

На правах рукописи



Шевырева Наталия Юрьевна

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ
ПРИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИИ БУРОВЫХ УСТАНОВОК
С ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Научный руководитель: **Фащиленко Валерий Николаевич,**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Онищенко Георгий Борисович,**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Московский государственный
машиностроительный университет (МАМИ)»,
кафедра электрических систем, профессор

Благодаров Дмитрий Анатольевич,
кандидат технических наук,
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
университет «МЭИ», кафедра автоматизированного
электропривода, доцент

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный
технический университет»

Защита состоится «**14**» **июня 2016 г.** в **часов** на заседании
диссертационного совета Д **212.132.15** при ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский технологический университет «МИСиС» по адресу: 119991,
г. Москва, Ленинский проспект, д. 6

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке
Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» и
на сайте <http://old.misis.ru>.

Автореферат разослан « » **апреля 2016 г.**

УЧЁНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета
канд. техн. наук, профессор



ШЕШКО
Евгения Евгеньевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Значительное увеличение числа нелинейных потребителей электроэнергии приводит к существенному искажению синусоидальной формы напряжения сети и увеличению потребления реактивной мощности. Искажение напряжения сети приводит к увеличению потерь электроэнергии и сокращению срока службы электрооборудования, увеличению погрешности электроизмерительных приборов, ухудшению работы систем управления и связи. Увеличение потребления реактивной мощности приводит к возрастанию потерь в питающей сети, дополнительным отклонениям напряжения сети.

К нелинейным потребителям, ухудшающим качество электроэнергии (КЭ), относятся электротехнические комплексы (ЭТК) буровых установок (БУ) для разведочного и эксплуатационного бурения на нефть и газ, для главных технологических механизмов которых – насосов, лебёдки и ротора, применяется частотно-регулируемый электропривод (ЧРЭП) переменного тока.

Одно из преимуществ ЧРЭП переменного тока заключается в возможности поддержания на вводе буровой установки коэффициента мощности 0,95–0,98. Несмотря на это, отклонение напряжения при увеличении длины питающей линии может превысить допустимое значение. Для уменьшения искажения формы напряжения сети в составе преобразователей частоты (ПЧ) применяют 12-пульсную схему выпрямления. Но это решение не позволяет полностью решить проблему искажения формы напряжения сети.

Поэтому научное обоснование совокупности решений по повышению качества электроэнергии в системах электроснабжения БУ с ЧРЭП является актуальной научной задачей.

Степень разработанности темы исследования. Одним из решений задачи повышения качества электроэнергии является применение фильтро-компенсирующих устройств (ФКУ). Наиболее полно эта задача решена для ЭТК БУ с тиристорными электроприводами постоянного тока. В то же время, несмотря на всё более широкое распространение ЭТК БУ с ЧРЭП переменного тока, задача повышения качества электроэнергии для данного класса ЭТК БУ практически не решена.

В настоящее время к перспективным средствам повышения качества электроэнергии относится применение в составе ПЧ активных выпрямителей напряжения (АВН). Однако работы, посвящённые изучению свойств ПЧ с АВН в

составе ЭТК БУ, которые учитывали бы свойства электрической сети БУ отсутствуют.

Целью работы является научное обоснование совокупности решений по повышению качества электроэнергии при электроснабжении буровых установок с частотно-регулируемым электроприводом, обеспечивающих нормативные значения отклонения напряжения электропитания и суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения.

Основная идея работы заключается в том, что для обеспечения нормативных значений отклонения напряжения электропитания и суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения в системах электроснабжения частотно-регулируемых электроприводов буровых установок целесообразно применение фильтро-компенсирующих устройств, либо преобразователей частоты с активным выпрямителем напряжения.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать компьютерные модели, позволяющие установить влияние ЧРЭП БУ на КЭ в системах электроснабжения.

2. Установить влияние настроек ступенчатого регулирования реактивной мощности в ФКУ на отклонение напряжения электропитания, суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения и коэффициент мощности в системе электроснабжения БУ с ЧРЭП.

3. Установить влияние несущей частоты широтно-импульсной модуляции (ШИМ), параметров фильтра и сигнала задания реактивного тока АВН на коэффициент мощности, отклонение напряжения и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения в системе электроснабжения БУ с ЧРЭП.

4. Разработать для АВН структуры автоматического регулирования реактивной мощности и напряжения в системе электроснабжения БУ с ЧРЭП.

5. Оценить влияние систем автоматического регулирования реактивной мощности и напряжения на коэффициент мощности, отклонение напряжения электропитания и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения в системе электроснабжения БУ с ЧРЭП в установившихся и переходных режимах работы электроприводов главных буровых механизмов.

Научная новизна результатов исследования:

1. Установлены зависимости, позволяющие определить влияние ФКУ со ступенчатым регулированием реактивной мощности и «ненастроенными»

фильтрами высших гармоник на коэффициент мощности, отклонение напряжения и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения в системе электроснабжения БУ с ЧРЭП.

2. Установлены зависимости, позволяющие оценить влияние настройки фильтра АВН, несущей частоты АВН, задания реактивного тока АВН на коэффициент мощности, отклонение напряжения и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения в системе электроснабжения БУ с ЧРЭП.

3. Предложены структурные схемы систем автоматического регулирования АВН по реактивной мощности и напряжению системы электроснабжения БУ с ЧРЭП, выполненные по принципу подчинённого регулирования координат, обеспечивающих нормативные значения отклонения напряжения электропитания и суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения и заданное значение коэффициента мощности.

4. Найдены зависимости, позволяющие определить влияние систем автоматического регулирования АВН по реактивной мощности и напряжению на коэффициент мощности, отклонение напряжения электропитания и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения в системе электроснабжения БУ с ЧРЭП в установившихся и переходных режимах работы электроприводов главных буровых механизмов.

Теоретическая значимость работы состоит в:

- нахождении зависимостей влияния ФКУ со ступенчатым регулированием реактивной мощности и «ненастроенными» фильтрами на коэффициент мощности, отклонение напряжения и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения в системах электроснабжения БУ с ЧРЭП, позволяющих обосновать величину реактивной мощности и настройку фильтров ФКУ;

- нахождении зависимостей коэффициента мощности, отклонения напряжения и суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения в системах электроснабжения БУ с ЧРЭП от настройки фильтра АВН, несущей частоты АВН и задания реактивного тока, позволяющих согласовать параметры АВН с системой электроснабжения;

- обосновании структур автоматического регулирования АВН с отрицательными обратными связями по реактивной мощности и напряжению системы электроснабжения БУ с ЧРЭП, обеспечивающих нормативные значения отклонения напряжения электропитания и суммарного коэффициента

гармонических составляющих напряжения и заданное значение коэффициента мощности;

– нахождении зависимостей влияния систем автоматического регулирования АВН по реактивной мощности и напряжению на коэффициент мощности, отклонение напряжения электропитания и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения, позволяющих согласовать параметры систем автоматического регулирования АВН с системой электроснабжения БУ с ЧРЭП в установившихся и переходных режимах работы электроприводов главных буровых механизмов.

Практическая значимость работы состоит в разработке:

– компьютерных моделей, позволяющих исследовать качество электроэнергии в установившихся и переходных режимах работы электроприводов и принять обоснованное решение по повышению КЭ на этапе проектирования ЭТК БУ с ЧРЭП переменного тока;

- технических требований к «ненастроенным» ФКУ со ступенчатым регулированием реактивной мощности для ЭТК БУ с ЧРЭП, выполнение которых обеспечивает нормативные значения показателей качества электроэнергии (ПКЭ);

- методики выбора параметров фильтра АВН на базе компьютерной модели, которая учитывает характеристики системы электроснабжения ЭТК БУ и позволяет получить нормативное значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения;

– структурных схем системы автоматического регулирования АВН по реактивной мощности и напряжению в системе электроснабжения БУ с ЧРЭП, применение которых обеспечивает нормативные значения ПКЭ в установившихся и переходных режимах работы электроприводов.

Методология и методы исследования. В основу исследования положены работы Л.А. Добрусина, И.В. Жежеленко, А.Е. Козярука, Я.Ю. Солодухо, В. П. Шипилло, в которых рассмотрено влияние полупроводниковых преобразователей на питающую сеть; работы А.Б. Виноградова, Е.Е. Чаплыгина, Р.Т. Шрейнера, где приведён анализ свойств активных выпрямителей в составе преобразователей частоты; работы Б.И. Абрамова, А.И. Когана, О.И. Кожаква, Б.М. Парфёнова, посвящённые повышению качества электроэнергии в системах электроснабжения БУ, содержащих электроприводы с полупроводниковыми преобразователями.

В работе использованы методы анализа электрических цепей, полупроводниковых преобразователей, теории автоматического управления, автоматизированного электропривода, компьютерного моделирования.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Зависимости, позволяющие оценить влияние реактивной мощности и резонансной частоты «ненастроенных» фильтров ФКУ со ступенчатым регулированием реактивной мощности на коэффициент мощности, отклонение напряжения и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения в системе электроснабжения БУ с ЧРЭП.

2. Зависимости, позволяющие оценить влияние настройки фильтра АВН, несущей частоты АВН, задания реактивного тока АВН на коэффициент мощности, отклонение напряжения и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения в системе электроснабжения БУ с ЧРЭП.

3. Совокупность решений позволяющих осуществить автоматическое регулирование реактивной мощности и напряжения систем электроснабжения ЭТК БУ с ЧРЭП и обеспечивающих нормативные значения отклонения напряжения электропитания и суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения и заданное значение коэффициента мощности.

Степень достоверности результатов. Основные научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, подтверждаются: корректным применением теорий электрических цепей, силовой полупроводниковой техники, автоматизированного электропривода, результатами компьютерного моделирования, сравнением и сходимостью результатов компьютерного моделирования с данными экспериментальных исследований на объектах, расхождение между которыми не превышает 10%.

Апробация результатов. Основные положения работы докладывались и обсуждались на: XI Международной конференции «Новые идеи в науках о Земле» (г. Москва, 2013), XIX Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 2013), Научно-технической конференции молодых учёных «Электротехнические комплексы и системы в нефтяной и газовой промышленности» (г. Москва, 2013), XXI Международном научном симпозиуме «Неделя горняка – 2013» (г. Москва, 2013), XX Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 2014), VII Международной научной конференции студентов, аспирантов, и молодых учёных «Молодые - наукам о Земле» (г. Москва, 2014), XXII Международном научном симпозиуме «Неделя горняка – 2014» (г. Москва, 2014), XXI Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и

энергетика» (г. Москва, 2015), XXIII Международном научном симпозиуме «Неделя горняка – 2015» (г. Москва, 2015), XXII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 2016), XXIV Международном научном симпозиуме «Неделя горняка – 2016» (г. Москва, 2016), заседании Научно-технического совета ООО «Электротехническая промышленная компания» (г. Москва, 2016), заседаниях научного семинара кафедры «Энергетика и энергоэффективность горной промышленности» НИТУ «МИСиС» (г. Москва, 2013, 2014, 2015), заседании кафедры «Энергетика и энергоэффективность горной промышленности» НИТУ «МИСиС» (г. Москва, 2016).

Реализация выводов и рекомендаций работы.

Разработанные компьютерные модели ЭТК БУ с ЧРЭП, зависимости для определения коэффициента мощности, отклонения напряжения и суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения в системе электроснабжения БУ с ЧРЭП, технические требования к ненастроенным ФКУ со ступенчатым регулированием реактивной мощности, решения и рекомендации по выбору структуры и параметров АВН в составе ЧРЭП используются в ООО «Электротехническая промышленная компания» при разработке нового электрооборудования для буровых установок с частотно-регулируемым электроприводом.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, в том числе 4 опубликованы в изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России.

Объём и структура диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка используемой литературы из 112 наименований, приложения, включает 109 рисунков, 5 таблиц. Общий объем диссертационной работы – 173 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и степень научной разработанности темы исследования, сформулированы цель, основная идея работы, задачи исследования, основные научные положения и новизна, а также научное и практическое значение работы.

В первой главе приведены основные сведения об ЭТК БУ, рассмотрены основные решения по улучшению КЭ при работе электропривода БУ с

полупроводниковыми преобразователями, показаны особенности математического описания ЭТК БУ с ЧРЭП.

В настоящее время для главных механизмов БУ широко применяются регулируемые электроприводы переменного тока по системе преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель (система ПЧ-АД) (рисунок 1).

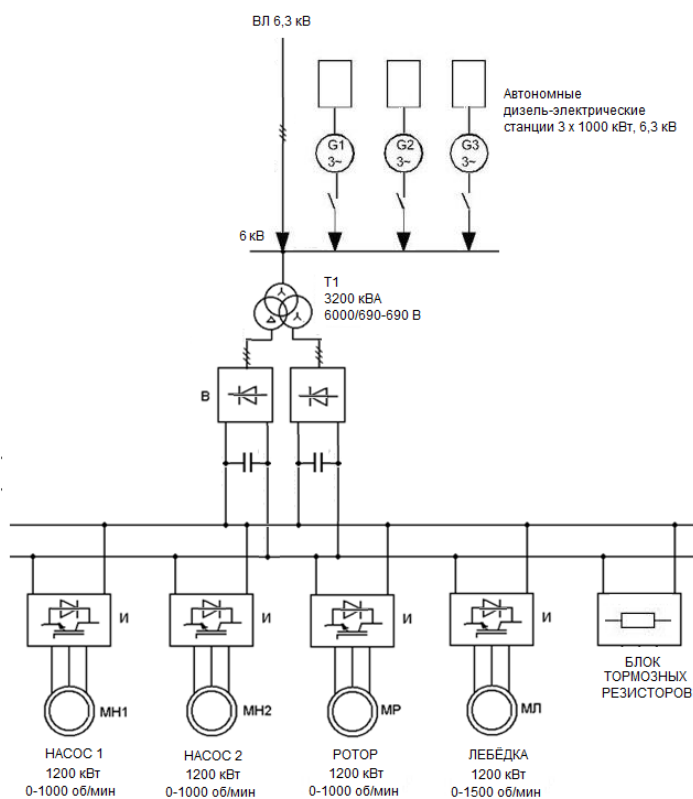


Рисунок 1 - Схема электрооборудования БУ с ЧРЭП

Наличие регулируемого электропривода с полупроводниковым преобразователем в системе электроснабжения приводит к возрастанию потребления реактивной мощности, искажению синусоидальной формы напряжения сети из-за генерации полупроводниковыми преобразователями токов высших гармоник.

Несмотря на широкое распространение БУ с ЧРЭП, задача повышения энергетических показателей для данного класса БУ практически не решена.

Основным средством улучшения КЭ является применение ФКУ. Однако конкретные рекомендации, связанные с обоснованием выбора ФКУ, учитывающие как особенности работы ЭТК БУ с ЧРЭП, так и свойства системы электроснабжения, отсутствуют.

В настоящее время перспективным средством повышения КЭ при работе ЧРЭП является применение в составе преобразователя частоты АВН (рисунок 2).

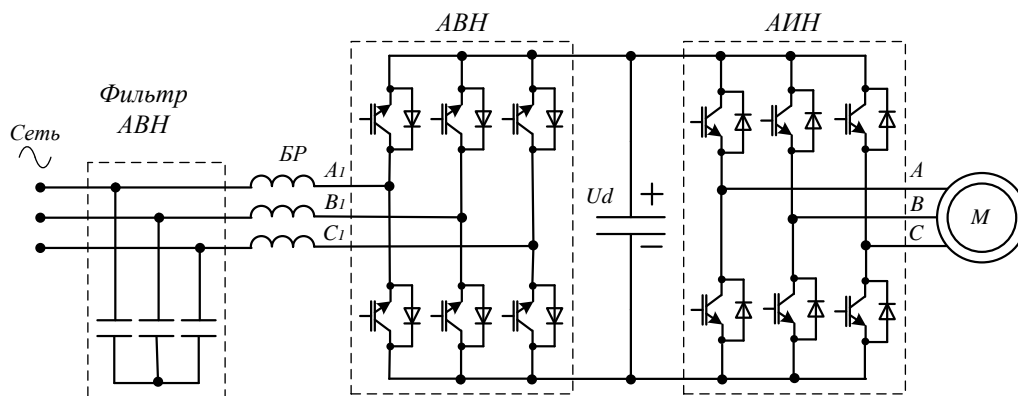


Рисунок 2 - Структура силовых цепей двухзвенного ПЧ с АВН и автономным инвертором напряжения

Применение АВН позволяет осуществить: стабилизацию выпрямленного напряжения на заданном уровне; формирование фазных токов сети, близких по форме к синусоиде; поддержание заданного коэффициента мощности сети; передачу энергии из сети переменного напряжения в цепь постоянного напряжения и в противоположном направлении.

Преобразователи частоты с АВН могут явиться эффективным средством повышения КЭ и энергосбережения для БУ с ЧРЭП главных механизмов.

Наличие полупроводниковых преобразователей в составе ЭТК БУ, необходимость учёта свойств системы электроснабжения, параллельная работа ЧРЭП приводит к существенному усложнению математической модели ЭТК БУ с ЧРЭП. Учитывая сложность математической модели, задача анализа влияния на качество электроэнергии ЧРЭП БУ должна решаться при помощи численных методов. В этом случае математическая модель реализуется на компьютере.

На основании выполненного анализа влияния электроприводов с полупроводниковыми преобразователями на электрическую сеть и обзора средств улучшения КЭ сформулированы задачи диссертационной работы.

Во второй главе рассмотрены математические модели ЭТК БУ с ЧРЭП и их реализация на компьютере.

В основу математических моделей положены расчётные схемы ЭТК БУ с ЧРЭП при питании от местной линии электропередачи 6 кВ и от автономного синхронного генератора (СГ) 6 кВ. Для каждого варианта питания рассмотрены два случая, когда в состав ПЧ входит неуправляемый выпрямитель или АВН.

Математическая модель ЭТК БУ представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений высокого порядка. Поэтому задача анализа влияния на качество электроэнергии ЧРЭП БУ решается при помощи пакета *MatLab*, который содержит систему компьютерного моделирования *Simulink* и

пакет расширения *SimPower Systems*. Разработанные компьютерные модели учитывают особенности системы электроснабжения и элементов, входящих в состав ЭТК БУ: трансформатор, ФКУ, ПЧ, АВН, асинхронный электродвигатель. а также системы автоматического регулирования АВН и ЧРЭП. Так как АВН генерирует высокочастотные гармоники тока и напряжения, то учитываются ёмкости воздушной линии электропередачи.

Разработанные компьютерные модели позволяют определять токи и напряжения в системе, коэффициент мощности, суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения сети в установившихся и переходных режимах работы электроприводов и осуществить обоснованный выбор ФКУ или АВН на этапе проектирования ЭТК БУ с ЧРЭП.

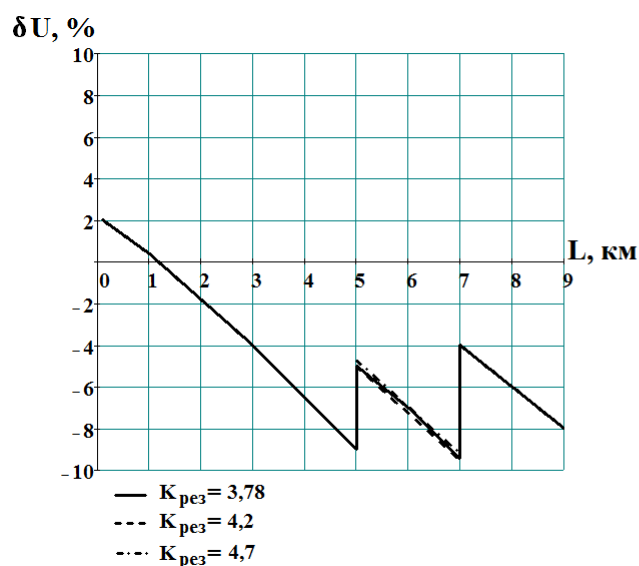
В третьей главе приведены результаты исследования энергетических показателей ЧРЭП БУ в случае применения ФКУ со ступенчатым регулированием реактивной мощности (ФКУ-С) и «ненастроенными» фильтрами. Исследования выполнялись на примере ЭТК буровой установки БУ–4200/250.

Потребляемые БУ мощности достаточно велики по отношению к сравнительно слабой электрической линии, особенно при значительной её длине. Поэтому при питании от линии 6 кВ целью управления ФКУ-С является поддержание заданного уровня напряжения на вводе 6 кВ БУ. Кроме этого необходимо обеспечение допустимого уровня высших гармоник напряжения сети.

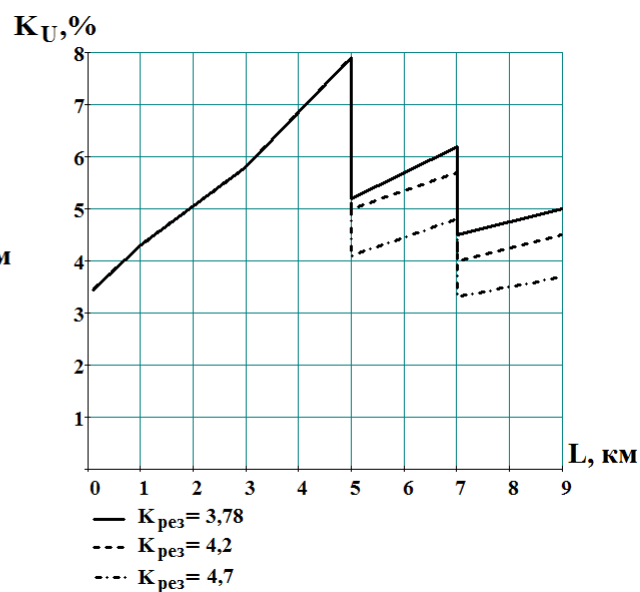
Предварительно принято, что ФКУ-С содержит четыре ступени (Ф1–Ф4). Общая реактивная мощность ФКУ-С равна 1040 квар. С целью изучения влияния настройки ФКУ-С на суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения исследованы варианты настройки фильтров ФКУ-С на следующие относительные резонансные частоты $K_{рез}$: 3,78; 4,2; 4,7. Принято, что с увеличением длины линии каждая последующая ступень ФКУ-С включается после снижения напряжения на 10 % по сравнению с номинальной величиной.

Все расчёты ПКЭ и реактивной мощности выполняются для наиболее тяжёлого режима по активной мощности: турбинного бурения двумя насосами в виде зависимости от длины линии L .

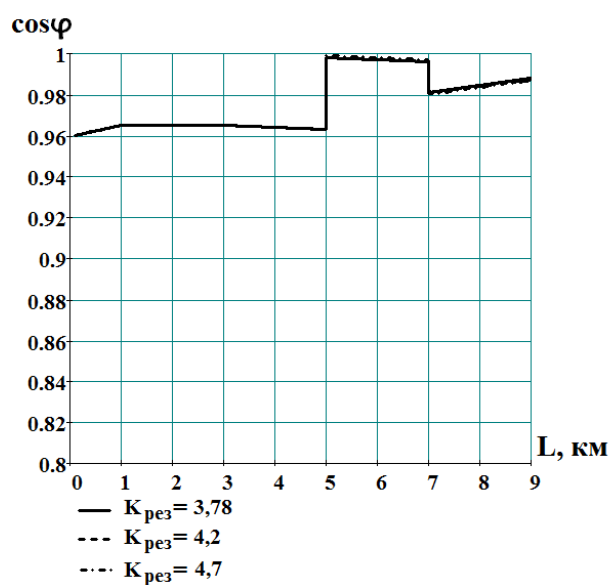
На рисунке 3 приведены графики зависимостей, позволяющие определить влияние реактивной мощности и резонансной частоты ненастроенных фильтров ФКУ-С на отклонение напряжения δU , суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U , коэффициент мощности $\cos\varphi$ и реактивную мощность по первой гармонике в системе электроснабжения ЧРЭП БУ.



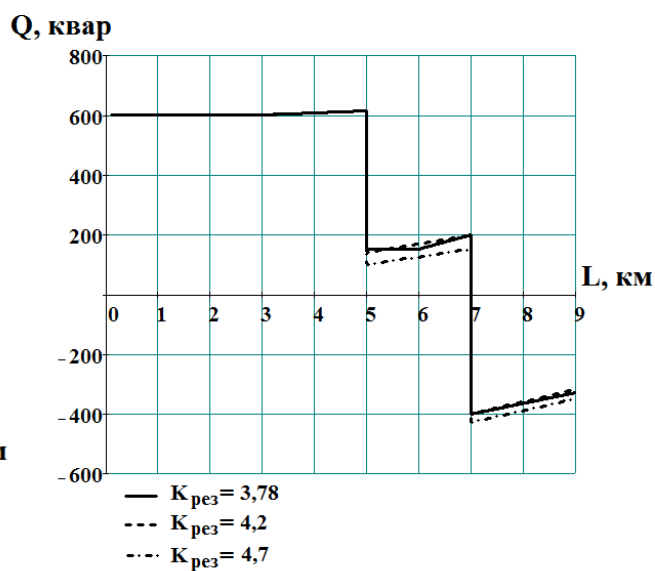
а



б



в



г

Рисунок 3 - Графики отклонения напряжения (а), суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения сети (б), коэффициента мощности (в) и реактивной мощности (г) на вводе БУ в зависимости от длины линии

Анализ графических зависимостей позволил сделать следующие выводы. ФКУ со ступенчатым регулированием реактивной мощности при питании регулируемых электроприводов БУ от линии электропередачи позволяет обеспечить нормативные показатели по δU (10 %) и по K_U (5 %). При выборе ФКУ-С по критерию отклонения напряжения возможно обеспечить нормальную работу БУ при длине линии до 9-10 км вместо 5 км при отсутствии ФКУ. Для улучшения гармонического состава напряжения сети при работе БУ с ЧРЭП необходимо применение ФКУ при длине линии более 2 км.

Во второй части главы рассмотрено влияние ФКУ-С с «ненастроенными» фильтрами на величину реактивной мощности и уровень высших гармоник при питании ЭТК БУ от автономных СГ. На основании полученных зависимостей были сделаны следующие выводы.

Включение ФКУ-С увеличивает коэффициент мощности с 0,96 практически до 1. Применение «ненастроенных» фильтров высших гармоник обеспечивает уменьшение коэффициента K_U до 5–6,5 % в зависимости от настройки фильтров.

На основе выполненных научных исследований сформулированы технические требования к ФКУ-С для буровых установок 6 и 7 класса с ЧЭРП по величине максимальной реактивной мощности ФКУ-С, числу ступеней ФКУ-С и рекомендуемой настройке фильтров. Выполнение данных требований позволяет получить в установившихся режимах работы электроприводов коэффициент гармонических составляющих напряжения не более 5 %, максимальное отклонение напряжения, не превышающее 10 % при длине высоковольтной воздушной линии электропередачи до 9-10 км, коэффициент мощности при питании от СГ близкий к 1.

Выполнено сравнение характеристик ФКУ для ЭТК БУ-3900 ЭКБМЦ с тиристорным электроприводом постоянного тока и ЭТК БУ-4200/250 с ЧРЭП. Так как данные буровые установки относятся к одному классу, то это позволило выявить отличия в характеристиках ФКУ для электроприводов постоянного тока и переменного тока. Показано, что в случае ЧРЭП величина реактивной мощности ФКУ может быть уменьшена примерно в 2 раза.

В четвёртой главе исследованы свойства АВН в составе ЧРЭП ЭТК БУ. Получены зависимости тока и напряжения от времени на вводе 6 кВ БУ при длине линии 9 км при отключённом и включённом фильтре АВН для двух значениях несущей частоты при ШИМ $f_{\text{нес}} = 2400$ Гц и $f_{\text{нес}} = 9600$ Гц, которые позволили сделать выводы, что увеличение несущей частоты, либо применение фильтра на стороне переменного тока АВН являются эффективными средствами улучшения формы кривых тока и напряжения в линии 6 кВ.

На рисунке 4 приведены результаты расчёта на вводе 6 кВ БУ величины реактивной мощности и отклонения напряжения при изменении реактивной составляющей тока АВН.

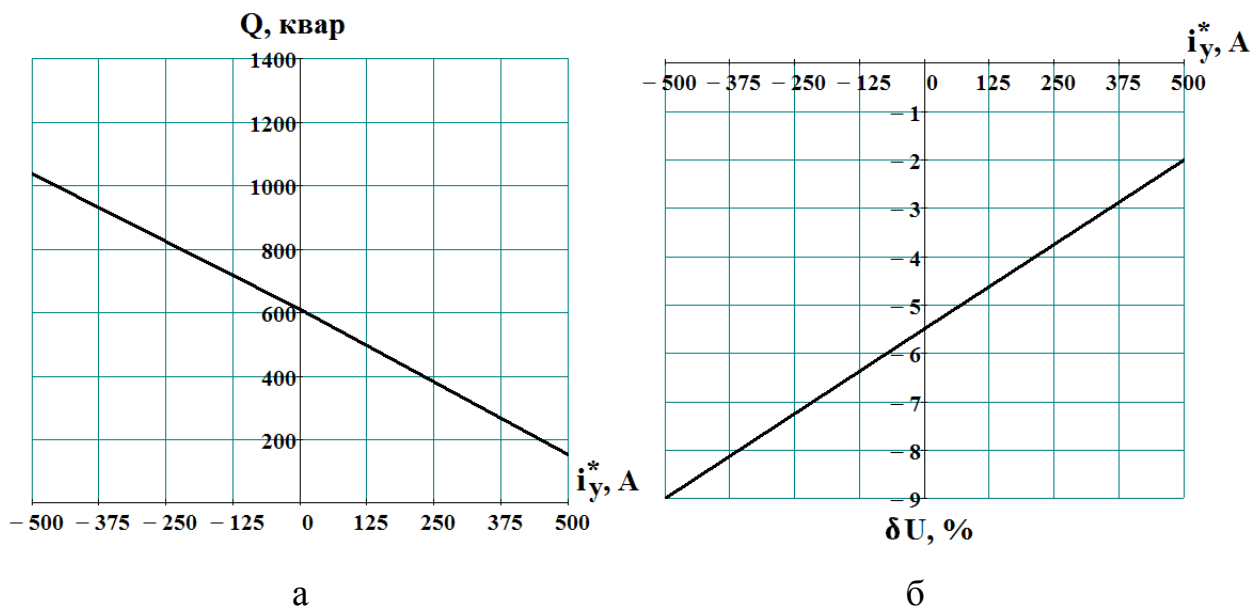


Рисунок 4 - Графики реактивной мощности (а) и отклонения напряжения (б) на стороне 6 кВ от сигнала задания реактивной составляющей тока АВН i_y^*

Из анализа графиков следует, что увеличение сигнала задания реактивной составляющей тока АВН i_y^* приводит к уменьшению реактивной мощности в точке подключения БУ к линии 6 кВ. Уменьшение величины реактивной мощности приводит к уменьшению отклонения напряжения.

На стороне переменного напряжения АВН присутствуют гармонические составляющие высокой частоты. Поэтому в состав АВН входит фильтр, который ослабляет высшие гармоники, генерируемые АВН в сеть переменного тока, в соответствии с требованиями к качеству напряжения.

В работе предложена методика выбора параметров низкочастотного однозвенного Г-образного фильтра, основанная на построении частотной характеристики коэффициента передачи фильтра K для разных значений параметров фильтра и уточнении методами компьютерного моделирования параметров фильтра, при которых будет обеспечен заданный коэффициент K_U . Особенностью методики является учёт индуктивных и активных сопротивлений системы электроснабжения ЭТК БУ.

С помощью созданной компьютерной модели выполнены расчёты ПКЭ при питании ЭТК БУ с АВН от линии электропередачи 6 кВ в зависимости от её длины. При проведении исследований значения несущей частоты ШИМ взяты равными 9600 и 2400 Гц. Сигналы задания реактивного тока АВН I_y принимались равными 0 и 500 А (в этом случае АВН генерирует емкостную реактивную мощность). Моделирование проводилось при отсутствии фильтра АВН и при его включении.

На основании анализа полученных зависимостей сделаны следующие выводы. Увеличение задания емкостного реактивного тока АВН приводит к уменьшению реактивной мощности, увеличению коэффициента мощности и уменьшению отклонения напряжения. Увеличение несущей частоты ШИМ приводит к уменьшению суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения сети. Эффективным средством улучшения формы напряжения сети при заданной несущей частоте является применение АВН совместно с фильтром. Однако выбор несущей частоты ШИМ или параметров фильтра без учёта свойств системы электроснабжения может приводить к превышению коэффициентом K_U нормативных значений.

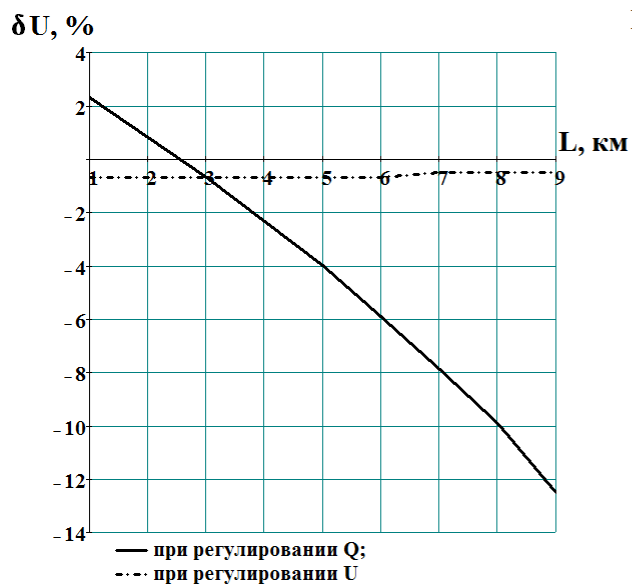
В пятой главе исследовано влияние на качество электроэнергии применение в составе АВН систем автоматического регулирования (САР) по реактивной мощности (Q) или напряжению (U) на вводе 6 кВ БУ на основе принципа подчинённого регулирования координат.

При постоянном значении реактивного тока АВН напряжение и реактивная мощность на вводе 6 кВ БУ зависят от длины питающей линии и нагрузки электроприводов. Для поддержания заданного значения напряжения необходимо его регулирование при помощи отрицательной обратной связи (о.о.с.) по U на вводе 6 кВ БУ. Аналогично для обеспечения постоянства реактивной мощности необходимо её регулирование при помощи о.о.с. по Q на вводе 6 кВ БУ.

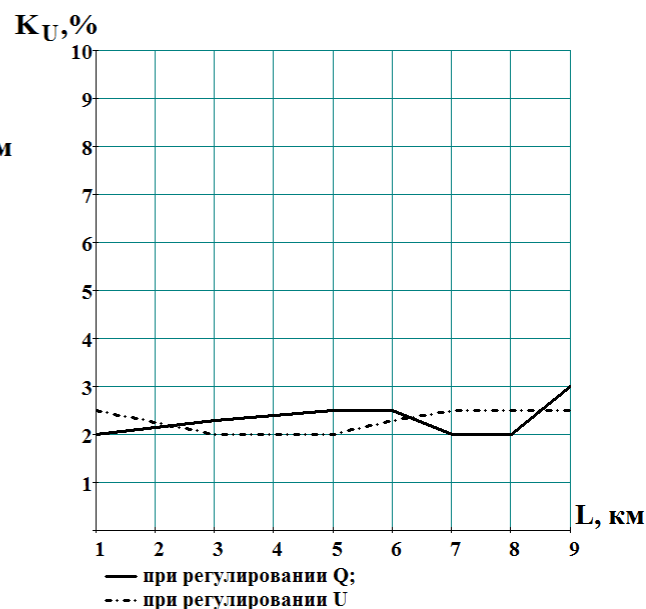
На основании предложенных структурных схем найдены передаточные функции регуляторов реактивной мощности и напряжения, которые являются интегральными регуляторами. При изменении параметров электрической сети регулятор напряжения необходимо перестраивать.

В данном разделе выполнены исследования АВН с о.о.с. по U и о.о.с. по Q . Сигнал задания по напряжению равен 6000 В, по реактивной мощности – нулю. Длина линии увеличивается от 1 до 9 км. Несущая частота ШИМ $f_{\text{несШИМ}} = 2400$ Гц. Включён фильтр АВН.

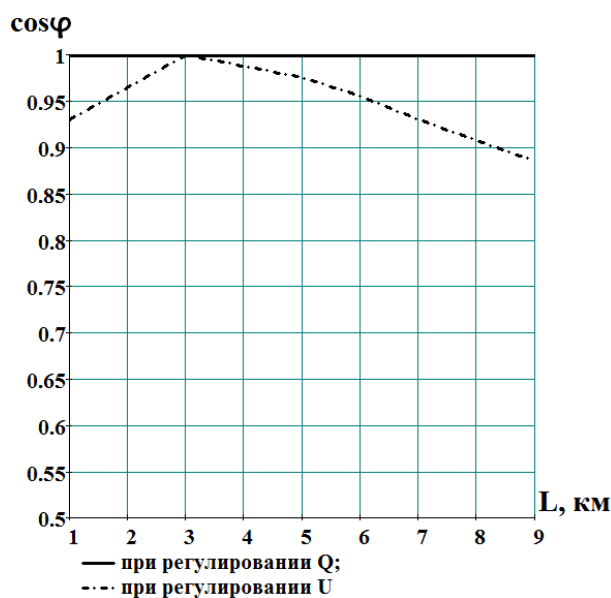
На рисунке 5 приведены результаты расчёта на вводе БУ 6 кВ отклонения напряжения, суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, коэффициента мощности и реактивной мощности в зависимости от длины линии.



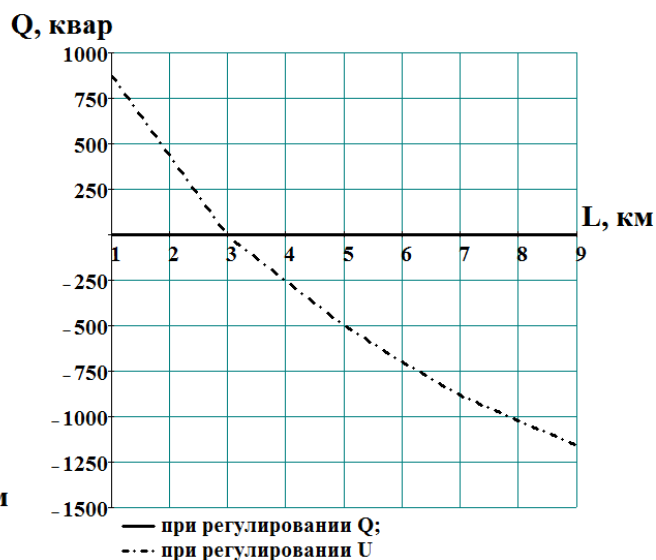
а



б



в



г

Рисунок 5 - Графики отклонения напряжения (а), суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения сети (б), коэффициента мощности (в) и реактивной мощности (г) в зависимости от длины линии при регулировании по Q и U

Анализ графиков позволяет сделать следующие выводы.

Применение о.о.с. по Q в системе управления АВН позволяет получить коэффициент мощности равным единице, а реактивную мощность равную нулю при изменении длины линии от 1 до 9 км.

Применение о.о.с. по U в системе управления АВН позволяет получить отклонение напряжения при изменении длины линии от 1 до 9 км в пределах от 1,5 до 2,5 %, что меньше допустимого значения 10 %.

Наличие АВН позволяет получить коэффициент K_U меньше 5 % при изменении длины линии от 1 до 9 км независимо от вида о.о.с.

В данном разделе исследовано также влияние АВН с о.о.с. по Q на величину реактивной мощности и уровень высших гармоник напряжения сети при питании ЭТК БУ от автономных СГ. Применение АВН позволяет практически полностью компенсировать реактивную мощность. При наличии фильтра АВН значительно снижается коэффициент K_U . Его величина не превышает нормативного значения 5 %. Отсутствие фильтра приводит к значительному увеличению K_U .

Разработанная компьютерная модель ЭТК БУ с ЧРЭП и АВН позволяет исследовать переходные процессы при пуске и торможении электропривода.

Работа ЧРЭП в динамике рассмотрена для случая повторно-кратковременного режима работы электропривода буровой лебёдки. В этом случае имеет место максимальное влияние электропривода на сеть в переходных режимах.

Исследование динамических режимов выполнены при питании от линии электропередачи 6 кВ для двух вариантов регулирования АВН. В первом случае регулируемой величиной является реактивная мощность на вводе БУ 6 кВ, во втором напряжение на вводе БУ 6 кВ. Величина задания реактивной мощности принята равной нулю, а величина задания напряжения была принята равной номинальному напряжению $U_{\text{ном}} = 6$ кВ. Все расчёты проводились при длине питающей линии 7 км.

Переходные процессы исследовались для случаев подъёма и спуска колонны бурильных труб (КБТ). На рисунке 6 приведены графики переходных процессов при спуске КБТ и регулировании по U .

Предложенные САР АВН позволяют получить высокое качество переходных процессов при пуске и торможении электропривода. Наличие АВН обеспечивает рекуперацию энергии в сеть при движении КБТ вниз. Регулирование АВН по U позволяет значительно уменьшить отклонение напряжения в переходных и установившихся режимах работы электропривода по сравнению со случаем регулирования по Q . Регулирование АВН по Q позволяет уменьшить потребление реактивной мощности и увеличить коэффициент мощности в переходных и установившихся режимах работы электропривода по сравнению со случаем регулирования по U .

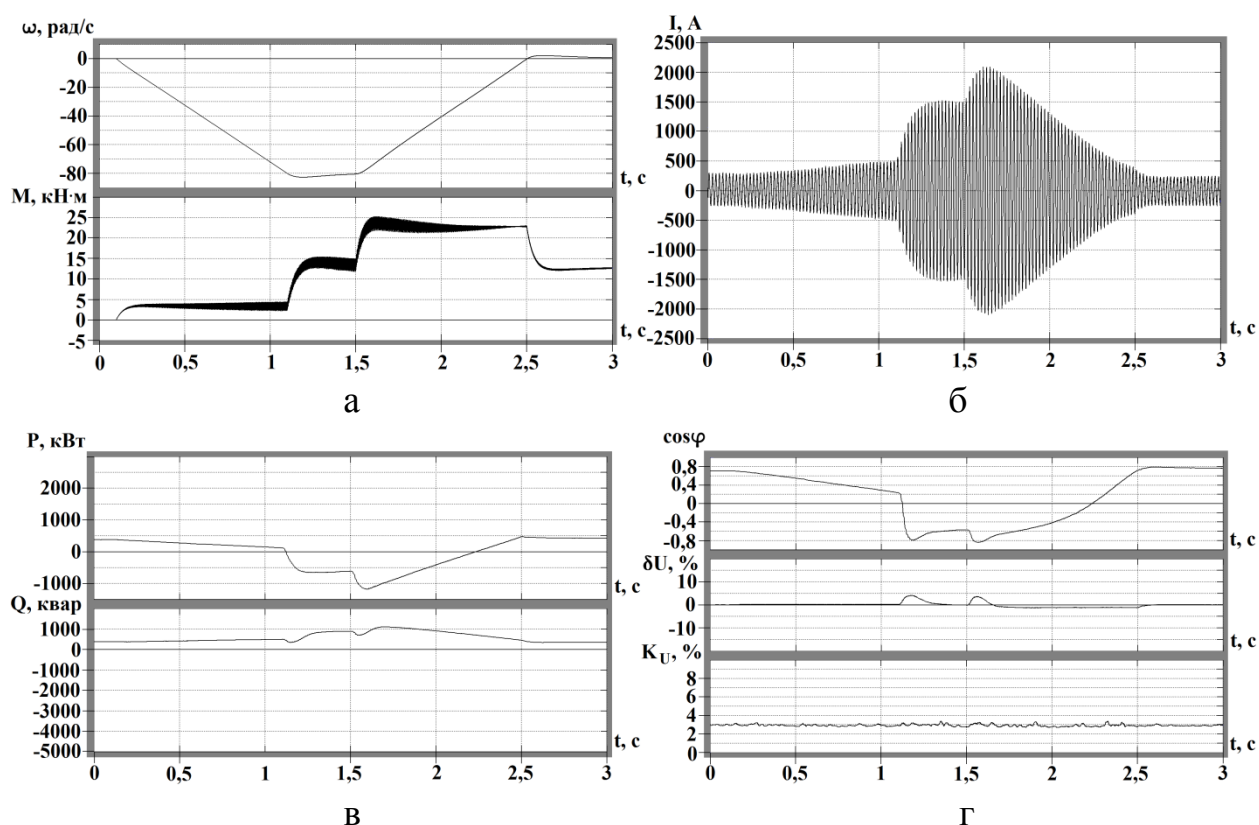


Рисунок 6 - Переходные процессы при спуске КБТ (регулирование АВН по U):
 ω , M - угловая скорость и момент электродвигателя (а);
 I - ток нагрузки трансформатора Т (б); P , Q - активная и реактивная мощности на вводе 6 кВ БУ (в); $\cos\varphi$, δU , K_U - коэффициент мощности, отклонение напряжения, суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (г)

Выполнено сравнение свойств ФКУ-С и АВН. В отличие от ФКУ-С, которое обеспечивает ступенчатое регулирование реактивной мощности, АВН осуществляет её непрерывное регулирование. АВН позволяет получить меньший суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения, чем применение 12-пульсного выпрямителя с ФКУ-С. Применение АВН в составе преобразователя частоты обеспечивает режим рекуперации энергии в отличие от случая ЧРЭП с неуправляемым выпрямителем.

Для находящихся в эксплуатации буровых установок с частотно-регулируемым электроприводом повышение качества электроэнергии в системе электроснабжения возможно посредством применения относительно простых ФКУ со ступенчатым регулированием реактивной мощности и «ненастроенными» фильтрами. При разработке нового электрооборудования для буровых установок рекомендуется применение в составе преобразователей частоты АВН.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано новое решение актуальной задачи обоснования совокупности решений по повышению качества электроэнергии в системе электроснабжения БУ с ЧРЭП, что имеет существенное значение для развития электротехнических комплексов и систем в минерально-сырьевом комплексе России.

Основные результаты и выводы по диссертационной работе, полученные лично автором, заключаются в следующем:

1. Разработаны компьютерные модели системы электроснабжения БУ с ЧРЭП, которые позволяют оценить показатели качества электроэнергии в установившихся и переходных режимах работы электроприводов и осуществить обоснованный выбор ФКУ или АВН в составе преобразователя частоты на этапе проектирования ЭТК БУ с ЧРЭП переменного тока.

2. Установлено, что ФКУ со ступенчатым регулированием реактивной мощности и «ненастроенными» фильтрами при питании БУ с ЧРЭП от линии электропередачи позволяет обеспечить нормативные показатели по отклонению напряжения от минус 10 до плюс 10 % и по уровню искажений напряжения в питающей сети до 5 %. При обоснованном выборе ФКУ возможно обеспечить нормальную работу БУ при длине линии до 9–10 км.

Для автономных СГ применение ступенчатого ФКУ с «ненастроенными» фильтрами обеспечивает коэффициент мощности близкий к 1, уменьшение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения в среднем до 5 %.

На основе выполненных научных исследований сформулированы технические требования к ФКУ для БУ с ЧРЭП по величине минимальной реактивной мощности ФКУ, числу ступеней ФКУ и рекомендуемой настройке фильтров.

3. Подтверждено, что при питании БУ с ЧРЭП от линии электропередачи увеличение несущей частоты ШИМ, а также включение фильтра на стороне переменного тока АВН уменьшают искажения синусоидальной формы напряжения сети. Увеличение задания емкостного реактивного тока АВН уменьшает реактивную мощность, увеличивает коэффициент мощности и уменьшает отклонение напряжения системы электроснабжения БУ с ЧРЭП.

Выбор несущей частоты ШИМ или параметров фильтра без учёта свойств системы электроснабжения приводит к увеличению суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения выше нормативного значения 8%.

4. Предложена методика выбора параметров фильтра АВН, основанная на построении для выбранной схемы фильтра частотной характеристики коэффициента передачи фильтра для разных значений параметров фильтра и уточнении методами компьютерного моделирования параметров фильтра, при которых обеспечивается нормативный суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения. Особенностью методики является учёт характеристик системы электроснабжения ЭТК БУ.

5. Предложены структурные схемы системы автоматического регулирования АВН для случаев, когда в качестве регулируемых величин выбираются реактивная мощность, либо напряжение системы электроснабжения БУ с ЧРЭП. Все структурные схемы выполнены по принципу подчинённого регулирования координат.

6. АВН с отрицательной обратной связью по напряжению обеспечивает в установившихся режимах работы электроприводов при питании от линии электропередачи 6 кВ нормативные показатели по отклонению напряжения (10 %) и по уровню искажений напряжения в питающей сети (5 %). Применение АВН обеспечивает нормальную работу буровой установки при длине линии до 9-10 км.

7. Применение АВН с отрицательной обратной связью по реактивной мощности в системе с автономными СГ позволяет практически полностью компенсировать реактивную мощность в системе с автономными СГ.

Применение АВН с фильтром в системе с автономными СГ приводит к значительному снижению суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения по сравнению с отсутствием фильтра. Его величина не превышает нормативного значения 5 %.

8. Предложенные структурные схемы системы автоматического регулирования АВН на основе принципа подчинённого регулирования координат позволяют получить высокое качество переходных процессов при пуске и торможении электропривода. Изменения всех величин происходят без значительных колебаний, с достаточным быстродействием. Наличие АВН обеспечивает рекуперацию энергии в сеть при движении КБТ вниз.

9. Регулирование АВН по напряжению позволяет значительно уменьшить отклонение напряжения в переходных и установившихся режимах работы электропривода по сравнению со случаем регулирования по реактивной мощности.

Регулирование АВН по реактивной мощности позволяет уменьшить потребление реактивной мощности и увеличить коэффициент мощности в

переходных и установившихся режимах работы электропривода по сравнению со случаем регулирования по напряжению.

10. Результаты диссертационной работы могут быть использованы электротехническими компаниями, работающими в области применения частотно-регулируемых электроприводов в минерально-сырьевом комплексе, при разработке нового электрооборудования, что позволит получить нормативные значения отклонения напряжения электропитания и суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения и заданное значение коэффициента мощности.

Основные положения диссертации отражены в следующих работах, опубликованных:

в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях:

1. Шевырева Н. Ю. Моделирование частотно-регулируемого электропривода буровой установки и оценка его влияния на качество электроэнергии / Н. Ю. Шевырева, В. Н. Фащенко // Вести высших учебных заведений Черноземья. - 2013. - №2. - С. 15–21.

2. Шевырева, Н. Ю. Влияние на качество электроэнергии ступенчатого фильтро-компенсирующего устройства при работе буровых установок с частотно-регулируемым электроприводом / Н. Ю. Шевырева // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2015. - №1. - С. 408–415.

3. Шевырева, Н. Ю. Моделирование частотно-регулируемого электропривода с активным выпрямителем / Н. Ю. Шевырева // Главный энергетик. - 2015. - №8. - С. 69–74.

4. Шевырева, Н. Ю. Закономерности влияния частотно-регулируемого электропривода с активным выпрямителем на качество электроэнергии / Н. Ю. Шевырева // Вести высших учебных заведений Черноземья. - 2015. - №4. - С. 26–35.

в научных сборниках и других изданиях:

5. Шевырева, Н. Ю. Оценка влияния частотно-регулируемого электропривода буровой установки на качество электроэнергии / Н. Ю. Шевырева // Научно-техническая конференция молодых учёных. «Электротехнические комплексы и системы в нефтяной и газовой промышленности». Тезисы докладов. - М.: Издательский центр РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина, 2013, - С. 52–54.

6. Шевырева, Н. Ю. Влияние на качество электроэнергии частотно-регулируемых электроприводов буровых установок / Н. Ю. Шевырева, В. Н. Фащенко // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Девятнадцатая

Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тезисы докладов Т. 2. - М. : Издательский дом МЭИ, 2013, - С. 281.

7. Шевырева, Н. Ю. Математические модели электротехнических комплексов буровых установок с частотно-регулируемым электроприводом / Н. Ю. Шевырева, В. Н. Фащилenko // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Двадцатая Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тезисы докладов Т. 2. - М.: Издательский дом МЭИ, 2014, - С. 272.

8. Шевырева, Н. Ю. Обоснование применения активного выпрямителя для частотно-регулируемых электроприводов буровых установок / Н. Ю. Шевырева, В. Н. Фащилenko // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Двадцать первая Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тезисы докладов Т. 2. - М. : Издательский дом МЭИ, 2015, - С. 232.

9. Шевырева, Н. Ю. Программа расчёта энергетических характеристик частотно-регулируемого электропривода буровой установки / Н. Ю. Шевырева, В. Н. Фащилenko // XI Международная конференция «Новые идеи в науках о Земле»: Тезисы докладов Т. 2. - М. : Ваш полиграфический партнёр, 2013, - С. 157.

10. Шевырева, Н. Ю. Обеспечение электромагнитной совместимости в электротехнических комплексах буровых установок с частотно-регулируемым электроприводом / Н. Ю. Шевырева, В. Н. Фащилenko // VII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Молодые - наукам о Земле». Москва, Российский государственный геологоразведочный университет: Тезисы докладов Т. 1. - М.: РГГРУ, 2014, - С. 224–225.

11. Шевырева, Н. Ю. Сравнительный анализ применения фильтро-компенсирующего устройства и активного выпрямителя для частотно-регулируемого электропривода / Н. Ю. Шевырева, В. Н. Фащилenko // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Двадцать вторая Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тезисы докладов Т. 2. - М. : Издательский дом МЭИ, 2016, - С. 124.

В публикациях с соавторами [1, 6–11] личный вклад автора диссертации состоит в разработке компьютерных моделей ЧРЭП БУ, нахождении зависимостей, позволяющих определить влияние параметров ФКУ и АВН на показатели качества электроэнергии и коэффициент мощности в системе электроснабжения БУ с ЧРЭП, анализе полученных результатов.