде MATLAB Simulink имитационная модель электротехнического комплекса УЭЦН с внутрискважинным компенсатором, которая позволяет исследовать энергетические и силовые параметры комплекса.

2. Получены зависимости энергетических и силовых показателей электротехнического комплекса УЭЦН, оснащенного погружным электродвигателем мощностью 63 кВт, при регулировании частоты напряжения питания в диапазоне от 35 Гц до 50 Гц. Определен рекомендуемый диапазон регулирования частоты напряжения питания от 35 Гц до 53 Гц, при котором токи и напряжения на элементах комплекса не превышают допустимые значения.

3. Получены амплитудно-частотные характеристики входного гармонического сигнала, анализ которых показал, что на частотах 324 Гц и 328 Гц имеет место превышение входного гармонического сигнала на 1,7 и 1,8 единиц соответственно для исследуемого электротехнического комплекса УЭЦН, оснащенного погружным электродвигателем мощностью 63 кВт.

4. Установлено, что повышение мощности внутрискважинного компенсатора реактивной мощности приводит к снижению допустимого напряжения по условию динамической устойчивости погружного асинхронного электродвигателя.

## ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА ВНУТРИСКВАЖИННЫХ КОМПЕНСАТОРОВ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СОСТАВЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ПОГРУЖНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ДОБЫЧИ НЕФТИ

### 4.1 Разработка компоновочной схемы энергоэффективной погружной установки для добычи нефти

Разрабатываемые внутрискважинные компенсаторы реактивной мощности [56] предполагается использовать в энергоэффективных погружных установках для добычи нефти [57]. Компоновочная схема энергоэффективной УЭЦН приведена на рисунке 4.1.

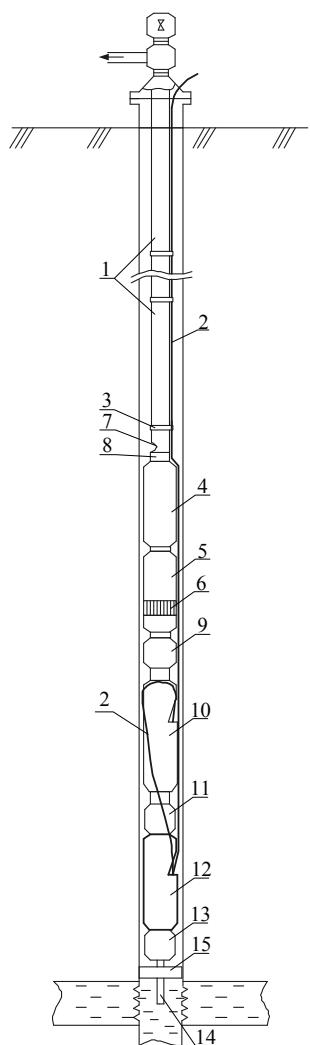


Рисунок 4.1 – Энергоэффективная погружная установка для добычи нефти

Энергоэффективная УЭЦН представляет собой линейную конструкцию, содержащую подвеску колонны насосно-компрессорных труб 1, питающий кабель 2, зажимы 3 для кабеля, погружной центробежный насос 4, газосепаратор 5, сетчатый фильтр 6, сливной клапан 7, обратный клапан 8, узел гидрозащиты 9, погружной электродвигатель 10, компенсатор 11, внутрискважинный компенсатор реактивной мощности 12, блок телеметрии 13, хвостовик 14, пакер (уплотнитель) 15, расположенные в эксплуатационной колонне скважины. Погружной центробежный насос 4 жестко соединен с колонной насосно-компрессорных труб 1. Для возможности спуска жидкости из насосно-компрессорных труб 1 перед подъемом погружного центробежного насоса 4 из скважины или предотвращения слива жидкости при его остановке, между колонной

насосно-компрессорных труб 1 и погружным центробежным насосом 4 установлены сливной клапан 7 и обратный клапан 8 соответственно. При эксплуатации скважин с высоким газосодержанием откачиваемой нефти, для уменьшения вредного влияния свободного газа на работу погружного центробежного насоса 4, к нему жестко присоединен газосепаратор 5. К газосепаратору 5 присоединен сетчатый фильтр 6. В скважинах, в которых входное объемное газосодержание менее 30% (например, в высокообводнённых скважинах), вредное влияние газа на работу погружного центробежного насоса 4 не отмечается и газосепаратор 5 можно исключить. В таком случае сетчатый фильтр 6 присоединяется к погружному центробежному насосу 4. Для защиты от попадания пластовой жидкости в полость погружного электродвигателя 10, компенсации температурного расширения объема масла, передачи врачающего момента валу погружного центробежного насоса 4 к сетчатому фильтру 6 присоединен узел гидрозащиты 9, к которому жестко присоединен погружной электродвигатель 10. Для компенсации объема масла внутри погружного электродвигателя 10 при изменении температурного режима, к нему жестко присоединен компенсатор 11. Внутрискважинный компенсатор реактивной мощности 12 жестко соединен компенсатором 11. Передача электрической энергии от источника питания к погружному электродвигателю 10 и внутрискважинному компенсатору реактивной мощности 12 осуществляется при помощи питающего кабеля 2, закрепленного на колонне насосно-компрессорных труб 1 при помощи зажимов 3. Для определения температуры и давления к внутрискважинному компенсатору 12 жестко присоединен блок телеметрии 13. К блоку телеметрии 13 присоединен хвостовик 14, оборудованный пакером 15.

#### **4.2 Разработка конструктивных и технологических требований к внутрискважинным компенсаторам**

Так как разрабатываемые внутрискважинные компенсаторы предполагается эксплуатировать в реальных скважинных условиях, то к данным устройствам предъявляются жесткие ограничения по массогабаритным показателям,

обусловленные местом их установки, и требованиям к надежной работе при высоких температурах и давлении.

В ходе анализа, совместно с ООО «Алмаз», эксплуатационных характеристик погружного оборудования и скважинных условий определены конструктивные и технологические требования к ВКРМ (далее устройство).

**Конструктивные:**

1. Длина устройства не превышает 4 м, ввиду расположения внутрискважинного компенсатора ниже рабочих органов УЭЦН и нефтенасыщенного пласта;

2. Способность работать в реальных скважинных условиях: температура до 140 °С и давление до 40 МПа или в соответствии с требованиями нефтедобывающего предприятия;

3. Устройства могут быть реализованы в любом габарите погружного оборудования;

4. Универсальность, то есть способность разрабатываемых устройств работать с электродвигателями различных заводов-изготовителей погружного оборудования (при условии соответствующей их модернизации).

**Технологические:**

1. Задание необходимых компенсационных токов для погружных электродвигателей мощностью не менее 16 кВт;

2. Работа с ПЭД с частотным управлением от 35 Гц до 70 Гц;

3. Работа параллельно с сетью с содержанием основных гармоник напряжения (3, 5, 7 и т.д.) до 14 %;

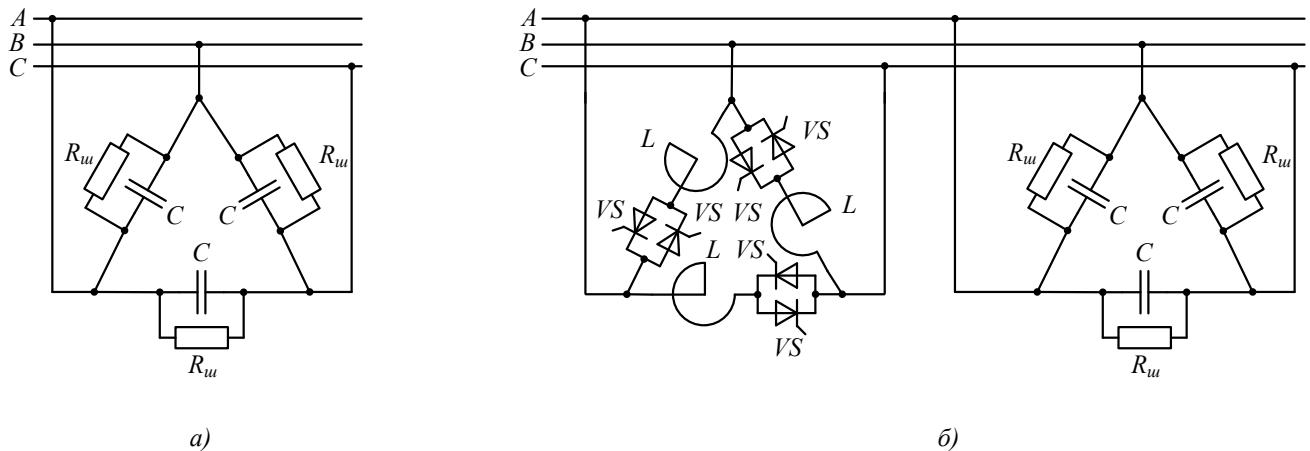
4. Номинальное напряжение до 3000 В;

5. Способность обеспечить коэффициент мощности сети в точке подключения не ниже  $\cos\varphi_c=0,95$ .

### 4.3 Разработка конструкции и выбор электрической схемы внутрискважинного компенсатора

В настоящее время наибольшее распространение получили конденсаторные установки с постоянной или регулируемой емкостью. В регулируемых компенсаторах реактивной мощности изменение вырабатываемой реактивной мощности может происходить двумя основными способами: изменением числа включенных в работу конденсаторов, либо включением в силовую цепь тиристорно-реакторных групп (статические тиристорные компенсаторы).

На рисунке 4.2а приведена широко применяемая, особенно в системах электроснабжения промышленных предприятий, нерегулируемая компенсирующая установка, в которой конденсаторы соединены по схеме треугольник (реже в звезду) и постоянно подключены на шины распределительного пункта или трансформаторной подстанции. К достоинствам таких конденсаторных установок можно отнести простоту конструкции, минимальные потери мощности в силовой цепи, определяемые потерями в конденсаторах. Несмотря на это, отсутствие возможности регулирования реактивной мощности может привести к перекомпенсации, повышению напряжения в сети и вызвать повреждения всех чувствительных к изменению напряжения приборов и устройств.



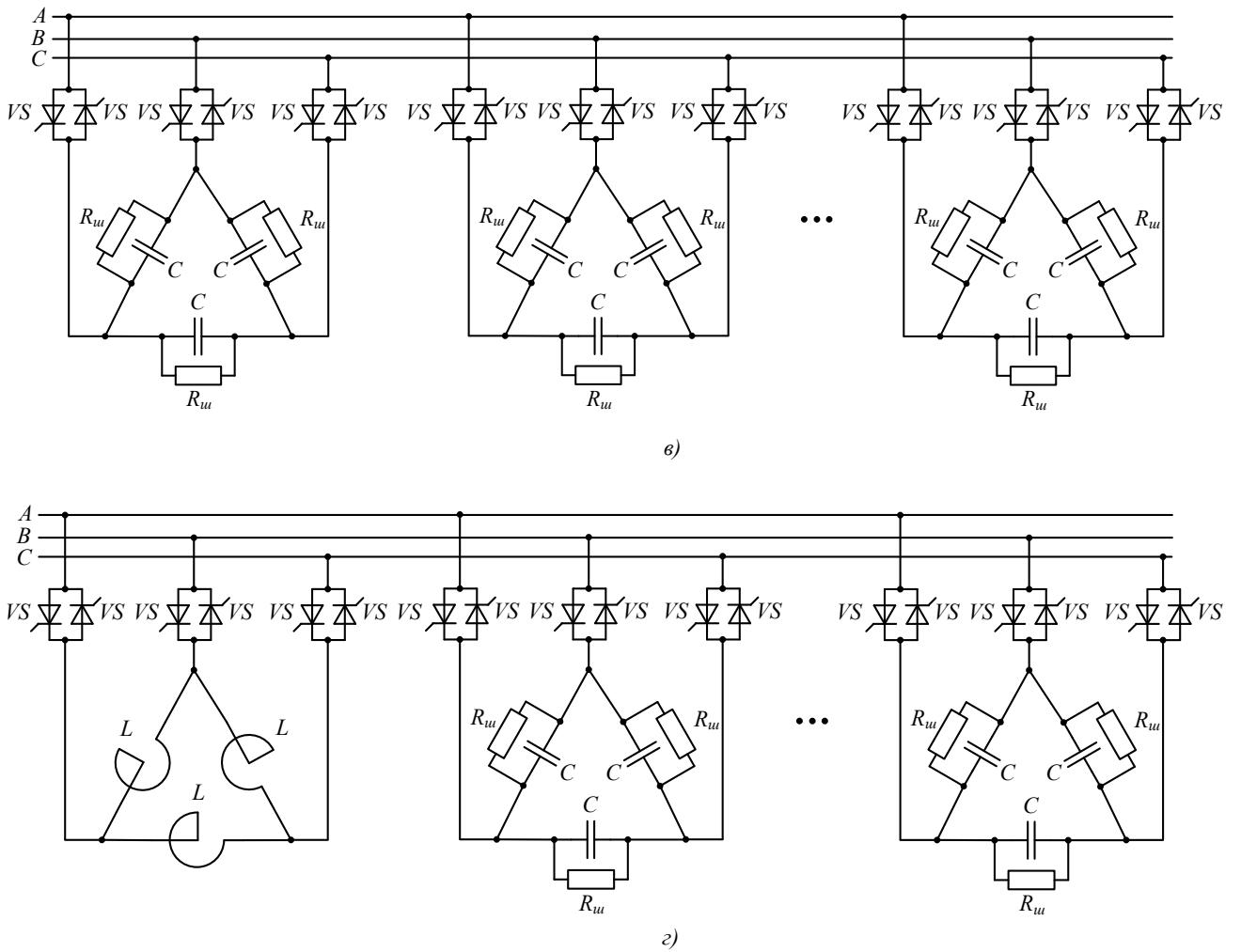


Рисунок 4.2 – Основные схемы силовых цепей компенсаторов реактивной мощности

Развитие технологии изготовления силовых полупроводниковых приборов позволило разработать более совершенные КУ на управляемых тиристорных ключах. Схема (рис. 4.2б) представляет схему одного из вариантов статического тиристорного компенсатора (СТК) на базе тиристорно-реакторной группы. Использование тиристоров, включенных в силовую цепь СТК, позволяет плавно изменить реактивную индуктивную мощность  $Q_L$ , при неизменной емкостной  $Q_C$ , тем самым изменения суммарную вырабатываемую реактивную мощность. Основными недостатками данной схемы являются: генерация в сеть токов высших гармоник, высокие массогабаритные показатели, существенные коммутационные перенапряжения, возникающие на тиристорах при переключениях, необходимость отстройки от резонансных режимов.

При отсутствии возможности компенсации реактивной мощности нерегулируемыми компенсирующими устройствами вследствие большой мощности и неравномерном графике электрических нагрузок используют КУ с регулированием реактивной мощности за счет переключения конденсаторов ступенями (рис. 4.2в). Плавность регулирования зависит от количества ступеней регулирования и мощности конденсаторов. К недостатку данной схемы можно отнести сложную систему управления и дискретный характер вырабатываемой реактивной мощности.

Плавное регулирование вырабатываемой реактивной мощности при относительно малой мощности реактора относительно схемы 4.2б достигается использованием СТК с регулируемой индуктивностью и регулируемой емкостью (рис. 4.2г). Мощность реактора находится по выражению  $Q_L = Q_{KV}/2 \cdot N$ , где  $N$  - число ступеней регулирования. В данной схеме регулирование вырабатываемая реактивная мощность может достигаться за счет переключения ступеней конденсаторов, включенных в сеть, или при помощи тиристоров включенных последовательно с реакторами.

Совершенствование элементной базы силовой электроники и новых методов высокочастотной модуляции позволило разработать новый класс устройств, построенных на IGBT или MOSFET транзисторах, либо на IGCT или GTO тиристорах. Данные устройства, в зависимости от выполняемых функций, принято называть: активные фильтры, статические компенсаторы реактивной мощности, сетевые инверторы, кондиционеры сети [88, 92]. Базовой схемой для таких устройств малой и средней мощности является схема на основе трехфазного автономного инвертора напряжения (рис. 4.3) [88]. В качестве нагрузки питающей сети изображен погружной электродвигатель. Применение полностью управляемых полупроводниковых приборов позволяет плавно регулировать вырабатываемую реактивную мощность с малым содержанием высших гармонических составляющих в компенсирующем токе за счет использования методов широтно-импульсной модуляции [92]. К достоинству данной схемы

можно отнести высокое быстродействие и низкие удельные массогабаритные показатели.

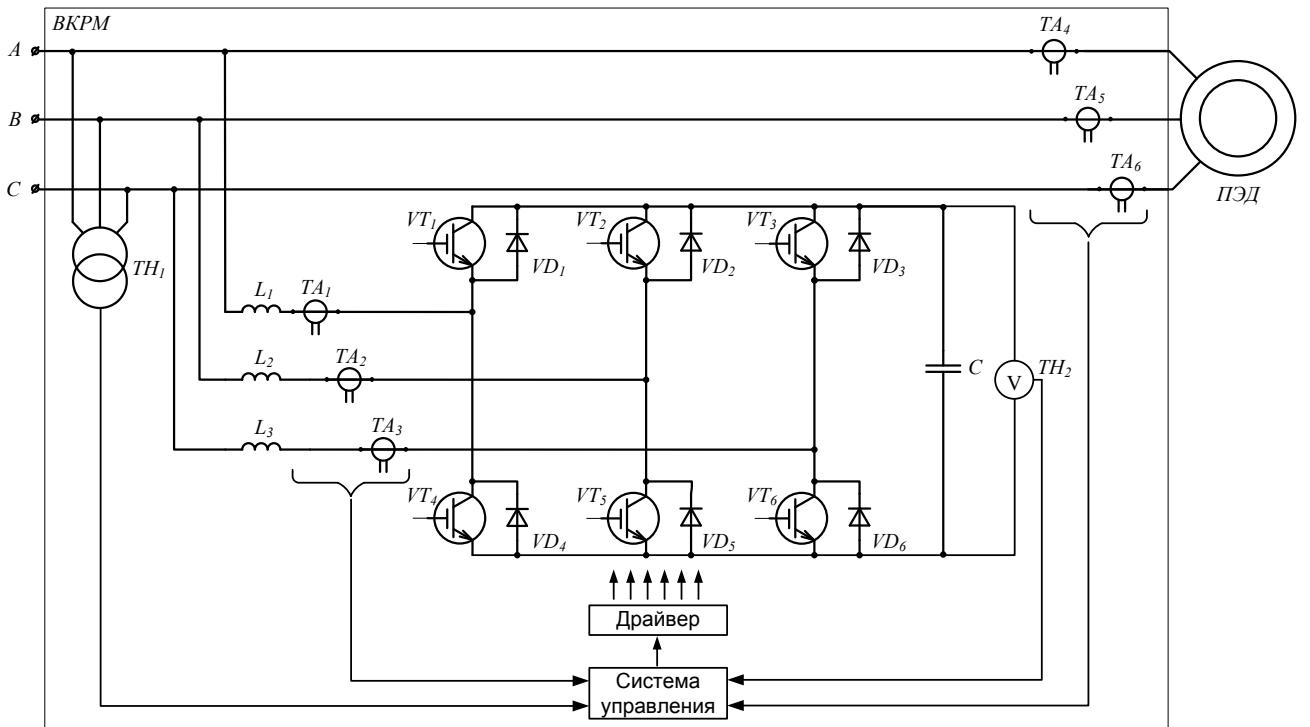


Рисунок 4.3 – Схема силовой части статического компенсатора

Силовая часть статического компенсатора на базе автономного инвертора напряжения состоит из следующих основных элементов: трехфазного четырехквадрантного преобразователя напряжения на полностью управляемых транзисторах  $VT_1$ ,  $VT_2$ ,  $VT_3$ ,  $VT_4$ ,  $VT_5$ ,  $VT_6$ , силовых диодов  $VD_1$ ,  $VD_2$ ,  $VD_3$ ,  $VD_4$ ,  $VD_5$ ,  $VD_6$ , фазных дросселей  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ , установленных на стороне переменного тока преобразователя, конденсаторной батареи  $C$  на стороне постоянного тока, трансформаторов тока  $TA_1$ ,  $TA_2$ ,  $TA_3$ ,  $TA_4$ ,  $TA_5$ ,  $TA_6$ , трансформаторов напряжения  $TH_1$ ,  $TH_2$ .

Методы исследования статических и динамических процессов в импульсных преобразователях энергии подробно рассмотрены в работах [18, 43, 52, 53, 62, 67, 78].

Управление статическим компенсатором на базе трехфазного АИН подробно рассмотрено в [7, 19, 32, 62-65]. Задание необходимых компенсационных токов основано на использовании метода «мгновенной мощности», разработанного в 80-х годах XX века японскими учеными Н. Akagi [93]. Синхронизация тактовой частоты преобразователя с частотой основной гармоники

сети, осуществляется с помощью блока фазовой автоподстройки частоты [62]. В [7, 50, 65] практически доказана эффективность регулирования реактивной мощности прямой и обратной последовательностей, потребляемой преобразователем из сети при использовании принятой электрической схемы.

Выбор электрической схемы компенсирующего устройства произведен согласно следующим требованиям, обусловленным местом его установки и характером нагрузки УЭЦН:

1. Минимальные массогабаритные показатели с достаточной большой мощностью компенсирующего устройства;
2. Надежная работа с содержанием высших гармонических составляющих в кривых токов и напряжений;
3. Низкий коэффициент содержания высших гармоник (менее 5 %) в компенсирующем токе.

Анализ схем показал, что схемы 4.2 б-г не удовлетворяют требованиям по массогабаритным показателям и низкому содержанию высших гармоник в компенсирующем токе. Данное обстоятельство обусловлено наличием тиристорно-реакторных групп, что приводит к повышению массы и габаритов компенсирующего устройства, и использованием тиристорных вентилей, на которых в момент коммутации возникают перенапряжения. Дополнительно, использование управляемых тиристорных вентилей приводит к генерации в сеть токов высших гармоник за счет несовершенства системы управления вентилями и их конструкцией.

Всем сформулированным требованиям удовлетворяет электрическая схема нерегулируемого компенсатора реактивной мощности 4.1а и схема компенсатора 4.3 на базе автономного инвертора напряжения. Для электрической схемы 4.3 требуется проверка работоспособности вентилей при высокой температуре и высоком напряжении до 3000 В.

На рисунке 4.4 изображен разработанный на заводе ООО «Алмаз» опытный образец нерегулируемого внутрискважинного компенсатора реактивной мощности.



Рисунок 4.4 – Узел токоввода внутрискважинного компенсатора

Конструктивно разработанный внутрискважинный компенсатор реактивной мощности представляет собой прочный герметичный корпус, внутри которого расположены высокотемпературные конденсаторы и система управления (при выборе электрической схемы на базе автономного инвертора напряжения). Внутреннее соединение выполнено проводами с изоляцией из фторопласта.

В ходе стендовых испытаний (Протокол испытаний №19038-II-II от 29.08.2018 г., Приложение Д) опытного образца нерегулируемого внутрискважинного компенсатора и погружного асинхронного электродвигателя зафиксировано повышение коэффициента мощности узла «ПЭД-ВКРМ» с 0,8 до 0,944, при заявленном коэффициенте мощности 0,95. Расхождение между расчетными и экспериментальными данными составило менее 1 %. Выбор мощности ВКРМ производился при помощи компьютерной программы «DRPC calculate» (Расчет энергетической эффективности использования внутрискважинных компенсаторов реактивной мощности).

По результатам стендовых испытаний утверждена программа проведения опытно-промышленных испытаний внутрискважинного компенсатора реактивной мощности на объектах ПАО «Варьеганнефтегаз» (Приложение Д).

В настоящее время опытный образец нерегулируемого внутрискважинного компенсатора реактивной мощности проходит опытно-промышленные испытания

на нефтедобывающем кусте №76, скважине №1049 Хохряковского месторождения.

В дальнейшем, результаты диссертационной работы будут использованы при разработке комплекса мероприятий, направленных на повышение эффективности добычи нефти установками электроцентробежных насосов.

#### **4.4 Выводы по главе 4**

1. Разработана компоновочная схема энергоэффективной погружной установки для добычи нефти, отличающаяся тем, что дополнительно содержит внутрискважинный компенсатор реактивной мощности, который жестко присоединен к погружному электродвигателю.

2. Выбраны электрические схемы нерегулируемого внутрискважинного компенсатора реактивной мощности и внутрискважинного компенсатора на базе автономного инвертора напряжения.

3. Разработан опытный образец нерегулируемого внутрискважинного компенсатора реактивной мощности и проведены стеновые испытания, в ходе которых зафиксировано повышение коэффициента мощности узла «ПЭД-ВКРМ» с 0,8 до 0,944.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Анализ современных способов, направленных на повышение энергетической эффективности добычи нефти установками электроцентробежных насосов, показал, что увеличение коэффициента полезного действия погружного оборудования и внедрение концепции «энергоэффективного дизайна» не решают в полной мере задачи повышения эффективности добычи углеводородов.

2. Показано, что использование разработанных внутрискважинных компенсаторов реактивной мощности позволяет повысить энергетическую эффективность добычи нефти УЭЦН до 15,8 %.

3. В ходе исследования на имитационной модели электротехнического комплекса УЭЦН с внутрискважинным компенсатором реактивной мощности энергетических и силовых показателей комплекса определен рекомендуемый диапазон регулирования частоты напряжения питания от 35 Гц до 53 Гц, при котором токи ПЭД и ВКРМ не превышают длительно-допустимые значения.

4. Установлено, что повышение мощности внутрискважинного компенсатора реактивной мощности приводит к снижению допустимого напряжения по условию динамической устойчивости погружного асинхронного электродвигателя.

5. Разработан опытный образец нерегулируемого внутрискважинного компенсатора реактивной мощности и проведены стендовые испытания, в ходе которых зафиксировано повышение коэффициента мощности узла «ПЭД-ВКРМ» с 0,8 до 0,944.

6. Разработаны конструкции внутрискважинных компенсаторов реактивной мощности в составе энергоэффективной погружной установки для добычи нефти, которые внедрены в производственную деятельность ООО «Алмаз» и проходят опытно-промышленные испытания на нефтедобывающих объектах ПАО «Варьеганнефтегаз».

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Абрамович, Б. Н. Электроснабжение нефтегазовых предприятий: Учебное пособие / Б. Н. Абрамович, Ю. А. Сычев, Д. В. Устинов. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный горный институт, 2008. – 81 с.
2. Абрамович, Б. Н. Динамическая устойчивость работы установок электроцентробежных насосов / Б. Н. Абрамович // Нефтяное хозяйство. – 2010. – № 9. – С. 104-106.
3. Ануфриев, С. Н. Опыт эксплуатации УЭЦН в условиях повышенного содержания мехпримесей / С. Н. Ануфриев, С. В. Погорелов // Производственно-технический нефтегазовый журнал «Инженерная практика». – 2010. – № 2. – С. 66-72.
4. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник для бакалавров / Л. А. Бессонов. – 12-е изд., исправ. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2016. – 701 с.
5. Боловин, Е. В. Метод идентификации параметров погружных асинхронных электродвигателей установок электроприводных центробежных насосов для добычи нефти / Е. В. Боловин, А. С. Глазырин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 1. – С. 123-131.
6. Букреев, В. Г. Стратегия управления электротехническим комплексом механизированной добычи нефти на основе экономического критерия / В. Г. Букреев, Н. Ю. Сипайлова, В. А. Сипайлов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 3. – С. 75-84.
7. Бурков, А. Т. Интеллектуальные преобразователи для симметрирования высокоскоростной электротяговой нагрузки / А. Т. Бурков, С. В. Кузьмин, В. В. Серонов, О. А. Степанская // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2015. – № 2. – С. 116-121.

8. Ведерников, В. А. Разработка и описание цифровой модели системы электропривода погружной установки / В. А. Ведерников, О. А. Лысова, А. В. Мамченков // Вестник кибернетики. Тюмень. – 2005. – № 4. – С. 38-50.
9. Веников, В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: учебник для электроэнергетических специальностей вузов / В. А. Веников. – 4-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1985. – 536 с.
10. Виленский, П. Л. Оценка эффективности инвестиционных проектов. Теория и практика: Учебное пособие / П. Л. Виленский. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Поли Принт Сервис, 2015. – 1300 с.
11. Виноградов, А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А. Б. Виноградов. – ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2008. – 298 с.
12. Гинзбург, М. Я. Интегральный показатель энергоэффективности погружных электродвигателей / М. Я. Гинзбург // Инженерная практика. 2017. № 12. С. 82-86.
13. Гладких, Т. Д. Динамика функциональной надежности нефтепромысловых электрических сетей / Т. Д. Гладких, В. В. Сушков, И. С. Сухачев // Динамика систем, механизмов и машин. 2016. – Том 3. – № 1. – С. 76-80.
14. Гончаров, М. В. Мониторинг станций управления УЭЦН по силовым кабелям / М. В. Гончаров, А. С. Травин // Нефть. Газ. Новации. 2016. – № 12. – С. 42-45.
15. Горланов, С. Ф. Внедрение и развитие технологий интеллектуального управления УЭЦН / С. Ф. Горланов // Инженерная практика. – 2011. – № 5. – С. 81-83.
16. ГОСТ 53905–2010 Энергосбережение. Термины и определения. – М.: 2011. – 16 с.
17. ГОСТ IEC 61921–2013 Конденсаторы силовые. Конденсаторные батареи для коррекции коэффициента мощности при низком напряжении. – М.: 2014. – 16 с.

18. Гречко, В. Е. Автономные инверторы модуляционного типа / Э. Н. Гречко, В. Е. Тонкаль. – Киев: Наукова думка, 1983. – 304 с.
19. Дьяконов, В. MATLAB. Обработка сигналов и изображений / В. Дьяконов. – СПб.: Питер, 2002. – 608 с.
20. Егоров, А. В. Обеспечение устойчивости многомашинных электротехнических систем непрерывных производств / А. В. Егоров, М. С. Ершов // Труды IX международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016. – 2016. – С. 585-590.
21. Ершов, М. С. Устойчивость промышленных электротехнических систем / М. С. Ершов, А. В. Егоров, А. А. Трифонов. – М.: ООО «Издательский дом «Недра», 2010. – 319 с.
22. Ершов, М. С. Рекомендации по повышению надежности работы потребителей производственных объектов при авариях в системах централизованного электроснабжения / М. С. Ершов // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2012. – № 12. – С. 88-91.
23. Ершов, М. С. Причины и параметры кратковременных нарушений электроснабжения промышленных объектов / М. С. Ершов, В. А. Анцифоров // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2014. – № 10. – С. 84-89.
24. Жежеленко, И. В., Саенко Ю. Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.
25. Железко, Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов / Ю. С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
26. Зарубин, В. С. Математическое моделирование в технике: учеб. Для вузов / В. С. Зарубин. – 3-е изд. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 495 с.
27. Золотарев, И. В. Прогнозирование энергоэффективности УЭЦН / И. В. Золотарев, И. В. Пещеренко, С. Н. Пошвин // Бурение и нефть. – 2013. – № 9. – С. 60-63.
28. Ивановский, В. Н. Вопросы энергоэффективности установок электроприводных центробежных насосов / В. Н. Ивановский, А. А. Сабиров,

- А. В. Деговцов, Ю. А. Донской, А. В. Булат, А. С. Зуев, С. Б. Якимов // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2016. – № 4. – С. 25-30.
29. Ивановский, В. Н. Скважинные насосные установки для добычи нефти / В. Н. Ивановский, В. И. Дирищев, А. А. Сабиров, В. С. Каштанов, С. С. Пекин. – М: ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2002. – 824 с.
30. Карпюк, А. В. Энергоэффективные УЭЦН с вентильными электродвигателями // Инженерная практика. 2017. – № 5. – С. 14-19.
31. Ковалев, А. Ю. К вопросу о применении аппарата конформных отображений при моделировании установок электроцентробежных насосов / А. Ю. Ковалев // Омский научный вестник. – 2013. – № 1 (117). – С. 209-211.
32. Ковалев, А. Ю. Экспериментальные исследования гармонического состава тока и напряжения на шинах станции управления установками электроцентробежных насосов / А. Ю. Ковалев, Е. М. Кузнецов, В. В. Аникин // РОССИЯ МОЛОДАЯ: Передовые технологии – в промышленность!. – 2015. – № 1. – С. 203-208.
33. Ковалев, А. Ю. Электротехнологические установки для нефтедобычи: монография / А. Ю. Ковалев, Е. М. Кузнецов, В. В. Аникин. – Омск.: Минобрнауки России, ОмГТУ, Нижневартовский академический институт прикладной энергетики, 2015. – 160 с.
34. Ковач, К. П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К. П. Ковач, И. Рац. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.
35. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин. –М.: Высшая школа, 1994. – 318 с.
36. Копырин, В. А. Индивидуальная компенсация реактивной мощности погружного асинхронного электродвигателя / В. А. Копырин // Конференция НЕФТЬ И ГАЗ 2016: Сборник трудов. – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина, 2016. – С. 336-335.
37. Копырин, В. А. Имитационное моделирование режимов работы погружного асинхронного электродвигателя / В. А. Копырин, О. В. Смирнов //

Омский научный вестник. – 2018. – № 1 (157). – С. 58-62. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-157-58-62.

38. Копырин, В. А. Оценка энергетической эффективности использования внутрискважинных компенсаторов реактивной мощности / В. А. Копырин, О. В. Смирнов, А. Л. Портнягин // Омский научный вестник. – 2018. – № 2 (158). – С. 78-83. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-159-78-83.

39. Копырин, В. А. Повышение эффективности использования электроэнергии погружным оборудованием высокодебитных скважин / В. А. Копырин // Омский научный вестник. – 2018. – № 3 (159). – С. 47-51. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-159-47-51.

40. Копырин, В. А. Исследование устойчивости погружного асинхронного электродвигателя при использовании внутрискважинного компенсатора / В. А. Копырин, Ф. А. Лосев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 1. – С. 390-398.

41. Копырин, В. А. Оптимизация режимов потребления реактивной мощности установками электроцентробежных насосов / В. А. Копырин, О. В. Смирнов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 4. – С. 450-458.

42. Копырин, В. А. Влияние внутрискважинного компенсатора на падение напряжения в элементах электротехнического комплекса добывающей скважины / В. А. Копырин, О. В. Смирнов, А. Л. Портнягин, Р. Н. Хамитов // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 9. – С. 117-124.

43. Кривицкий, С. О. Динамика частотно-регулируемых электроприводов с автономными инверторами / С. О. Кривицкий, И. И. Эпштейн. – М: Энергия, 1970. – 152 с.

44. Кубарьков, Ю. П. Выбор мощности компенсирующих устройств для оптимизации уровней потерь в электрической сети / Ю. П. Кубарьков, К. А. Голубева, Я. В. Макаров // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: технические науки. – 2016. – № 4 (52). – С. 77-82.

45. Кузнецов, Е. М. Прямое измерение скорости вращения погружных асинхронных электродвигателей установок для нефтедобычи / Е. М. Кузнецов, Д. О Павлов // Омский научный вестник. – 2017. – № 2 (152). – С. 55-59.
46. Лосев, Ф. А. Оценка динамической устойчивости погружных установок электроцентробежных насосов / Ф. А. Лосев, А. С. Мартынов, В. В. Сушкин // Актуальные вопросы энергетики: материалы Международной научно-практической конференции. – 2017. – С. 303-306.
47. Лысова, О. А. Системы управления электроприводов: Учебное пособие / О. А. Лысова, В. А. Ведерников. – Тюмень: ТюмГНГУ, – 2005. – 115 с.
48. Мартюшев, Д. Н. Комплексный подход к энергоэффективности при добыче нефти УЭЦН / Д. Н. Мартюшев // Инженерная практика. – 2011. – № 6. – С. 72-77.
49. Мартынов, А. С. Кратковременные нарушения электроснабжения в электрических сетях нефтяных месторождений / А. С. Мартынов, В. В. Сушкин, И. С. Небилович // Материалы V Международной научно-практической конференции «Культура, наука, образование: проблемы и перспективы». – 2016. – С. 123-126.
50. Марикин, А. Н. Применение преобразования Парка-Горева для управления статическим компенсатором реактивной мощности тяговой сети переменного тока / А. Н. Марикин, С. В. Кузьмин, С. А. Винаградов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2013. – № 2. – С. 47-54.
51. Махиня, А. Система энергоэффективного дизайна / А. Махиня // Нефтегазовая вертикаль. – 2014. – № 17–18. – С. 84-86.
52. Мелешин, В. И. Управление транзисторными преобразователями электроэнергии / В. И. Мелешин, Д. А. Овчинников. – М.: Техносфера, – 2011. – 576 с.
53. Мерабишвили, П. Ф. Нестационарные электромагнитные процессы в системах с вентилями / П. Ф. Мерабишвили, Е. М. Ярошенко. – Кишинев: Штиинца, 1980. – 208 с.
54. Мещанов, Г. И. Тепловой расчет кабеля-удлинителя в нефтяной скважине / Г. И. Мещанов // ПТНЖ «Электро». – 2010. – № 1. – С. 33-35.

55. Невоструев, В. А. Комплексный подход к энергоэффективности при добыче нефти УЭЦН // Инженерная практика. – 2017. – № 8. – С. 28-32.
56. Пат. 145053 Российская федерация, МПК G05F1/70, H02J3/18. Внутрискважинный компенсатор реактивной мощности / В. А. Копырин, Н. В. Гара, А. Л. Портнягин, О. В. Смирнов - №2014116437/07; заявл. 23.04.2014; опубл. 10.09.2014, Бюл. №25. – 5 с.
57. Пат. №159811 Российская федерация, МПК E21B43/12, F04D13/10. Погружная насосная установка с повышенным коэффициентом мощности / В. А. Копырин, О. В. Смирнов, А. Л. Портнягин - № 2015140165/03; заявл. 21.09.2015; опубл. 20.02.2016, Бюл. №25. – 5 с.
58. Пат. №159860 Российская федерация, МПК H02J3/18. Погружной компенсатор реактивной мощности / В. А. Копырин - № 2015140690/07; заявл. 23.09.2015; опубл. 20.02.2016, Бюл. №25. – 5 с.
59. Пат. 2485660 Российская федерация, МПК H02K 5/12, F04D 13/08. Погружной электродвигатель с повышенным коэффициентом мощности / Н. Г. Ибрагимов, Р. Г. Заббаров и т.д. - №2014116437/07; заявл. 23.04.2014; опубл. 10.09.2014, Бюл. №17. – 5 с.
60. Петлин, А. В. Опыт применения ПЭД с повышенным напряжением в ЦДО «Варьеганнефтегаз». Новые разработки ООО «Алмаз» / А. Е. Петлин // Инженерная практика. – 2011. – № 5. – С. 54-56.
61. Правила устройства электроустановок: все действующие разделы ПУЭ-6 и ПУЭ-7. 8-й выпуск. - Новосибирск: Сиб. унив. Изд-во, 2010. – 854 с.
62. Розанов, Ю. К. Силовая электроника: учебник для вузов / Ю. К. Розанов, М. В. Рябчинский, А. А. Кваснюк. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 632 с.
63. Розанов, Ю. К. Цифровая система управления статическим компенсатором реактивной мощности / Ю. К. Розанов, М. И. Смирнов, К. С. Кошелев // Электричество. – 2006. – № 7. – С. 25-30.
64. Розанов, Ю. К. Цифровая система управления преобразователем неактивной мощности / Ю. К. Розанов, М. В. Рябчинский, М. И. Смирнов // Техническая электродинамика. – 2005. – № 2. – С. 30-33.

65. Розанов, Ю. К. Пуско-регулирующее устройство для асинхронного двигателя на основе преобразователя напряжения с емкостным накопителем / Ю. К. Розанов, М. В. Рябчинский, М. И. Смирнов // XI-я международная конференция «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты.» – МКЭЭЭ. – 2006. – С. 182-183.
66. Российская Федерация. Законы. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: федер. закон от 23 ноября 2009 г., № 261-ФЗ (последняя редакция). Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».
67. Руденко, В. С. Основы преобразовательной техники / В. С. Руденко, В. И. Сенько, И. М. Чиженко. – М.: Высшая школа, 1974. – 431 с.
68. Сипайлов, В. А. Математическое моделирование электротехнического комплекса механизированной добычи нефти / В. А. Сипайлов / Наука, технологии, инновации: Труды Всеросс. науч. конф. Новосибирск. – 2008. – С. 46-47.
69. Смирнов, О. В. К вопросу об использовании внутристкважинных компенсаторов реактивной мощности / О. В. Смирнов, В. А. Копырин // Известия вузов. Нефть и газ. – 2015. – № 2. – С. 68-70.
70. Солодянкин, А. С. Математическое моделирование электротехнического комплекса установок электроцентробежных насосов / А. С. Солодянкин, А. Ю. Ковалев. – препринт Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. – 32 с.
71. Справочные данные по расчетным коэффициентам электрических нагрузок. – «Тяжпромэлектропроект имени Ф.Б. Якубовского». – 1990. – 114 с.
72. Сухачев, И. С. Совершенствование защиты от импульсных перенапряжений в системе «Трансформатор – питающий кабель – погружной электродвигатель» / И. С. Сухачев, С. В. Сидоров, В. В. Сушкин // Промышленная энергетика. – 2017. – № 9. – С. 7-12.
73. Сухачев, И. С. Методика оценки энергии, воздействующей на изоляцию электрооборудования нефтяной скважины при импульсных

перенапряжениях / И. С. Сухачев, С. В. Сидоров, В. В. Сушков // Омский научный вестник. – 2017. – № 6 (156). – С. 87-91.

74. Табачникова, Т. В. Индивидуальная компенсация реактивной мощности электротехнического комплекса добывающей скважины с электроцентробежным насосом / Т. В. Табачникова, Р. И. Гарифуллин, Э. Д. Нурбосынов, А. В. Махт // Промышленная энергетика. – 2015. – №2. – С. 44-46.

75. Тарасов, В. П. Энергосберегающий дизайн УЭЦН / В.П. Тарасов // Инженерная практика. – 2010. – № 3. – С. 26-31.

76. Тарасов, В. П. Использование специализированного ПО для расчета энергопотребления на механизированном фонде скважин / В. П. Тарасов, С. В. Куряев, И. М. Голубь // Инженерная практика. – 2016. – № 3. – С. 22-26.

77. Терёхин, В. Б. Моделирование систем электроприводов в Simulink (Matlab 7.0.1): учебное пособие / В. Б. Терёхин // Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 292 с.

78. Толстов, Ю. Г. Автономные инверторы тока / Ю. Г. Толстов. – М.: Энергия, 1978. – 208 с.

79. ТУ Р2.13.174.00.000. Кабели для установок погружных электронасосов, с полиэтиленовой изоляцией. Издание второе. – Радужный: ООО «Алмаз», 2008. – 19 с.

80. Усольцев, А. А. Электрические машины: учебное пособие / А. А. Усольцев. – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 416 с.

81. Хамитов, Р. Н. Причины выхода из строя силовых конденсаторов устройств компенсации реактивной мощности / Р. Н. Хамитов, А. А. Охотникова, Е. И. Семеров // Россия молодая: передовые технологии – в промышленности. – 2015. – № 1. – С. 278-282.

82. Хоцянов, И. Погружные вентильные двигатели. История, конструктивные особенности, возможности / И. Хоцянов, А. Санталов, О. Перельман, А. Рабинович, Е. Пошвин // Нефтегазовая вертикаль. – 2011. – № 12. – С. 58-65.

83. Хоцянов, И. Д. Вентильные электроприводы для центробежных насосов / И. Д. Хоцянов, А. М. Санталов, В. П. Кирюхин, О. Н. Хоцянова // Вестник МЭИ. – 2007. – № 3. – С. 21-26.
84. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – М.: ДМКПресс, 2007. – 288 с.
85. Шевченко, С. Д. Разработка алгоритма расчета дебита нефтяных скважин при их эксплуатации УЭЦН / С. Д. Шевченко, С. Б. Якимов, В. Н. Ивановский, А. А. Сабиров, Ю. А. Донской, О. А. Бычков, А. В. Прозоров // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2013. – № 6. – С. 90-91.
86. Шрейнер, Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р. Т. Шрейнер. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
87. Шрейнер, Р. Т. Математическое описание и алгоритмы ШИМ активных выпрямителей тока / Р. Т. Шрейнер, А. А. Ефимов, А. И. Калыгин // Электротехника. – 2000. – №10. – С. 42-49.
88. Шрейнер, Р. Т. Активный фильтр как новый элемент энергосберегающих систем электропривода / Р. Т. Шрейнер, А. А. Ефимов // Электротехника. – 2000. №3. – С. 46-54.
89. Якимов, С. Б. Оптимизация сечения кабеля УЭЦН – простая и эффективная технология энергосбережения / С. Б. Якимов, М. Н. Каверин, В. П. Тарасов // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2012. – № 3. – С. 53-57.
90. Якимов, С. Б. О новых перспективах применения ПЭД с повышенным напряжением питания для снижения капитальных и операционных затрат / С. Б. Якимов, М. Н. Каверин, В. П. Тарасов // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2015. – № 4. – С. 34-38.
91. Якимов, С. Б. Современное состояние и перспективные направления снижения тепловых потерь в кабельных линиях УЭЦН большой мощности в ОАО «НК «Роснефть» / С. Б. Якимов // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2016. – № 3. – С. 40-46.

92. Abramovich, B. N. The control algorithm for active and hybrid correction systems of voltage and current waveforms / B. N. Abramovich, Y. A. Sychev // IEEE Conference 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Omsk, Russia, 15-17 November 2016). Article number: 7818962. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7818962.
93. Akagi, H. Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits / H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae // IPEC'83 - Int. Power Electronics Conf. – Tokyo, Japan, 1983, P. 1375-1386.
94. IEEE STD/1459-2000. IEEE Trial Use Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Non-Sinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2000. – 52 c.
95. Kovalev, A. Yu. The parameter identification of submersible motors of electrical centrifugal pump units for oil production / A. Yu. Kovalev, Ye. M. Kuznetsov, V. V. Anikin // IEEE Control and Communications (SIBCON), 21-23 May 2015 International Siberian Conference. – P. 1-4.
96. Mishra, V. Power loss reduction of 11 kV feeder using capacitor banks to distribution transformers – a case study / V. Mishra, M. P. Sharma, B. Vyas, S. R. Ola // 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES). DOI: 10.1109/ICPEICES.2016.7853164.
97. Sharon, D. Reactive-power definitions and power-factor improvement in nonlinear systems // Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. – 1973. – V. 120. – Iss. 6. – P. 704-706. DOI: 10.1049/piee.1973.0155.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

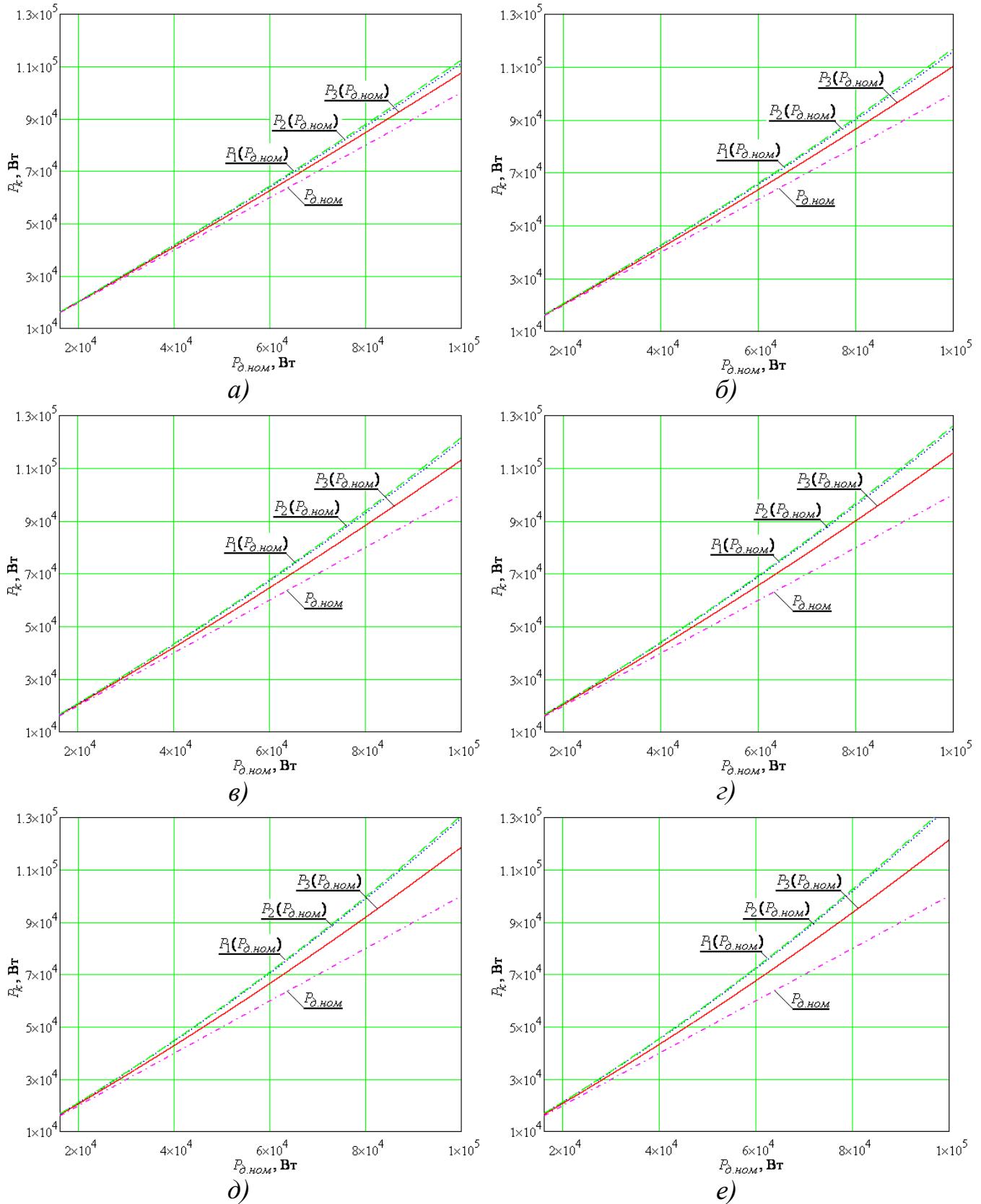


Рисунок А.1 – Графики зависимостей потребляемой мощности ЭТК УЭЦН при  $U_{o,nom} = 1250$  В,  $S_T = 100$  кВА,  $S_{KL} = 21,15$   $\text{мм}^2$ : *а)*  $l_{KL} = 1000$  м, *б)*  $l_{KL} = 1500$  м, *в)*  $l_{KL} = 2000$  м, *г)*  $l_{KL} = 2500$  м, *д)*  $l_{KL} = 3000$  м, *е)*  $l_{KL} = 3500$  м

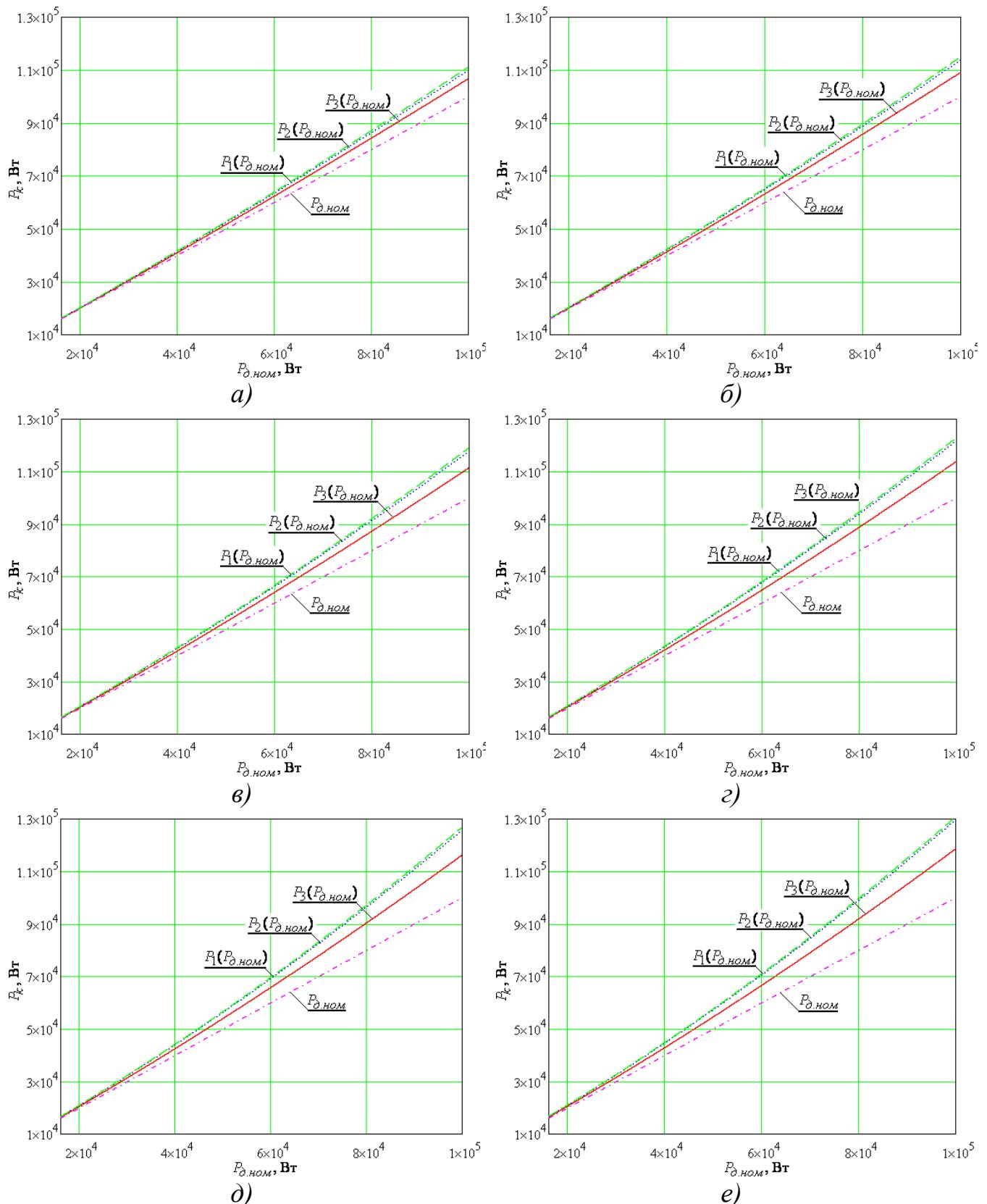


Рисунок А.2 – Графики зависимостей потребляемой мощности ЭТК УЭЦН при  $U_{\partial,nom} = 1250$  В,  $S_T = 100$  кВА,  $S_{KL} = 25$  мм<sup>2</sup>: *a)*  $l_{KL} = 1000$  м, *б)*  $l_{KL} = 1500$  м, *в)*  $l_{KL} = 2000$  м, *г)*  $l_{KL} = 2500$  м, *д)*  $l_{KL} = 3000$  м, *е)*  $l_{KL} = 3500$  м

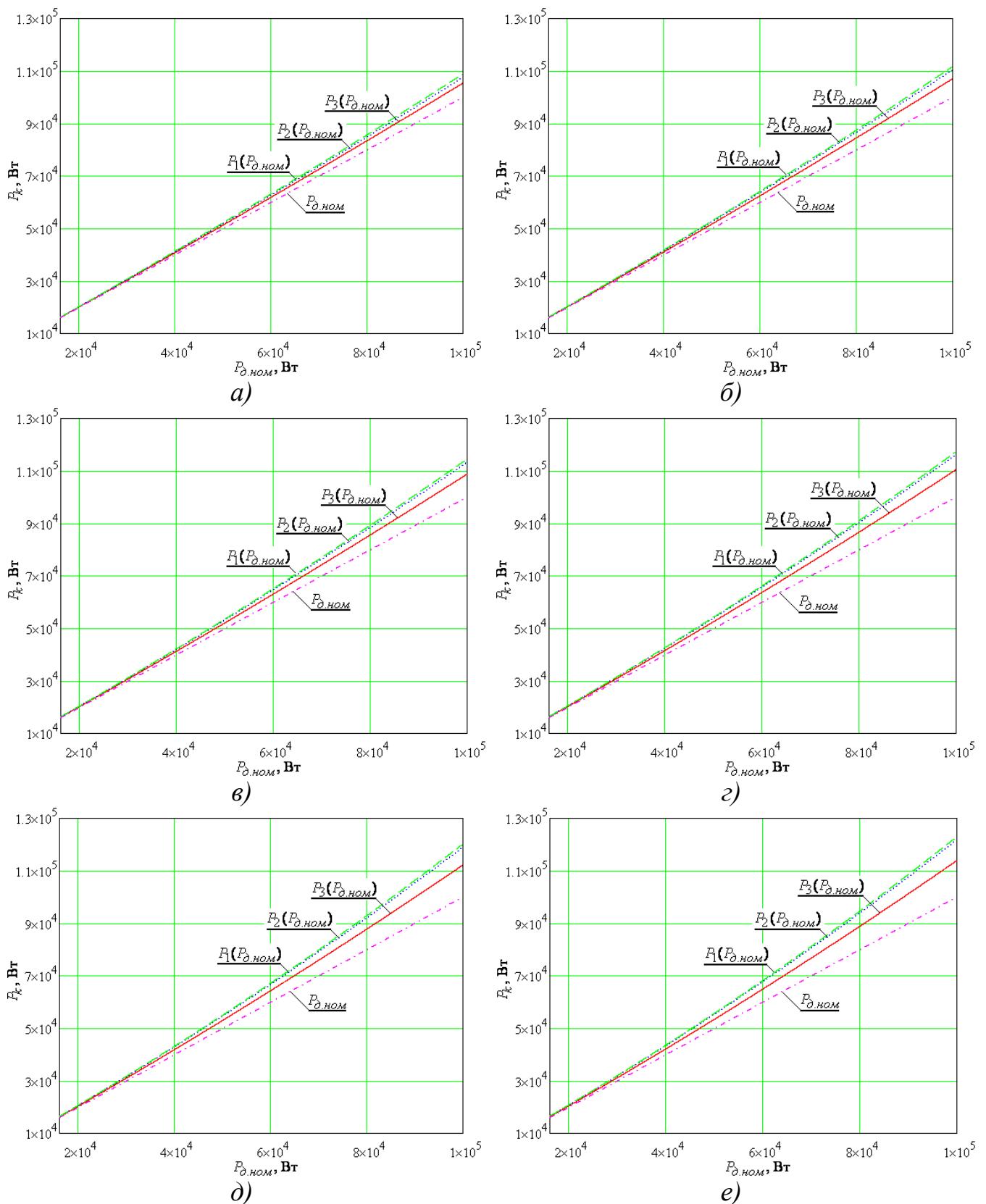
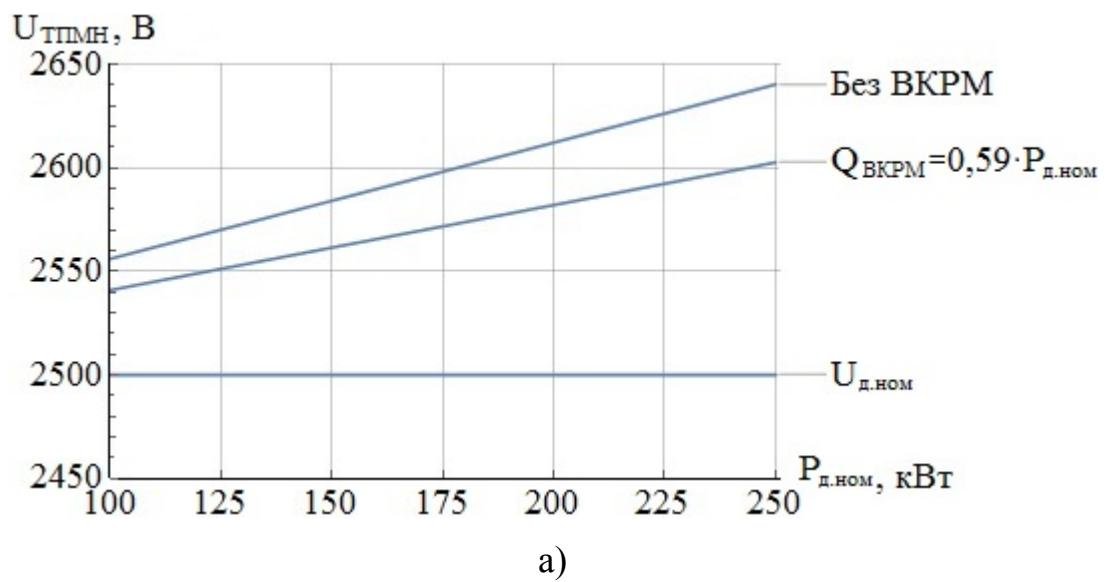
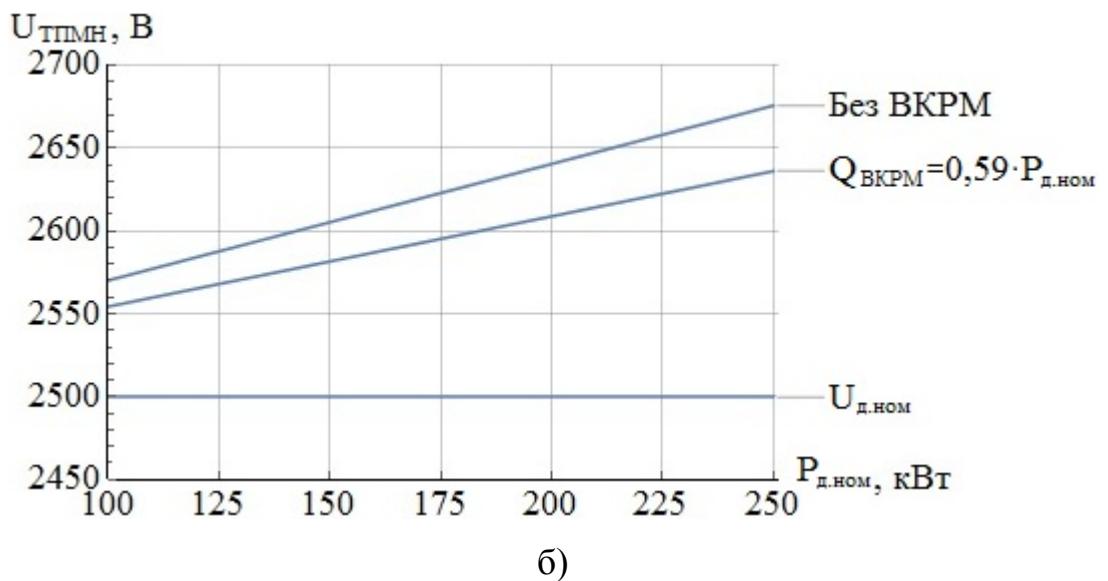


Рисунок А.3 – Графики зависимостей потребляемой мощности ЭТК УЭЦН при  $U_{0,nom} = 1250$  В,  $S_T = 100$  кВА,  $S_{KL} = 35$  мм<sup>2</sup>: *a)*)  $l_{KL} = 1000$  м, *б)*)  $l_{KL} = 1500$  м, *в)*)  $l_{KL} = 2000$  м, *г)*)  $l_{KL} = 2500$  м, *д)*)  $l_{KL} = 3000$  м, *е)*)  $l_{KL} = 3500$  м

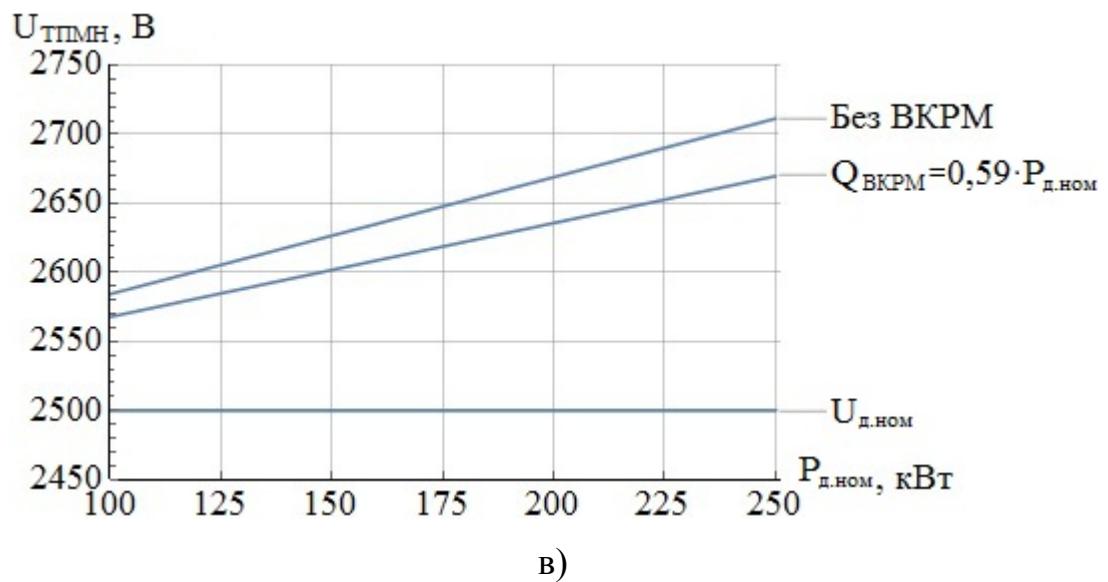
## ПРИЛОЖЕНИЕ Б



а)



б)



в)

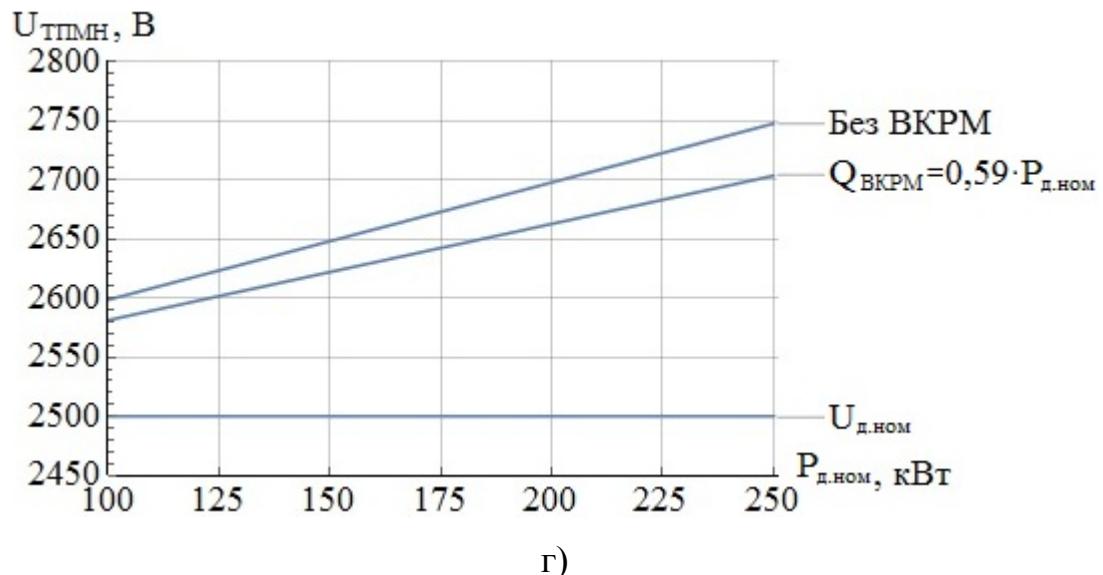
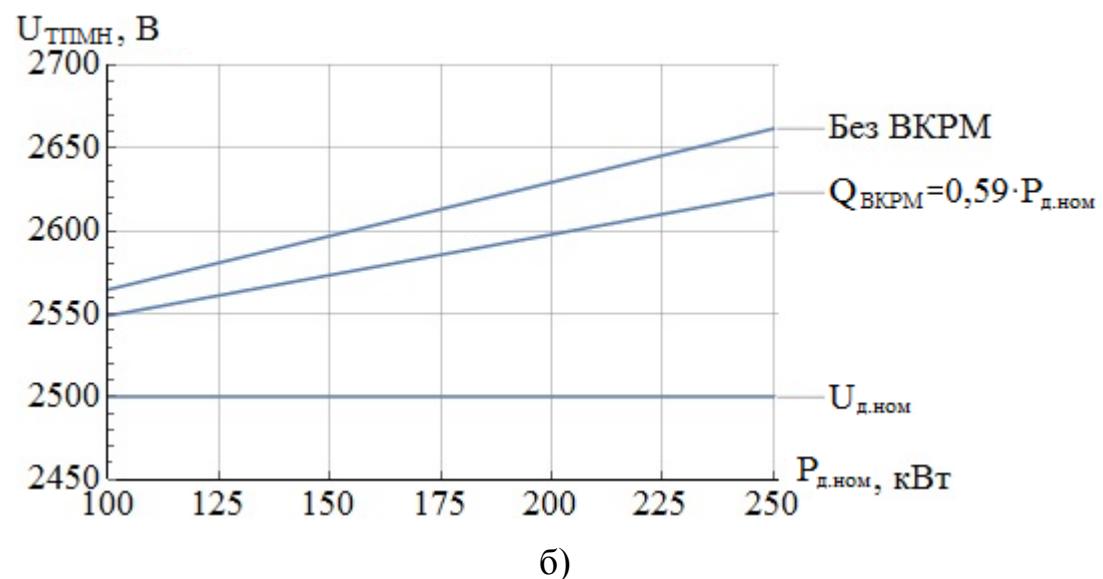
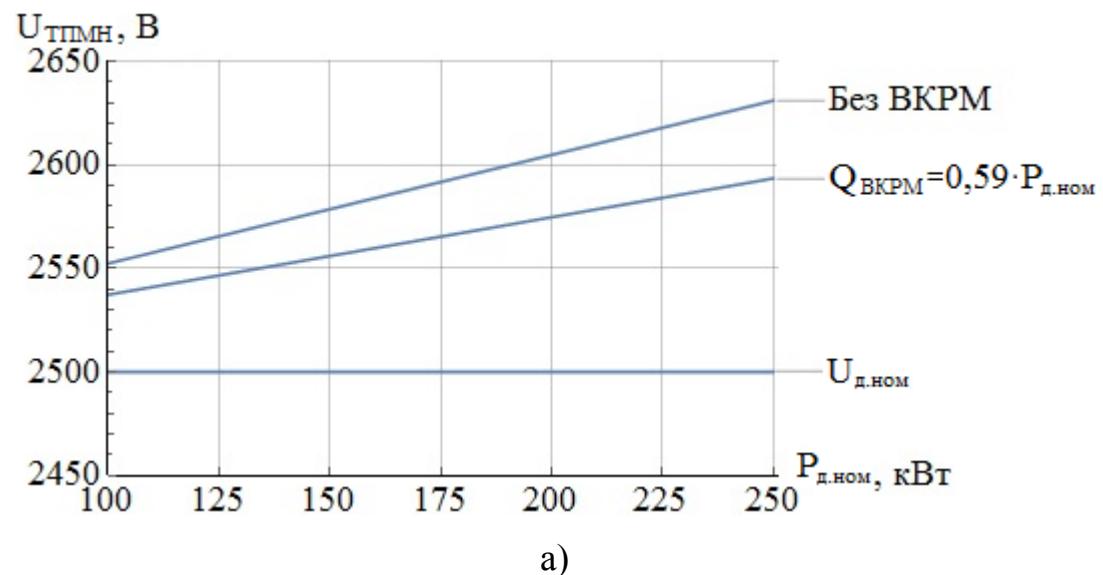


Рисунок Б.1 – Зависимости напряжения на выходе питающего трансформатора до и после компенсации реактивной мощности внутри скважины при  $S_{KL}=21,15 \text{ мм}^2$ :

а)  $l_{KL}=1000 \text{ м}$ ; б)  $l_{KL}=1500 \text{ м}$ ; в)  $l_{KL}=2000 \text{ м}$ ; г)  $l_{KL}=2500 \text{ м}$



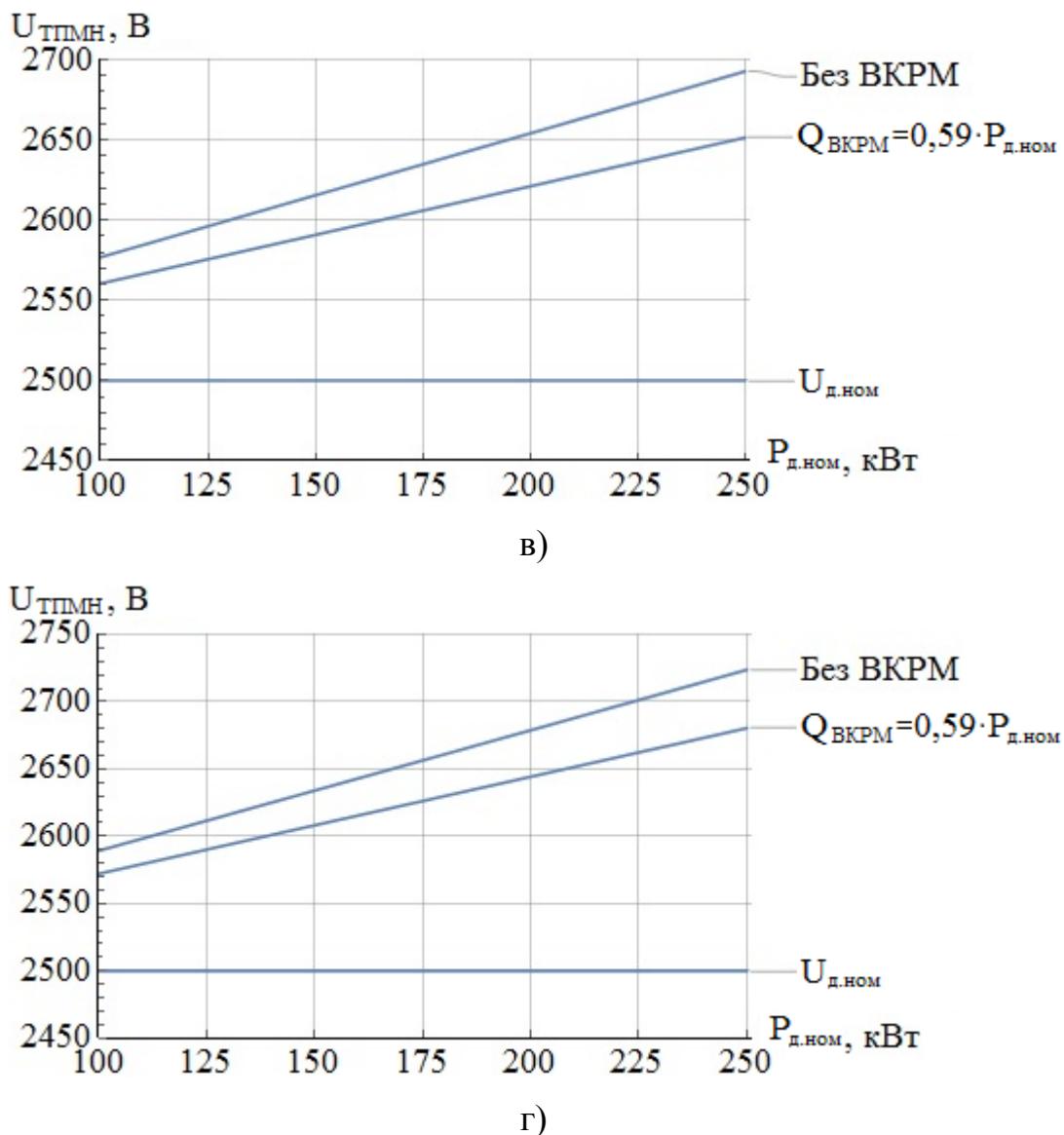
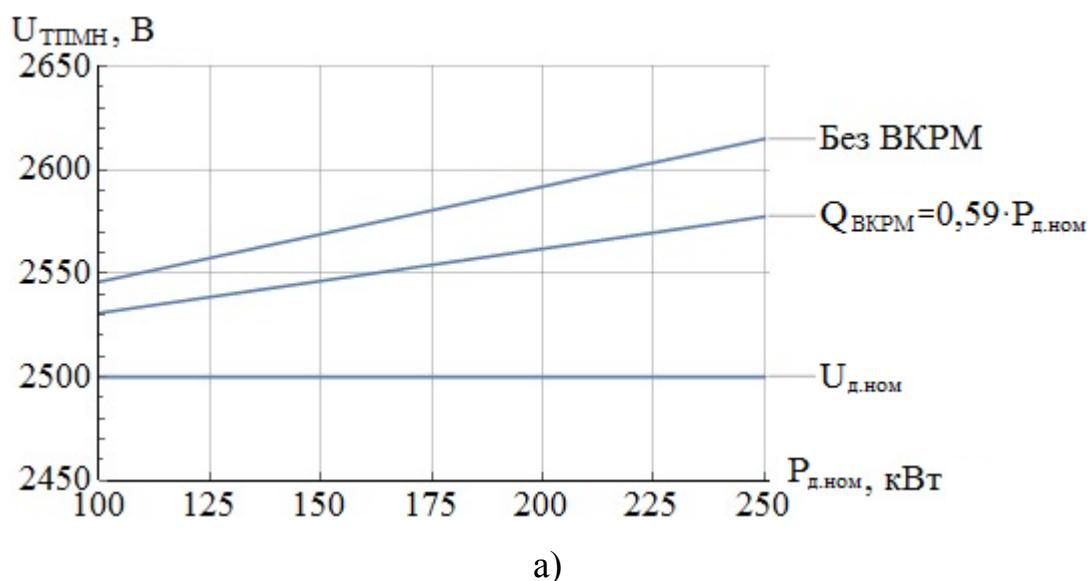


Рисунок Б.2 – Зависимости напряжения на выходе питающего трансформатора до и после компенсации реактивной мощности внутри скважины при  $S_{KL}=25 \text{ мм}^2$ :

а)  $l_{KL}=1000 \text{ м}$ ; б)  $l_{KL}=1500 \text{ м}$ ; в)  $l_{KL}=2000 \text{ м}$ ; г)  $l_{KL}=2500 \text{ м}$



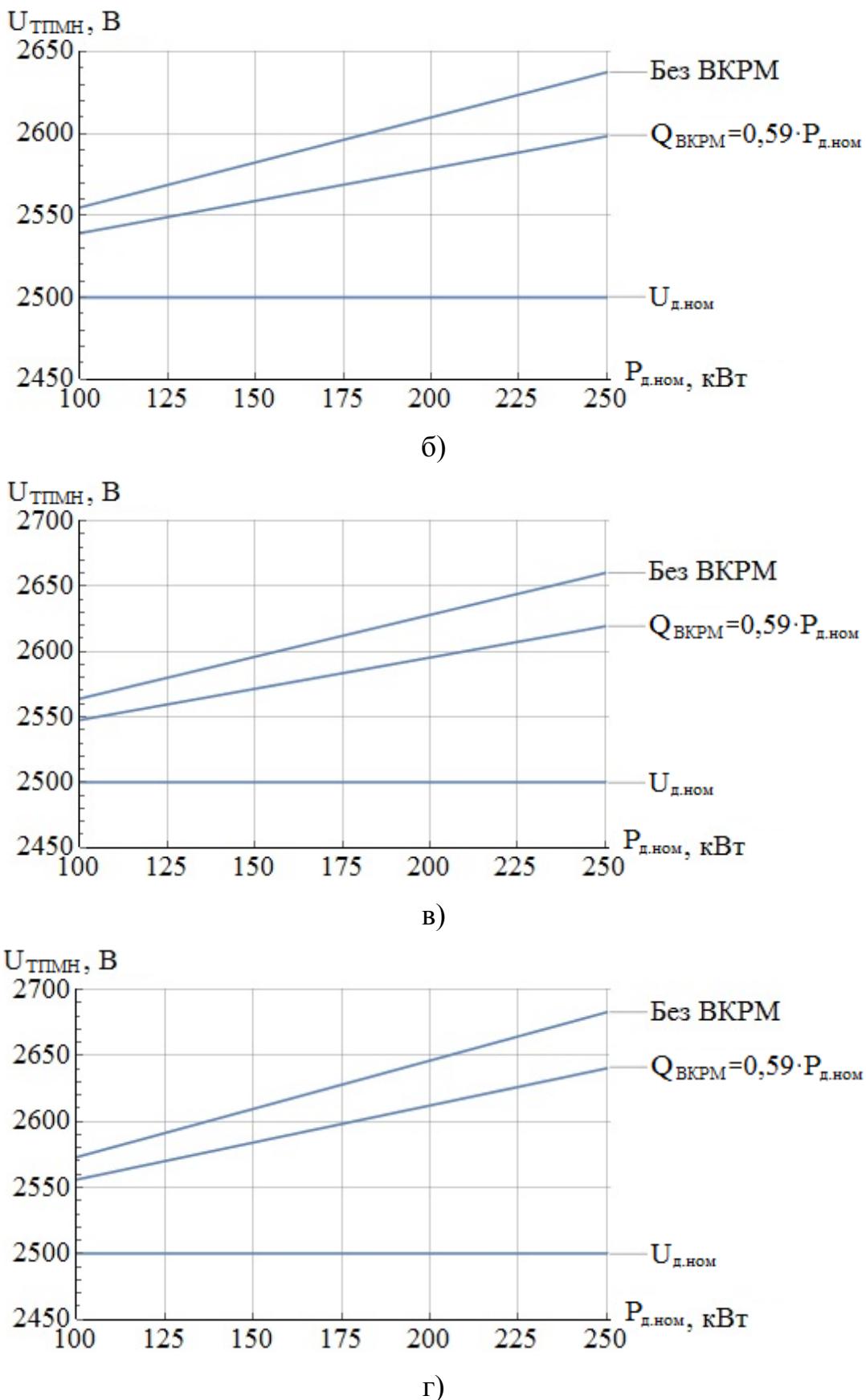


Рисунок Б.3 – Зависимости напряжения на выходе питающего трансформатора до и после компенсации реактивной мощности внутри скважины при  $S_{KL}=35 \text{ мм}^2$ :

а)  $l_{KL}=1000 \text{ м}$ ; б)  $l_{KL}=1500 \text{ м}$ ; в)  $l_{KL}=2000 \text{ м}$ ; г)  $l_{KL}=2500 \text{ м}$

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### **Методика расчет энергетической и экономической эффективности внедрения внутрискважинных компенсаторов реактивной мощности на нефтяных месторождениях**

Для реализации оценки эффективности внедрения ВКРМ на нефтяных месторождениях можно выделить два направления: оценка энергетической эффективности и оценка экономической эффективности.

Оценка энергетической эффективности позволяет оценить полезный эффект, полученный от использования ВКРМ, сделать вывод о целесообразности его внедрения с учетом принятого показателя энергетической эффективности.

При оценке экономической эффективности проекта оценивается его потенциальная способность сохранить окупаемость вложенных средств и обеспечить рост эффективности их использования.

В качестве объекта исследования были выбраны десять потенциальных нефтяных скважин кандидатов для внедрения внутрискважинных компенсаторов Северо-Варяганского месторождения. Информация о технологических параметрах УЭЦН и фактическом энергопотреблении скважин кандидатов приведена в таблице В1 и таблице В2 соответственно.

Таблица В1  
Технологические параметры УЭЦН

№ скв.	Номинальная производительность насоса, м <sup>3</sup> /сут	Номинальная мощность ПЭД, кВт	Частота напряжения питания ПЭД, Гц	Сечение токопроводящих жил кабельной линии, мм <sup>2</sup>	Длина кабельной линии, м
1	400,0	160	50	16	2615
2	250,0	125	50	16	2338
3	500,0	180	50	16	2456
4	500,0	180	50	16	2801
5	320,0	160	50	16	2425
6	320,0	180	50	16	2548
7	200,0	125	50	16	2969
8	500,0	180	50	16	2264
9	200,0	110	50	16	2731
10	500,0	180	50	16	1918

## Фактическое энергопотребление УЭЦН

№ скв.	Напряжение отпайки трансформатора, В	Рабочий ток, А	Коэффициент мощности, cosφ	Потребляемая активная мощность, кВт	Потребляемая электроэнергия, кВт·ч в год	Удельное энергопотребление на кубический метр добытой жидкости, кВт/м <sup>3</sup>
1	2670	52	0,67	164,9	1444841	10,7
2	2640	49,1	0,68	172,4	1509846	14,7
3	3269	52,6	0,68	203,1	1778753	12,2
4	3215	53	0,73	220,0	1927048	10,4
5	2378	46,3	0,7	139,8	1224772	9,9
6	2920	49,1	0,74	188,1	1647885	10,7
7	2480	39,9	0,71	134,5	1178185	19,8
8	2723	56,6	0,8	231,5	2028301	10,1
9	1967	41,3	0,7	104,0	911404	12,1
10	2670	51	0,73	179,0	1567771	8,0

Показатель энергетической эффективности определяется по выражению:

$$\vartheta_P(t) = \frac{W_{план}(t) - W_{нов}(t)}{W_{план}(t)} = 1 - \frac{W_{нов}(t)}{W_{план}(t)}, \quad (1)$$

где  $W_{план}(t)$  – плановый расход электроэнергии, рассчитанный при стандартной компоновке УЭЦН (без ВКРМ), кВт·ч;

$W_{нов}(t)$  – расход электроэнергии при использовании ВКРМ, кВт·ч.

Для оценки экономического эффекта, полученного от использования ВКРМ, предлагается сравнить сумму затрат на компенсацию реактивной мощности при стандартном и предложенном способах, с учетом потерь электрической энергии в электротехническом комплексе УЭЦН.

В настоящее время для расчета количества комплектно-трансформаторных подстанции (КТП) при проектировании и разработке нефтедобывающих кустов скважин следует руководствоваться ВНТП 3-85 «Нормы технологического проектирования объектов сбора, транспорта, подготовки нефти, газа и воды нефтяных месторождений», ПУЭ «Правила устройства электроустановок», внутренними техническими документами эксплуатирующих организаций и т.д.

Как правило, устройства компенсации реактивной мощности устанавливаются на площадке обслуживания комплектно-трансформаторных

подстанций. Выбор мощности устройств компенсации производится исходя из условия поддержания требуемого коэффициента реактивной мощности сети в точке подключения  $\operatorname{tg}\varphi_c \leq 0,3$ .

Потери электроэнергии в ЭТК УЭЦН в годовом выражении с учетом коэффициента использования определяются по выражению:

$$\Delta W_i = k_u \cdot \Delta P_i \cdot N, \quad (2)$$

где  $\Delta P_i$  – потери активной мощности в ЭТК при стандартной компоновке

УЭЦН и при использовании ВКРМ, кВт·ч в год;

$N$  – количество рабочих часов в году,  $N = 8760$  ч;

$k_u$  – коэффициент использования электроцентробежного насоса,  $k_u = 0,95$  для ЭЦН до 35 кВт,  $k_u = 0,8$  для ЭЦН выше 35 кВт.

Финансовые поступления, связанные с реализацией проекта, создаются главным образом за счет уменьшения потерь активной мощности в токопроводящих элементах комплекса. Величину ежегодных финансовых поступлений предлагается определять по выражению:

$$F_t = (\Delta W_{план} - \Delta W_{нов}) \cdot c = k_u \cdot (\Delta P_{план} - \Delta P_{нов}) \cdot N \cdot c, \quad (3)$$

где  $c$  – тариф на электроэнергию,  $c = 3$  руб./кВт·ч;

$t$  – время, лет.

Расчетные значения энергопотребления и показатели энергетической и экономической эффективности после использования внутрискважинных компенсаторов приведены в таблице В3 и таблице В4 соответственно. Температура пластовой жидкости на рассматриваемых нефтедобывающих скважинах варьируется от 74 до 83 °C.

Таблица В3

## Расчетное энергопотребление УЭЦН

№ скв.	Напряжение отпайки трансформатора (новое), В	Рабочий ток (новый), А	Реактивная мощность ВКРМ, квар	Потребляемая активная мощность (новая), кВт	Потребляемая электроэнергия (новая), кВт·ч в год	Удельное энергопотребление на кубический метр добытой жидкости (новое), кВт/м <sup>3</sup>
1	2598,0	39,0	105,6	151,4	1350141	9,7
2	2574,0	41,0	107,8	159,6	1419946	13,3
3	3204,0	38,8	131,8	190,7	1691873	11,2
4	3143,0	42,5	113,8	207,6	1840498	9,6
5	2320,0	36,8	80,9	130,3	1157932	9,0
6	2860,0	39,9	94,2	178,7	1582205	9,9
7	2416,0	33,9	74,0	125,2	1113295	17,9
8	2665,0	52,4	83,1	222,4	1964431	9,3
9	1908,0	33,3	57,7	95,5	851854	10,5
10	2621,0	41,5	95,6	170,7	1509671	7,5

Таблица В4

## Показатели энергетической и экономической эффективности

№ скв.	Снижение энергопотребления в год, кВт·ч в год	Показатель энергоэффективности $\mathcal{E}_P$ , %	Экономический эффект без учета стоимости ВКРМ, руб.
1	94700	8,2	284100,0
2	89900	7,4	269700,0
3	86880	6,1	260600,0
4	86550	5,6	259700,0
5	66840	6,8	200500,0
6	65680	5,0	197000,0
7	64890	6,9	194700,0
8	63870	3,9	191600,0
9	59550	8,2	178700,0
10	58100	4,6	174300,0

Анализ таблицы В3 и таблицы В4 показал, что внедрение внутрискважинных компенсаторов реактивной мощности на исследуемых нефтяных скважинах с энергетической и экономической точки зрения целесообразно при планируемой средней стоимости разрабатываемых внутрискважинных компенсаторов 110 тыс. руб.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



• ПАТЕНТ •

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 145053

ВНУТРИСКВАЖИННЫЙ КОМПЕНСАТОР РЕАКТИВНОЙ  
МОЩНОСТИ

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Тюменский государственный нефтегазовый университет" (ТюмГНГУ) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2014116437

Приоритет полезной модели **23 апреля 2014 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации **05 августа 2014 г.**

Срок действия патента истекает **23 апреля 2024 г.**

*Брио руководителя Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

Л.Л. Кирий



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) RU (11) 145 053<sup>(13)</sup> U1(51) МПК  
G05F 1/70 (2006.01)  
H02J 3/18 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ ОПИСАНИЯ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2014116437/07, 23.04.2014

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
23.04.2014

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 23.04.2014

(45) Опубликовано: 10.09.2014 Бюл. № 25

Адрес для переписки:  
625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38,  
ТюмГНГУ, патентно-информационный отдел,  
Ивановой Л.С.

(72) Автор(ы):

Копырин Владимир Анатольевич (RU),  
Гара Наталья Викторовна (RU),  
Портнягин Алексей Леонидович (RU),  
Смирнов Олег Иванович (RU)

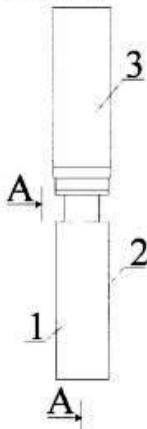
(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования "Тюменский  
государственный нефтегазовый университет"  
(ТюмГНГУ) (RU)

## (54) ВНУТРИСКВАЖИННЫЙ КОМПЕНСАТОР РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

## (57) Формула полезной модели

Внутрискважинный компенсатор реактивной мощности, содержащий корпус, с расположенным в нем косинусными конденсаторами, при этом указанный корпус выполнен с возможностью соединения с электродвигателем, отличающийся тем, что компенсатор дополнительно содержит установленный в корпусе блок системы управления и шинопроводы, причем входы косинусных конденсаторов соединены с выходами силовых модулей блока системы управления, а выходы косинусных конденсаторов соединены с шинопроводами.

RU  
145053  
U1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

на изобретение

№ 2595256

**ПОГРУЖНОЕ ФИЛЬТРОКомПЕНСИРУЮЩЕЕ  
УСТРОЙСТВО**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
"Тюменский индустриальный университет" (ТИУ) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2015116849

Приоритет изобретения **30 апреля 2015 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре  
изобретений Российской Федерации **03 августа 2016 г.**

Срок действия патента истекает **30 апреля 2035 г.**

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Геннадий Иванов*

Г.П. Иванов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) RU (11) 2 595 256 (13) С1

(51) МПК  
H02J 3/18 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2015116849/07, 30.04.2015

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
30.04.2015

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 30.04.2015

(45) Опубликовано: 27.08.2016 Бюл. № 24

(56) Список документов, цитированных в отчете о  
поиске: RU145053U1, 10.09.2014. RU2479088C1,  
10.04.2013. CN203883480U, 15.10.2014.

Адрес для переписки:

625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, ТИУ,  
управление НИР, Шаруха Е.И.

(72) Автор(ы):

Копырин Владимир Анатольевич (RU),  
Смирнов Олег Владимирович (RU),  
Портнягин Алексей Леонидович (RU)

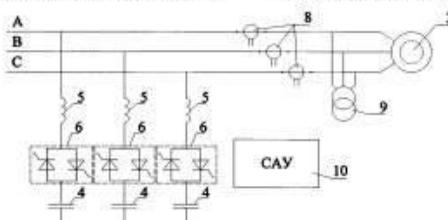
(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования "Тюменский индустриальный  
университет" (ТИУ) (RU)

RU 2 595 256 С1

C1  
2 5 9 5 2 5 6  
R U

входами модулей тиристорных вентилей. Выходы модулей тиристорных вентилей соединены с входами конденсаторов, выходы конденсаторов соединены между собой по схеме «звезда». Для возможности регулирования вырабатываемой реактивной мощности в корпус установлен блок системы автоматического управления, включающий в себя трансформаторы тока, трехфазный трансформатор напряжения и систему автоматического управления, которая вычисляет реактивную мощность и выдает управляющий сигнал на включение тиристорных вентилей. Технический результат - уменьшение негативного влияния высших гармонических составляющих на конденсаторы. 3 ил.



Фиг. 3

## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## •ПАТЕНТ•

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 159860

ПОГРУЖНОЙ КОМПЕНСАТОР РЕАКТИВНОЙ  
МОЩНОСТИ

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Тюменский государственный нефтегазовый университет" (ТюмГНГУ) (RU)*

Автор(ы): *Копырин Владимир Анатольевич (RU)*

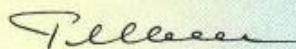
Заявка № 2015140690

Приоритет полезной модели **23 сентября 2015 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации **29 января 2016 г.**

Срок действия патента истекает **23 сентября 2025 г.**

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ильин



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) RU<sup>(11)</sup> 159 860<sup>(13)</sup> U1(51) МПК  
H02J 3/18 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**(12) ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ ОПИСАНИЯ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ**

(21)(22) Заявка: 2015140690/07, 23.09.2015

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
23.09.2015

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 23.09.2015

(45) Опубликовано: 20.02.2016 Бюл. № 5

Адрес для переписки:

625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38,  
ТюмГНГУ, управление НИР, Шаруха Е.И.(72) Автор(ы):  
Копырин Владимир Анатольевич (RU)(73) Патентообладатель(и):  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования "Тюменский государственный  
нефтегазовый университет" (ТюмГНГУ)  
(RU)**(54) ПОГРУЖНОЙ КОМПЕНСАТОР РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ****(57) Формула полезной модели**

Погружной компенсатор реактивной мощности, содержащий герметичный корпус, с расположенными внутри катушками индуктивности, конденсатором, трансформаторами тока и блоком системы автоматического управления, при этом корпус выполнен с возможностью соединения с корпусом погружного электродвигателя, отличающийся тем, что внутри корпуса установлен трехфазный инвертор напряжения, состоящий из шести пар силовых вентилей, блока системы автоматического управления и драйвера, причем входы катушек индуктивности электрически соединены с питающим кабелем, а выходы с входом и выходом двух пар силовых вентилей каждая, противоположные входы и выходы силовых вентилей соединены с входом и выходом конденсатора, блок системы автоматического управления, включает в себя трансформаторы тока, датчики напряжения, систему автоматического управления с функцией широтно-импульсной модуляции.

U1 159860 RU

R U 1 5 9 8 6 0 U 1

## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 159811

ПОГРУЖНАЯ НАСОСНАЯ УСТАНОВКА С  
ПОВЫШЕННЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ МОЩНОСТИ

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Тюменский государственный нефтегазовый университет" (ТюмГНГУ) (RU)*

Автор(ы): см. на обороте

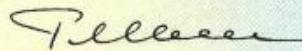
Заявка № 2015140165

Приоритет полезной модели 21 сентября 2015 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 28 января 2016 г.

Срок действия патента истекает 21 сентября 2025 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ильин



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) RU (11) 159 811 (13) U1

(51) МПК  
E21B 43/12 (2006.01)  
F04D 13/10 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ ОПИСАНИЯ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2015140165/03, 21.09.2015

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
21.09.2015

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 21.09.2015

(45) Опубликовано: 20.02.2016 Бюл. № 5

Адрес для переписки:

625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38,  
ТюмГНГУ, управление НИР, Шаруха Е.И.

(72) Автор(ы):

Копырин Владимир Анатольевич (RU),  
Смирнов Олег Владимирович (RU),  
Портнягин Алексей Леонидович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования "Тюменский государственный  
нефтегазовый университет" (ТюмГНГУ)  
(RU)(54) ПОГРУЖНАЯ НАСОСНАЯ УСТАНОВКА С ПОВЫШЕННЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ  
МОЩНОСТИ

## (57) Формула полезной модели

Погружная насосная установка с повышенным коэффициентом мощности, содержащая блок телеметрии, хвостовик, оборудованный пакером, колонну насосно-компрессорных труб с установленными на ней последовательно сверху вниз сливным клапаном, обратным клапаном, погружным центробежным насосом, газосепаратором, сетчатым фильтром, узлом гидрозащиты, погружным электродвигателем и силовой кабель, закрепленный на колонне насосно-компрессорных труб при помощи зажимов, отличающаяся тем, что к погружному электродвигателю жестко присоединен внутристеклянный компенсатор реактивной мощности с установленными на нем последовательно блоком телеметрии и хвостовиком, оборудованным пакером.

U1 159811 RU

RU 159811 RU

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



# СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

**№ 2019612165**

**«DRPC calculate» (Расчет энергетической эффективности  
использования внутристкважинных компенсаторов  
реактивной мощности)**

Правообладатель: *Общество с ограниченной ответственностью  
«Научно-производственная компания «Техойл» (ООО НПК  
«Техойл») (RU)*

Авторы: *Копырин Владимир Анатольевич (RU), Бухер Юрий  
Евгеньевич (RU), Смирнов Олег Владимирович (RU), Хамитов  
Рустам Нуриманович (RU)*

Заявка № 2019610928

Дата поступления **04 февраля 2019 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **12 февраля 2019 г.**

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Г.П. Ильев*



## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ  
«АЛМАЗ»



628463, Российская Федерация, ХМАО-Югра, г. Радужный, Южная промышленная зона  
Приемная: (34668) 41-150 (доб. 101) e-mail: almaz@almaz-hmao.ru  
ИНН 8609004214 КПП 862450001 ОГРН 1028601465232 ОКПО 27385465

## АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы на соискание  
ученой степени кандидата технических наук  
Копырина Владимира Анатольевича

Комиссия в составе:

Р. Н. Салихов – Исполнительный директор-Главный инженер  
ООО «Алмаз»;

А. А. Юкин – Начальник конструкторско-технического отдела  
ООО «Алмаз»

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы  
Копырина В. А. внедрены в производственную деятельность ООО «Алмаз»  
при разработке, изготовлении и испытаниях опытного образца  
внутрискважинного компенсатора реактивной мощности в составе  
энергоэффективной погружной установки для добычи нефти, а именно:

1. Результаты имитационного моделирования энергетических и  
силовых параметров электротехнического комплекса установки  
электроцентробежного насоса с внутрискважинным компенсатором реактивной  
мощности при изменении частоты напряжения питания;

2. Конструктивные решения элементов электротехнического  
комплекса установки электроцентробежного насоса с внутрискважинным  
компенсатором реактивной мощности на основе патентов: внутрискважинный  
компенсатор реактивной мощности (RU 145053), погружная насосная установка  
с повышенным коэффициентом мощности (RU 159811), погружное фильтро-  
компенсирующее устройство (RU 2595256), погружной компенсатор  
реактивной мощности (RU 159860).

Экспериментально подтверждена эффективность использования  
внутрискважинных компенсаторов реактивной мощности в составе установок  
электроцентробежных насосов. В ходе стендовых испытаний опытных образов  
погружного асинхронного электродвигателя (ПЭД) и внутрискважинного  
компенсатора реактивной мощности (ВКРМ) зафиксировано повышение  
коэффициента мощности узла «ПЭД–ВКРМ» с 0,80 до 0,95.

Приложение: Протокол испытаний №19038-II-II от 29.08.2018 г.

Исполнительный директор-Главный инженер

  
Р. Н. Салихов

Начальник КТО

  
А. А. Юкин

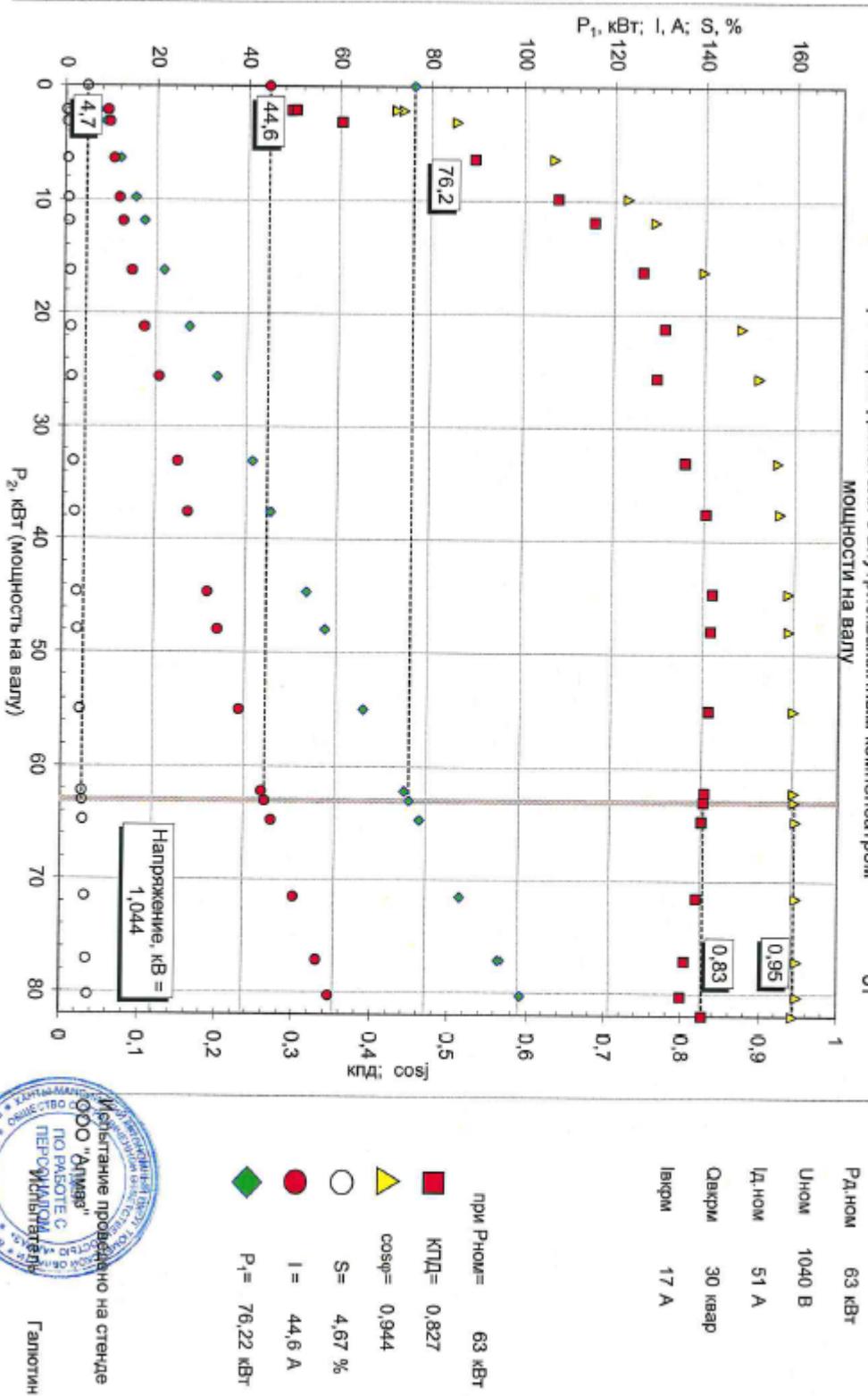


**Протокол испытания под нагрузкой погружного электродвигателя с внутристкважинным компенсатором №19038-II-II**

ВЛ-2ЭД-Я 63-117МБ5 зав. №Я 180345

Предприятие-изготовитель ООО "Алмаз" Дата испытания 29.08.18

Зависимость параметров двигателя с внутристкважинным компенсатором от мощности на валу



Испытание проведено на стенде  
по разработке  
ООО "Алмаз"  
ПЕРСОНАЛЬНЫЙ  
ГАМОТИН



**ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
«ВАРЬЕГАННЕФТЕГАЗ»  
(ПАО «Варьеганнефтегаз»)**

**«СОГЛАСОВАНО»**

Заместитель генерального директора  
по перспективному планированию и  
развитию производства

Д.В. Загайнов

«11 » июля 2018г.

**«УТВЕРЖДАЮ»**

И.о. заместителя генерального  
директора - главный инженер  
ПАО «Варьеганнефтегаз»

А.П. Фирсов

«11 » июля 2018г.



**ПРОГРАММА  
ПАО «Варьеганнефтегаз»**

**ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ:  
Внутрискважинного компенсатора реактивной  
мощности (ВКРМ)**

г. Нижневартовск 2018 г.

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе ОМГТУ

О.В. Кропотин

« 01 » 03 2019 г.

### АКТ

использования в учебном процессе результатов докторской работы  
Копырина Владимира Анатольевича

Результаты докторской работы на соискание ученой степени кандидата технических наук Копырина Владимира Анатольевича внедрены в практику деятельности Омского государственного технического университета.

В частности:

1. Материалы по теме докторской работы систематически используются на кафедре «Электрическая техника» Энергетического института Омского государственного технического университета при чтении лекций, при выполнении расчетных работ по дисциплине «Проектирование и конструирование электроэнергетического и электротехнического оборудования и систем» для студентов направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» профиль «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений».

2. Материалы по теме докторской работы систематически используются на кафедре «Электрическая техника» Энергетического института Омского государственного технического университета при чтении лекций, при курсовом проектировании по дисциплине «Электротехнические комплексы и системы управления механизмами электроустановок» для студентов направления подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

профиль «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений».

3. Для внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс подготовлено и издано учебное пособие:

Электрооборудование погружных электротехнических комплексов:  
учеб. пособие / Р. Н. Хамитов, В. А. Копырин ; Минобрнауки России,  
ОмГТУ. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2019. – 132 с. (Тираж 50 экз.).

Заведующий кафедрой «Электрическая техника»

Омского государственного технического университета

д.т.н., профессор

 А.В. Бубнов