

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

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»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор В. Н. Фащиленко

Москва – 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. ВЛИЯНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ БУРОВЫХ УСТАНОВОК НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ СЕТЬ.....	13
1.1. Понятие электротехнического комплекса буровой установки.....	13
1.2. Электрический привод главных буровых механизмов.....	15
1.3. Структура электротехнического комплекса буровой установки с частотно-регулируемым электроприводом.....	17
1.4. Влияние электропривода с полупроводниковыми преобразователями на электрическую сеть соизмеримой мощности.....	19
1.5. Улучшение качества электроэнергии при работе электропривода буровых установок с полупроводниковыми преобразователями.....	24
1.6. Результаты экспериментальных исследований влияния ФКУ на качество электроэнергии.....	28
1.7. Частотно-регулируемый электропривод переменного тока с активным выпрямителем напряжения.....	32
1.8. Особенности математического описания ЭТК БУ с частотно-регулируемым электроприводом.....	35
1.9. Задачи диссертационной работы.....	37
Выводы.....	38
ГЛАВА 2. КОМПЬЮТЕРНЫЕ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ БУРОВЫХ УСТАНОВОК С ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ.....	39
2.1. Расчётные схемы ЭТК БУ с частотно-регулируемым электроприводом.....	39
2.2. Математическая модель асинхронного электрического двигателя и его системы автоматического регулирования.....	43

2.3. Математическая модель системы автоматического регулирования активного выпрямителя напряжения.....	49
2.4. Схемы замещения линии электропередачи 6 кВ и синхронного генератора.....	58
2.5. Компьютерная модель ЭТК БУ с частотно-регулируемым электроприводом и неуправляемым выпрямителем.....	59
2.6. Компьютерная модель ЭТК буровой установки с частотно- регулируемым электроприводом и активным выпрямителем напряжения.....	63
2.7. Измерение токов, напряжений и расчёт коэффициента мощности, отклонения напряжения и суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения.....	66
2.8. Сравнение результатов экспериментальных исследований с расчётами на компьютерной модели.....	68
Выводы.....	72
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФИЛЬТРО- КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ НА СИСТЕМУ ЭЛЕКТРО- СНАБЖЕНИЯ БУРОВЫХ УСТАНОВОК С ЧАСТОТНО- РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ.....	74
3.1. Нагрузки и типовые режимы работы электроприводов главных буровых механизмов.....	74
3.2. Выбор параметров «ненастроенного» ФКУ со ступенчатым регулированием реактивной мощности.....	75
3.3. Влияние ФКУ на качество электроэнергии при питании БУ с ЧРЭП от линии электропередачи.....	77
3.4. Влияние ФКУ на качество электроэнергии при питании БУ с ЧРЭП от автономных синхронных генераторов.....	85
3.5. Технические требования к ФКУ для ЭТК БУ с ЧРЭП.....	94
Выводы.....	96

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ БУРОВЫХ УСТАНОВОК С АКТИВНЫМ ВЫПРЯМИТЕЛЕМ НАПРЯЖЕНИЯ НА СИСТЕМУ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ.....	97
4.1. Исследование свойств активного выпрямителя напряжения в составе частотно-регулируемого электропривода ЭТК БУ.....	97
4.2. Методика выбора параметров фильтра АВН.....	104
4.3. Особенности влияния АВН на качество электроэнергии при питании БУ с частотно-регулируемым электроприводом от линии электропередачи.....	114
Выводы.....	123
ГЛАВА 5. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ БУРОВЫХ УСТАНОВОК С ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ.....	124
5.1. Структура и методика расчёта регуляторов САР АВН по напряжению и реактивной мощности.....	124
5.2. Исследование АВН с отрицательными обратными связями по напряжению и реактивной мощности в установившемся режиме при питании от линии электропередачи.....	129
5.3. Исследование АВН с отрицательной обратной связью по реактивной мощности в установившемся режиме при питании от автономных СГ.....	133
5.4. Переходные режимы при пуске и торможении частотно-регулируемого электропривода с АВН.....	137
5.5. Сравнение результатов исследования частотно-регулируемых электроприводов с ФКУ-С и АВН.....	152
Выводы.....	155
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	156

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	159
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Акт внедрении результатов диссертационной работы.....	173

ВВЕДЕНИЕ

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. Кожакова, 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 мощно-

сти, 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.

ГЛАВА 1. ВЛИЯНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ БУРОВЫХ УСТАНОВОК НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ СЕТЬ

1.1. Понятие электротехнического комплекса буровой установки

Для БУ, состоящих из взаимосвязанных механизмов, улучшение конструкции и эксплуатационных характеристик возможно только при совместном решении отдельных задач по выбору и проектированию электропривода и другого электрооборудования для БУ [54, 2]. Поэтому при выборе электрооборудования для БУ применяется комплексный подход, когда всё электрооборудование рассматривается как единый ЭТК, в котором отдельные системы и элементы связаны между собой и оказывают влияние друг на друга [54, 6].

ЭТК БУ состоит из нескольких систем: система питания и распределения энергии (высоковольтные комплектно-распределительные устройства, силовые трансформаторы, дизель-электрические станции); система электроприводов главных механизмов (электропривод буровой лебедки, электропривод буровых насосов, электропривод ротора, верхний электропривод); система вспомогательных электроприводов (аварийный привод буровой лебедки, вспомогательные приводы вышечно-лебедочного блока, электроприводы циркуляционной системы); система управления [7, 54].

Выбор систем, входящих в состав ЭТК БУ, определяется назначением и типом БУ, видом электропривода для главных буровых механизмов и особенностями электроснабжения БУ.

Классификация БУ для эксплуатационного и глубокого разведочного бурения содержится в ГОСТ 16293-89 [55]. Главным классификационным параметром является допускаемая нагрузка на крюке. По этому параметру установки подразделяются на 11 классов. Минимальная и максимальная допускаемые нагрузки равны 800 и 8000 кН соответственно.

Главными буровыми механизмами БУ являются ротор, буровые насосы, бу-

ровая лебёдка [68].

Привод ротора при роторном бурении осуществляет вращение колонны бурильных труб (КБТ) и связанного с колонной долота, разрушающего на забое горную породу.

Буровые насосы осуществляют прокачивание бурового раствора. При роторном бурении поток раствора поднимает на поверхность частицы разбуренной породы. При турбинном бурении поток раствора вращает забойный гидравлический двигатель (турбобур).

Буровая лебёдка производит спуско-подъёмные операции (СПО) с целью замены в процессе бурения износившегося долота.

Для регулирования подачи инструмента на забой при бурении скважины используют регулятор подачи долота (РПД).

В течение длительного времени на БУ широко применялся дизельный привод [55], который передаёт мощность на общую механическую трансмиссию, от которой приводятся во вращение приводы буровых насосов, лебёдки и ротора.

В России широко применяется электрический привод буровых механизмов [55]. Использование электродвигателей для главных буровых механизмов устраняет тяжёлые и громоздкие механические трансмиссии. В отличие от дизельного привода электрический привод имеет большую долговечность.

При выборе электрооборудования необходимо учитывать особенности систем электроснабжения БУ.

Основной объём бурения в России выполняется БУ с централизованным электроснабжением. Для схемы централизованного электроснабжения БУ характерным является следующее [51, 55]. От энергосистемы напряжением 110 кВ питание подаётся на центральную понижающую подстанцию (ЦПП). От ЦПП электроэнергия при напряжении 35 кВ подаётся на промышленные подстанции 35/6 кВ, от которых питаются БУ, кустовые насосные станции (КНС) системы поддержания пластового давления, насосы внутрипромысловой перекачки нефти, компрессорные станции, трансформаторные подстанции 6/0,4 кВ для электроснабжения скважин насосной добычи нефти и прочих промысловых потребителей.

От трансформаторной подстанции 35/6 кВ электроэнергия по местной линии 6 кВ поступает на вводное распределительное устройство буровой установки, откуда она подаётся через один или два параллельно включённых трансформатора для питания электроприводов и другого электрооборудования БУ.

Рост стоимости электроэнергии, удалённость месторождений, увеличение стоимости строительства и эксплуатации промысловых линий электропередачи приводит к необходимости применения автономных источников энергии [55]. В этом случае на БУ используются дизель-генераторы, электроэнергия от которых передаётся на электродвигатели буровых механизмов.

1.2. Электрический привод главных буровых механизмов

В течение многих лет на буровых установках используется нерегулируемый электропривод на основе асинхронных и синхронных электродвигателей. Однако этот тип электропривода в минимальной степени удовлетворяет требованиям технологии бурения [55].

Регулируемый электропривод позволяет полностью использовать мощности буровых механизмов и реализовать оптимальный режим бурения при переменных горно-геологических условиях бурения, сократить аварийность и улучшить показатели бурения. Упрощается конструкция механизмов, повышается их надёжность и долговечность, экономятся энергетические ресурсы и облегчается труд буровиков [55].

На большинстве БУ российского производства для главных механизмов в течение многих лет используется плавно-регулируемый тиристорный электропривод постоянного тока (система ТП-ДПТ), созданный во ВНИИ Электропривод [3, 5, 6, 50, 63].

Системы автоматического регулирования (САР) электроприводов постоянного тока для ротора, насосов и лебёдки выполнены по принципу подчиненного регулирования координат. В этом случае САР имеет два контура регулирования: внутренний (подчинённый) контур регулирования тока якоря и внешний (глав-

ный) контур регулирования скорости. Для электропривода буровой лебёдки применяется двухзонное регулирование скорости с «зависимым» управлением током возбуждения [55].

В приводе буровой лебёдки уровень максимальной скорости подъёма КБТ должен изменяться в зависимости от веса колонны таким образом, чтобы мощность, развиваемая приводом, оставалась постоянной. Для решения этой задачи применяют узел регулирования мощности при изменении веса колонны. С уменьшением веса КБТ скорость автоматически увеличивается до величины, при которой мощность равна заданной величине. При усилии на крюке равном или больше номинального ослабления поля не происходит [55].

В период 2006-2007 г.г. в ООО «Электротехническая промышленная компания» (ООО «Электропром»), которая является прямым преемником научно-технических традиций ВНИИЭлектропривод, были разработаны и начато внедрение регулируемых электроприводов переменного тока по системе преобразователь частоты-асинхронный электродвигатель (система ПЧ-АД) для главных механизмов БУ: насосов, лебёдки и ротора. По сравнению с тиристорным электроприводом постоянного тока система ПЧ-АД имеет следующие преимущества: надёжность, простота, относительная дешевизна двигателя, не требующего постоянного обслуживания (нет коллекторного узла), что позволяет значительно снизить затраты на эксплуатацию двигателей [7, 8].

Для всех главных механизмов БУ применяется один тип взрывозащищённого асинхронного короткозамкнутого двигателя. Для питания электродвигателей используются ПЧ с неуправляемым выпрямителем и общими шинами постоянного тока. Главные приводы (насосов, лебёдки, ротора) получают питание от индивидуальных инверторов [7].

Регулирование скорости двигателя лебёдки – двухзонное. В диапазоне изменения скорости от нуля до номинальной регулирование осуществляется с постоянным моментом при пропорциональном изменении частоты и напряжения (зона постоянства момента). При увеличении скорости двигателя выше номи-

нального значения регулирование осуществляется увеличением частоты ПЧ при постоянном значении напряжения питания (зона постоянства мощности).

Векторная система регулирования привода лебёдки обеспечивает необходимую динамику спуско-подъёмных операций и плавное регулирование скорости в первой и второй зонах работы.

В отличие от привода лебёдки, для приводов насосов и ротора характерным является продолжительный режим работы и меньший диапазон регулирования скорости. Скорость буровых насосов и ротора изменяется от нуля до номинальной частоты вращения (первая зона). Для приводов насосов и ротора также применяются векторные системы регулирования.

Создание электроприводов переменного тока с частотным управлением на базе силовых приборов – IGBT- транзисторов и цифровых систем управления позволило повысить уровень автоматизации ЭТК БУ; увеличить надёжность и срок службы буровой установки [7].

1.3. Структура электротехнического комплекса буровой установки с частотно-регулируемым электроприводом

В настоящее время силами ООО «Электропром» г. Москва и ООО «Уралмаш НГО-Холдинг» г. Екатеринбург разработаны и поставляются ЭТК БУ с ЧРЭП для наземных и морских буровых установок [7].

В работе [7] рассмотрена структура разработанного ЭТК БУ с ЧРЭП, краткое описание которой приведено ниже.

На рисунке 1.1. приведена схема электрооборудования БУ с ЧРЭП грузоподъемностью 250 – 270 тонн [7].

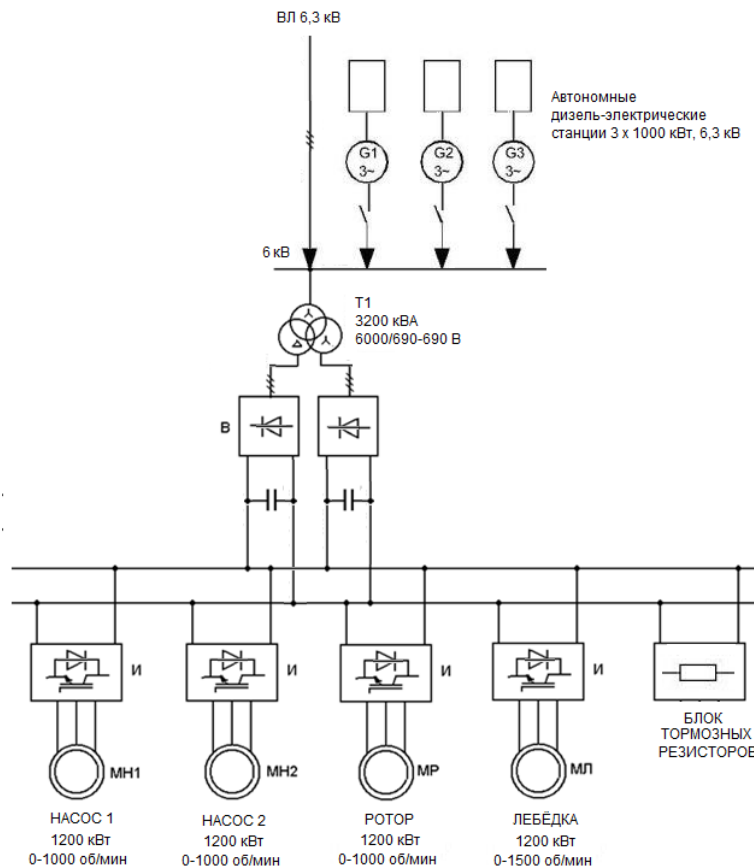


Рисунок 1.1 - Схема электрооборудования БУ с ЧРЭП

Схемы электроснабжения обеспечивают питание БУ от двух возможных источников: от централизованной системы электроснабжения или от автономных дизельных электростанций. Схемы обеспечивают возможность аварийного электроснабжения от резервного дизель-генератора мощностью 315 кВА, напряжением 0,4 кВ.

Питание ЧРЭП главных механизмов (буровой лебедки, буровых насосов, ротора) осуществляется от трёхобмоточного трансформатора 3200 кВА, 6000/690/690В со схемой соединения вторичных обмоток Y/Δ-Y что обеспечивает питание промежуточных шин постоянного тока ПЧ по 12-типульсной схеме выпрямления, выполненной на диодах. Для питания вспомогательных механизмов и электроприводов БУ, системы освещения и бытовых нагрузок используется сухой двухобмоточный трансформатор мощностью 1000...1600 кВА, 6/0,4 кВ.

Электропривод главных механизмов БУ выполнен с применением специальных асинхронных короткозамкнутых электродвигателей во взрывозащищенном исполнении. Мощность двигателей 1200 кВт, напряжение 690 В, номинальная скорость 1000 об/мин.

В качестве регулируемого источника питания главных электродвигателей БУ применяются ПЧ типа Sinamics S120 поставляемые фирмой «Siemens» и модифицированные под условия эксплуатации в РФ [7]. ПЧ конструктивно разделяется на вводное коммутационное устройство, силовые выпрямительные модули, и приводные модули-инверторы. Технические данные модулей: вводное устройство – 690 В, 50 Гц, 1700 А; выпрямитель – 1500 кВт, 1200В, 1880 А; инвертор – 690 В, 1270 А.

Все системы ЭТК БУ размещаются в специальных закрытых контейнерах:

Устройства и изделия ЭТК БУ оборудованы цифровыми средствами управления, контроля и сигнализации, которые объединены в единую автоматизированную систему управления БУ [7].

Электропривод буровой лебедки работает в 4-х квадрантах механической характеристики в том числе в режиме рекуперативного торможения. Торможение привода лебедки в процессе спуска буровой колонны осуществляется путем сброса энергии торможения в тормозные резисторы, подключенные к шинам постоянного тока с помощью электронных ключей.

1.4. Влияние электропривода с полупроводниковыми преобразователями на электрическую сеть соизмеримой мощности

Электроснабжение БУ осуществляется в основном от слабых промышленных сетей соизмеримой мощности или автономных систем электроснабжения [27, 55, 58].

Наличие регулируемого электропривода с полупроводниковым преобразователем в системе электроснабжения соизмеримой мощности приводит к возрастанию потребления реактивной мощности, искажению формы напряжения сети

из-за генерации полупроводниковыми преобразователями токов высших гармоник [9, 11, 37, 48, 52, 95, 97].

Увеличение реактивной мощности приводит к возрастанию потерь в электрической сети, дополнительным отклонениям и колебаниям напряжения сети [40, 49, 70, 71]. Отклонение напряжения влияет на производительность технологического оборудования, нарушается функционирование асинхронных электродвигателей, источников освещения и других электроприёмников [33]. Значительное отклонение напряжения приводит к срабатыванию релейной защиты и отключению электрооборудования. Тем самым нарушается технологический процесс, возрастают потери сырья и сокращается выпуск продукции [35, 51].

Искажение синусоидальной формы напряжения сети вызывает увеличение потерь электроэнергии и сокращение срока службы электрооборудования за счёт дополнительного старения изоляции, увеличение погрешности измерительных приборов, ухудшение работы устройств автоматики и связи [15, 33, 37, 38, 39].

В работе [74] приведены результаты исследований, показывающие, что при нелинейной нагрузке коэффициент кратности увеличения потерь в магнитопроводе для трёхфазного трансформатора может достигать 1,9 и более.

В работе [33] приведены зависимости, показывающие, что при коэффициенте загрузки трансформатора более 0,7 высокое содержание высших гармоник в кривой напряжения сети может привести к значительному сокращению службы трансформатора из-за теплового старения изоляции (до 50%).

В работах [33, 57] рассмотрен экономический ущерб от пониженного КЭ. Экономический ущерб имеет две составляющих: электромагнитную и технологическую. Электромагнитная составляющая складывается в основном из потерь активной мощности и уменьшения срока службы изоляции электрооборудования. Технологическая составляющая ущерба вызывается влиянием качества электроэнергии на производительность технологических установок и себестоимость выпускаемой продукции [33].

Проблема качества электроэнергии стала ещё более актуальной при необходимости питания БУ от существующих линий электропередачи длиной до 9–10 км и более [27].

В соответствии с ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» под КЭ понимается степень соответствия характеристик электрической энергии в данной точке электрической системы совокупности нормированных показателей качества электрической энергии (ПКЭ) [23].

При оценке влияния электропривода с полупроводниковыми преобразователями на электрическую сеть в данной работе используются такие ПКЭ, как отклонение напряжения электропитания и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения.

До 01.07.2014 г. качество электрической энергии регламентировалось в соответствии с ГОСТ 13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [22].

С 01.07.2014 г. действует новый стандарт ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [23].

В новом стандарте отклонения напряжения оцениваются посредством отрицательного $\delta U_{(-)}$ и положительного $\delta U_{(+)}$ отклонений напряжения электропитания в точке передачи электрической энергии от номинального или согласованного значения, %:

$$\delta U_{(-)} = \frac{U_0 - U_{m(-)}}{U_0} \cdot 100; \delta U_{(+)} = \frac{U_{m(+)} - U_0}{U_0} \cdot 100,$$

где $U_{m(-)}$, $U_{m(+)}$ – значения напряжения электропитания, меньшие U_0 и большие U_0 соответственно, усредненные в интервале времени 10 мин;

U_0 – напряжение, равное стандартному номинальному напряжению $U_{ном}$ или согласованному напряжению U_c .

В соответствии с ГОСТ 32144-2013 положительные и отрицательные отклонения напряжения электропитания в точке передачи электрической энергии не должны превышать 10 % номинального или согласованного значения напряжения в течение 100 % времени интервала в одну неделю.

Несинусоидальность напряжения оценивается суммарным коэффициентом гармонических составляющих напряжения K_U :

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)}^2}}{U_{(1)}} \cdot 100,$$

где $U_{(1)}$ – действующее значение междуфазного (фазного) напряжения основной частоты; $U_{(n)}$ – действующее значение n -ой гармонической составляющей междуфазного (фазного) напряжения.

Его определение совпадает с определением коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения по ГОСТ 13109-97.

В соответствии с ГОСТ 32144-2013 для суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения установлены следующие нормы:

а) значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения K_U не должны превышать значений, которые совпадают с нормально допустимыми значениями коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения по ГОСТ 13109-97, в течение 95 % времени интервала в одну неделю;

в) значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения K_U не должны превышать значений, которые совпадают с предельно допустимыми значениями коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения по ГОСТ 13109-97, в течение 100 % времени интервала в одну неделю.

Нормально допустимые и предельно допустимые значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения по ГОСТ 13109-97 в точках общего присоединения к электрическим сетям с номинальным напряжением

$U_{\text{ном}}=0,38$ кВ равны соответственно 8 % и 12 %, а с номинальным напряжением $U_{\text{ном}}=6 - 20$ кВ равны соответственно 5 % и 8 %.

Наличие высших гармоник тока усложняет проблему компенсации реактивной мощности. В работе [70] выполнен анализ существующих теорий реактивной мощности для несинусоидальных режимов. На основе выполненного анализа в [70] рекомендуется под реактивной мощностью понимать реактивную мощность по основной гармонике [13], которую необходимо компенсировать и одновременно осуществлять фильтрацию высших гармоник. Поэтому, следуя рекомендациям [70], в данной работе под реактивной мощностью понимается реактивная мощность по основной гармонике.

Для ЭТК БУ, оснащённых регулируемыми электроприводами с полупроводниковыми преобразователями, характерны следующие показатели КЭ, приведённые в таблице 1.1 [1, 4, 90].

Таблица 1.1 - ПКЭ для ЭТК БУ с полупроводниковыми преобразователями

Система электропривода	Коэффициент мощности	Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения	Отклонение напряжения на вводе буровой установки
ТП-ДПТ	0,5-0,6	20 %	минус 15-20 %.
ПЧ-АД	0,90-0,95	8-10 %	минус 15-20 %.

Анализ таблицы 1.1. показывает, что для ЭТК БУ, оснащённых регулируемым электроприводом с полупроводниковыми преобразователями, характерно: низкий коэффициент мощности для тиристорных электроприводов постоянного тока; суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения и отклонение напряжения электропитания на вводе БУ превышают нормативные значения. Если не принимать специальных мер, нормальная эксплуатация БУ невозможна.

Основным средством улучшения КЭ в системах электроснабжения, содержащих электроприводы с полупроводниковыми преобразователями, является приме-

нение фильтро-компенсирующих устройств (ФКУ). ФКУ обеспечивает одновременно компенсацию реактивной мощности основной частоты и фильтрацию высших гармонических. Это позволяет получить нормативные ПКЭ по отклонению напряжения и гармоническим составляющим напряжения в точке присоединения преобразователя к питающей электрической сети [28].

В работах Грина А. В. [24], Гринберга Р. П. [25], Добрусина Л. А. [29], Добуша В. С. [31], Ермолова С. А. [34], Карташева И. И. [43], Нгуен Чи Тханя [56], Скамьина А. Н. [69] рассмотрены современные решения по схемам и устройствам управления ФКУ.

1.5. Улучшение качества электроэнергии при работе электропривода буровых установок с полупроводниковыми преобразователями

Тиристорный электропривод постоянного тока. В настоящее время в системах электроснабжения БУ, содержащих тиристорный электропривод постоянного тока, эксплуатируются два вида ФКУ [4, 50]:

ФКУ со ступенчатым регулированием реактивной мощности (ФКУ-С), содержащее несколько конденсаторно-реакторных групп (ступеней), включаемых в работу путем автоматического или ручного управления;

ФКУ с непрерывным «косвенным» регулированием реактивной мощности (ФКУ-К), содержащее постоянно подключенную к сети фильтро-конденсаторную группу (ФКГ) и тиристорно-реакторную регулирующую группу (ТРГ).

На рисунках 1.2 и 1.3 приведены схемы электроприводов буровых установок с данными видами ФКУ [4].

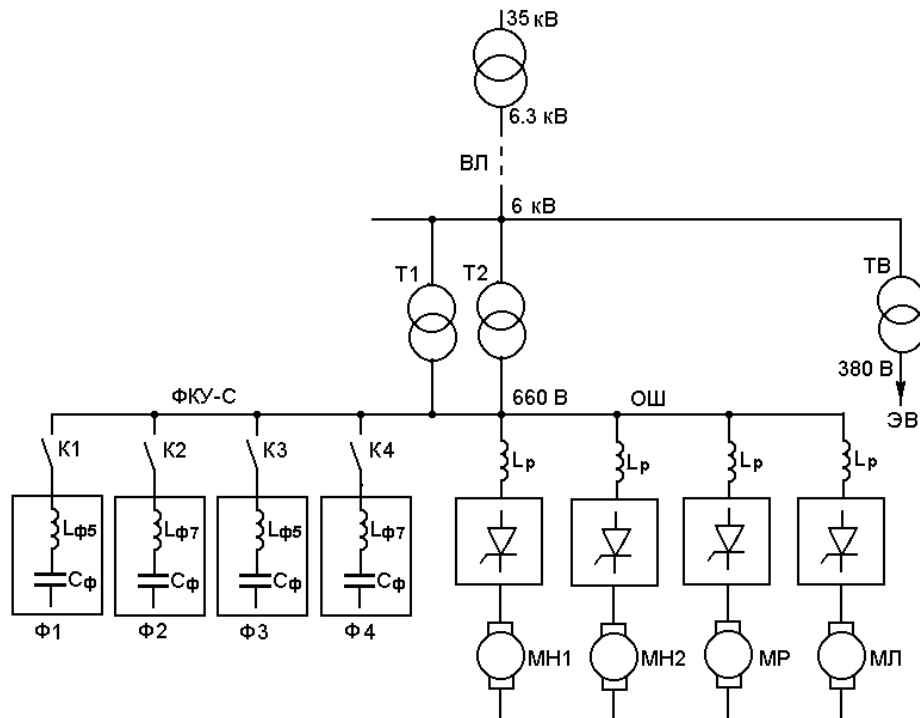


Рисунок 1.2 - ФКУ со ступенчатым регулированием реактивной мощности

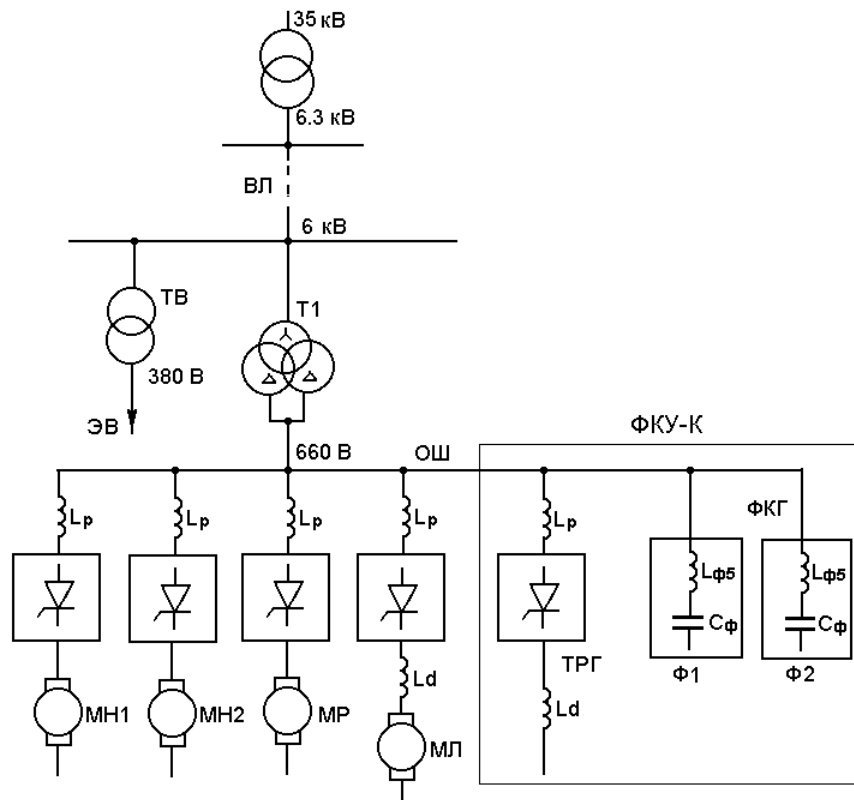


Рисунок 1.3 - ФКУ с непрерывным «косвенным» регулированием реактивной мощности

ФКУ следует выполнять на напряжение питания главных приводов (380 В или 660 В) и подключать его к общим шинам (ОШ), от которых питаются полупроводниковые преобразователи. При этом снижается неблагоприятное влияние высших гармоник тока, генерируемых полупроводниковыми преобразователями, на главный трансформатор и другое электрооборудование.

Рациональная мощность одной ступени ФКУ находится в пределах 150 – 250 квар (максимум 300 квар) [4].

При разработке алгоритмов управления ФКУ необходимо различать три случая [4].

1) Питание БУ от централизованной системы электроснабжения при большой и средней длине линии – от 4 до 12 км («длинная линия»).

В этом случае целями управления ФКУ являются:

- поддержание заданного уровня напряжения на вводе БУ;
- обеспечение допустимого суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения.

2) Питание БУ от централизованной системы электроснабжения при малой длине линии - от 1 до 4 км («короткая линия»).

В этом случае целями управления ФКУ являются:

- уменьшение потребления реактивной мощности;
- обеспечение допустимого суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения.

3) Питание от синхронных генераторов.

При питании БУ от синхронных генераторов целями управления ФКУ являются:

- уменьшение потребления реактивной мощности;
- обеспечение допустимого суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения.

Соответственно, необходимо рассматривать алгоритмы управления только для двух вариантов системы автоматического регулирования (САР) [4]:

- для электрических БУ при питании от длинных линий - САР напряжения;

– для электрических БУ при питании от коротких линий и дизель-электрических БУ – САР реактивной мощности.

Исследование ущерба, обусловленного высшими гармониками, показало, что он уменьшается со снижением высших гармоник напряжений в зависимости, близкой к квадратичной [37]. Поэтому точная фильтрация высших гармоник не является обязательной. Их достаточно снизить до нормативных значений. В этом случае возможно применение «ненастроенных» фильтров [37, 108], что позволит упростить схему ФКУ.

В работе [66] предложена методика определения областей эффективности вариантов ЭТК БУ с ФКУ и без ФКУ при централизованном и автономном электроснабжении. Методика основывается на сопоставлении приведенных затрат по этим вариантам и определении границы эффективности дополнительных инвестиций в ФКУ и срока окупаемости. Выполненные исследования показали, что при питании от линии электропередачи вариант ЭТК БУ с ФКУ является экономически оправданным, если для выбранного варианта ФКУ инвестиции не превышают 1,25–1,30 млн. руб. в ценах 2005 г. [66].

Частотно-регулируемый электропривод переменного тока. Одно из преимуществ ЧРЭП переменного тока перед тиристорным электроприводом постоянного тока заключается в возможности поддержания на вводе БУ коэффициента мощности 0,95–0,98. Поэтому возможен вывод, что применение ЧРЭП позволит обойтись без ФКУ. Однако при увеличении длины питающей линии 6 кВ, чтобы обеспечить требуемое отклонение напряжения при большой активной мощности электроприводов (около 1000 кВт), необходимо включение ФКУ [4].

Применение преобразователя частоты по 12-типульсной схеме выпрямления (рисунок 1.1) позволяет уменьшить искажения формы напряжения сети за счёт отсутствия 5 и 7 высших гармоник [7, 97]. Однако это решение не позволяет полностью решить проблему искажения формы напряжения сети. В работе [91] показано, что для обеспечения работоспособности БУ с ЧРЭП переменного тока при питании от существующих маломощных линий 6 кВ необходимо применение ФКУ, также как и в случае электропривода постоянного тока.

Несмотря на всё более широкое распространение ЭТК БУ с ЧРЭП переменного тока, задача повышения энергетических показателей для данного класса ЭТК БУ практически не решена [61]. Имеется лишь небольшое количество работ, посвящённых этой проблеме, например [12, 91]. Однако в них отсутствуют конкретные рекомендации, связанные с обоснованием выбора ФКУ, учитывающие как особенности работы ЭТК БУ с ЧРЭП переменного тока, так и свойства системы электроснабжения.

При проектировании и выборе ФКУ для ЭТК БУ с ЧРЭП необходимо учитывать следующие особенности работы БУ: переменный характер нагрузок от относительно спокойных режимов бурения до повторно-кратковременных при спуске и подъеме бурильной колонны; значительные изменения уровня максимальных нагрузок в зависимости от текущей глубины скважины; изменение числа работающих электроприводов при проходке скважины; зависимость длины питающей линии от места нахождения БУ; изменение числа параллельно работающих синхронных генераторов при автономном электроснабжении [90].

1.6. Результаты экспериментальных исследований влияния ФКУ на качество электроэнергии

В данном разделе приведены результаты измерений ПКЭ, токов и напряжений, полученных при проведении наладки и испытаний ФКУ на БУ-5000/335. Наладку и испытания проводили сотрудники ООО «Электропром».

Схема электроснабжения ЭТК БУ приведена на рисунке 1.4 [12]. Схема имеет следующие особенности:

- электроснабжение БУ осуществляется от дизель-электрических станций (ДЭС) 6 кВ;
- электроэнергия, получаемая от вторичных обмоток трансформаторов Т1, Т2, суммируется на общих шинах комплектного трансформаторного устройства (КТУ) с номинальным напряжением переменного тока 660 В;

- от общих шин питаются все ТП, к ним же с помощью контакторов подключаются ступени ФКУ;
- используется ФКУ ступенчатого типа ФКУ-С, содержащее 4 ступени Ф1, Ф2, Ф3 и Ф4;
- фильтры ФКУ являются «ненастроенными» (настройка на гармонику с номером 3,8).

На стороне 6 кВ к измерительным трансформаторам тока ТА и напряжения TV подключено измерительное устройство ИзУ. Измерительное устройство измеряет и хранит в запоминающем устройстве измеренные значения напряжений, токов, реактивных и активных мощностей, коэффициента мощности, высших гармоник тока и напряжения. Тип измерительного устройства – цифровой измеритель показателей качества электроэнергии G 4400 компании «ELSPEK» (Израиль).

Результаты экспериментальных исследований приведены на рисунках 1.5–1.7.

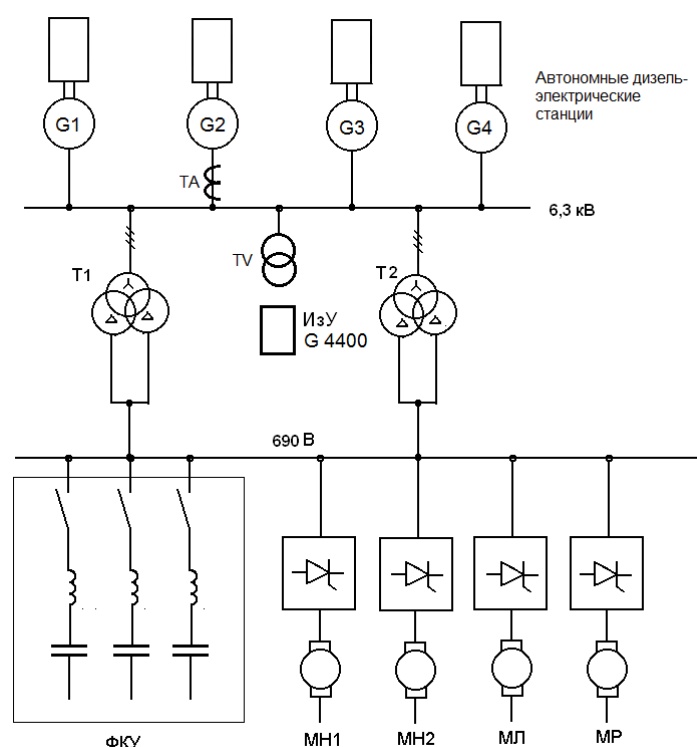


Рисунок 1.4 - Схема электроснабжения

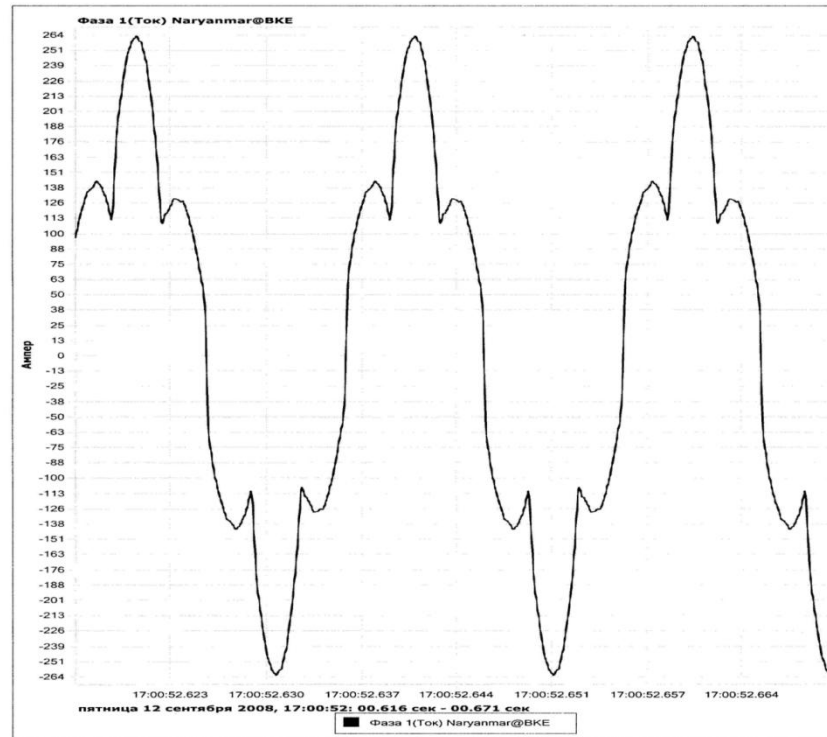


Рисунок 1.5 - Осциллограмма тока фазы 1 при отсутствии ФКУ

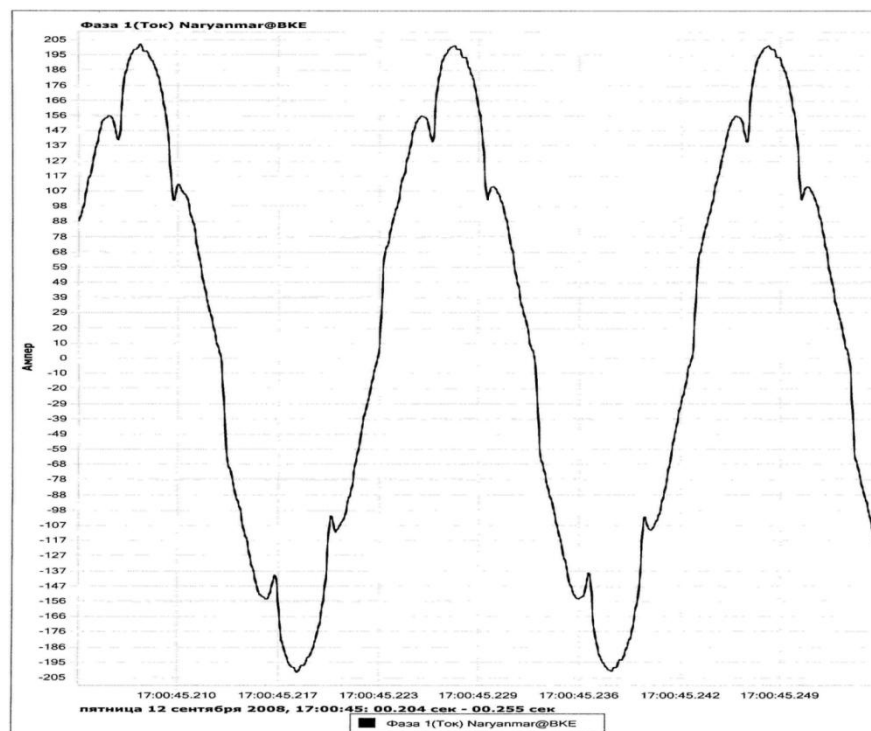


Рисунок 1.6 - Осциллограмма тока фазы 1 при включении ступени ФКУ

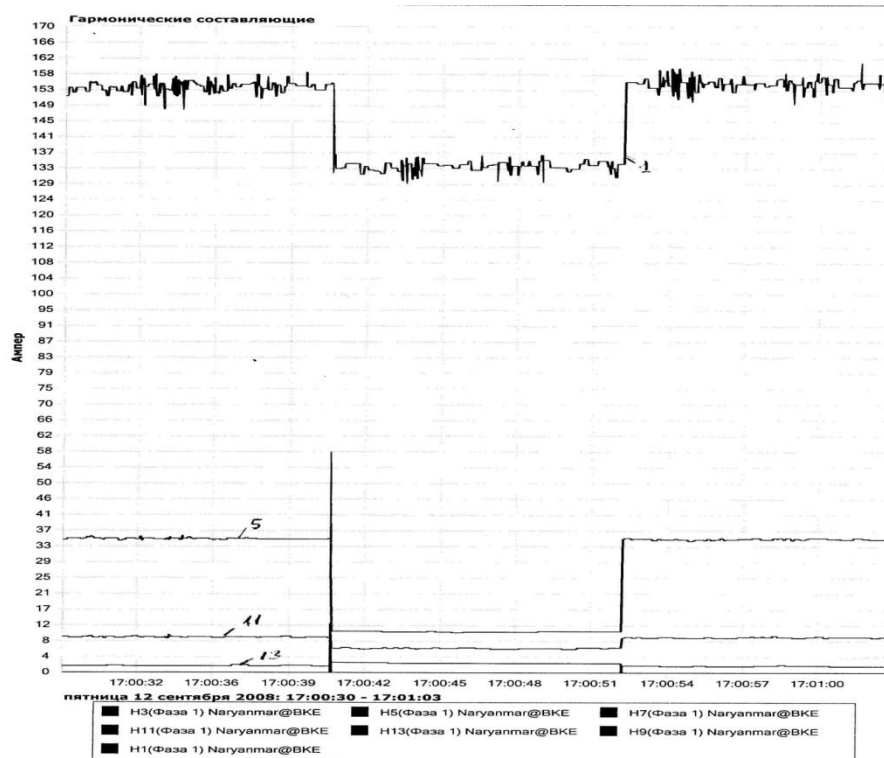


Рисунок 1.7 - Гармоники № 1, 5, 11, 13 тока фазы 1

На рисунке 1.5 приведена осциллограмма тока фазы 1 на вводе 6 кВ при отсутствии ФКУ.

На рисунке 1.6 приведена осциллограмма тока фазы 1 на вводе 6 кВ при включении ступени ФКУ.

На рисунке 1.7. показано изменение гармоник № 1, 5, 11, 13 тока фазы 1 на вводе 6 кВ во времени при отсутствии и включении ступени ФКУ.

Анализ графиков, приведённых на рисунках 1.5–1.7, позволяет сделать следующие выводы.

При отсутствии ФКУ имеет место значительное искажение синусоидальной формы тока сети.

Включение ФКУ приводит к уменьшению искажения синусоидальной формы тока сети за счёт уменьшения в основном 5-й гармоники тока.

Включение ФКУ приводит также к уменьшению 1-й гармоники тока сети. Причиной этого является компенсация реактивной мощности системы.

Результаты измерений, полученных при проведении наладки и испытаний ФКУ на БУ-5000/335 показали, что применение ФКУ является эффективным средством повышения КЭ и уменьшения реактивной мощности в системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой.

1.7. Частотно-регулируемый электропривод переменного тока с активным выпрямителем напряжения

В настоящее время перспективным средством повышения КЭ при работе ЧРЭП переменного тока является применение в составе ПЧ активного выпрямителя напряжения (АВН) [17, 36, 47, 98, 99, 102, 103, 106].

Чтобы обеспечить высокое качество электрической энергии в системе электроснабжения, для таких преобразователей применяют широтно-импульсную модуляцию (ШИМ).

Система управления АВН решает следующие задачи [17, 99]:

- стабилизация выпрямленного напряжения на заданном уровне путем воздействия на амплитуду заданных фазных токов сети;
- формирование фазных токов сети, близких по форме к синусоиде путём воздействия на напряжения управления;
- поддержание заданного коэффициента мощности сети (индуктивного, емкостного или равного единице путем воздействия на напряжения управления;
- передача энергии из сети переменного напряжения в цепь постоянного напряжения и в противоположном направлении (режим рекуперации электроэнергии).

При использовании АВН можно получить большее напряжение на стороне постоянного тока по сравнению с использованием неуправляемых трехфазных выпрямителей.

В АВН наряду с «классической» ШИМ, формирующей синусоидальный сигнал, используются другие разновидности ШИМ, например «векторная» ШИМ [17, 59, 77].

На рисунке 1.8 показана структура силовых цепей двухзвенного ПЧ с АВН [99].

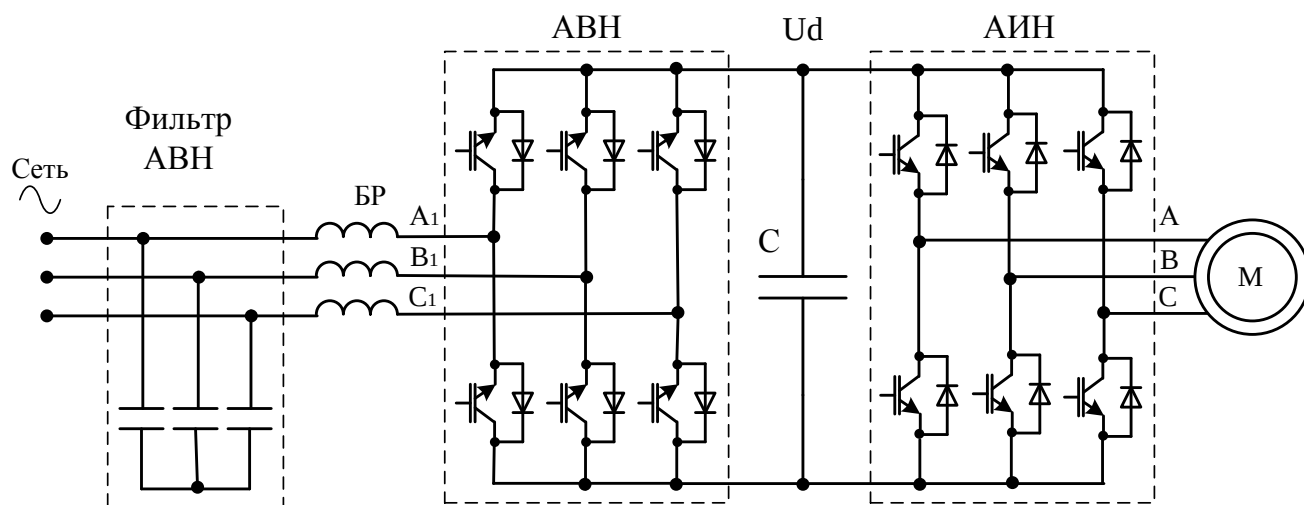


Рисунок 1.8 - Структура силовых цепей двухзвенного ПЧ с АВН и АИН

В силовой цепи последовательно включены фильтр АВН, АВН и автономный инвертор напряжения (АИН). Выпрямитель АВН, выполненный по трехфазной мостовой схеме, преобразует напряжение питающей сети переменного тока в стабилизированное напряжение постоянного тока U_d на конденсаторе C . Трехфазный мостовой АИН работает в режиме ШИМ и преобразует постоянное напряжение в переменное с требуемыми значениями частоты и амплитуды основной гармоники.

АВН выполняется по схеме, идентичной схеме инвертора АИН, и так же работает в режиме ШИМ. АВН инвертирует постоянное напряжение U_d в напряжение в виде импульсов на своих зажимах переменного тока A_1 , B_1 и C_1 . Эти зажимы связаны с питающей сетью через буферные реакторы (БР) [99]. Рабочая частота напряжения на зажимах переменного тока АВН постоянна и равна частоте питающей сети. Разность мгновенных значений напряжения питающей сети и импульсного напряжения на зажимах переменного тока АВН воспринимаются БР, являющимися обязательными элементами системы. Благодаря использованию режима ШИМ импульсное напряжение, формируемое АВН на стороне переменного тока, имеет гармонический состав, в котором основная (полезная) гармоника

и высшие гармоники существенно различаются по частоте. Это создает условия для фильтрации высших гармоник тока, потребляемого из питающей сети. Чтобы получить форму тока, близкую к синусоидальной, в состав АВН входит фильтр, который ослабляет высшие гармоники, генерируемые АВН в сеть переменного тока. Таким образом решается задача потребления из сети практически синусоидального тока [99].

Фазовый угол потребляемого тока зависит от соотношения амплитуд и фазовых углов напряжений, приложенных к БР со стороны сети и со стороны АВН, а также от индуктивности и активного сопротивления реактора. Изменяя с помощью системы управления АВН параметры основной гармоники переменного напряжения на зажимах А1, В1 и С1, можно обеспечить работу ПЧ с заданным значением коэффициента мощности [99].

Двухзвенный ПЧ с АВН обеспечивает двусторонний энергетический обмен между питающей сетью и электрическим двигателем, в том числе режимы рекуперации энергии в питающую сеть.

ПЧ с АВН являются эффективным средством повышения КЭ и энергосбережения для машин и механизмов с ЧРЭП. Поэтому они находят всё более широкое применение.

Проектированием и выпуском ПЧ с АВН занимаются многие организации, например ABB [109], Schneider Electric [110], Vacon [111], Siemens [112] и др.

Существует значительное количество работ, в которых рассмотрено применение ЧРЭП с АВН для различных классов машин и механизмов, например для экскаваторов [32, 45, 46, 67], горнотранспортных систем [14], шахтных подъёмных машин [62], прокатных станков [75, 76], судового электропривода [16, 53]. Однако работы, посвящённые изучению свойств ПЧ с АВН в составе ЭТК БУ, которые учитывали бы реальные условия эксплуатации БУ отсутствуют.

ФКУ ступенчатого типа может обеспечить нормативные показатели качества электроэнергии в установившихся режимах работы электроприводов. АВН позволяет осуществлять непрерывное автоматическое регулирование реактивной мощности в системе электроснабжения, что даёт возможность поддерживать за-

данные напряжение и реактивную мощность на вводе 6 кВ БУ в установившихся и переходных режимах работы электроприводов главных буровых механизмов. Однако при автоматическом регулировании реактивной мощности ошибочный выбор структуры и параметров системы автоматического регулирования (САР) может привести к нарушению устойчивой работы, возникновению значительных колебаний токов и напряжений и выходу из строя электрооборудования. В работе [89] приведены рекомендации по выбору структуры и параметров САР реактивной мощности и напряжения для ФКУ с непрерывным «косвенным» регулированием реактивной мощности (ФКУ-К). Однако для случая применения АВН в составе ЧРЭП БУ такие рекомендации отсутствуют. Поэтому одной из задач исследования является разработка структур САР АВН по реактивной мощности и напряжению в системе электроснабжения БУ с ЧРЭП и исследование их влияния на коэффициент мощности, отклонение напряжения электропитания и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения в системе электроснабжения БУ с ЧРЭП в установившихся и переходных режимах работы.

1.8. Особенности математического описания ЭТК БУ с частотно-регулируемым электроприводом

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. Математическая модель ЭТК БУ в этом случае представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений высокого порядка, составленными относительно мгновенных значений переменных для каждого элемента ЭТК БУ. Использование моделей на основе дифференциальных уравнений позволяет полностью исследовать все процессы, которые имеют место в рассматриваемых электротехнических системах, в том числе происходящие при ШИМ в АИН [30, 42, 65].

Учитывая сложность математической модели ЭТК БУ с ЧРЭП, задача анализа влияния на КЭ ЧРЭП БУ должна решаться при помощи численных методов

решения дифференциальных уравнений. Численные методы реализуются при помощи компьютерного моделирования [18]. В этом случае математическая модель на компьютере реализуется при помощи специально разработанной программы, называемой компьютерной моделью [18].

Разработанная программа должна учитывать особенности системы электропитания и ЧРЭП БУ, позволять определять токи и напряжения в системе, отклонение напряжения электропитания, активную и реактивную мощности, коэффициент мощности, суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения. Компьютерная модель должна быть дополнена моделями систем автоматического регулирования таких объектов управления, как АВН и ЧРЭП.

Современные системы визуального программирования позволяют существенно упростить построение компьютерных моделей. В этом случае на экране из библиотеки стандартных блоков создаётся модель исследуемой системы и выполняются необходимые расчёты [18, 26].

Исследование влияния на КЭ ЧРЭП БУ осуществляется в установившихся режимах работы посредством решения дифференциальных уравнений, которые составлены относительно мгновенных значений переменных, что требует больших затрат машинного времени. Это связано с тем, что установившийся режим можно рассчитать, интегрируя исходную систему дифференциальных уравнений на достаточно большом интервале времени. Чтобы устранить эту проблему, необходимо ввести начальные условия для исходных дифференциальных уравнений, соответствующие установившемуся режиму. Существенно уменьшить время интегрирования позволяет исключение механического переходного процесса в электроприводе посредством задания установившегося значения скорости в его модели [18, 93].

Математическая модель ЭТК БУ с ЧРЭП может быть реализована в виде компьютерной модели при помощи пакета MatLab, который содержит систему визуального моделирования Simulink и пакет расширения SimPower Systems.

Библиотека пакета Simulink представляет собой набор визуальных объектов, используя которые, можно исследовать практически любую систему электропривода [26].

Пакет расширения SimPowerSystems служит для компьютерного моделирования электротехнических систем, содержащих выпрямители, ПЧ, электродвигатели различного типа, устройства управления и т.д. Пакет связан с системой Simulink, имеет свою библиотеку элементов и позволяет проектировать и моделировать электропривода переменного тока с полупроводниковыми ПЧ на уровне их функциональных и даже принципиальных электрических схем [18, 19, 20, 100, 101, 105].

1.9. Задачи диссертационной работы

На основании выполненного анализа влияния электроприводов с полупроводниковыми преобразователями на электрическую сеть соизмеримой мощности и обзора средств улучшения КЭ при работе электропривода БУ с полупроводниковыми преобразователями сформулированы следующие задачи диссертационной работы:

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.

Выводы

1. В настоящее время для главных механизмов БУ широко применяются регулируемые электропривода переменного тока по системе ПЧ-АД. По сравнению с тиристорным электроприводом постоянного тока система ПЧ-АД имеет следующие преимущества: надежность, простота, относительная дешевизна двигателя, не требующего постоянного обслуживания (нет коллекторного узла), что позволяет значительно снизить затраты на эксплуатацию двигателей.

2. Несмотря на всё более широкое распространение БУ с ЧРЭП, задача повышения энергетических показателей для данного класса БУ практически не решена. Отсутствуют конкретные рекомендации, связанные с обоснованием выбора ФКУ, учитывающие как особенности работы ЭТК БУ с ЧРЭП, так и свойства системы электроснабжения.

3. Исследование ущерба, обусловленного высшими гармониками, показало, что он уменьшается со снижением высших гармоник напряжений в зависимости, близкой к квадратичной. Поэтому высшие гармоники достаточно снизить до нормативных значений. В этом случае возможно применение «ненастроенных» фильтров, позволяющих упростить схему ФКУ.

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

5. На основании выполненного анализа влияния электроприводов с полупроводниковыми преобразователями на электрическую сеть соизмеримой мощности и обзора средств улучшения качества электроэнергии при работе ЧРЭП БУ сформулированы задачи диссертационной работы.

ГЛАВА 2. КОМПЬЮТЕРНЫЕ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ БУРОВЫХ УСТАНОВОК С ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

2.1. Расчётные схемы ЭТК БУ с частотно-регулируемым электроприводом

Для решения поставленных в диссертационной работе задач, необходимо разработать компьютерные модели системы ЧРЭП с ФКУ и с АВН для БУ, учитывающие свойства системы электроснабжения. В основу данных моделей положены следующие расчётные схемы электрооборудования ЭТК БУ с ЧРЭП:

1. Схема электрооборудования БУ с ЧРЭП при питании от местной линии 6 кВ. В качестве звена постоянного тока используется неуправляемый выпрямитель. Схема представлена на рисунке 2.1 [78, 79, 84].

2. Схема электрооборудования БУ с ЧРЭП при питании от автономных синхронных генераторов. В качестве звена постоянного тока в ПЧ используется неуправляемый выпрямитель. Схема представлена на рисунке 2.2.

3. Схема электрооборудования БУ с ЧРЭП при питании от местной линии 6 кВ. В качестве звена постоянного тока в ПЧ используется АВН. Схема представлена на рисунке 2.3 [80].

4. Схема электрооборудования БУ с ЧРЭП при питании от автономных синхронных генераторов. В качестве звена постоянного тока в ПЧ используется АВН. Схема представлена на рисунке 2.4.

В схеме, представленной на рисунке 2.1 от воздушной ЛЭП напряжением 6 кВ получает питание понижающий трёхобмоточный трансформатор Т со вторичным напряжением 660 В. Трансформатор имеет две вторичные обмотки Δ и Y , к этим обмоткам подключаются трёхфазные мостовые неуправляемые выпрямители В, что обеспечивает питание промежуточных шин постоянного тока ПЧ по 12-типульсной схеме выпрямления.

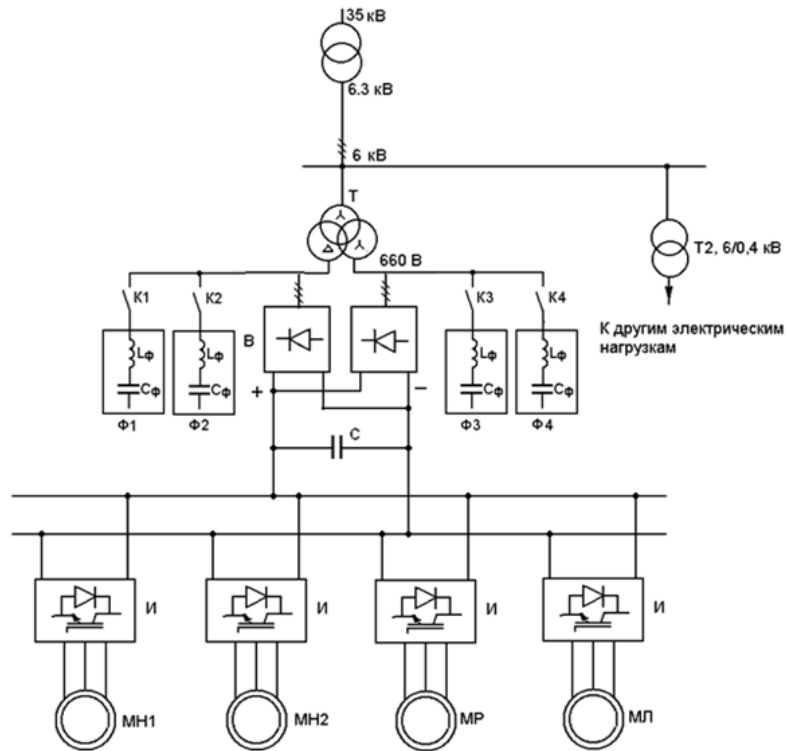


Рисунок 2.1 - Схема электрооборудования БУ с ЧРЭП и
неуправляемым выпрямителем при питании от местной линии 6 кВ

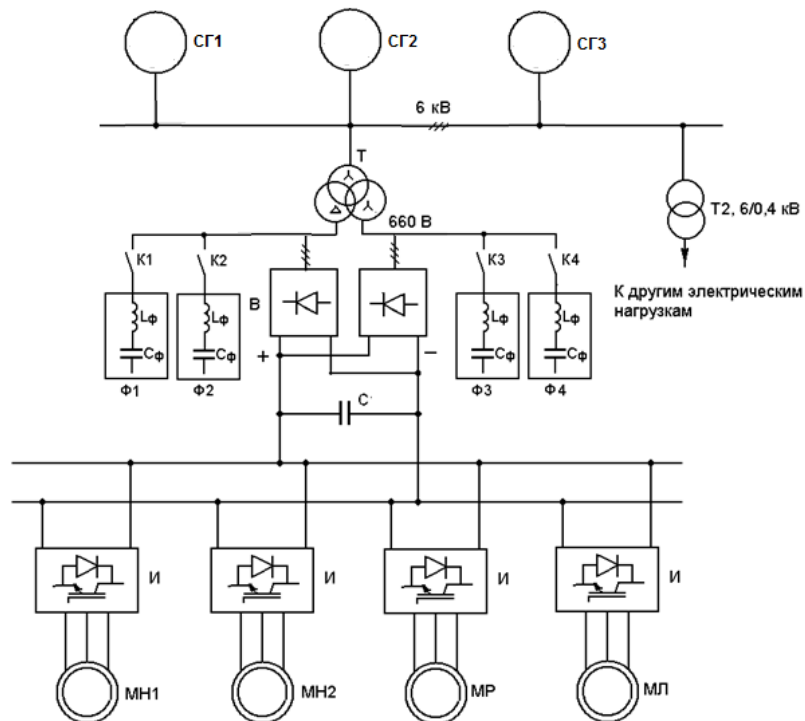


Рисунок 2.2 - Схема электрооборудования БУ с ЧРЭП и
неуправляемым выпрямителем при питании от автономных СГ

Применение трёхобмоточного трансформатора в этой схеме со вторичными обмотками, соединёнными в Δ и Y , и общим выпрямительным устройством позволяет уменьшить содержание высших гармоник в питающей сети за счёт исчезновения 5 и 7 гармоник [4, 7].

Электроэнергия, получаемая от вторичных обмоток трансформатора, при помощи неуправляемых выпрямителей преобразуется в энергию постоянного тока с номинальным напряжением 900 В. От общих шин постоянного тока получают питание автономные инверторы напряжения (И), через которые энергия передаётся на асинхронные электродвигатели (АД) главных механизмов буровой установки: два буровых насоса (МН1 и МН2), ротор (МР) и лебёдка (МЛ).

В состав схемы может входить ФКУ ступенчатого типа (ФКУ-С), ступени которого ($\Phi 1$, $\Phi 2$, $\Phi 3$, $\Phi 4$) с помощью контакторов (или трехфазных тиристорных ключей) подключаются к вторичным обмоткам трансформатора (Т).

В отличие от схемы рисунка 2.1, в схеме рисунка 2.2 понижающий трёхобмоточный трансформатор Т получает питание от автономных синхронных генераторов (СГ).

По сравнению со схемами, представленными на рисунках 2.1, 2.2, схема на рисунке 2.3 имеет следующие особенности:

- от шин 6 кВ комплектного распределительного устройства получает питание преобразовательный двухобмоточный трансформатор Т;
- ко вторичной обмотке трансформатора через фильтр Φ и реактор подключается АВН, через который от общих шин постоянного тока получают питание АИН.

В отличие от схемы рисунка 2.3, в схеме рисунка 2.4 понижающий трансформатор Т получает питание от автономных синхронных генераторов СГ.

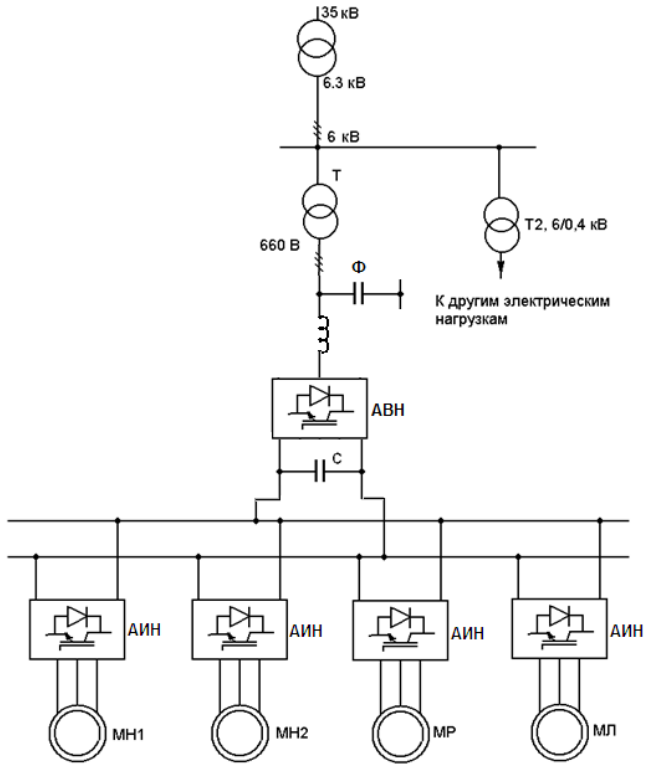


Рисунок 2.3 - Схема электрооборудования БУ с ЧРЭП и АВН при питании от местной линии 6 кВ

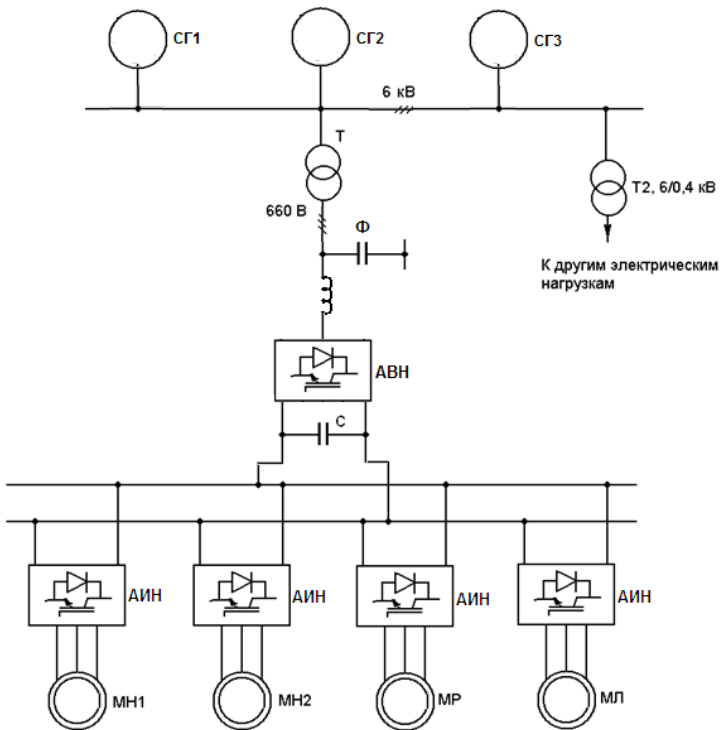


Рисунок 2.4 - Схема электрооборудования БУ с ЧРЭП и АВН при питании от автономных СГ

2.2. Математическая модель асинхронного электрического двигателя и его системы автоматического регулирования

В основу математической модели ЧРЭП положена математическая модель асинхронного электрического двигателя в синхронных осях x , y , вращающихся с синхронной скоростью поля машины [44, 60, 73].

При этом синусоидально изменяющиеся реальные переменные машины преобразуются в постоянные величины, характеризующие проекции изображающего вектора на синхронно с ним вращающиеся координатные оси x и y .

В осях x , y система дифференциальных уравнение АД имеет следующий вид [44].

Уравнение статорной цепи:

$$\begin{aligned} U_{1x} &= i_{1x}R_1 + \frac{d\Psi_{1x}}{dt} - \omega_{0эл} \Psi_{1y}; \\ U_{1y} &= i_{1y}R_1 + \frac{d\Psi_{1y}}{dt} + \omega_{0эл} \Psi_{1x}. \end{aligned} \quad (2.1)$$

Уравнения роторной цепи:

$$\begin{aligned} 0 &= i'_{2x}R'_2 + \frac{d\Psi_{2x}}{dt} - (\omega_{0эл} - \omega \cdot p)\Psi_{2y}; \\ 0 &= i'_{2y}R'_2 + \frac{d\Psi_{2y}}{dt} + (\omega_{0эл} - \omega \cdot p)\Psi_{2x}. \end{aligned} \quad (2.2)$$

где: Ψ_{1x} и Ψ_{1y} - потокосцепление статора идеализированной двухфазной машины (ИДМ) по осям x и y ; Ψ_{2x} и Ψ_{2y} - потокосцепление ротора по осям x и y ; R_1 и R'_2 - активное сопротивление фаз соответственно ротора и статора; $\omega_{0эл}$ - частота вращения магнитного поля статора; ω - частота вращения ротора; i_{1x} и i_{1y} - ток статора ИДМ по осям x и y ; i'_{2x} и i'_{2y} - ток ротора по осям x и y .

Уравнения потокосцеплений [44]:

$$\begin{aligned} \Psi_{1x} &= L_1 i_{1x} + L_{12} i'_{2x}; \\ \Psi_{1y} &= L_1 i_{1y} + L_{12} i'_{2y}; \\ \Psi_{2x} &= L'_2 i'_{2x} + L_{12} i_{1x}; \\ \Psi_{2y} &= L'_2 i'_{2y} + L_{12} i_{1y}. \end{aligned} \quad (2.3)$$

где: L_1, L'_2 – собственные индуктивности ротора и статора;

L_{12} – взаимная индуктивность.

Уравнение движения электропривода:

$$M_{\text{дв}} - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (2.4)$$

где: $M_{\text{дв}}$ – момент электродвигателя;

J – момент инерции электропривода;

M_c – момент сопротивления.

Момент электродвигателя [44]:

$$M_{\text{дв}} = \frac{2}{3} p_n \frac{L_{12}}{L_2} (\Psi_{2x} i_{1y} - \Psi_{2y} i_{1x}), \quad (2.5)$$

где p_n – число пар полюсов.

САР ЧРЭП БУ выполнена по принципу векторного управления координатами электропривода [73]. Она имеет два канала управления – потокосцеплением ротора и скоростью двигателя. Применение векторного управления позволяет обеспечить требуемое качество динамических процессов и точность регулирования.

Функциональная схема системы векторного регулирования координат частотно-регулируемого АД приведена на рисунке 2.5. Данная функциональная схема получена на основе функциональных схем САР, приведённых в [73], и представляет собой систему векторного управления с косвенной ориентацией по вектору потокосцепления ротора АД.

Рассматриваемая система векторного управления привода обеспечивает стабилизацию потокосцепления ротора ψ_2 [73]. При стабилизации потокосцепления ротора ($\psi_2 = \text{const}$) механические характеристики АД подобны характеристикам двигателя постоянного тока с независимым возбуждением. Информацию о векторе потокосцепления в данной системе управления привода получают косвенным путём на основе математической модели электрической машины.

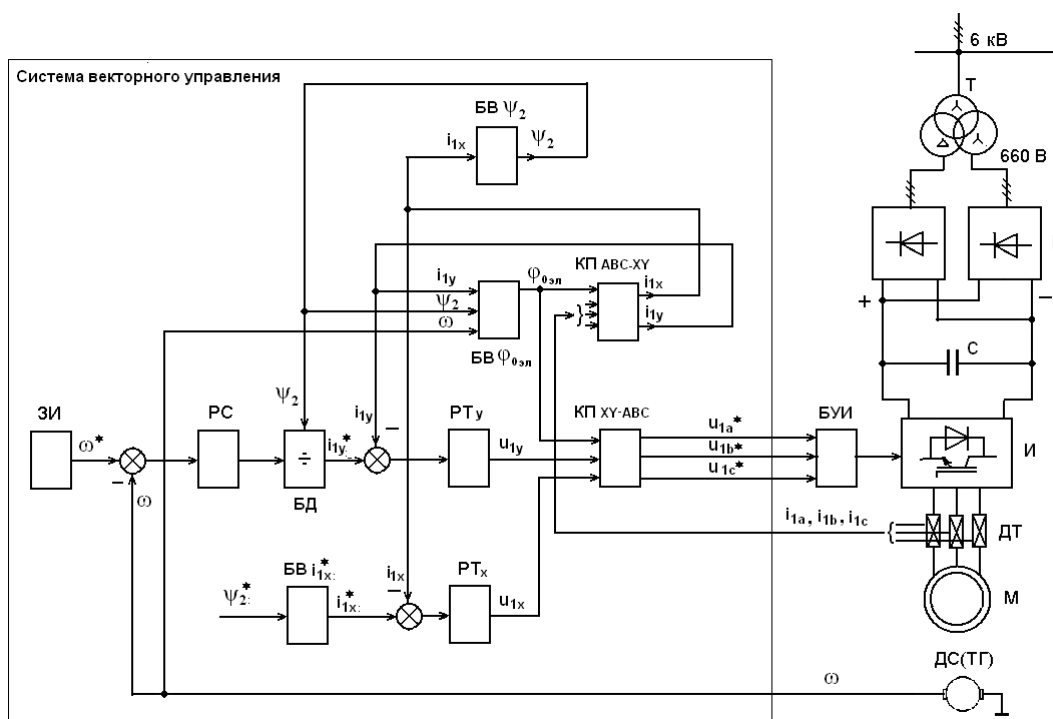


Рисунок 2.5 - Функциональная схема системы векторного управления с косвенной ориентацией по вектору потокосцепления ротора АД

Система имеет два канала управления – угловой скоростью ω и потокосцеплением ротора ψ_2 . Канал управления ψ_2 управляет составляющей i_{1x} тока статора. Канал управления скоростью АД двухконтурный: внутренний контур управляет составляющей i_{1y} тока статора, внешний – угловой скоростью ротора.

Составляющие тока статора i_{1x} и i_{1y} являются проекциями тока статора i_1 на оси X и Y ортогональной системы координат, вращающейся с синхронной скоростью $\omega_{0\text{ эл}}$ магнитного поля двигателя.

Составляющие тока статора i_{1x} и i_{1y} не зависят от частоты питания АД и по своей форме являются постоянными токами. Поэтому система векторного управления строится подобно системам управления двигателями постоянного тока (ДПТ), в которых составляющая i_{1x} тока статора аналогична току возбуждения и определяет потокосцепление АД, а составляющая i_{1y} аналогична току якоря ДПТ.

Сигнал задания скорости АД ω^* формируется в задатчике интенсивности (ЗИ) и поступает на вход элемента сравнения. На второй вход элемента сравнения поступает сигнал ω реальной скорости АД с выхода тахогенератора. Разность

сигналов $\omega^* - \omega$ поступает на вход регулятора скорости (РС). Выходной сигнал РС является сигналом задания электромагнитного момента $M_{эм}$ АД. Блок деления (БД) выполняет операцию деления сигнала задания электромагнитного момента на сигнал, пропорциональный ψ_2 . На выходе БД формируется сигнал задания i_{1y}^* составляющей тока статора по оси у.

Сигнал задания потокосцепления ротора ψ_2^* поступает на вход блока вычисления (БВ) сигнала задания i_{1x}^* составляющей тока статора по оси х. Сигнал задания i_{1x}^* вычисляется в соответствии с выражением [73]:

$$i_{1x}^* = \frac{\Psi_{2x}}{L_{12}}, \quad (2.6)$$

где L_{12} – взаимная индуктивность обмоток статора и ротора АД.

Составляющие i_{1x}^* и i_{1y}^* сравниваются в элементах сравнения со своими текущими значениями i_{1x} и i_{1y} . Текущие значения i_{1x} и i_{1y} определяются в блоке координатных преобразований (КП) АВС – ХУ по известным значениям токов статора АД i_a , i_b , i_c и углу поворота $\varphi_{0эл}$ осей координат Х и У, вращающихся относительно осей А, В, С со скоростью электромагнитного поля АД.

Угол $\varphi_{0эл}$ определяется в БВ $\varphi_{0эл}$ путём интегрирования выражения [73]:

$$\varphi_{0эл} = \int \left(p \cdot \omega + \frac{L_{12} \cdot R'_2}{L'_2} \cdot \frac{i_{1y}}{\Psi_{2x}} \right) dt, \quad (2.7)$$

где p – число пар полюсов; L'_2 – индуктивность обмотки ротора, приведённая к цепи статора.

Сигналы рассогласования задающих и реальных значений составляющих тока статора поступают на входы соответствующих регуляторов тока $РТ_x$ и $РТ_y$. Выходные сигналы регуляторов поступают в блок КП ХУ – АВС системы координат ХУ в систему координат АВС. Входные сигналы координатного преобразователя трансформируются в блоке КП в сигналы задания u_{1a}^* , u_{1b}^* , u_{1c}^* трёхфазной системы координат, поступающие на вход блока управления инвертором (БУИ) и определяющие выходные напряжения ПЧ.

В БВ ψ_2 формируется выходной сигнал, пропорциональный реальному значению потокосцепления ротора. В разработанной компьютерной модели САР

частотно-регулируемого асинхронного электропривода значение Ψ_2 определяется посредством решения дифференциального уравнения, связывающего потокосцепление ротора и составляющую тока статора i_{1x} [73]:

$$T_2 \frac{d\Psi_2}{dt} + \Psi_2 = L_{12} \cdot i_{1x}, \quad (2.8)$$

где $T_2 = L'_2/R'_2$ – электромагнитная постоянная времени цепи ротора;
 L'_2 – индуктивность обмотки ротора, приведённая к цепи статора.

Для расчёта передаточных функций регуляторов используется структурная схема системы векторного управления с косвенной ориентацией по вектору потокосцепления ротора АД, показанная на рисунке 2.6 [73].

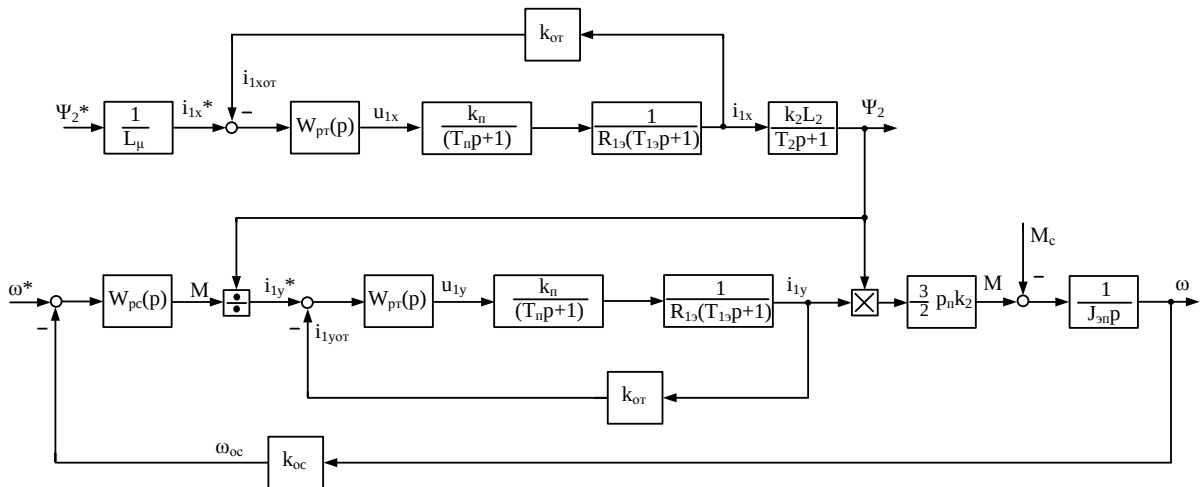


Рисунок 2.6 - Структурная схема системы векторного управления с косвенной ориентацией по вектору потокосцепления ротора АД

Схема содержит два одинаковых по параметрам внутренних контура регулирования составляющих i_{1x} и i_{1y} тока статора с коэффициентом обратной связи по току $k_{от}$ и внешний контур регулирования скорости двигателя с коэффициентом обратной связи по скорости $k_{ос}$. Данная схема подобна структурной схеме системы двухзонного регулирования скорости ДПТ.

На схеме приняты следующие обозначения: ω^* , Ψ_2^* – сигналы задания скорости электродвигателя и потокосцепления ротора; M^* , i_{1x}^* и i_{1y}^* – сигналы задания момента электродвигателя M , токов i_{1x} и i_{1y} ; $\omega_{ос}$, $i_{1xот}$ и $i_{1yот}$ – сигналы обрат-

ных связей по скорости ω , токам i_{1x} и i_{1y} ; k_{oc} , $k_{от}$ – коэффициенты обратных связей по току и скорости электродвигателя; W_{pt} , W_{pc} – передаточные функции регулятора тока (РТ) и РС.

В соответствии со структурной схемой передаточные функции регуляторов находятся по следующим формулам [73].

Передаточная функция пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора тока:

$$W_{pt}(p) = k_{pt} + \frac{1}{T_{ипт}p} \quad (2.9)$$

где $k_{pt} = T_{1э}/T_{ипт}$ – коэффициент передачи пропорциональной части регулятора тока;

$T_{ипт} = k_{от}k_{п}a_{т}T_{п}/R_{1э}$ – постоянная времени интегрирования ПИ-регулятора тока;

$T_{1э} = \sigma L_1/R_{1э}$ – электромагнитная постоянная времени статорной цепи;

$k_{п}$ – коэффициент передачи ПЧ;

$T_{п}$ – эквивалентная постоянная времени цепи управления ПЧ;

$R_{1э} = R_1 + k_2^2 R'_2$ – эквивалентное активное сопротивление цепи статора;

$k_2 = L_{12}/L'_2$ – коэффициент электромагнитной связи ротора;

$\sigma = 1 - \frac{L_{12}^2}{L_1 \cdot L'_2}$ – коэффициент рассеяния магнитного поля АД;

L_1 – индуктивность обмотки статора;

$a_{т}$ – коэффициент настройки РТ.

Передаточная функция пропорционального регулятора скорости (П-РС):

$$W_{pc} = k_{pc} = \frac{2J_{эп}k_{от}}{3pk_2k_{oc}a_c a_{т}T_{п}}, \quad (2.10)$$

где $J_{эп}$ – момент инерции электропривода; a_c – коэффициент настройки РС.

Передаточная функция пропорционально-интегрального регулятора скорости (ПИ-РС):

$$W_{pc} = k_{pc} + \frac{1}{T_{ипс}p}, \quad (2.11)$$

где $T_{ирс} = \frac{a_c a_t b_c T_{п}}{k_{рс}}$ – постоянная времени интегрирования ПИ-РС; b_c – коэффициент настройки ПИ-РС.

В приведённых формулах коэффициенты настройки a_t , a_c , b_c выбираются в диапазоне от 2 до 4.

2.3. Математическая модель системы автоматического регулирования активного выпрямителя напряжения

В основу математической модели САР АВН положена векторная САР, предложенная в работах [17, 99].

Система управления реализована в синхронной ортогональной системе координат (x, y) , ориентированной по вектору напряжения сети $\bar{U}$, что позволяет отдельно управлять активной i_x и реактивной i_y составляющими вектора входного тока выпрямителя $\bar{I}$ [17].

На рисунке 2.7. показано разложение вектора входного тока выпрямителя $\bar{I}$ на составляющие в системе координат (x, y) , ориентированной по вектору напряжения сети $\bar{U}$, где ω_u – угловая частота напряжения сети; θ_u – угол поворота вектора напряжения питающей сети в неподвижной системе координат А, В, С. [17].

При ориентации вращающейся системы координат по вектору напряжения питающей сети $\bar{U}$:

$$u_x = U; u_y = 0, \quad (2.12)$$

где U – модуль вектора напряжения питающей сети.

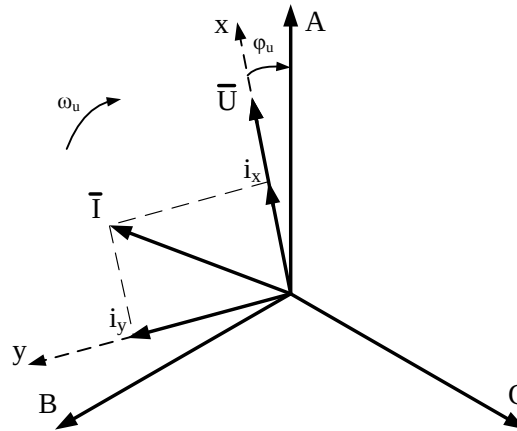


Рисунок 2.7 - Разложение вектора тока $\bar{I}$ на составляющие в осях x, y

Функциональная схема векторной САР АВН представлена на рисунке 2.8 [17, 99].

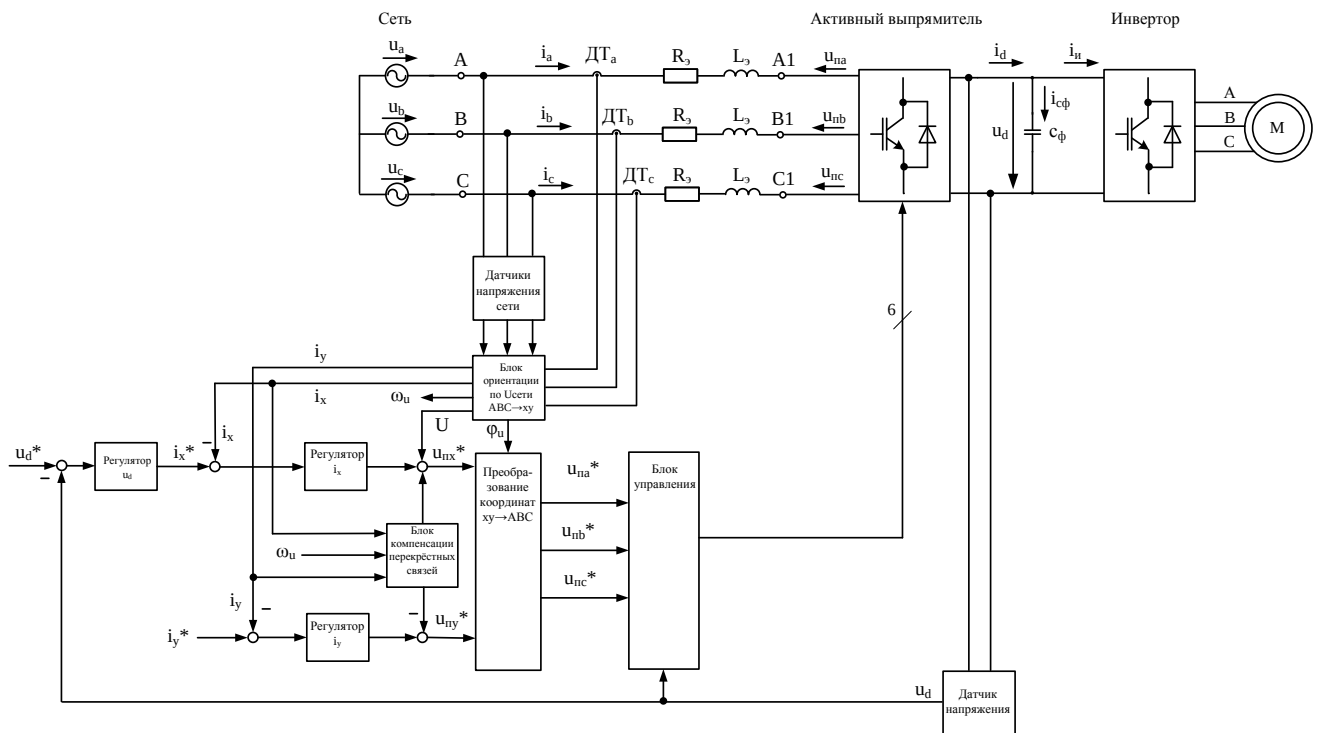


Рисунок 2.8 - Функциональная схема векторной САР АВН

Блок «Блок ориентации по $U_{\text{сети}} \text{ ABC} \rightarrow xy$ » выполняет вычисление параметров сетевого напряжения U, ω_u по результатам измерения мгновенных значений напряжений в фазах сети, а также осуществляет преобразование входных то-

ков в координатную систему (x, y) , ориентированную по вектору сетевого напряжения $\bar{U}$.

Блок компенсации перекрестных связей компенсирует взаимное влияние активной i_x и реактивной i_y составляющих вектора входного тока выпрямителя $\bar{I}$.

Блок «Преобразование координат $xu \rightarrow ABC$ » выполняет преобразование заданных напряжений выпрямителя из синхронной системы координат (x, y) в трехфазную систему координат (A, B, C) .

Векторная САР содержит одноконтурную САР реактивного тока i_y и двухконтурную САР выпрямленного напряжения АВН U_d , внутренним контуром которой является контур регулирования активного тока i_x . Для уменьшения ошибки регулирования, вызванной изменением напряжения сети U , применяется регулирование по возмущающему воздействию, которым является напряжение U .

Сигналы рассогласований между заданными (i_x^*, i_y^*) и фактическими (i_x, i_y) значениями преобразованных токов поступают на вход ПИ регуляторов токов. Выходные сигналы регуляторов тока после дополнения сигналами компенсирующих связей поступают на входы преобразователя координат вектора управляющих напряжений $xu \rightarrow ABC$. После преобразования координат формируются управляющие воздействия $u_{па}^*$, $u_{пв}^*$ и $u_{пс}^*$, поступающие на блок управления АВН.

Регулирование коэффициента мощности преобразователя осуществляется путём задания реактивной составляющей входного тока i_y^* . При $i_y^*=0$ реактивная мощность выпрямителя равна нулю.

Синтез регуляторов системы векторного управления АВН выполняется на основе принципов подчиненного регулирования с учетом компенсации влияния перекрестных связей и возмущающих воздействий [17, 99].

Учитывая высокую частоту коммутации ключей в режиме ШИМ, при синтезе системы автоматического управления АВН используется его более простая эквивалентная непрерывная модель [17].

Эквивалентную непрерывную модель АВН удобно представить в системе координат (x, y) , ориентированной по вектору напряжения сети $\bar{U}$. В этом случае уравнения непрерывной модели АВН имеют следующий вид [17]:

$$u_x = U = u_{\text{пх}} + R_{\text{э}} i_x + L_{\text{э}} \frac{di_x}{dt} - \omega_u L_{\text{э}} i_y; \quad (2.13)$$

$$u_y = 0 = u_{\text{пy}} + R_{\text{э}} i_y + L_{\text{э}} \frac{di_y}{dt} + \omega_u L_{\text{э}} i_x; \quad (2.14)$$

$$f_{\text{пх}} = \frac{u_{\text{пх}}^*}{2U_0}; \quad (2.15)$$

$$f_{\text{пy}} = \frac{u_{\text{пy}}^*}{2U_0}; \quad (2.16)$$

$$u_{\text{пх}} = f_{\text{пх}} u_d; \quad (2.17)$$

$$u_{\text{пy}} = f_{\text{пy}} u_d; \quad (2.18)$$

$$i_d = \frac{3}{2} (f_{\text{пх}} i_x + f_{\text{пy}} i_y); \quad (2.19)$$

$$i_d - i_n = C \frac{du_d}{dt}; \quad (2.20)$$

$$\omega_u = \frac{d\theta_u}{dt}. \quad (2.21)$$

где $L_{\text{э}}$ - эквивалентная индуктивность, равная сумме индуктивностей на стороне переменного тока между АВН и напряжением сети, по вектору которого ориентируется вектор входного тока АВН $\bar{I}$; $R_{\text{э}}$ - эквивалентное активное сопротивление, равное сумме активных сопротивлений на стороне переменного тока между АВН и напряжением сети, по вектору которого ориентируется вектор входного тока АВН $\bar{I}$;

U_0 - амплитуда несущего сигнала ШИМ в схеме управления; $f_{\text{пх}}$, $f_{\text{пy}}$ - представление в эквивалентной непрерывной модели АВН по осям x , y дискретной вектор-функции, описывающей управляющие сигналы и состояния полупроводниковых ключей АВН [17].

Эквивалентная индуктивность L_{Σ} равна:

$$L_{\Sigma} = L_{2\Sigma} + L_{\text{л}} + L_{\text{р}},$$

где $L_{2\Sigma}$ – эквивалентная индуктивность трансформатора, приведённая к вентильной обмотке трансформатора;

$L_{\text{л}} = L_{\text{л6}} + L_{\text{сэ}}$ – индуктивность системы электроснабжения при питании от линии 6 кВ (при питании от СГ – индуктивность СГ), приведённая к вентильной обмотке трансформатора;

$L_{\text{л6}}$ – индуктивность линии 6 кВ;

$L_{\text{сэ}}$ – индуктивность элементов системы электроснабжения от ЦПП 110/35/6 кВ до линии электропередачи 6кВ;

$L_{\text{р}}$ – индуктивность сетевого (буферного) реактора.

Эквивалентное активное сопротивление R_{Σ} , равно:

$$R_{\Sigma} = R_{2\Sigma} + R_{\text{л}} + R_{\text{р}};$$

$R_{2\Sigma}$ – эквивалентное активное сопротивление трансформатора, приведённое к вентильной обмотке трансформатора;

$R_{\text{л}} = R_{\text{л6}} + R_{\text{сэ}}$ – активное сопротивление системы электроснабжения при питании от линии 6 кВ (при питании от СГ активное сопротивление СГ), приведённое к вентильной обмотке трансформатора;

$R_{\text{л6}}$ – активное сопротивление линии 6 кВ;

$R_{\text{сэ}}$ – активное сопротивление элементов системы электроснабжения от ЦПП 110/35/6 кВ до линии электропередачи 6кВ;

$R_{\text{р}}$ – активное сопротивление сетевого (буферного) реактора.

Уравнения непрерывной аппроксимации (2.13)–(2.21) справедливы при условии [17]:

$$\left| u_{\text{п}j}^* \right| \leq U_0, \quad j=a,b,c. \quad (2.22)$$

В этом случае насыщение узла ШИМ отсутствует. Поэтому ни один из фазных широтно-импульсных модуляторов не потеряет управляемости.

Коэффициент мощности АВН определяется формулой [17]:

ния u_x и u_y . Управляемыми величинами являются напряжение u_d на выходе активного выпрямителя и компоненты вектора сетевых токов i_x и i_y . В структуре АВН имеются перекрёстные связи, а также внутренняя обратная связь по выпрямленному напряжению u_d , имеющая мультипликативный характер (вместо алгебраического сложения сигнал обратной связи умножается на сигнал прямой ветви регулирования).

Для решения задачи синтеза векторной САР АВН осуществляется компенсация влияния перекрёстных связей, внутренней обратной связи по выпрямленному напряжению u_d и возмущающего воздействия по напряжению сети U . Это позволяет осуществить синтез векторной САР активного выпрямителя на основе подчинённого регулирования координат.

Для подавления действия внутренней обратной связи по выпрямленному напряжению u_d применяются специальные компенсирующие связи путем включения блоков деления управляющих воздействий $u_{пх}^*$ и $u_{пу}^*$ на величину $2U_0 = \frac{1}{k_{п}^*} u_d$, пропорциональную u_d , где $k_{п}^* = \text{const}$ – параметр компенсирующей связи [17].

Введение такой компенсирующей связи, показанной на рисунке 2.9 пунктиром, блокирует действие внутренней обратной связи по напряжению u_d . Это обеспечивает независимость компонент вектора сетевого напряжения АВН $u_{пх}$ и $u_{пу}$ от величины u_d [17]:

$$u_{пх} = \frac{u_{пх}^*}{2U_0} u_d = k_{п}^* u_{пх}^*; \quad u_{пу} = \frac{u_{пу}^*}{2U_0} u_d = k_{п}^* u_{пу}^*. \quad (2.24)$$

Из выражения (2.24) следует, что при компенсации внутренней обратной связи по выпрямленному напряжению u_d между компонентами вектора сетевого напряжения АВН $u_{пх}$ и $u_{пу}$ и управляющими воздействиями $u_{пх}^*$ и $u_{пу}^*$ существует

линейная зависимость, где параметр компенсирующей связи k_{π}^* равен коэффициенту передачи АВН k_{π} .

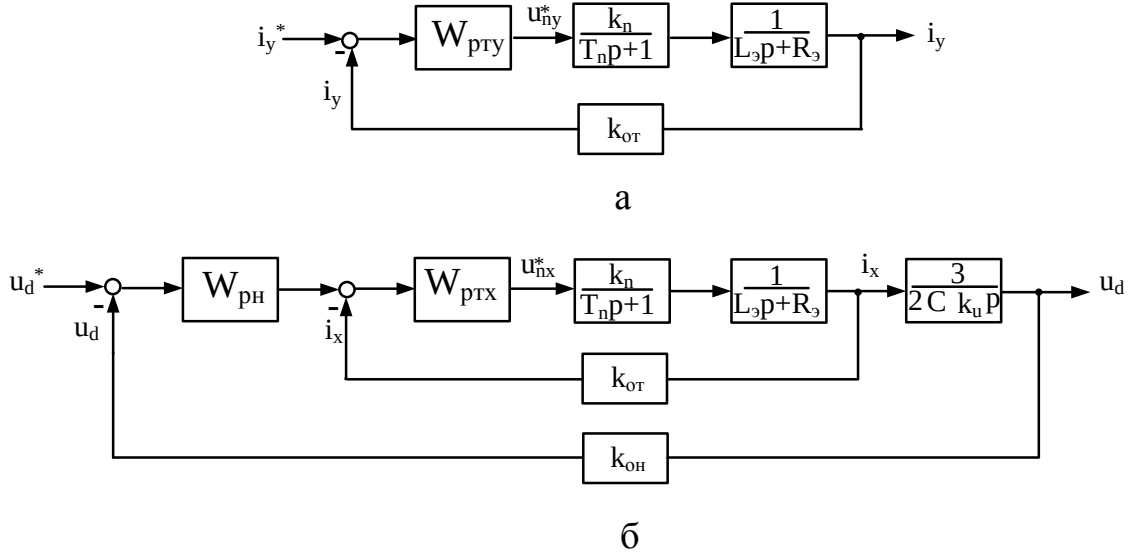


Рисунок 2.10 - Расчётные структурные схемы для определения передаточных функций регуляторов САУ АВН: регулятора реактивного тока i_y (а); регуляторов выпрямленного напряжения u_d и активного тока i_x (б)

На рисунке 2.10 представлены расчётные структурные схемы, полученные на основе структурной схемы рисунка 2.9, для определения передаточных функций регуляторов системы автоматического управления АВН [17].

Данные структурные схемы справедливы при компенсации влияния перекрёстных связей, внутренней обратной связи по выпрямленному напряжению u_d и возмущающего воздействия по напряжению сети U .

Коэффициенты передачи блоков компенсации перекрёстных связей равны $\omega_u L_3 / k_{\pi}$.

Передаточные функции регуляторов тока i_y и i_x являются ПИ-регуляторами тока [17]:

$$W_{pty} = k_{piy} + \frac{k_{iiy}}{p}; \quad (2.25)$$

$$W_{ptx} = k_{pix} + \frac{k_{iix}}{p}, \quad (2.26)$$

$$\text{где } k_{\text{пiy}} = k_{\text{пix}} = \frac{L_3}{k_{\text{п}} \cdot k_{\text{от}} \cdot a_{\text{т}} \cdot T_{\text{п}}};$$

$$k_{\text{иiy}} = k_{\text{иix}} = \frac{R_3}{k_{\text{п}} \cdot k_{\text{от}} \cdot a_{\text{т}} \cdot T_{\text{п}}};$$

$$k_{\text{п}} = k_{\text{п}}^* = \frac{u_{\text{д}}^*}{2 \cdot U_0} - \text{коэффициент передачи АВН};$$

$k_{\text{от}}$ - коэффициент обратной связи по току;

$u_{\text{д}}^*$ - заданное значение выходного напряжения выпрямителя;

U_0 - амплитуда несущего сигнала ШИМ;

$T_{\text{п}}$ - постоянная времени АВН, равна периоду модуляции [17];

$a_{\text{т}}$ - коэффициент настройки РТ.

Передаточная функция регулятора выпрямленного напряжения $u_{\text{д}}$ является ПИ-регулятором [17], что позволяет обеспечить постоянство выпрямленного напряжения, независимо от внешних воздействий:

$$W_{\text{рн}} = k_{\text{прн}} + \frac{k_{\text{ирн}}}{p}, \quad (2.27)$$

$$\text{где } k_{\text{прн}} = \frac{2 \cdot k_{\text{u}} \cdot C \cdot k_{\text{от}}}{3 \cdot k_{\text{он}} \cdot a_{\text{н}} \cdot a_{\text{т}} \cdot T_{\text{п}}};$$

$$k_{\text{прн}} = \frac{2 \cdot k_{\text{u}} \cdot C \cdot k_{\text{от}}}{3 \cdot k_{\text{он}} \cdot b_{\text{н}} \cdot a_{\text{н}}^2 \cdot a_{\text{т}}^2 \cdot T_{\text{п}}^2};$$

$$k_{\text{u}} = \frac{u_{\text{д}}^*}{U_{\text{ном}}};$$

$U_{\text{ном}}$ - номинальное значение амплитуды напряжения сети;

C - ёмкость конденсатора АВН на стороне постоянного тока;

$k_{\text{он}}$ - коэффициент обратной связи по выпрямленному напряжению $u_{\text{д}}$;

$a_{\text{н}}, b_{\text{н}}$ - коэффициенты настройки регулятора выпрямленного напряжения.

В приведённых формулах коэффициенты настройки $a_{\text{т}}, a_{\text{н}}, b_{\text{н}}$ выбираются в диапазоне от 2 до 4.

2.4. Схемы замещения линии электропередачи 6 кВ и синхронного генератора

Длина питающей линии 6 кВ на практике может достигать длины 9-10 км и более. Поэтому при наличии высокочастотных гармоник тока и напряжения, генерируемых АВН, схема замещения ЛЭП 6 кВ представляется в виде П-образной схемы замещения с сосредоточенными параметрами, учитывающей ёмкость линии (рисунок 2.14) [10].

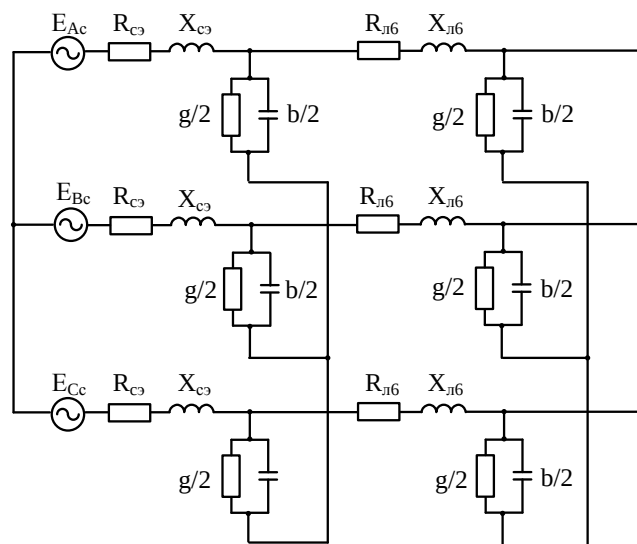


Рисунок 2.14 - Схема замещения линии 6 кВ с учётом ёмкости линии

На схеме приняты следующие обозначения:

$R_{л6} = r_0 \cdot L$; $X_{л6} = x_0 \cdot L$; $g = g_0 \cdot L$; $b = b_0 \cdot L$, где r_0 – продольное активное сопротивление единицы длины линии; x_0 – продольное индуктивное сопротивление единицы длины линии; $x_0 = \omega \cdot L_0$; L_0 – индуктивность единицы длины линии; g_0 – поперечная активная проводимость единицы длины линии; b_0 – поперечная ёмкостная проводимость единицы длины линии; $b_0 = \omega \cdot C_0$; C_0 – ёмкость единицы длины линии; L – длина питающей линии 6 кВ.

Схема содержит также элементы: E_{Ac} , E_{Bc} , E_{Cc} – синусоидальные ЭДС трёхфазной системы электроснабжения, которые считаются источниками бесконечной мощности; R_{c3} , X_{c3} – эквивалентные сопротивления, которые учитывают активное

и индуктивное сопротивления элементов системы электроснабжения от ЦПП 110/35/6 кВ до линии электропередачи 6кВ.

В работах [21, 96] показано, что при питании от СГ полупроводниковых выпрямителей схема замещения одного СГ представляет собой источник синусоидальной «неискажённой» ЭДС E'' и последовательно включенного с ним эквивалентного индуктивного сопротивления $X_{сг}$:

$$X_{сг} = \frac{x_d'' + \sqrt{x_d'' x_q''}}{2}, \quad (2.28)$$

где x_d'' и x_q'' – сверхпереходные сопротивления СГ по продольной и поперечной осям.

Использование предлагаемой схемы замещения СГ позволяет упростить компьютерную модель ЭТК БУ с ЧРЭП при питании от автономных синхронных генераторов и сократить время решения уравнений.

Для поддержания на шинах генератора заданного значения напряжения в компьютерной модели используется регулятор напряжения, который воздействует на величину «неискажённой» ЭДС таким образом, чтобы отклонение напряжения на шинах генератора не превышало нормативных значений.

2.5. Компьютерная модель ЭТК БУ с частотно-регулируемым электроприводом и неуправляемым выпрямителем

Задача анализа влияния на качество электроэнергии ЧРЭП БУ решается при помощи пакета MatLab, который содержит систему визуального моделирования Simulink и пакет расширения SimPower Systems.

В основу разработанной компьютерной модели [78, 79, 84, 86] положены типовые схемы электрооборудования БУ с ЧРЭП, которые показаны на рисунках 2.1 и 2.2.

Разработанная компьютерная модель в виде блок–диаграммы представлена на рисунке 2.15.

В состав компьютерной модели входят следующие элементы и подсистемы: подсистема line_6_kV or SG; блоки RLC Load, RLC Load1, RLC Load2 (схема замещения дополнительной электрической нагрузки ЭТК БУ); блок T1 (модель трёхобмоточного трёхфазного трансформатора; блоки Universal Bridge1 и Universal Bridge2 (неуправляемый выпрямитель в составе ПЧ); блоки F1a, F1b, F1c, F2a, F2b, F2c (индуктивность, ёмкость и резистор одной фазы ступени ФКУ); блоки Lr1, Lr2, Lr3, Lr4, Lr5, Lr6 (сетевые реакторы выпрямителей); блок C (конденсатор C в звене постоянного тока ПЧ); блоки Inverter, Inverter 1 (инверторы в составе ПЧ); блоки Discrete PWM Generator и Discrete PWM Generator1, используемые для реализации ШИМ на несущей частоте с синусоидальным модулирующим сигналом; подсистемы SAR of electrical drive1 и SAR of electrical drive2 (CAP электроприводов); блоки Psi2* Psi2*1 (блоки задания потокосцепления ротора); блоки w^* и w^*1 (блоки задания угловой скорости электродвигателей); блоки Asynchronous Machine1 и Asynchronous Machine2 (асинхронные электродвигатели); блоки Step1 и Step2 (блоки задания момента нагрузки на валу асинхронного электродвигателя); блоки Voltage Measurement1 и Voltage Measurement2 (блоки измерения напряжения инвертора); блоки Machines Measurement Demux и Machines Measurement Demux1 (блоки измерения фазных токов статора, скорости и момента электродвигателя); блоки Scope1 и Scope2 (осциллографы для наблюдения временных зависимостей).

Блок-диаграмма подсистемы SAR of electrical drive (рисунок 2.18) построена в соответствии с функциональной схемой CAP АД приведённой на рисунке 2.5.

Подсистема SAR of electrical drive содержит следующие элементы: блок w^* - задание угловой скорости электродвигателя; блок Speed controller моделирует РС; блок Psi2* задаёт требуемое значение потокосцепления ψ_2 . Блок i_x^* Calculation моделирует блок вычисления БВ сигнала задания i_{1x}^* составляющей тока статора по оси x; блоки Fcn и Product моделируют блок деления БД сигнала задания электромагнитного момента на сигнал, пропорциональный ψ_2 ; блок i_y controller моделирует регулятор тока РТ_y; блок i_x controller моделирует регулятор тока РТ_x; блок

Flux Calculation моделирует блок БВ ψ_2 , в котором формируется выходной сигнал, пропорциональный реальному значению потокосцепления ротора; блок Phi0 Calculation моделирует блок вычисления БВ $\phi_{0эл}$ угла $\phi_{0эл}$; блок ABC-XY моделирует блок координатных преобразований КП ABC-XY; блок XY-ABC моделирует блок координатных преобразований КП XY-ABC.

Дополнительная электрическая нагрузка ЭТК БУ представлена в виде схемы замещения, которая содержит следующие блоки: RLC Load, RLC Load1, RLC Load2. В данных блоках задаются активная и реактивная мощности дополнительной электрической нагрузки ЭТК БУ.

Подсистема line_6_kV or SG содержит блоки для моделирования ЛЭП 6 кВ и автономных СГ. Модель ЛЭП 6 кВ составлена в соответствии со схемой замещения линии 6 кВ (рис. 2.14) и содержит следующие элементы: источник синусоидальной ЭДС системы электроснабжения, который считается источником бесконечной мощности; эквивалентные сопротивления, которые учитывают активное и индуктивное сопротивления элементов системы электроснабжения от ЦПП 110/35/6 кВ до линии электропередачи 6кВ; блоки, моделирующие индуктивность и активное сопротивление линии 6 кВ; активные проводимости воздушной линии 6 кВ; реактивные проводимости воздушной линии 6 кВ.

Модель СГ представляет собой источник синусоидальной «неискажённой» ЭДС E'' и последовательно включенного с ним эквивалентного индуктивного сопротивления $X_{сг}$. В модели используется регулятор напряжения, который воздействует на величину «неискажённой» ЭДС с целью поддержания заданного значения напряжения на шинах генератора.

В зависимости от варианта электроснабжения ЭТК БУ в разработанной компьютерной модели включается либо блок для моделирования ЛЭП 6 кВ, либо блок, моделирующий работу автономных СГ.

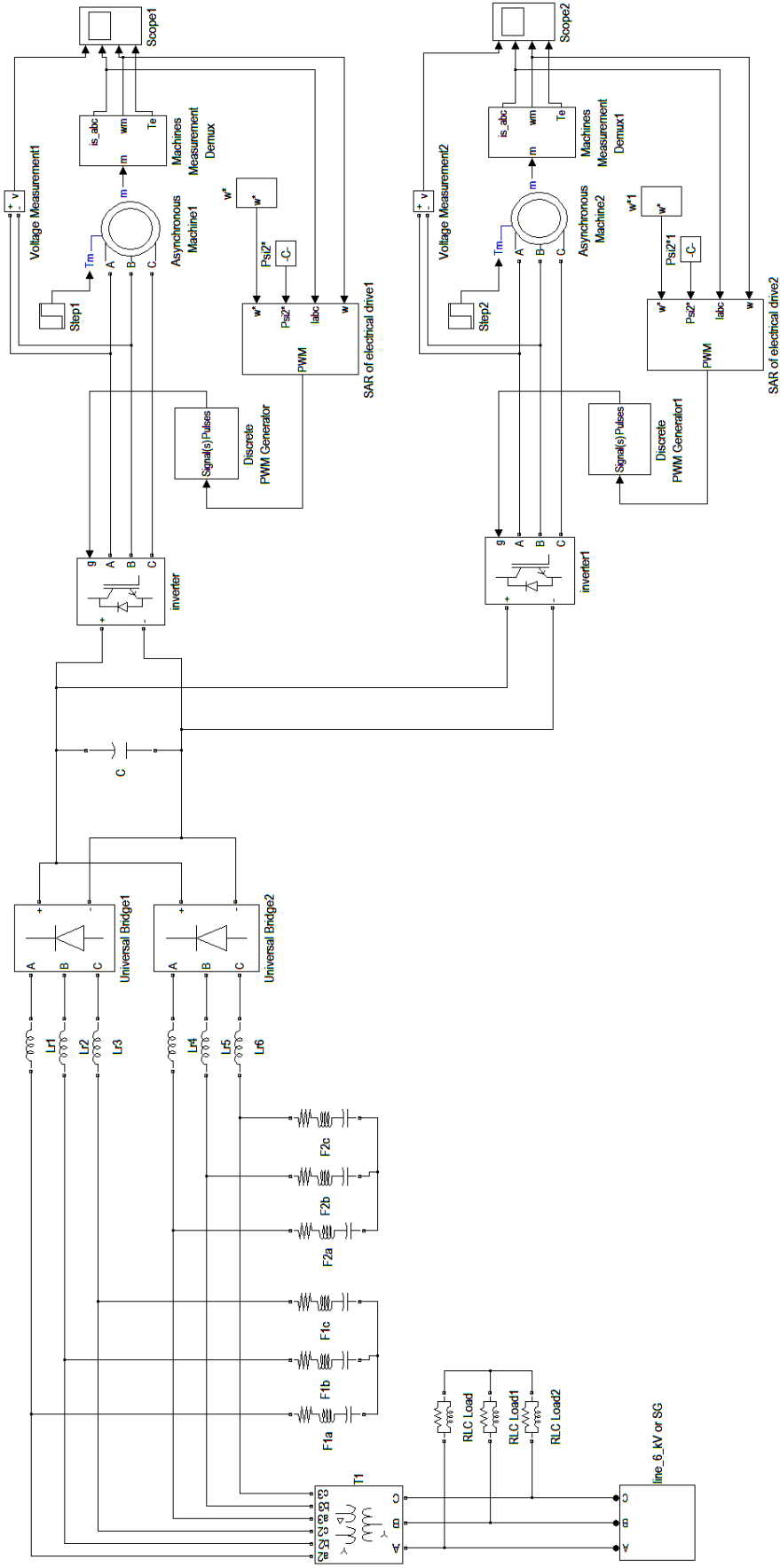


Рисунок 2.15 - Блок-диаграмма ЭТК БУ с ЧРЭП и неуправляемым выпрямителем при питании от

линии электропередачи 6 кВ

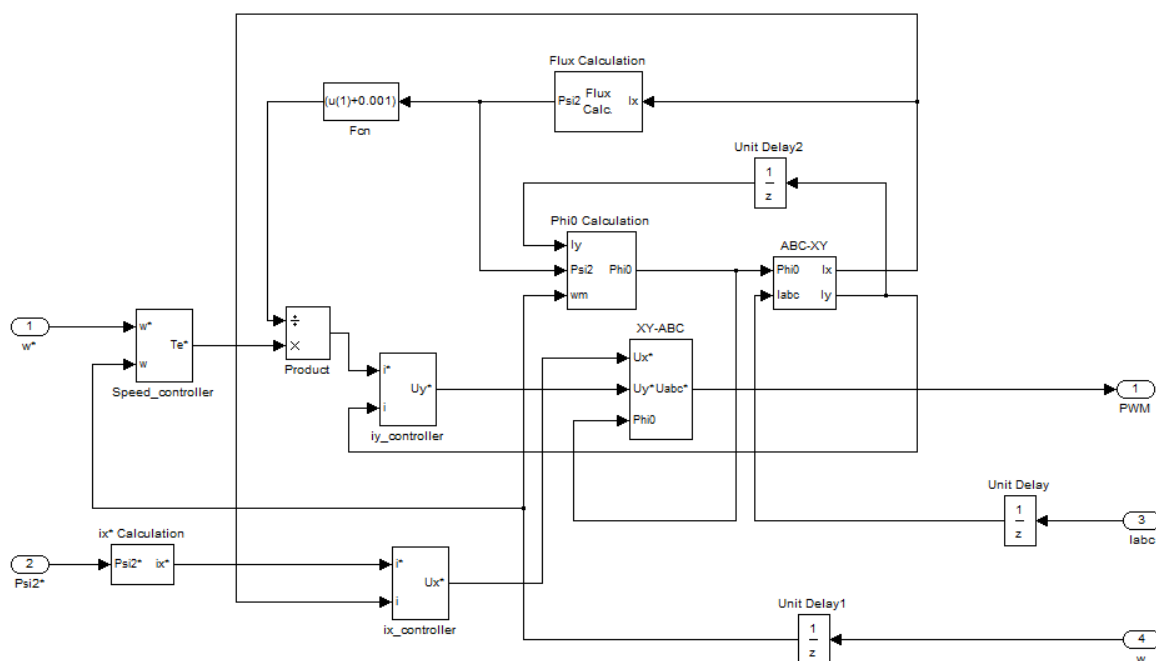


Рисунок 2.16 - Блок-диаграмма подсистем SAR of electrical drive
(САР электроприводов БУ)

Компьютерная модель ЭТК БУ с ЧРЭП и неуправляемым выпрямителем позволяет оценить влияние ЧРЭП на питающую сеть, определить реальные токи и напряжения АД при его питании от ПЧ с ШИМ, обосновать выбор ФКУ.

2.6. Компьютерная модель ЭТК буровой установки с частотно-регулируемым электроприводом и активным выпрямителем напряжения

В основу разработанной компьютерной модели [80] положены типовые схемы электрооборудования БУ с ЧРЭП и АВН, которые показаны на рисунках 2.3 и 2.4.

Разработанная компьютерная модель в виде блок–диаграммы представлена на рисунке 2.17 [80].

Рассматриваемая компьютерная модель (рисунок 2.17) отличается от модели с неуправляемым выпрямителем (рисунок 2.15) включением вместо блоков, моделирующих неуправляемый выпрямитель, подсистемы, моделирующей активный выпрямитель. Вместо ФКУ, включён фильтр АВН. Все остальные элемен-

ты и подсистемы аналогичны рассмотренным ранее в разделе 2.5.

В состав компьютерной модели рисунка 2.17 входят следующие элементы и подсистемы: подсистема line_6_kV or SG; блоки RLC Load, RLC Load 1, RLC Load2; блоки фильтровых конденсаторов C1, C2, C3; блоки сетевых (буферных) реакторов Lr2, Lr4, Lr6; блок AFE (ABH); Voltage Measurement3 (блок измерения напряжения на вторичной обмотке трансформатора); Fourier2 (блок преобразования Фурье, необходимый для выделения 1-ой гармоники напряжения); Current Measurement1- Current Measurement3 (блоки измерения токов вторичных обмоток трансформатора); блок SAR of AFE (схема управления ABH); блок Discrete PWM Generator включённый на выходе блока SAR of AFE, используемый для реализации ШИМ на несущей частоте с синусоидальным модулирующим сигналом.

На вход подсистемы SAR of AFE подаются сигналы задания выходного напряжения выпрямителя U_d^* и реактивного тока i_y^* ABH; амплитудное значение 1-ой гармоники линейного напряжения U_x ; значения фазных токов ABH i_a , i_b , i_c ; значение выпрямленного напряжения U_d .

Блок–диаграмма подсистемы SAR of AFE (рисунок 2.18) построена в соответствии со структурной схемой CAP ABH, приведённой на рисунке 2.9. При этом частота сети принята постоянной.

Подсистема SAR of AFE содержит следующие элементы: блок Ud_controller (ПИ-регулятор выпрямленного напряжения U_d); abc_xy0 – блок преобразования координат из трёхфазной в синхронную систему координат; блок xy_abc1 – блок преобразования координат из синхронной системы координат в трёхфазную систему координат; блок i_y controller (моделирует ПИ-регулятор реактивного тока i_y); блок i_x controller моделирует ПИ-регулятор активного тока i_x ; i_x^* - сигнал задания активного тока; i_y^* - сигнал задания реактивного тока; блоки Lx1 и Ly предназначены для компенсации перекрёстных связей; сигнал U_x служит для компенсации влияния изменения величины напряжения сети.

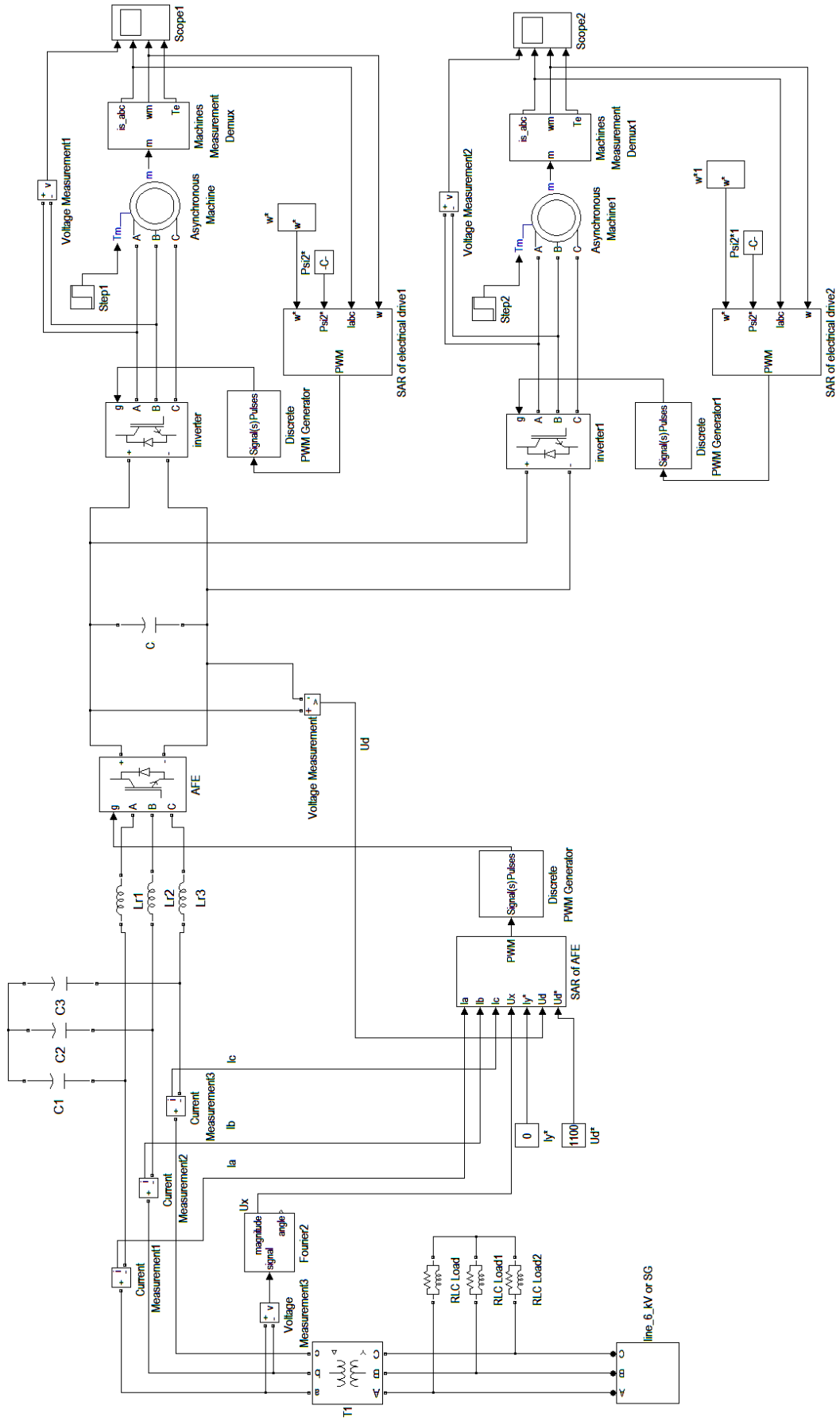


Рисунок 2.17 - Блок-диаграмма ЭТК БУ с ЧРЭП и АВН

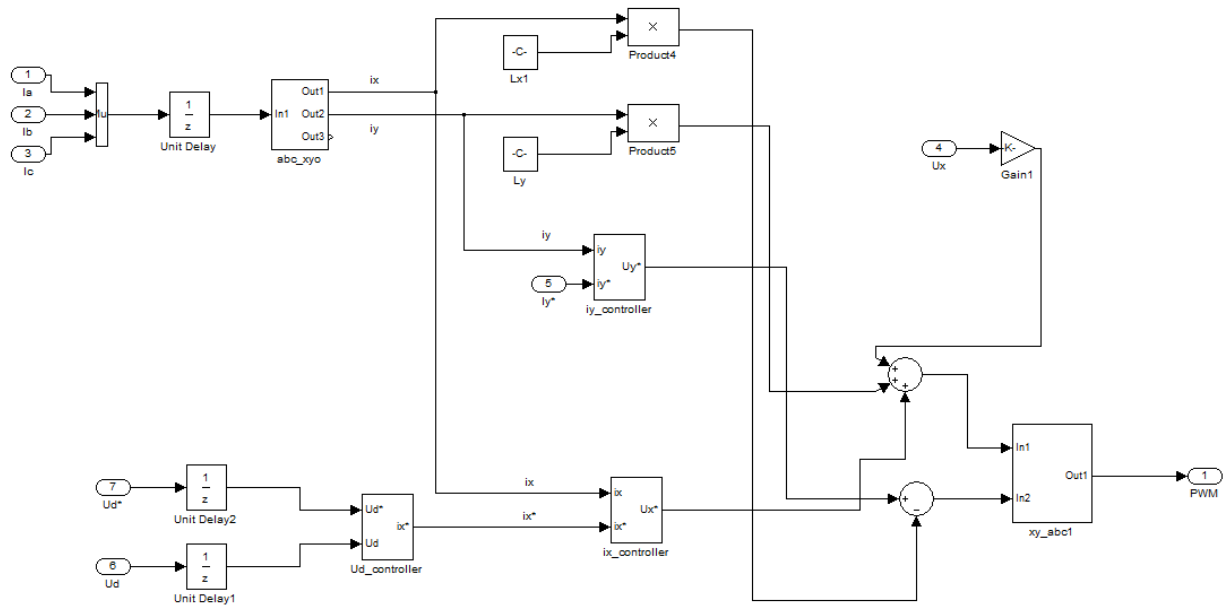


Рисунок 2.18 - Блок-диаграмма подсистемы SAR of AFE (схема управления АВН)

В разработанной компьютерной модели для фильтрации высших гармоник, генерируемых АВН в сеть переменного тока, применяется низкочастотный однозвенный Г-образный фильтр [77], который включает в себя блоки фильтровых конденсаторов C1, C1, C3 и блоки сетевых реакторов Lr1, Lr2, Lr3.

2.7. Измерение токов, напряжений и расчёт коэффициента мощности, отклонения напряжения и суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

Для измерения токов и напряжений, построения графиков служат специальные измерительные блоки. Пример подключения измерительных блоков на стороне 6 кВ преобразовательного трансформатора показан на рисунок 2.19.

Блоки Skope осуществляют отображение информации об измеряемых величинах. Для подачи на их входы измеряемых напряжений и токов служат специальные блоки Voltage Measurement и Current Measurement. Блок Voltage Measurement подключается к точкам, между которыми необходимо измерить напряжение, а блок Current Measurement включается последовательно в цепь по которой протекает измеряемый ток.

Блок Active & ReactivePower служит для измерения активной и реактивной мощностей на стороне 6 кВ преобразовательного трансформатора.

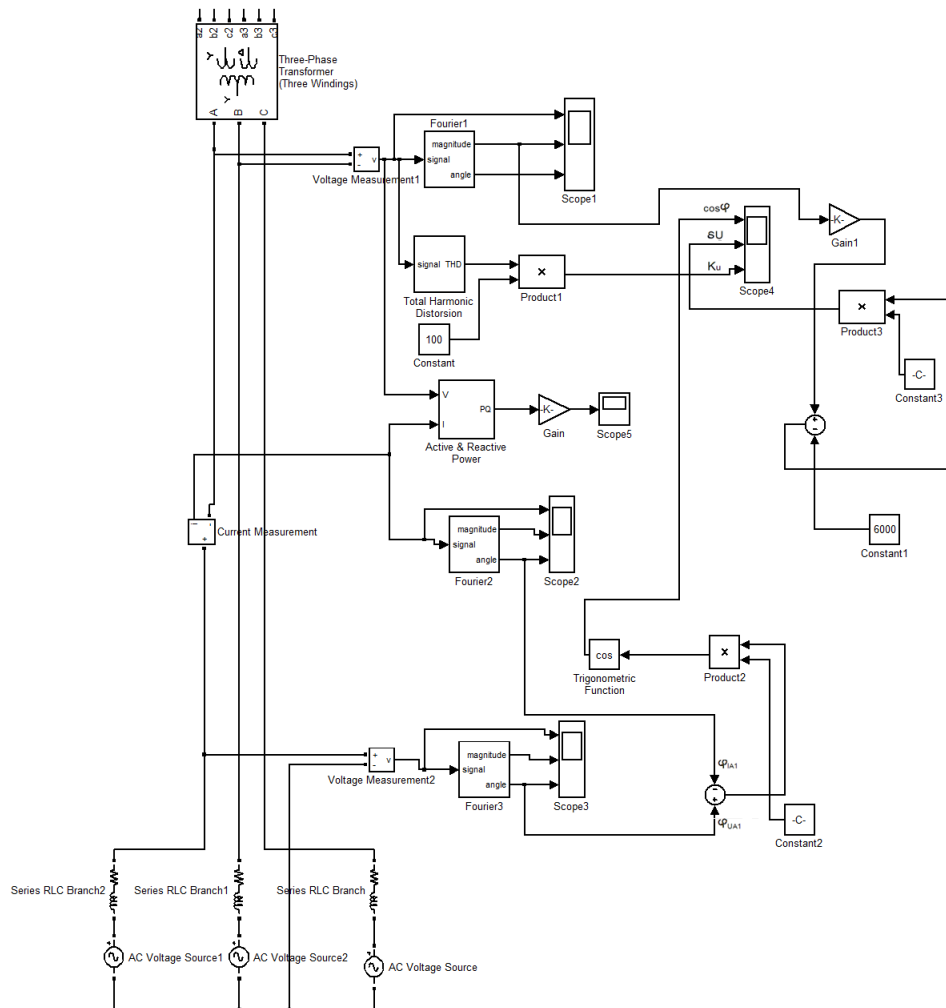


Рисунок 2.19 - Пример подключения измерительных блоков на стороне 6 кВ

Блоки Fourier служат для определения амплитуды и угла первых гармоник напряжения и тока на стороне линии электропередачи.

Блок Total Harmonic Distorsion вычисляет суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U на вводе БУ.

Блок Skope 4 служит для построения графиков коэффициента мощности $\cos\varphi$, отклонения напряжения δU от номинального и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U на вводе 6 кВ БУ.

Коэффициент мощности K_M на схеме рисунка 2.22 вычисляется по формуле:

$$K_m = \cos \varphi,$$

где $\varphi = \varphi_{U1} - \varphi_{I1}$, φ_{U1} – фаза первой гармоники напряжения, φ_{I1} – фаза первой гармоники тока.

Значение δU вычисляется согласно ГОСТ 32144-2013

2.8. Сравнение результатов экспериментальных исследований с расчётами на компьютерной модели

С целью проверки адекватности разработанной модели исследуемому объекту в данном разделе выполнено сравнение результатов измерений ПКЭ, выполненных сотрудниками ООО «Электротехническая промышленная компания», с расчётами на компьютерной модели

Объектом исследования являлись установки центробежных электронасосов (УЦЭН) с ЧРЭП, которые применяются для добычи нефти. Анализ результатов исследований показал, что ПЧ значительно искажают форму напряжения в нефтепромысловых электрических сетях [72].

Питание кустов скважин осуществляется по двухцепной воздушной линии 35 кВ. На кустовых площадках установлены понижающие подстанции ПС 35/6 кВ, от которых по линиям 6 кВ получают питание комплектные трансформаторные подстанции КТП-6/0,4 кВ. От шин 0,4 кВ КТП-6/0,4 кВ осуществляется распределение электрической энергии непосредственно к УЦЭН с ЧРЭП.

ПКЭ измерялись на вводах РУ-6 кВ кустовых подстанций ПС 35/6 кВ и на вводах РУ-0,4 кВ КТПН-6/0,4 кВ, а также на отходящих линиях 0,4кВ РУНН КТПН-6/0,4кВ, питающих отдельные УЭЦН.

Измерительное устройство измеряет напряжение, ток, реактивную мощность, активную мощность, коэффициент мощности, высшие гармоники тока и напряжения.

В данном разделе приведены результаты экспериментальных измерений ПКЭ на вводах РУ-6 кВ кустовых подстанций ПС 35/6 кВ, которые были проведены на трёх кустах добывающих скважин [72].

На рисунке 2.20 приведена расчётная схема, которая была положена в основу компьютерной модели для проверки адекватности модели, в основу которой положена система компьютерного моделирования Simulink и пакет расширения SimPower Systems. Данная компьютерная модель получена на основе компьютерной модели, представленной на рисунке 2.15 и отличается от неё применением двухобмоточных трансформаторов 35/6 кВ и 6/0,4 кВ и 6-пульсных неуправляемых выпрямителей в составе ПЧ. Напряжение источника питания равно 35 кВ. На стороне 0,4 кВ трансформатора Т2 подключаются параллельно работающие ПЧ.

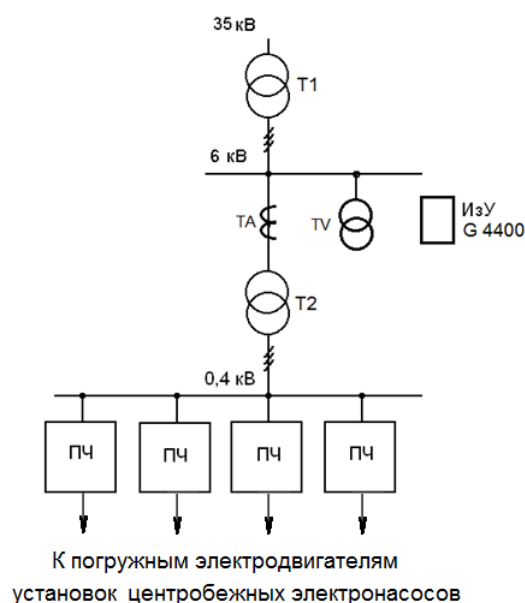


Рисунок 2.20 - Расчётная схема для проверки адекватности модели
исследуемому объекту

На расчётной схеме показано также подключение измерительного устройства с помощью которого осуществлялись экспериментальные исследования. Измерительное устройство (ИзУ) подключено к измерительным трансформаторам тока ТА и напряжения TV. ИзУ измеряет и хранит в запоминающем устройстве

измеренные значения напряжений, токов, реактивных и активных мощностей, коэффициента мощности, высших гармоник тока и напряжения.

Тип измерительного устройства – цифровой измеритель ПКЭ G 4400 компании «ELSPEK» (Израиль).

Активная мощность, потребляемая ПЧ, подбиралась такой, чтобы при расчёте ПКЭ на модели, значение активной мощности P на шинах 6 кВ устанавливалось равным значению, измеренному экспериментально.

В таблице 2.1 приведены результаты экспериментальных исследований и исследований на компьютерной модели. Приняты следующие обозначения: $U_{\text{л}}$ – линейное напряжение на шинах 6 кВ; $I_{\text{ф}}$ – фазный ток на вводе 6 кВ трансформатора Т2; K_U – суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения на шинах 6 кВ; P – активная мощность на вводе 6 кВ трансформатора Т2; $\cos\varphi$ – коэффициент мощности на вводе 6 кВ трансформатора Т2.

Таблица 2.1 - Сравнение экспериментальных данных и результатов расчётов на модели

№ куста	$U_{\text{л}}$, кВ			$I_{\text{ф}}$, А			K_U , %			$\cos\varphi$			P , кВт		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Эксперимент	6,28	6,2	6,12	63	81	82	5,9	6,4	6,7	0,975	0,954	0,92	662	850	800
Модель	6,17	6,16	6,23	68	84	76,3	6,4	6,6	6,4	0,988	0,982	0,99	662	850	800
δ , %	1,8	0,65	1,8	7,9	3,6	7,0	8,5	3,1	4,5	1,3	2,9	7,6	0	0	0

Сравнение результатов расчётов на модели и экспериментальных данных, приведённых в таблице 2.1, показывает, что результаты расчёта $U_{\text{л}}$, $I_{\text{ф}}$, K_U , P , $\cos\varphi$ не существенно отличаются от экспериментальных значений. Относительная погрешность расчёта δ не превышает 10%.

На рисунках 2.21 и 2.22 показаны экспериментально полученные сотрудниками ООО «Электротехническая промышленная компания» графики линейного напряжения на шинах 6 кВ и фазный ток на вводе 6 кВ трансформатора Т2.

Из графиков видно, что формы напряжений и токов на стороне 6 кВ существенно искажены.

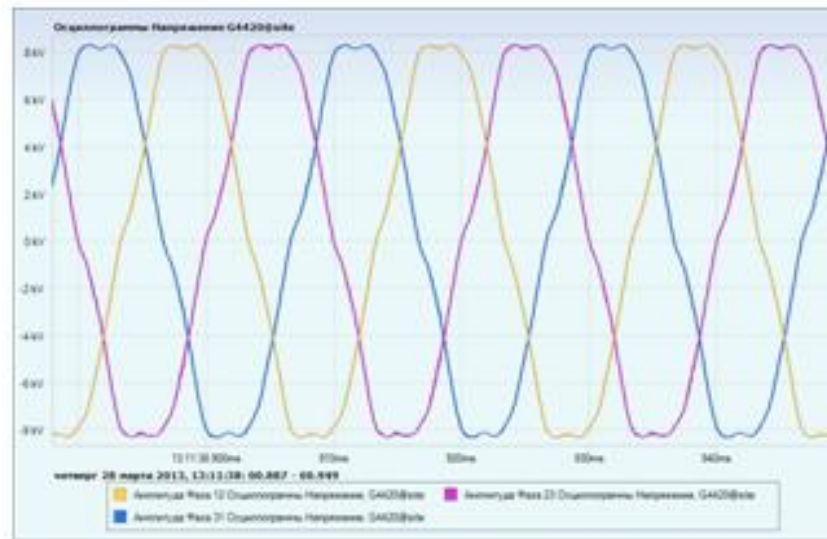


Рисунок 2.21 - График линейного напряжения на шинах 6 кВ

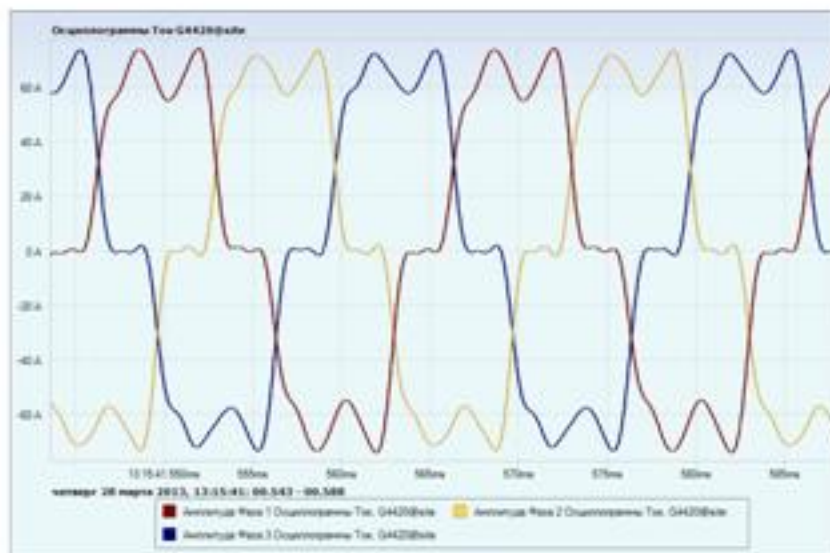


Рисунок 2.22 - График фазного тока на вводе 6 кВ трансформатора Т2

На рисунке 2.23 показаны графики линейного напряжения и фазного тока во времени на стороне 6 кВ, полученные на модели.

Сравнение форм линейного напряжения и фазного тока, полученных на модели (рисунок 2.23) и экспериментально (рисунки 2.21 и 2.22), показывает, что

формы линейного напряжения и тока, полученные на модели, совпадают с формами напряжения и тока, полученными экспериментально.

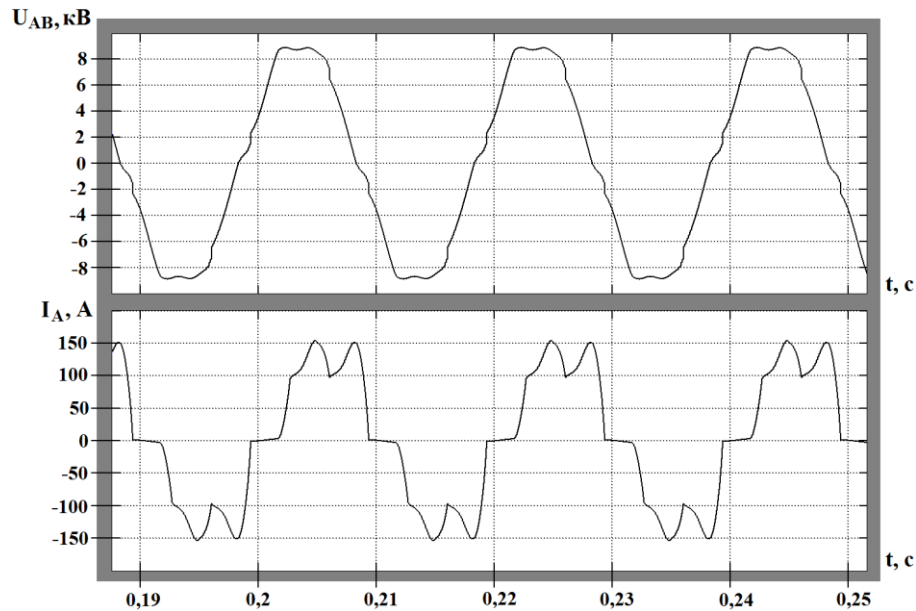


Рисунок 2.23 - Графики линейного напряжения и фазного тока во времени на стороне 6 кВ, полученные на компьютерной модели

Анализ таблицы 2.1 и сравнение графиков, приведённых на рисунках 2.21 – 2.23 позволяет сделать вывод, что разработанные модели, в основу которых положены система компьютерного моделирования Simulink и пакет расширения SimPower Systems, достаточно точно отражают реальные процессы в системах с ЧРЭП и могут быть использованы для определения ПКЭ.

Выводы

1. На основании расчётных схем ЭТК БУ с ЧРЭП разработаны компьютерные модели ЭТК БУ с ЧРЭП, учитывающие структуру и свойства ФКУ, ПЧ, АВН, системы электроснабжения. Схема замещения линии электропередачи 6 кВ представлена в виде П-образной схемы замещения, учитывающей ёмкость линии. Схема замещения СГ представляет собой источник синусоидальной «неискажённой» ЭДС и последовательно включённого с ним эквивалентного индуктивного

сопротивления.

2. Разработанные компьютерные модели позволяют рассчитать ПКЭ в установившихся и переходных режимах работы электроприводов и осуществить обоснованный выбор ФКУ или АВН в составе ПЧ на этапе проектирования ЭТК БУ с ЧРЭП.

3. Математические модели, реализованные в системе компьютерного моделирования Simulink с помощью пакета расширения SimPower Systems достоверно отражают реальные процессы в системах с ЧРЭП, что подтверждается сравнением результатов компьютерного моделирования с данными экспериментальных исследований на объектах, расхождение между которыми не превышает 10 %.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФИЛЬТРО-КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ НА СИСТЕМУ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ БУРОВЫХ УСТАНОВОК С ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

3.1. Нагрузки и типовые режимы работы электроприводов главных буровых механизмов

Нагрузки электроприводов главных буровых механизмов рассматриваемого ЭТК БУ характеризуются следующим [7].

Электропривод бурового насоса. Мощность 950...1180 кВт. Режим работы – длительный, однозонное регулирование с постоянством момента в первой зоне.

Электропривод ротора. Мощность 800 кВт. Режим работы – длительный, двухзонное регулирование с постоянством момента.

Электропривод буровой лебедки. Мощность 900...1500 кВт. (1500 кВт – для односкоростной двухдвигательной лебедки). Режим работы – повторно-кратковременный, двухзонное регулирование с постоянством момента в первой зоне (до 1000 об/мин), с постоянством мощности во второй зоне (1000...1800 об/мин).

В процессе проходки скважины возможны различные режимы работы БУ. Причиной этого являются изменяющиеся геолого-технические условия бурения скважин и многообразие технологических операций при строительстве буровой скважины. С целью сокращения числа анализируемых вариантов, необходимо выделить небольшое количество типовых режимов, которые характеризуются максимальным энергопотреблением и поэтому имеют наибольшее влияние на электрическую сеть. Если ПКЭ в выбранных режимах работы не будут превышать нормативных значений, то это будет выполняться для остальных режимов, которые характеризуются значительно меньшим влиянием на сеть.

Все режимы работы БУ делят на три группы: длительные режимы, повторно-кратковременные режимы, кратковременные режимы [90].

К длительным режимам относятся турбинное бурение двумя насосами, турбинное бурение одним насосом, роторное бурение при работе одного насоса.

К повторно-кратковременному режиму относятся спуско-подъёмные операции, когда работает электропривод лебёдки. Повторно-кратковременный режим делят на три подрежима: пуск, установившийся режим работы электропривода лебёдки, торможение.

К кратковременным режимам относятся приподъём при турбинном бурении и прихват. В этих режимах электропривод лебёдки работает 10–15 с. Затем делается пауза. Во время паузы продолжают работать насосы.

На основании имеющегося опыта проектирования и эксплуатации ЭТК БУ установлено, что наибольшей активной мощностью характеризуется длительный режим турбинного бурения двумя насосами [64, 92, 94]. Поэтому все расчёты ПКЭ и реактивной мощности выполняются для наиболее тяжёлого режима по активной мощности: турбинного бурения двумя насосами.

Для исследуемого ЭТК БУ мощность потребляемая одним насосом принята равной 950 кВт (0,8 от номинальной мощности), угловая скорость асинхронного электропривода 100 рад/с (0,95 от номинальной скорости), момент на валу электродвигателя в этом случае равен 9,5 кНм (0,83 от номинального момента).

Кроме электроприводов основных механизмов в состав ЭТК БУ входит дополнительная электрическая нагрузка: асинхронные электродвигатели, нагревательные установки, освещение. По данным эксплуатации принято, что активная мощность дополнительной электрической нагрузки ЭТК БУ равна 300 кВт, коэффициент мощности 0,7.

3.2. Выбор параметров «ненастроенного» ФКУ со ступенчатым регулированием реактивной мощности

Определим величину реактивной мощности на вводе ЭТК БУ для выбранного режима работы БУ. Примем, что в режиме турбинного бурения коэффициент мощности преобразователей частоты равен 0,95. В этом случае реактивная мощ-

ность одного преобразователя равна 312 квар. Реактивная мощность дополнительной электрической нагрузки ЭТК БУ при коэффициенте мощности 0,7 равна 306 квар. Общая реактивная мощность при работе двух электроприводов буровых насосов равна 930 квар. Следовательно, реактивная мощность ФКУ должна быть приблизительно равна 1000 квар.

Выбираем параметры ФКУ в соответствии с рекомендациями, приведёнными в [64]. Принимаем, что ФКУ содержит четыре ступени (Ф1–Ф4) (рисунок 2.1), реактивная мощность каждой ступени при линейном напряжении на общих шинах 660 В составляет 260 квар. Общая реактивная мощность ФКУ равна 1040 квар.

Принимаем, что в каждой ступени конденсаторы соединены в «звезду». В этом случае реактивная мощность одной ступени ФКУ $Q_{ст}$ связана с ёмкостью одной фазы C_{ϕ} и линейным напряжением U соотношением $Q_{ст} = C_{\phi} \cdot U^2$ [13]. При $U=660$ В ёмкость конденсаторов в одной фазе равна 1900 мкФ.

Определим значения индуктивности фильтрового реактора L_{ϕ} .

Чтобы исключить возникновение опасных резонансных режимов, необходима настройка ступени «ненастроенного» ФКУ на фильтрацию гармоник, номер которой ниже номера канонической гармоники (для 6-пульсной схемы $K_{рез\ мин}=5$, для 12-пульсной $K_{рез\ мин} = 11$).

Из условия последовательного резонанса напряжения следует, что номер фильтруемой высшей гармоники равен [13]:

$$K_{рез} = \frac{1}{\omega_0 \sqrt{L_{\phi} \cdot C_{\phi}}}, \quad (3.1)$$

где $\omega_0 = 314$ рад/с – круговая частота сети.

Выбираем значения $K_{рез}$, равные 3,78, 4,2 и 4,7.

Определим индуктивности фильтрового реактора L_{ϕ} для данных значений $K_{рез}$. Воспользовавшись (3.1), найдём, что для $K_{рез}$, равных 3,78, 4,2 и 4,7, индуктивности фильтрового реактора L_{ϕ} равны соответственно 0,37 мГн, 0,30 мГн и 0,24 мГн

Для проверки правильности выбора параметров ФКУ выполним расчёты ПКЭ для выбранного режима работы электроприводов главных буровых механизмов.

3.3. Влияние ФКУ на качество электроэнергии при питании БУ с ЧРЭП от линии электропередачи

В данном разделе исследуется применение простейших фильтрокомпенсирующих устройств ступенчатого типа (ФКУ-С) с «ненастроенными» фильтрами в составе ЭТК БУ с целью получения нормативных ПКЭ при питании от местных линий электропередач.

Исследование ПКЭ и обоснование выбора ФКУ рассматриваются на примере электропривода буровой установки БУ-4200/250.

Схеме электрооборудования буровой установки БУ-4200/250 при питании от местной линии электропередачи соответствует расчётная схема, показанная на рисунке 2.1. Для рассматриваемого случая она имеет следующие особенности:

- электроснабжение БУ осуществляется от воздушной линии электропередачи напряжением 6 кВ;
- линия выполнена проводом А-95;
- электроэнергия, получаемая от вторичных обмоток трансформатора (Т), при помощи мостовых трёхфазных неуправляемых выпрямителей (В) преобразуется в энергию постоянного тока с номинальным напряжением 900 В;
- от общих шин постоянного тока питаются инверторы напряжения (И), от которых получают питание электродвигатели насосов, лебёдки и ротора;
- номинальная мощность электродвигателей насосов (МН1 и МН2), лебёдки (МЛ) и электродвигателя ротора (МР) одинакова и равна 1200 кВт при номинальном напряжении переменного тока 690 В;
- используется ФКУ-С, ступени которого (Ф1, Ф2, Ф3, Ф4) с помощью контакторов (или трехфазных тиристорных ключей) подключаются к вторичным обмоткам трансформатора (Т);

– работают также вспомогательные электропотребители, питаемые через трансформатор Т2.

Компьютерная модель для рассматриваемой схемы электрооборудования представлена на рисунке 2.15.

Созданная компьютерная модель позволяет выполнить расчёты следующих величин:

- отклонение напряжения δU от номинального на вводе питания 6 кВ в БУ;
- суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U на вводе питания 6 кВ в БУ;
- реактивная мощность Q на вводе питания 6 кВ в БУ;
- коэффициент мощности системы $\cos \varphi$ на вводе питания 6 кВ в БУ.

В настоящее время актуальной является задача обеспечения работоспособности БУ с питанием от существующих маломощных линий 6 кВ [27]. Поэтому все расчёты приведены в виде зависимости от длины линии L с заданным сечением. Такая форма представления зависимостей позволяет обосновать выбор ФКУ-С с «ненастроенными» фильтрами [64, 92, 94]. При выполнении расчётов принято, что скорость и момент нагрузки электропривода при изменении длины линии не изменяются.

Принято, что напряжение на выходе питающей подстанции равно 6,3 кВ, что на 5 % больше номинального. Это сделано с целью обеспечения работы БУ при увеличении длины питающей линии.

На вводе БУ допускается отклонение напряжения δU от номинального в пределах от минус 10 до плюс 10 %.

При питании от линии 6 кВ целью управления ФКУ является поддержание заданного уровня напряжения на вводе БУ. Кроме этого необходимо обеспечение допустимого уровня высших гармоник напряжения сети [4].

Предварительно принято, что ФКУ содержит четыре ступени (Ф1-Ф4) (рисунок 2.12). Реактивная мощность одной ступени равна 260 квар.

Принимается следующий алгоритм управления ФКУ-С: с увеличением дли-

ны линии каждая последующая ступень ФКУ включается после снижения напряжения на 10 % по сравнению с номинальной величиной.

С целью изучения влияния настройки ФКУ на коэффициент K_U исследованы варианты настройки фильтров ФКУ на следующие относительные резонансные частоты $K_{рез}$: 3,78; 4,2; 4,7.

На рисунках 3.1–3.4 приведены результаты расчётов отклонения напряжения, суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, реактивной мощности и коэффициента мощности на вводе БУ 6 кВ в зависимости от длины питающей линии 6 кВ [78, 79, 82, 83].

На основании анализа полученных зависимостей могут быть сделаны следующие выводы.

Отклонение напряжения с увеличением длины линии при отсутствии ФКУ возрастает и при длине линии 5 км достигает допустимого значения минус 10%. Включение по одной ступени ФКУ на каждой вторичной обмотке трансформатора Т приводит к уменьшению δU примерно до минус 5 %. С увеличением длины линии до 7 км δU достигает допустимого значения минус 10 %. Включение второй ступени ФКУ на каждой вторичной обмотке трансформатора Т приводит к уменьшению δU примерно до минус 4 %. С увеличением длины линии более 9 км δU достигает допустимого значения минус 10 %. Настройка фильтров практически не влияет на величину δU с увеличением длины линии.

Коэффициент K_U с увеличением длины линии при отсутствии ФКУ возрастает и при длине линии 5 км достигает значения 8 %. Включение по одной ступени ФКУ на каждой вторичной обмотке трансформатора Т приводит к уменьшению коэффициента K_U : при настройке фильтров на $K_{рез}=3,78$ до 5,1 %, при $K_{рез}=4,2$ до 5 %, при $K_{рез}=4,7$ до 4 %. С увеличением длины линии до 7 км коэффициент K_U возрастает. При настройке фильтров на $K_{рез}=3,78$ и $K_{рез}=4,2$ коэффициент K_U превышает допустимое значение 5 %. Включение второй ступени ФКУ на каждой вторичной обмотке трансформатора Т приводит к уменьшению коэффициента K_U до нормативного значения 5 %. С увеличением длины линии свыше 9 км коэффициент K_U возрастает и превышает допустимые значения.

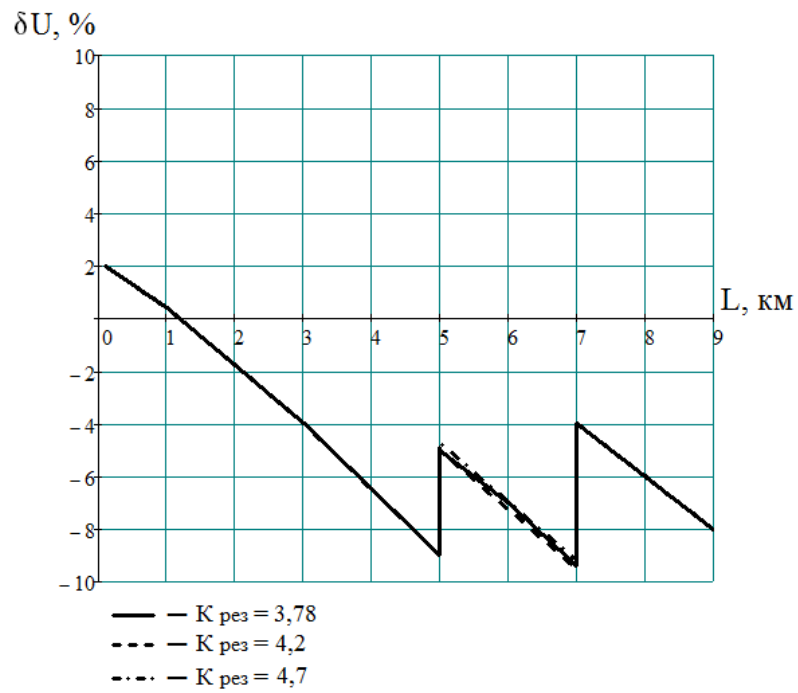


Рисунок 3.1 - График отклонения напряжения на вводе БУ в зависимости от длины
линии

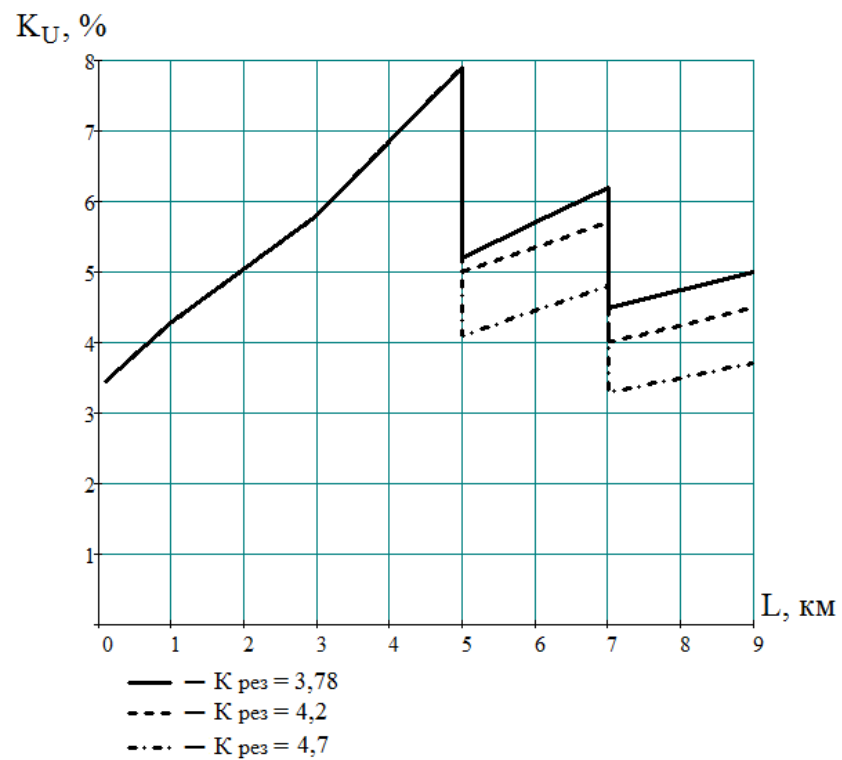


Рисунок 3.2 - График суммарного коэффициента гармонических
составляющих напряжения на вводе БУ в зависимости от длины линии

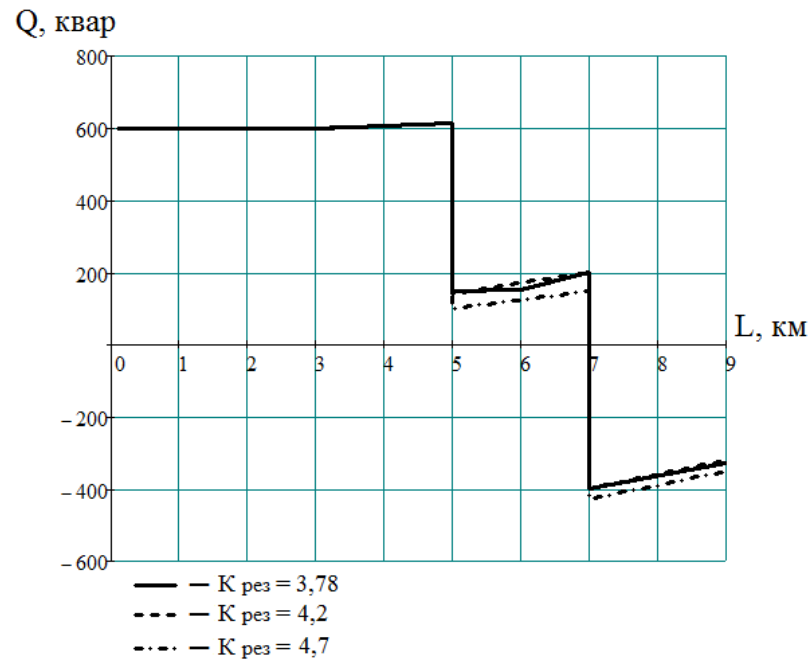


Рисунок 3.3 - График реактивной мощности на вводе БУ
в зависимости от длины линии

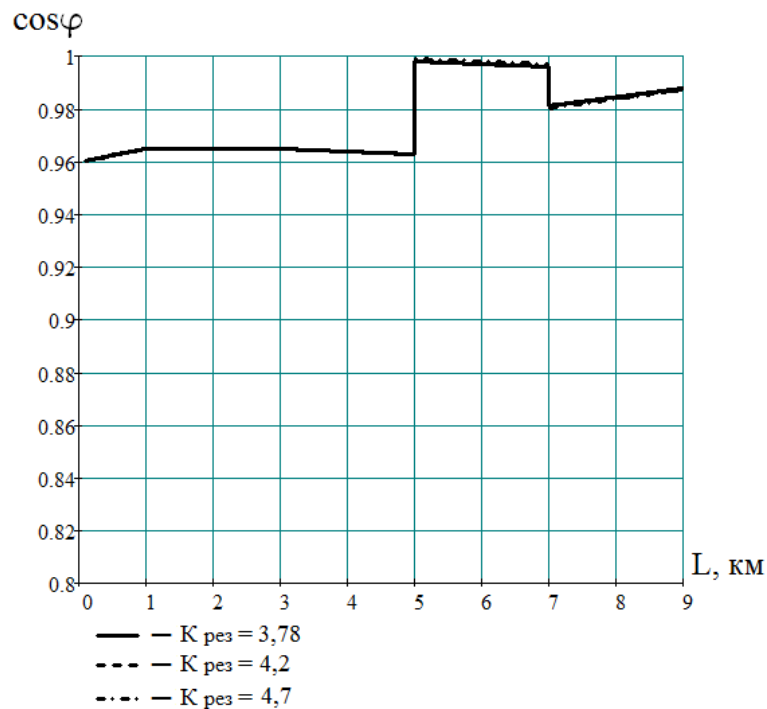


Рисунок 3.4 - График коэффициента мощности на вводе БУ
в зависимости от длины линии

Реактивная мощность Q с увеличением длины линии при отсутствии ФКУ практически не меняется и равна примерно 600 квар. Включение при длине линии

5 км по одной ступени ФКУ на каждой вторичной обмотке трансформатора Т приводит к уменьшению Q до 150 квар. С увеличением длины линии до 7 км Q незначительно возрастает в связи с увеличением индуктивного сопротивления линии. Включение второй ступени ФКУ на каждой вторичной обмотке трансформатора Т приводит к уменьшению Q примерно до минус 400 квар. С увеличением длины линии Q незначительно возрастает.

Коэффициент мощности $\cos \varphi$ с увеличением длины линии при отсутствии ФКУ практически не меняется и равен примерно 0,965. Включение при длине линии 5 км по одной ступени ФКУ на каждой вторичной обмотке трансформатора Т приводит к увеличению $\cos \varphi$ примерно до 0,997. С увеличением длины линии до 7 км $\cos \varphi$ незначительно уменьшается в связи с увеличением индуктивного сопротивления линии. Включение второй ступени ФКУ на каждой вторичной обмотке трансформатора Т приводит к уменьшению $\cos \varphi$ примерно до 0,985 (емкостной характер нагрузки). С увеличением длины линии от 7 км до 9 км $\cos \varphi$ увеличивается до 0,987 (емкостной характер нагрузки).

Сравнение графиков позволяет сделать вывод, что настройка фильтров практически не влияет на величину Q и $\cos \varphi$.

На рисунке 3.5. показан гармонический состав напряжения сети на вводе ЭТК БУ 6 кВ при отсутствии ФКУ.

Анализ гармонического состава показывает, что при отсутствии ФКУ эффективным средством улучшения синусоидальной формы напряжения сети является применение 12-пульсного выпрямителя. В этом случае в спектре гармоник отсутствуют 5 и 7-я гармоники, что приводит к значительному уменьшению коэффициента K_U по сравнению с 6-пульсным выпрямителем. Наиболее ярко в спектре гармоник выражены 11 и 13-я гармоники. Уровень остальных гармоник существенно меньше данных гармоник.

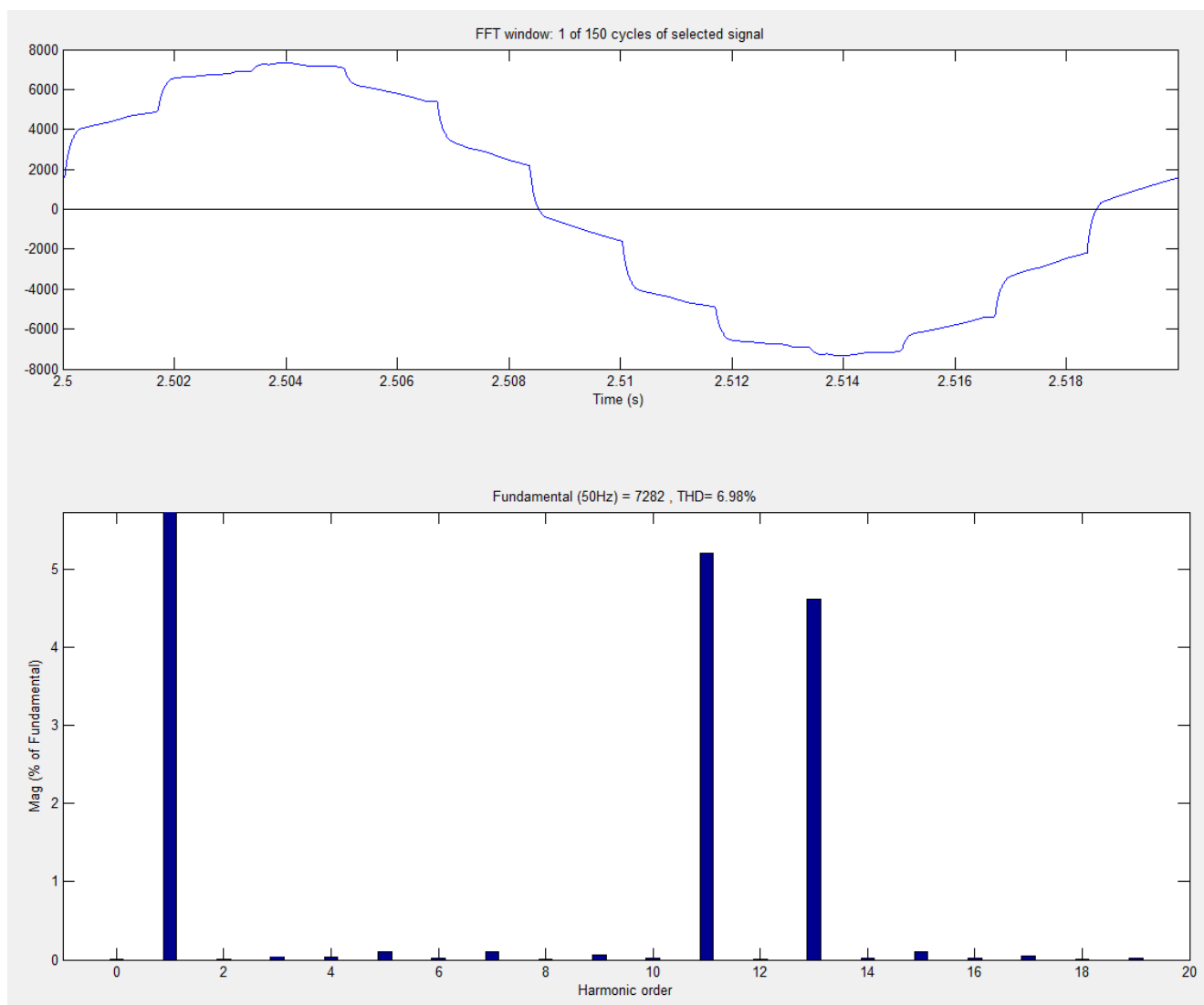


Рисунок 3.5 - Гармонический состав напряжения сети на вводе БУ 6 кВ.

Длина линии 7 км, без включения ФКУ

Однако, как показывает анализ графика коэффициента K_U от длины питающей линии 6 кВ (рисунок 3.2), применение только 12-пульсного выпрямителя в составе ПЧ не позволяет решить задачу получения нормативного коэффициента K_U равного 5% уже при длине питающей линии 2 км.

На основании полученных результатов сделан следующий вывод.

Для улучшения гармонического состава напряжения сети при работе БУ с ЧРЭП необходимо применение ФКУ при длине линии более 2 км.

На рисунке 3.6. показан гармонический состав напряжения сети на вводе ЭТК БУ 6 кВ при включении ФКУ.

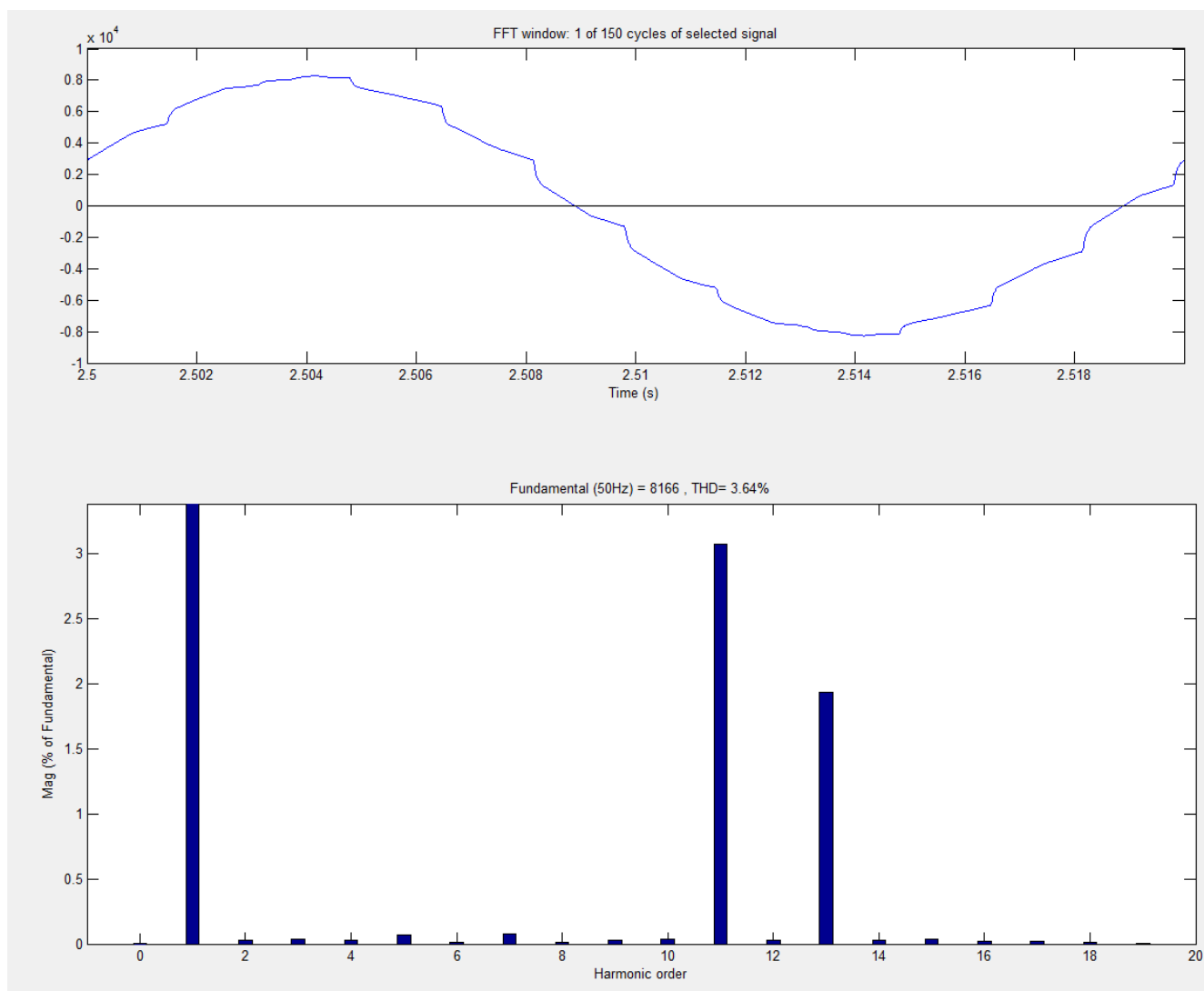


Рисунок 3.6 - Гармонический состав напряжения сети на вводе буровой установки 6 кВ. Длина линии 7 км, включены две ступени ФКУ

Включение ФКУ, как следует из сравнения рисунка 3.5 и рисунка 3.6 приводит к уменьшению 11 и 13-й гармоник более чем в 2 раза. Уровень остальных гармоник существенно меньше 11 и 13-й гармоники.

На основании полученных результатов исследования сделаны следующие выводы [82, 83, 87].

ФКУ со ступенчатым регулированием реактивной мощности при питании регулируемых электроприводов БУ от ЛЭП позволяет обеспечить требуемые показатели по отклонению напряжения (10 %) и по суммарному коэффициенту гармонических составляющих напряжения (5 %). При выборе ФКУ по критерию отклонения

напряжения возможно обеспечить нормальную работу БУ при длине линии до 9-10 км вместо 5 км при отсутствии ФКУ.

Настройка всех ступней ФКУ на одну резонансную частоту ниже пятой гармоники обеспечивает уменьшение коэффициента K_U на вводе БУ до уровня 5–8%, что доказывает возможность применения «ненастроенных» фильтров.

3.4. Влияние ФКУ на качество электроэнергии при питании БУ с ЧРЭП от автономных синхронных генераторов

В данном разделе рассмотрено влияние простейших ФКУ-С с «ненастроенными» фильтрами на величину реактивной мощности и уровень высших гармоник при питании ЭТК БУ от автономных СГ.

Схеме электрооборудования буровой установки БУ-4200/250 при питании от автономных СГ соответствует расчётная схема, показанная на рисунке 2.2.

Для рассматриваемого случая электроснабжение БУ осуществляется от автономных СГ напряжением 6 кВ.

Принято, что регулятор напряжения СГ, не зависимо от нагрузки, поддерживает напряжение равное 6,3 кВ.

Исследования проводились при следующих исходных данных.

Номинальная полная мощность СГ равна 1000 кВА, номинальный коэффициент мощности 0,8. Эквивалентное индуктивное сопротивление СГ $X_{сг} = 0,2$ о.е.

От общих шин получают питание два электропривода насосного агрегата (режим турбинного бурения двумя насосами).

Рассматривается режим, когда общая нагрузка электродвигателей насосов изменяется от 800 кВт до 1800 кВт при работе двух СГ. При работе трёх СГ нагрузка изменяется от 1700 кВт до 2000 кВт. Причиной изменения нагрузки электроприводов является увеличение давления с углублением скважины. Кроме того, постоянно включена дополнительная электрическая нагрузка с активной мощностью 300 кВт и коэффициентом мощности 0,7.

Все величины рассчитываются при отсутствии ФКУ и включённом ФКУ.

Предварительно принято, что ФКУ содержит четыре ступени (Ф1–Ф4) (рисунок 2.2). При наличии ФКУ на каждой вторичной обмотке трансформатора Т постоянно включено по одной ступени ФКУ.

При питании ЭТК БУ от СГ целями управления ФКУ являются [4]:

- уменьшение потребления реактивной мощности;
- обеспечение допустимого суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения.

С целью изучения влияния настройки ФКУ на суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения сети исследованы варианты настройки фильтров ФКУ на следующие относительные резонансные частоты $K_{рез}$: 3,78; 4,2; 4,7.

Вариант включения двух СГ. Результаты исследования для этого случая приведены на рисунках 3.7–3.11.

На рисунке 3.7 приведена зависимость активной мощности СГ от активной мощности ЧРЭП.

Из графиков следует, что кривые с ФКУ и без ФКУ совпадают. Активная мощность P возрастает примерно от 1120 до 2150 кВт при увеличении активной мощности ЧРЭП от 800 до 1800 кВт. Настройка ФКУ практически не влияет на величину активной мощности СГ. Разность между активными мощностями электроприводов БУ и СГ объясняется наличием дополнительной электрической нагрузки.

На рисунке 3.8 приведена зависимость реактивной мощности СГ от активной мощности ЧРЭП.

При отсутствии ФКУ реактивная мощность изменяется в пределах от 350 до 630 квар. Включение по одной ступени ФКУ на каждой вторичной обмотке трансформатора Т приводит к уменьшению Q . В этом случае Q с увеличением активной мощности ЧРЭП изменяется от 40 до 330 квар. Графики Q при различной настройке ФКУ практически совпадают.

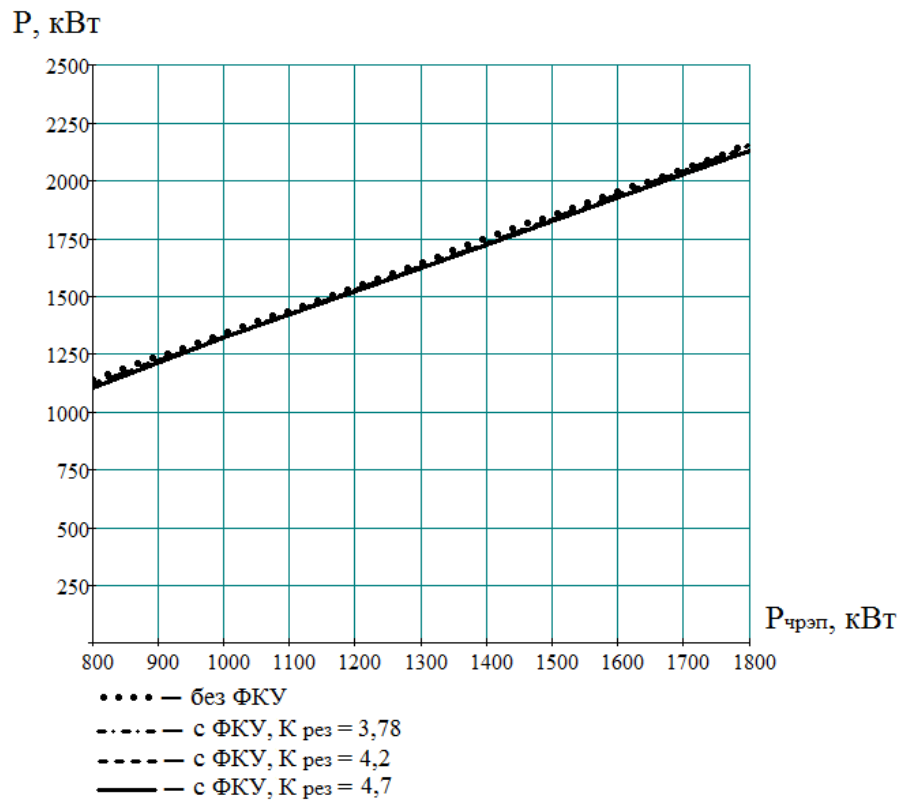


Рисунок 3.7 - График активной мощности двух СГ от активной мощности ЧРЭП

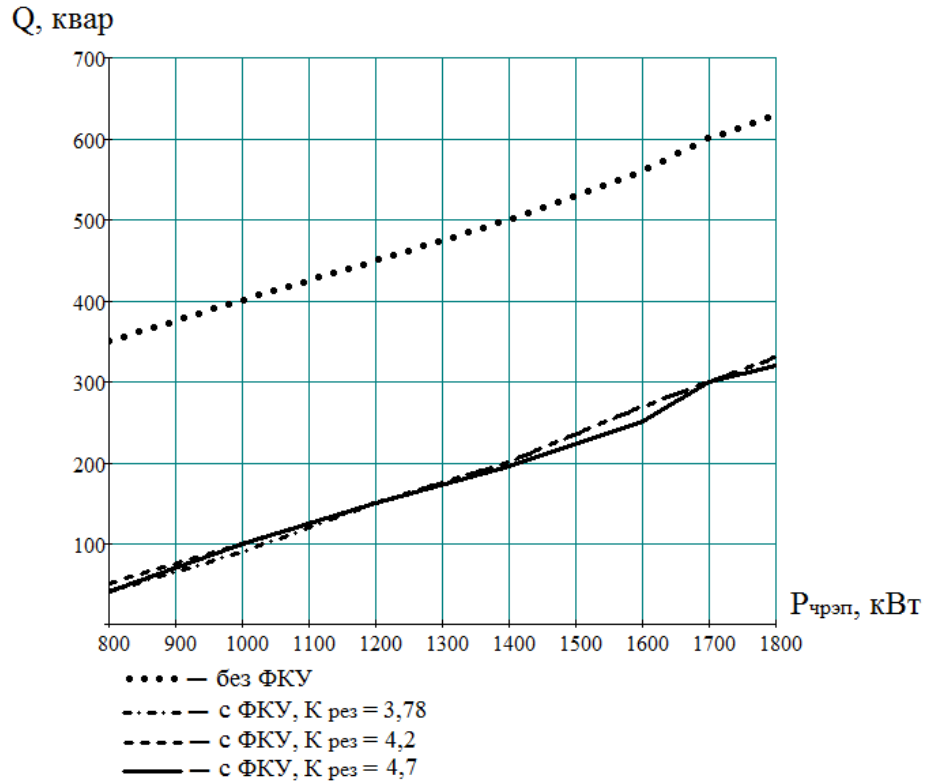


Рисунок 3.8 - График реактивной мощности двух СГ от активной мощности ЧРЭП

На рисунке 3.9 приведена зависимость полной мощности СГ от активной мощности ЧРЭП.

При отсутствии ФКУ полная мощность изменяется в пределах от 1190 до 2250 кВА. Включение по одной ступени ФКУ на каждой вторичной обмотке трансформатора Т приводит к уменьшению полной мощности. В этом случае полная мощность с увеличением активной мощности ЧРЭП изменяется от 1120 до 2170 кВА. Графики полной мощности при различной настройке ФКУ совпадают.

На рисунке 3.10 приведена зависимость коэффициента мощности СГ от активной мощности ЧРЭП.

Из графиков следует, что при отсутствии ФКУ $\cos \varphi$ изменяется в пределах от 0,955 до 0,96. Включение по одной ступени ФКУ на каждой вторичной обмотке трансформатора Т приводит к увеличению $\cos \varphi$. В этом случае $\cos \varphi$ при увеличении активной мощности ЧРЭП изменяется от 0,9995 до 0,989. Графики $\cos \varphi$ при различной настройке ФКУ совпадают.

На рисунке 3.11 приведена зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения СГ от активной мощности ЧРЭП.

При отсутствии ФКУ коэффициент K_U изменяется в пределах от 4,4 до 7,7 %. Включение по одной ступени ФКУ на каждой вторичной обмотке трансформатора Т приводит к уменьшению коэффициента K_U .

Для $K_{рез}=3,78$ коэффициент K_U изменяется в пределах от 3,6 до 6,5 %. Для $K_{рез}=4,2$ коэффициент K_U изменяется в пределах от 3,45 до 6,15 %. При $K_{рез}=4,7$ коэффициент K_U изменяется в пределах от 3,3 до 5,5 %. Из этого следует, что чем ближе относительная резонансная частота к 5, тем меньше коэффициент K_U .

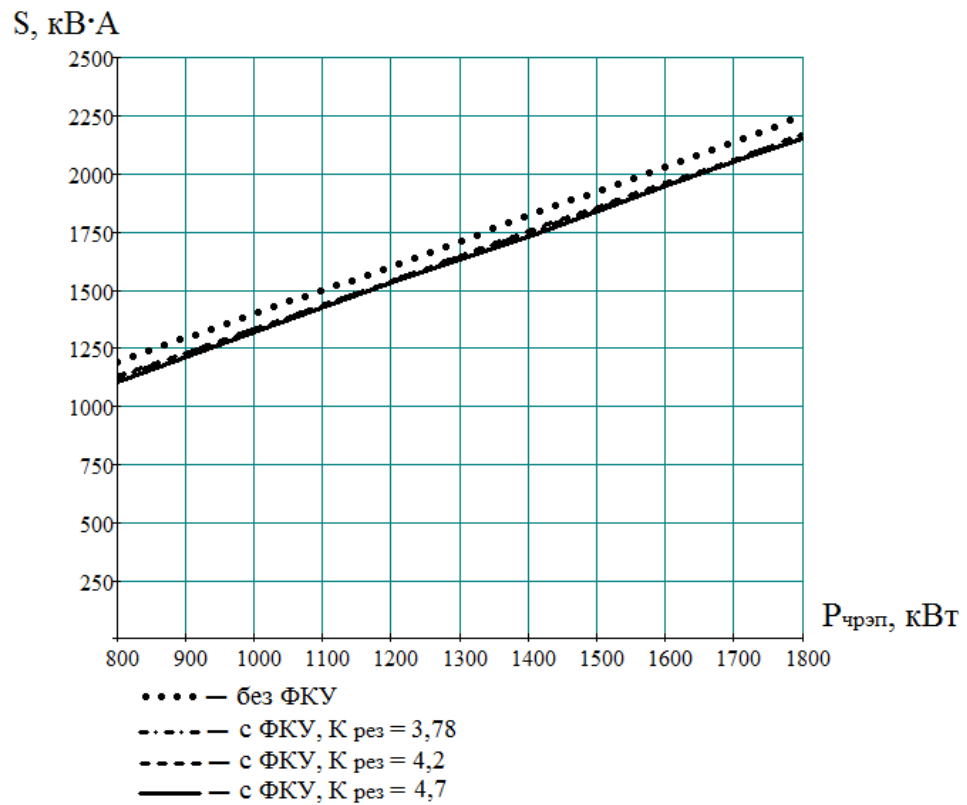


Рисунок 3.9 - График полной мощности двух СГ от активной мощности ЧРЭП

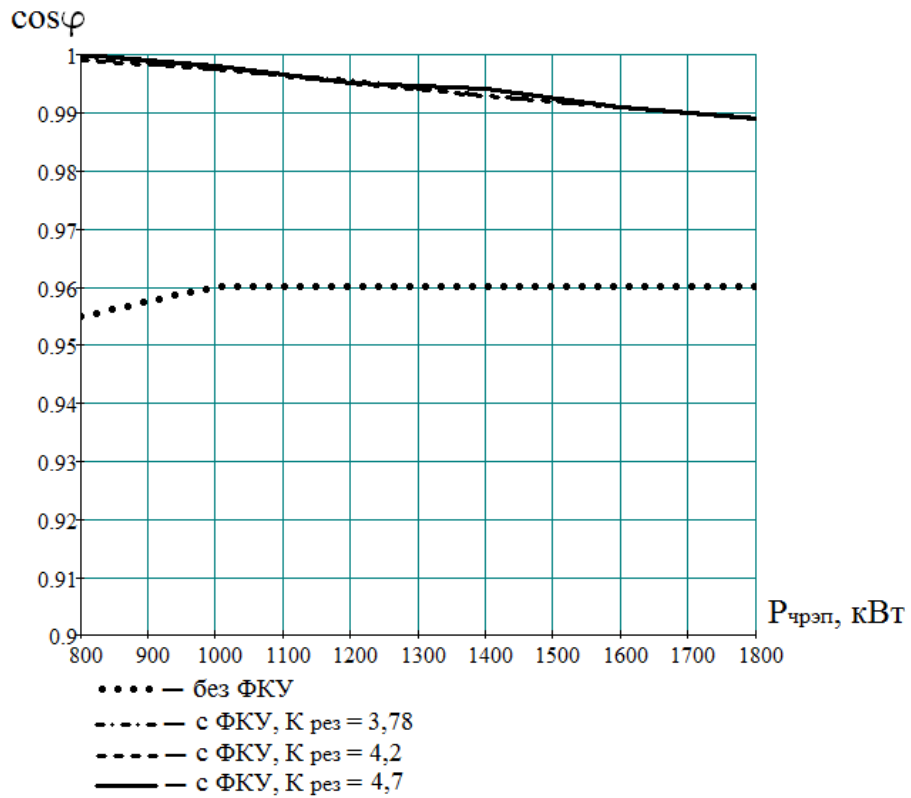


Рисунок 3.10 - График коэффициента мощности двух СГ от активной мощности ЧРЭП

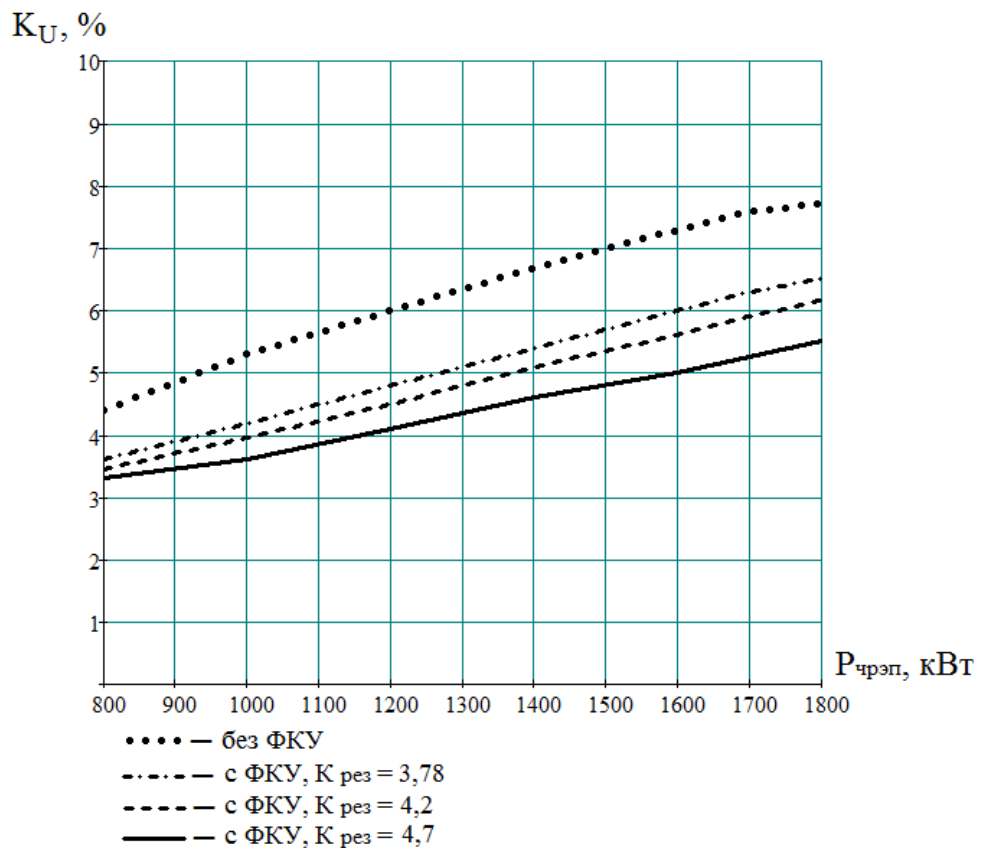


Рисунок 3.11 - График суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения двух СГ от активной мощности ЧРЭП

Вариант включения трёх СГ. В рассматриваемом случае исследованы варианты настройки фильтров ФКУ на следующие относительные резонансные частоты: 4,2; 4,7. Результаты исследования приведены на рисунках 3.12–3.16.

На рисунке 3.12 приведена зависимость активной мощности синхронных генераторов от активной мощности ЧРЭП. Из графиков следует, что кривые с ФКУ и без ФКУ совпадают. Активная мощность P возрастает примерно от 2040 до 2350 кВт при увеличении активной мощности ЧРЭП от 1700 до 2000 кВт. Настройка ФКУ практически не влияет на величину P . Разность между активными мощностями электроприводов БУ и СГ объясняется наличием дополнительной электрической нагрузки.

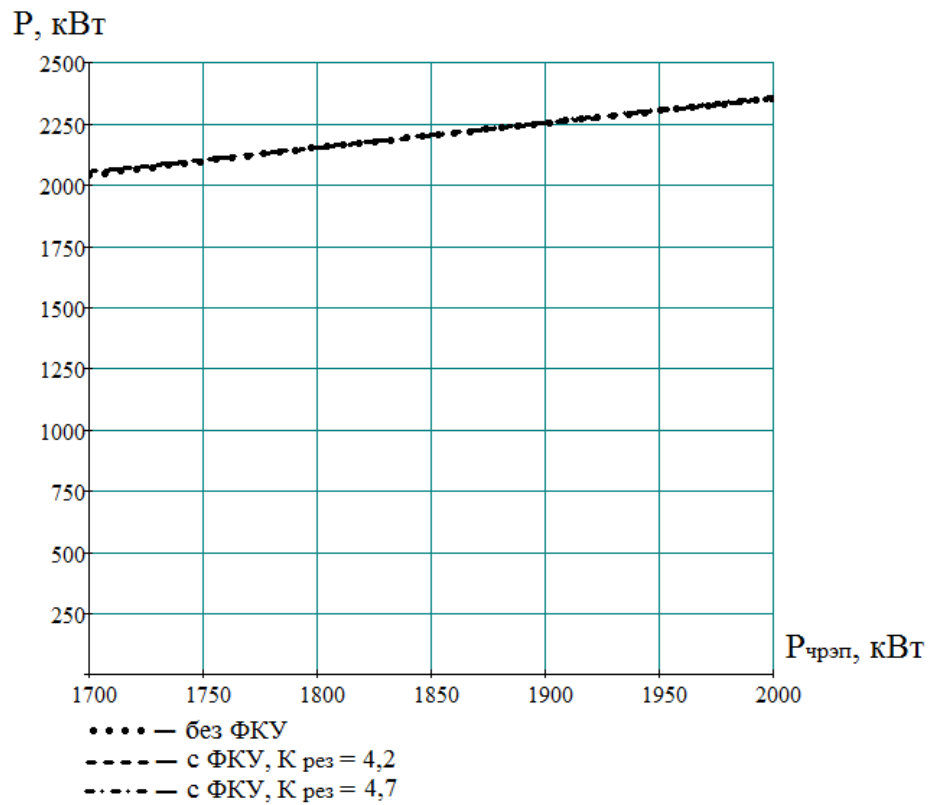


Рисунок 3.12 - График активной мощности трёх СГ от активной мощности ЧРЭП

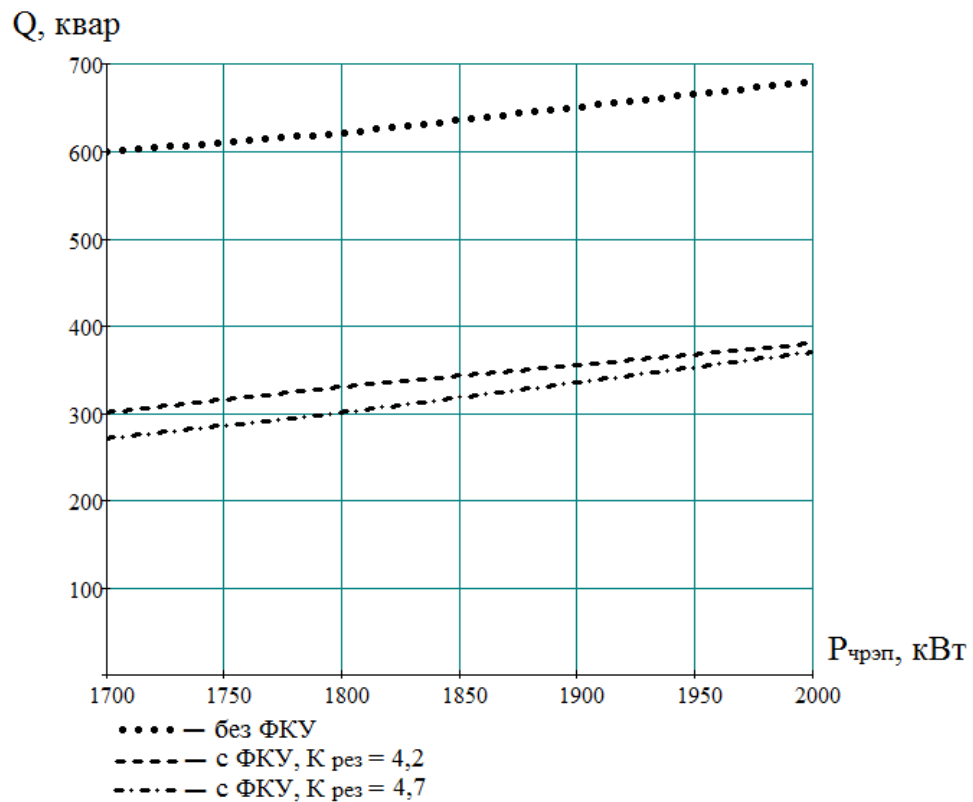


Рисунок 3.13 - График реактивной мощности трёх СГ от активной мощности ЧРЭП

На рисунке 3.13 приведена зависимость реактивной мощности синхронных генераторов от активной мощности ЧРЭП. Из графиков следует, что при отсутствии ФКУ Q изменяется в пределах от 600 до 680 квар. Включение по одной ступени ФКУ на каждой вторичной обмотке трансформатора Т приводит к уменьшению Q . В этом случае Q с увеличением активной мощности ЧРЭП изменяется в среднем от 270–300 квар до 370–380 квар. Графики Q при различной настройке ФКУ практически совпадают.

На рисунке 3.14 приведена зависимость полной мощности синхронных генераторов от активной мощности ЧРЭП. Из графиков следует, что при отсутствии ФКУ полная мощность изменяется в пределах от 2120 до 2450 кВА. Включение по одной ступени ФКУ на каждой вторичной обмотке трансформатора Т приводит к уменьшению полной мощности. В этом случае полная мощность с увеличением активной мощности ЧРЭП изменяется от 2070 до 2385 кВА. Графики полной мощности при различной настройке ФКУ практически совпадают.

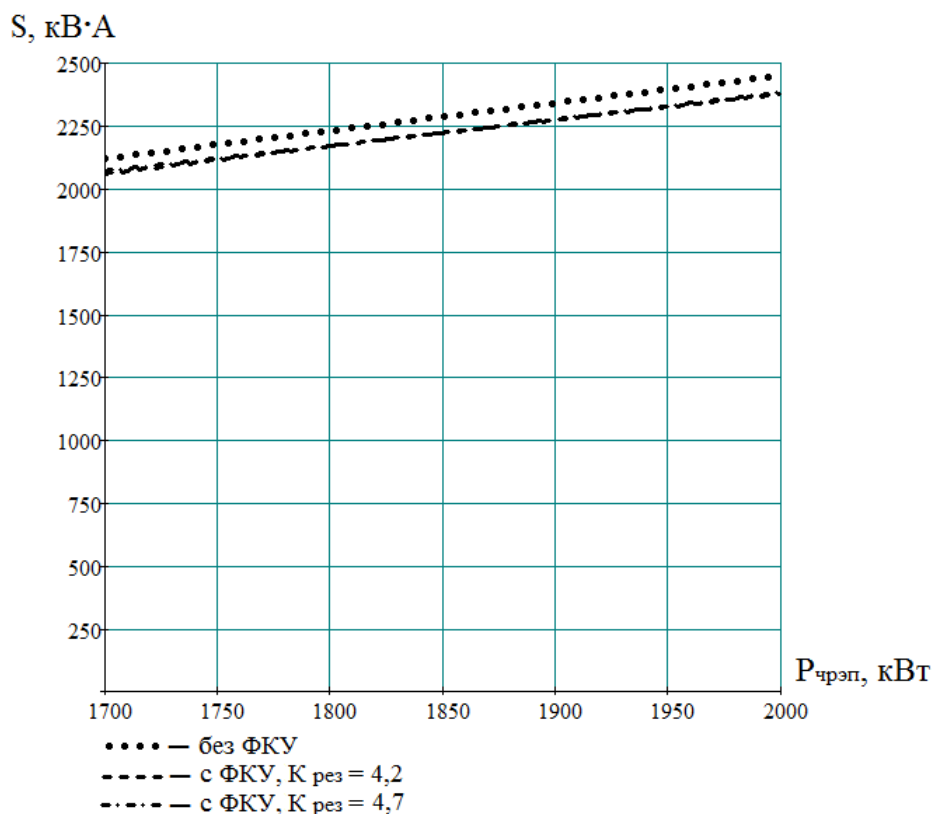


Рисунок 3.14 - График полной мощности трёх СГ от активной мощности ЧРЭП

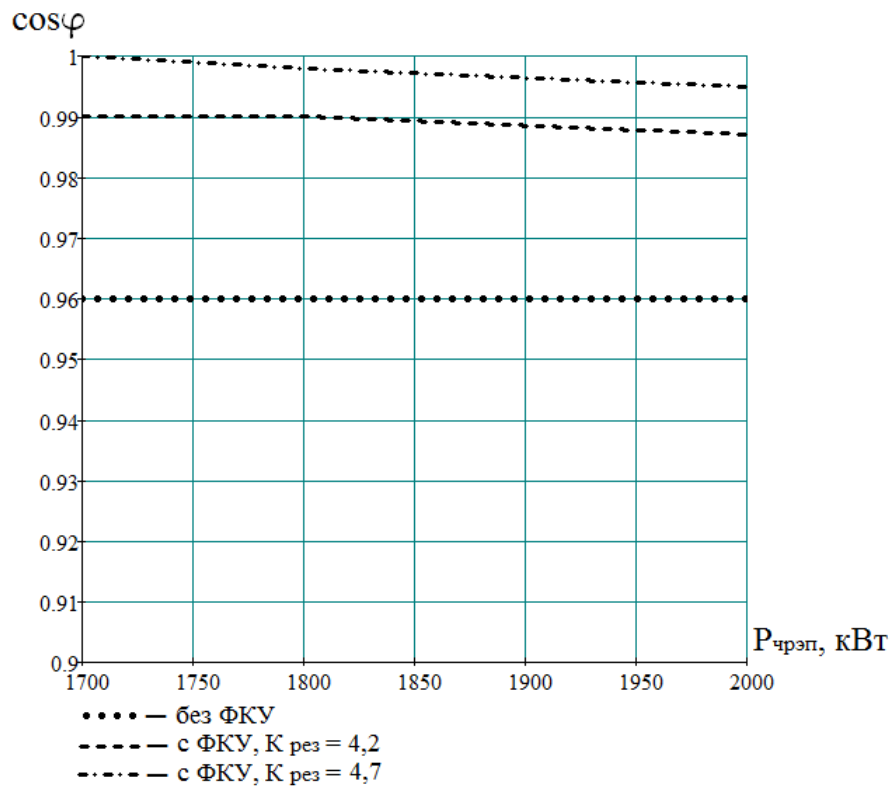


Рисунок 3.15 - График коэффициента мощности трёх СГ
от активной мощности ЧРЭП

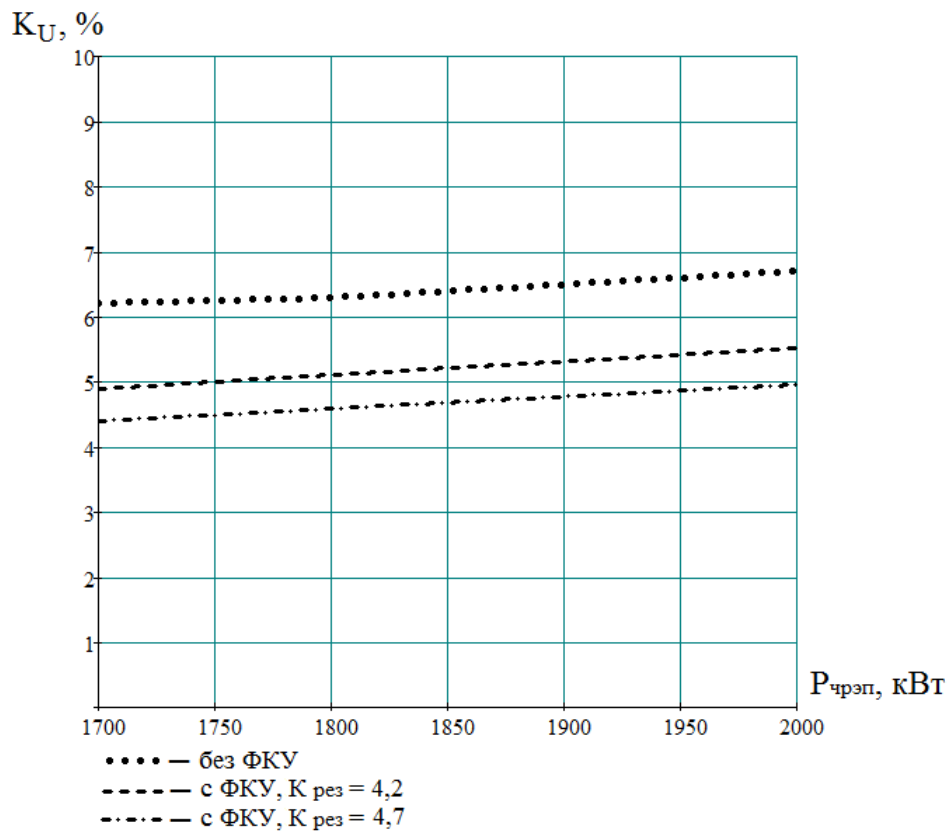


Рисунок 3.16 - График суммарного коэффициента гармонических
составляющих напряжения трёх СГ от активной мощности ЧРЭП

На рисунке 3.15 приведена зависимость $\cos \varphi$ СГ от активной мощности ЧРЭП. Из графиков следует, что при отсутствии ФКУ $\cos \varphi$ равен 0,96. Включение по одной ступени ФКУ на каждой вторичной обмотке трансформатора Т приводит к увеличению $\cos \varphi$. В этом случае $\cos \varphi$ с увеличением активной мощности ЧРЭП изменяется в среднем от 0,99–0,992 до 0,989–0,987. Графики $\cos \varphi$ при различной настройке ФКУ практически совпадают.

На рисунке 3.16 приведена зависимость изменения коэффициента K_U напряжения СГ от активной мощности ЧРЭП. Из графиков следует, что при отсутствии ФКУ коэффициент K_U изменяется в пределах от 6,2 до 6,7 %.

Включение по одной ступени ФКУ на каждой вторичной обмотке трансформатора Т приводит к уменьшению коэффициента K_U .

Для $K_{рез} = 4,2$ коэффициент K_U изменяется в пределах от 4,9 до 5,51 %. При $K_{рез} = 4,7$ коэффициент K_U изменяется в пределах от 4,4 до 4,95 %. Следовательно, включение ФКУ приводит к снижению коэффициента K_U и чем больше резонансная частота, тем меньше данный коэффициент.

Полученные зависимости позволяют сделать следующие выводы.

Включение ФКУ увеличивает $\cos \varphi$ от 0,96 практически до 1.

Применение «ненастроенных» фильтров высших гармоник обеспечивает уменьшение коэффициента K_U до 5–6,5 % в зависимости от настройки фильтров.

3.5. Технические требования к ФКУ для ЭТК БУ с ЧРЭП

На основе выполненных исследований сформулированы технические требования к ФКУ для БУ 6 и 7 класса с ЧРЭП по величине максимальной реактивной мощности ФКУ, числу ступеней ФКУ и рекомендуемой настройке фильтров (таблица 3.1). Выполнение данных требований позволяет получить в установившихся режимах работы электроприводов суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения не более 5 %, максимальное отклонение напряжения, не превышающее 10 % при длине высоковольтной воздушной линии электропе-

редачи до 9-10 км, коэффициент мощности при питании от автономных СГ близкий к 1.

Таблица 3.1 - Технические требования к ФКУ для ЭТК БУ с ЧРЭП

Наименование параметров	Значения параметров	
Класс буровых установок	6	7
Допустимая нагрузка на крюке, кН	2500	3200
Условная глубина бурения, м	4000	5000
Общая реактивная мощность ФКУ не менее, квар	1040	1040
Число ступеней ФКУ, не менее	4	4
Рекомендуемая настройка фильтров	Ненастроенные фильтры	

В таблице 3.2 приведено сравнение характеристик ФКУ для ЭТК БУ-3900 ЭКБМЦ с тиристорным электроприводом постоянного тока [90] и ЭТК БУ-4200/250 с ЧРЭП. Так как данные БУ относятся к одному классу, то это позволяет выявить отличия в характеристиках ФКУ для электроприводов постоянного тока и переменного тока.

Таблица 3.2 - Сравнение характеристик ФКУ для ЭТК БУ

Наименование параметров	Значения параметров	
Тип буровой установки	БУ-3900 ЭКБМЦ	БУ-4200/250
Привод главных буровых механизмов	ТП-ДПТ	ПЧ-АД
Допустимая нагрузка на крюке, кН	2500	2500
Условная глубина бурения, м	4000	4000
Тип ФКУ	ФКУ-К	ФКУ-С
Общая реактивная мощность ФКУ, квар	2000	1040
Число ступеней ФКУ	2	4

Основным отличием ФКУ для ЭТК БУ с ЧРЭП от ФКУ для ЭТК БУ с тиристорным электроприводом постоянного тока является величина реактивной мощности ФКУ. В случае ЧРЭП величина реактивной мощности ФКУ может быть уменьшена примерно в 2 раза.

Меньшее число ступеней ФКУ для ЭТК БУ-3900 ЭКБМЦ с тиристорным электроприводом постоянного тока объясняется применением для данного типа БУ плавно-регулируемого ФКУ с косвенной компенсацией реактивной мощности (ФКУ-К) [90].

Выводы

1. В результате выполненных исследований установлены закономерности влияния ФКУ на КЭ при централизованном и автономном электроснабжении ЧРЭП БУ.

2. ФКУ со ступенчатым регулированием реактивной мощности и «ненастроенными» фильтрами при питании ЧРЭП БУ от ЛЭП позволяет обеспечить нормативные показатели по отклонению напряжения (10 %) и по уровню искажений напряжения в питающей сети (5 %) при длине линии до 9-10 км.

3. В результате выполненных исследований доказано, что для автономных систем применение «ненастроенных» фильтров высших гармоник обеспечивает уменьшение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения в среднем до 5–6,5 % в зависимости от настройки фильтров.

4. 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. Их выполнение позволяет получить в установившихся режимах работы электроприводов: суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения не более 5 %; максимальное отклонение напряжения, не превышающее 10 % при длине высоковольтной воздушной линии электропередачи 9–10 км; коэффициент мощности практически равный 1 при питании от автономных СГ.

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ БУРОВЫХ УСТАНОВОК С АКТИВНЫМ ВЫПРЯМИТЕЛЕМ НАПРЯЖЕНИЯ НА СИСТЕМУ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

4.1. Исследование свойств активного выпрямителя напряжения в составе частотно-регулируемого электропривода ЭТК БУ

Исследование свойств АВН проводилось при питании ЧРЭП от ЛЭП. В этом случае оценка ПКЭ системы электроснабжения БУ при работе ЧРЭП с АВН осуществлялась при помощи специально разработанной компьютерной модели ЧРЭП БУ с АВН (рис. 2.17). В основу модели положена расчётная схема электрооборудования БУ с ЧРЭП, дополненная АВН (рисунок 2.3).

Схема и основное электрооборудование БУ имеет следующие особенности по сравнению со схемой электрооборудования БУ с ЧРЭП и неуправляемым выпрямителем (рисунок 2.1):

- от шин 6 кВ комплектного распределительного устройства получает питание двухобмоточный преобразовательный трансформатор Т, у которого первичная обмотка соединена в звезду, а вторичная – в треугольник;
- к вторичной обмотке трансформатора через фильтр и реактор подключается АВН;
- со стороны постоянного тока АВН подключён к общим шинам постоянного тока;
- от общих шин постоянного тока получают питание АИН, через которые энергия передаётся на асинхронные электродвигатели главных механизмов БУ: два буровых насоса (МН1 и МН2), ротор (МР) и лебёдка (МЛ).

Для схемы электрооборудования по рисунку 2.3 составлена компьютерная модель (рисунок 2.17).

Компьютерная модель позволяет выполнить расчёты следующих величин:

- отклонение напряжения δU от номинального на вводе питания 6 кВ в БУ;
- суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U на вводе питания 6 кВ в БУ;
- активная мощность P на вводе питания 6 кВ в БУ;

- реактивная мощность Q на вводе питания 6 кВ в БУ;
- полная мощность S на вводе питания 6 кВ в БУ;
- коэффициент мощности системы $\cos \varphi$ на вводе питания 6 кВ в БУ.

Разработанная компьютерная модель АВН позволила выполнить исследования свойств АВН в составе ЧРЭП ЭТК БУ [80, 84]. Исследования проводились для тех же условий работы электроприводов и системы электроснабжения, которые были приняты при исследовании влияния ФКУ на качество электроэнергии в случае питания БУ от ЛЭП 6 кВ (раздел 3.3).

На рисунках 4.1 и 4.2 показаны формы управляющих и опорных (несущих) сигналов, вырабатываемых в системе управления АВН. Управляющие сигналы поступающие на вход ШИМ системы управления АВН показаны на рисунке 4.1. Опорный (несущий) сигнал вырабатываемый ШИМ с которым сравниваются управляющие сигналы представлен на рисунке 4.2. В системе управления АВН происходит сравнение управляющего сигнала и опорного сигнала. В результате на входе АВН формируется линейное напряжение, состоящее из прямоугольных импульсов. Форма выходного напряжения показана на рисунке 4.3.

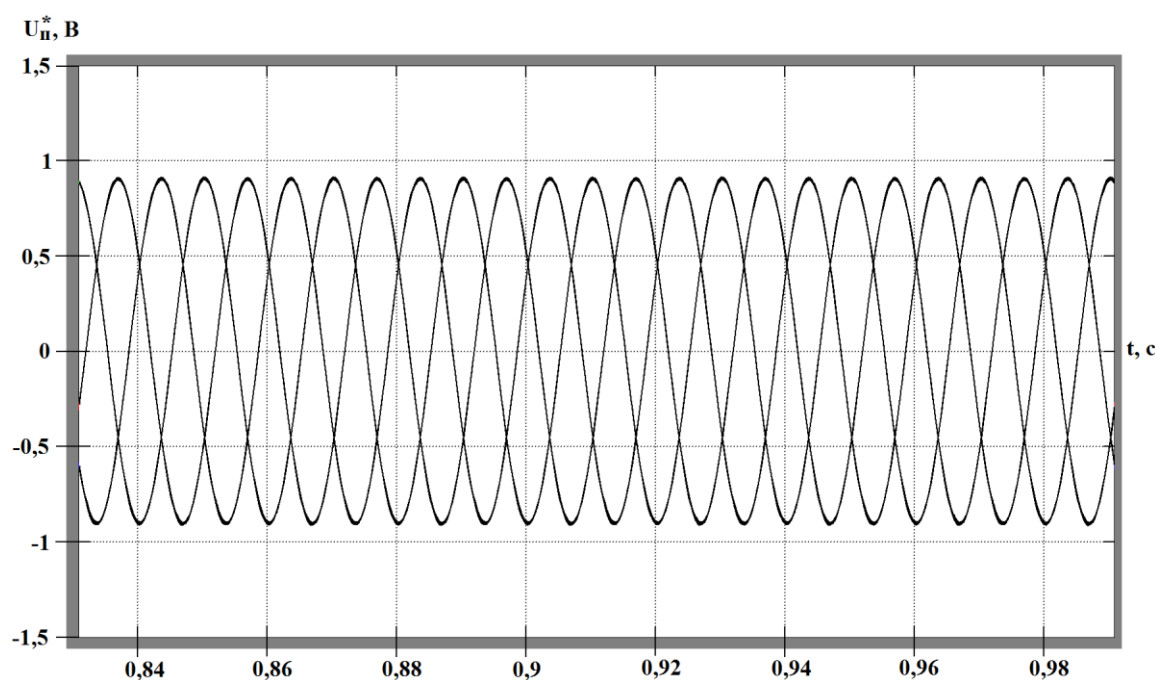


Рисунок 4.1 - Управляющие сигналы ($f = f_{\text{сети}} = 50$ Гц)

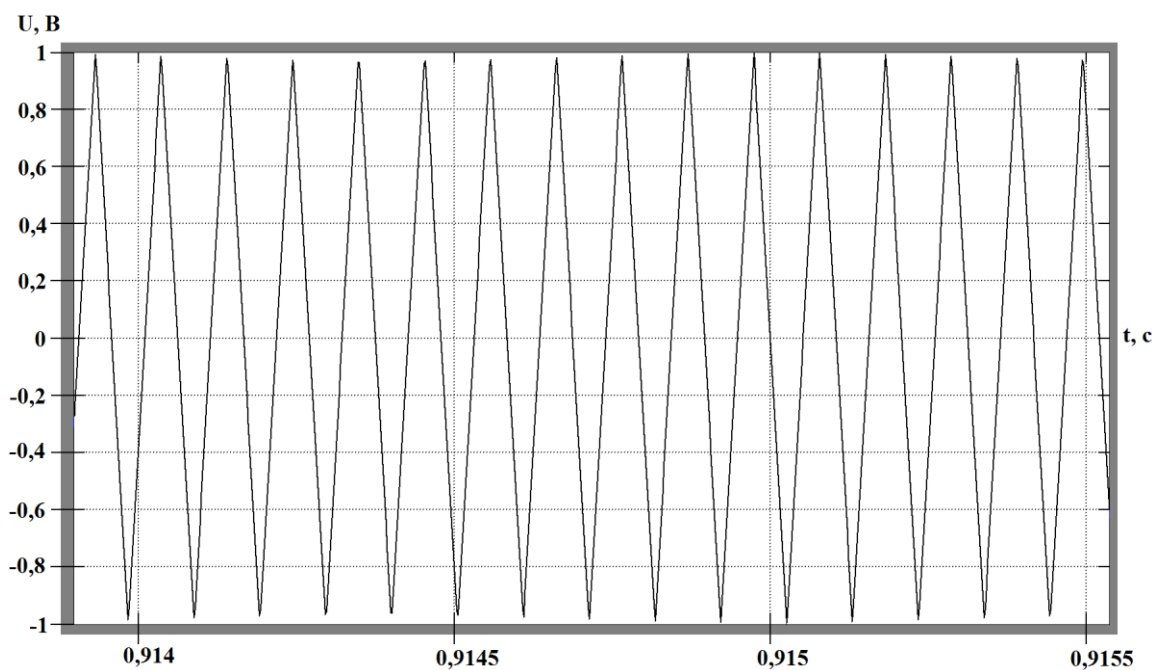


Рисунок 4.2 - Опорный (несущий) сигнал. (Несущая частота ШИМ $f_{\text{нес}} = 9600$ Гц)

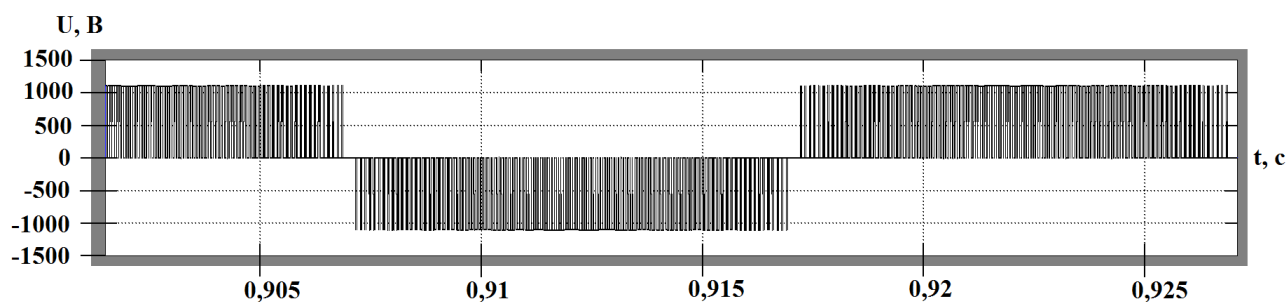


Рисунок 4.3 - Линейное напряжение на стороне переменного тока АВН
($f = f_{\text{сети}} = 50$ Гц; несущая частота ШИМ $f_{\text{нес}} = 9600$ Гц)

На рисунках 4.4 и 4.5 показаны формы напряжения и тока на вводе питания 6 кВ в БУ (в точке подключения преобразовательного трансформатора Т к линии 6 кВ) при разных значениях несущей частоты ШИМ и отсутствии фильтра АВН при длине линии 9 км.

На рисунке 4.4. показаны форма тока и напряжения на вводе питания 6 кВ, когда несущая частота ШИМ $f_{\text{нес}} = 2400$ Гц.

На рисунке 4.5. показаны форма тока и напряжения на вводе питания 6 кВ, когда несущая частота ШИМ $f_{\text{нес}} = 9600$ Гц.

Из сравнения рисунков 4.4. и 4.5. следует, что увеличение несущей частоты ШИМ приводит к значительному улучшению формы кривых тока и напряжения на вводе питания 6 кВ в БУ.

На рисунках 4.6 и 4.7 показаны формы напряжения и тока на вводе питания 6 кВ в БУ при разных значениях несущей частоты ШИМ и наличии фильтра АВН при длине линии 9 км.

На рисунке 4.6 показана форма тока и напряжения на вводе питания 6 кВ в БУ в установившемся режиме работы с фильтром АВН при длине линии 9 км. Несущая частота ШИМ $f_{\text{нес}} = 2400$ Гц

На рисунке 4.7 показана форма тока и напряжения на вводе питания 6 кВ в БУ в установившемся режиме работы с фильтром АВН при длине линии 9 км. Несущая частота ШИМ $f_{\text{нес}} = 9600$ Гц.

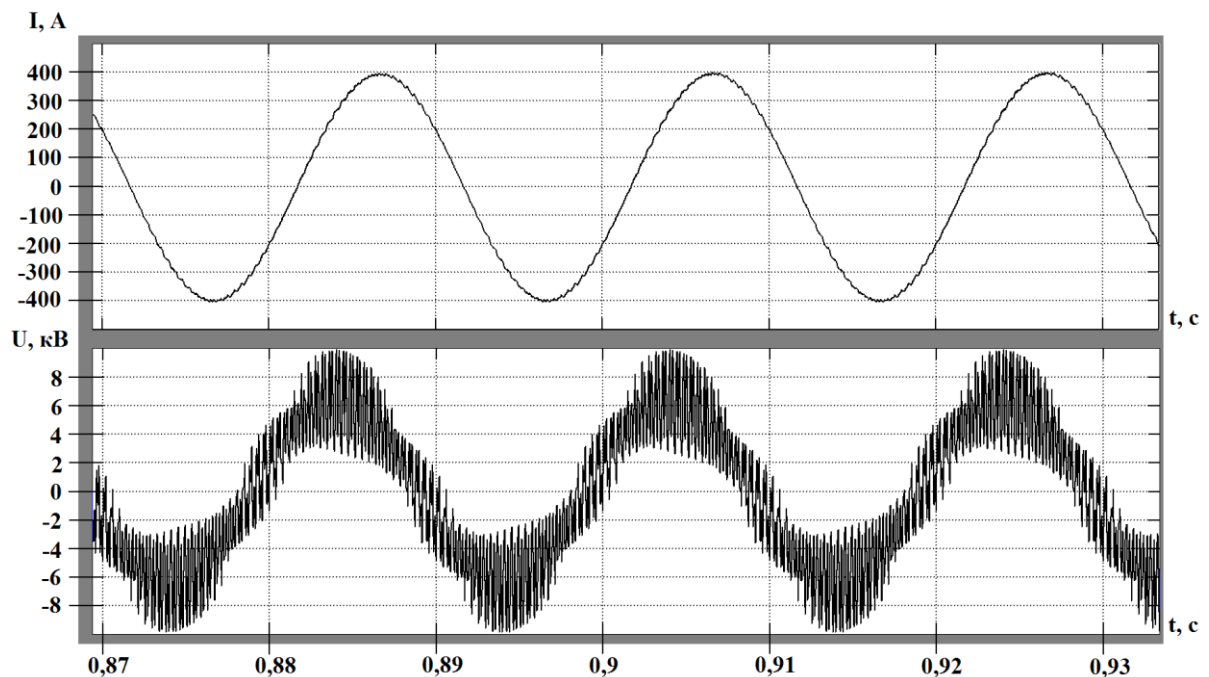


Рисунок 4.4 - Зависимости напряжения и тока от времени на стороне 6 кВ в установившемся режиме работы без фильтра АВН при длине линии 9 км (несущая частота ШИМ $f_{\text{нес}} = 2400$ Гц)

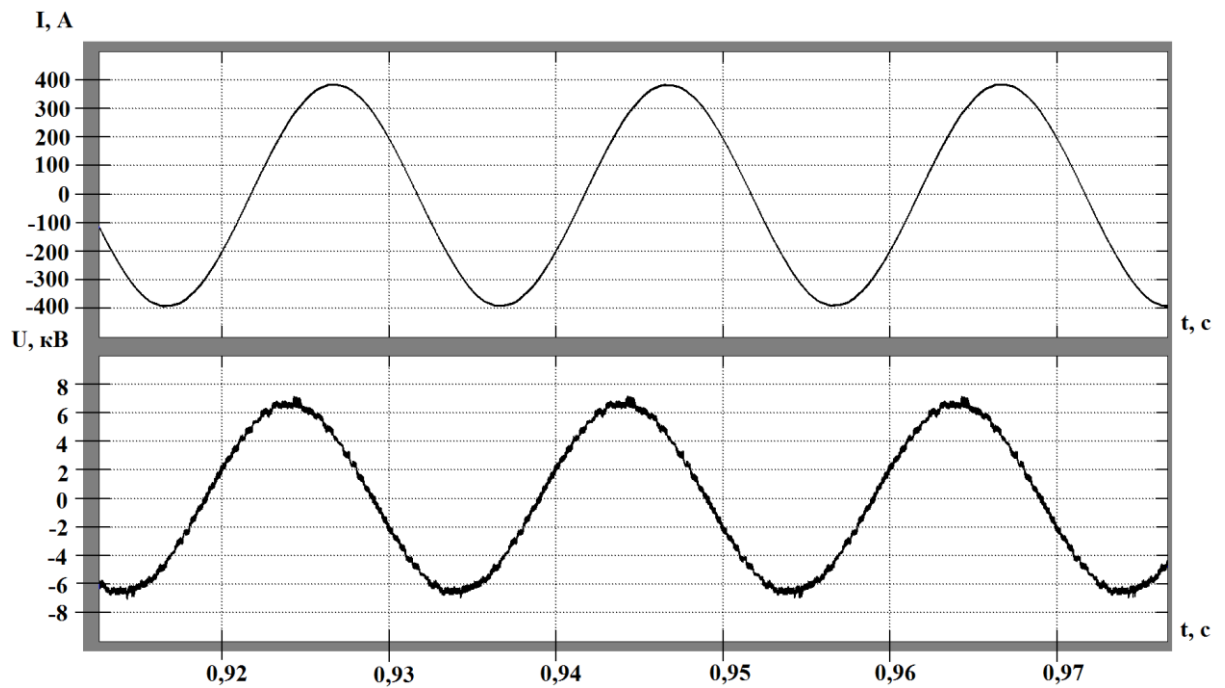


Рисунок 4.5 - Зависимости напряжения и тока от времени на стороне 6 кВ в установившемся режиме работы без фильтра АВН при длине линии 9 км (несущая частота ШИМ $f_{\text{нес}} = 9600$ Гц)

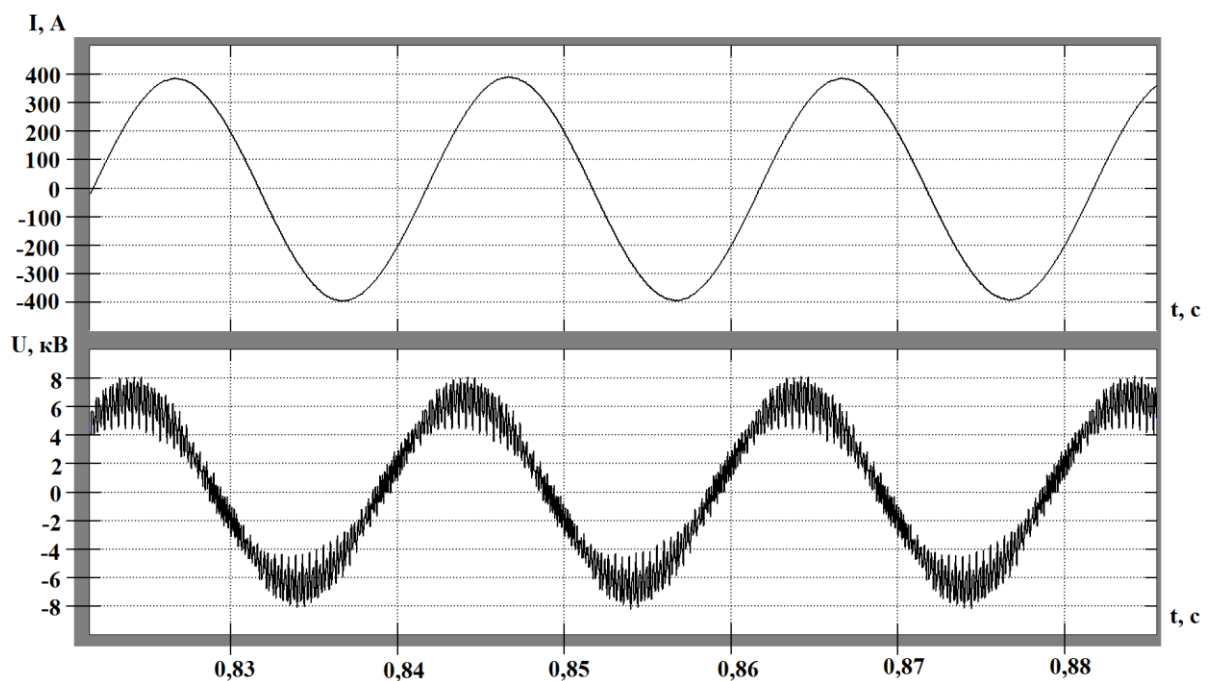


Рисунок 4.6 - Зависимости напряжения и тока от времени на стороне 6 кВ в установившемся режиме работы с фильтром АВН при длине линии 9 км (несущая частота ШИМ $f_{\text{нес}} = 2400$ Гц)

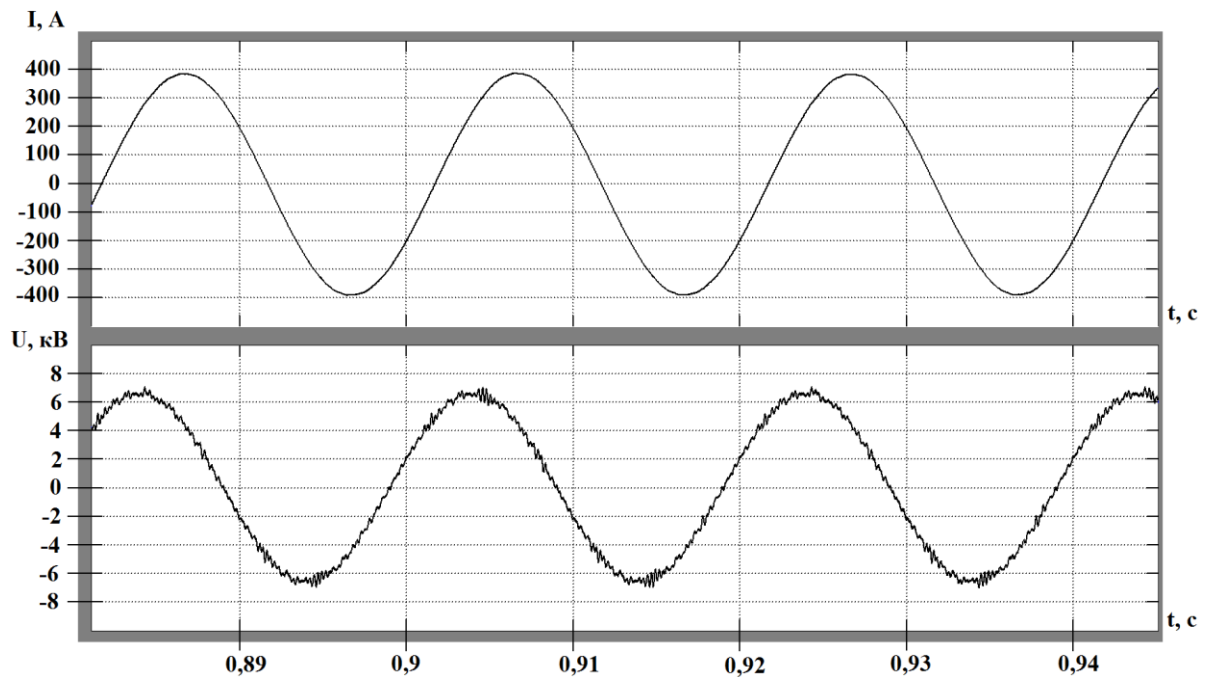


Рисунок 4.7 - Зависимости напряжения и тока от времени на стороне 6 кВ в установившемся режиме работы с фильтром АВН при длине линии 9 км (несущая частота ШИМ $f_{\text{нес}} = 9600$ Гц)

Сравнение рисунков 4.4 и 4.5 с рисунками 4.6 и 4.7 показывает, что эффективным средством улучшения формы кривых тока и напряжения в линии 6 кВ является применение фильтра на стороне переменного тока АВН.

На рисунках 4.8, 4.9 и 4.10 приведены в виде графиков результаты расчёта реактивной мощности, коэффициента мощности и отклонения напряжения на вводе питания 6 кВ в БУ (в точке подключения преобразовательного трансформатора Т к линии 6 кВ) при изменении сигнала задания реактивной составляющей тока АВН i_y^* . Длина линии 6 кВ равна 6 км.

Анализ графиков на рисунках 4.8, 4.9 и 4.10 позволил сделать следующие выводы. Увеличение сигнала задания реактивной составляющей тока АВН i_y^* приводит к уменьшению реактивной мощности и увеличению коэффициента мощности в точке подключения трансформатора к линии 6 кВ. Уменьшение величины реактивной мощности приводит к уменьшению отклонения напряжения.

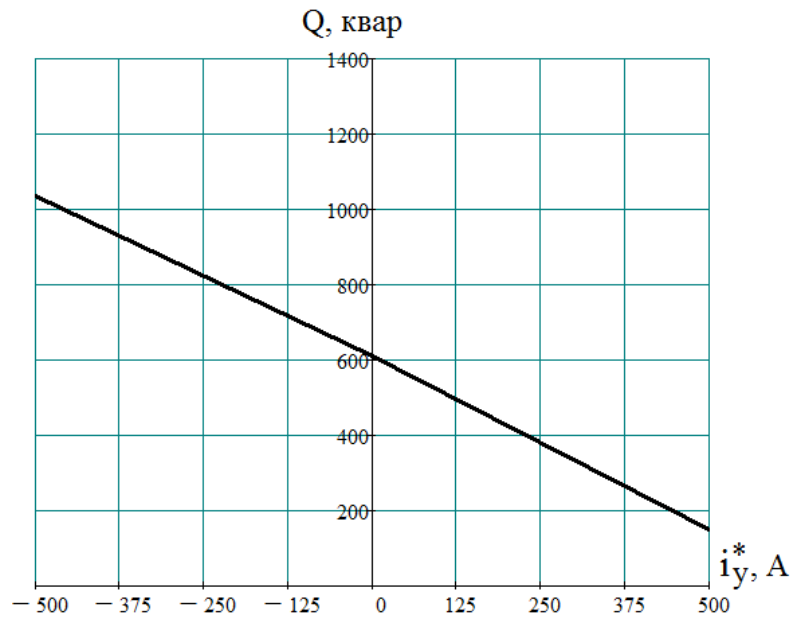


Рисунок 4.8 - Зависимость реактивной мощности на стороне 6 кВ от сигнала задания реактивной составляющей тока АВН i_y^*

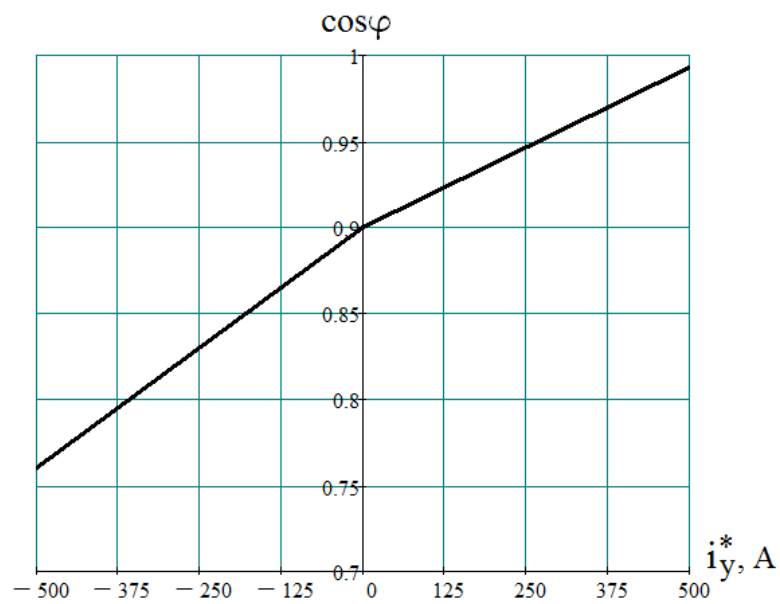


Рисунок 4.9 - Зависимость коэффициента мощности на стороне 6 кВ от сигнала задания реактивной составляющей тока АВН i_y^*

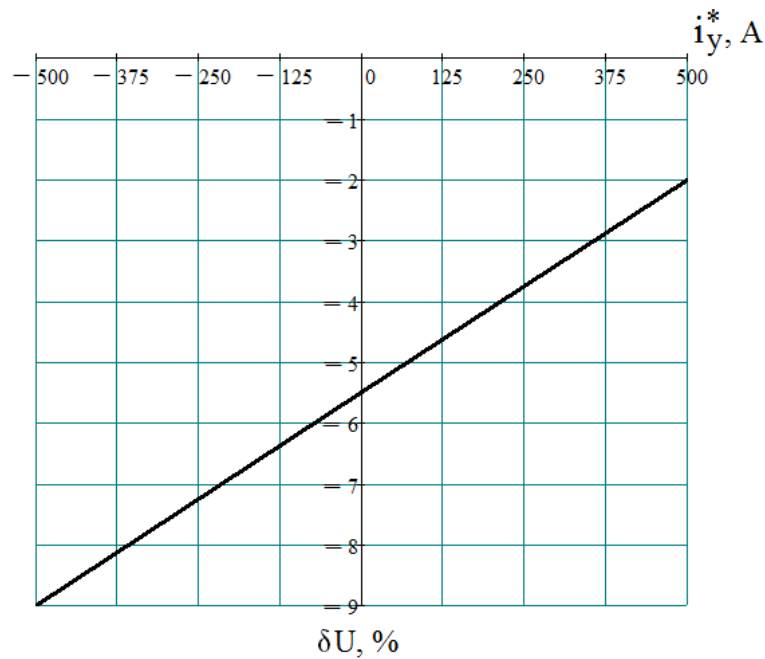


Рисунок 4.10 - Зависимость отклонения напряжения на стороне 6 кВ от сигнала задания реактивной составляющей тока АВН i_y^*

4.2. Методика выбора параметров фильтра АВН

Напряжение АВН на стороне переменного напряжения формируется средствами ШИМ при помощи изменения ширины импульса в течение периода. Из-за наличия импульсов в напряжении присутствуют гармонические составляющие высокой частоты. Поэтому возникает задача фильтрации высших гармоник напряжения на входе АВН, чтобы получить форму напряжения, близкую к синусоидальной. Для решения этой задачи в состав АВН входит фильтр, который ослабляет высшие гармоники, генерируемые АВН в сеть переменного тока, в соответствии с требованиями к качеству напряжения. При этом основная гармоника выходного напряжения должна передаваться с входа на выход фильтра без ослабления.

В литературе достаточно широко и полно описаны методы расчёта фильтров, например [41, 104].

На основе анализа методик, предложенных в [41, 104], предлагается решить задачу выбора параметров фильтра в два этапа. На первом этапе для выбранной

схемы фильтра строятся частотные характеристики коэффициента передачи фильтра K для разных значений параметров фильтра. По построенным характеристикам ориентировочно определяются параметры фильтра. Однако это не гарантирует получение требуемого коэффициента K_U .

Поэтому на втором этапе, на основе разработанной модели системы электроснабжения, содержащей ЧРЭП с АВН, методами компьютерного моделирования уточняются параметры фильтра, при которых будет обеспечен заданный коэффициент K_U .

Особенностью рассмотренной методики является учёт индуктивных и активных сопротивлений системы электроснабжения ЭТК БУ при выборе параметров фильтра АВН.

Выбираем низкочастотный однозвенный Г-образный фильтр (рисунок 4.11) [77].

Однозвенный Г-образный фильтр состоит из двух ветвей: продольной с сопротивлением $Z_1 = j\omega L_1$ и поперечной с сопротивлением $Z_2 = -j/(\omega C_2)$. Z_1 выполняется в виде реактора с индуктивностью L_1 . Модуль сопротивления реактора на основной частоте значительно меньше, чем та же величина на частоте подавления. Z_2 выполняется в виде конденсатора с ёмкостью C_2 , модуль сопротивления которого на основной частоте значительно выше сопротивления на частоте подавления.

Малое значение Z_1 на основной частоте обеспечивает передачу основной гармоники практически без ослабления; большое сопротивление Z_1 на частоте подавления – ослабление высших гармоник выходного напряжения фильтром.

Высокое значение сопротивления Z_2 на основной частоте обеспечивает минимальную загрузку АВН основной гармоникой реактивного тока, замыкающегося через фильтр; малое сопротивление Z_2 на частоте подавления – максимальное подавление высших гармоник.

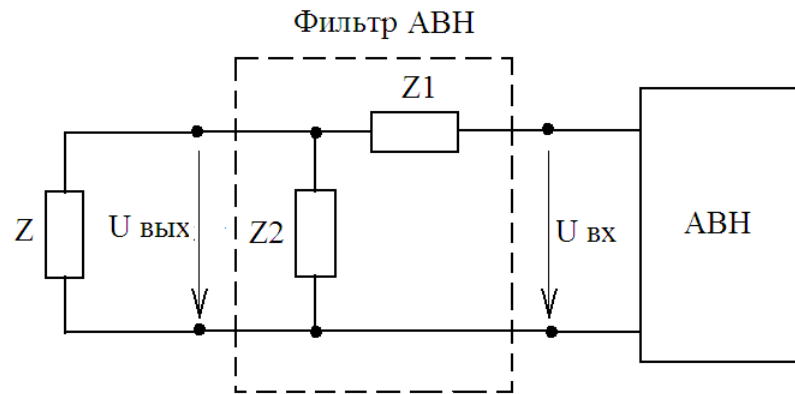


Рисунок 4.11 - Низкочастотный однозвенный Г-образный фильтр АВН

Отношение напряжения на выходе фильтра к напряжению на входе фильтра называется коэффициентом передачи фильтра K [77]. Комплексное значение коэффициента передачи фильтра (рисунок 4.11) определяется выражением [77]:

$$K(j\omega) = \frac{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{U}_{\text{ВХ}}} = \frac{\frac{Z_2 \cdot Z}{Z_2 + Z}}{Z_1 + \frac{Z_2 \cdot Z}{Z_2 + Z}}, \quad (4.1)$$

где Z – комплексное сопротивление нагрузки.

В рассматриваемом случае сопротивление нагрузки $Z = Z_{\text{ВХ Л}} + Z_{\text{Т}}$, где $Z_{\text{ВХ Л}}$ – комплексное входное сопротивление линии (при питании от СГ – комплексное входное сопротивление СГ), приведённое к стороне низкого напряжения силового трансформатора; $Z_{\text{Т}}$ – комплексное сопротивление трансформатора Т, приведённое к стороне низкого напряжения трансформатора.

При выборе параметров фильтра задаёмся значением сопротивления Z_1 , которое для АВН является сетевым (буферным) реактором с индуктивностью L_p .

Сетевой реактор выбираем по величине падения напряжения на реакторе $\Delta U\%$ [107]. Зная для выбранного реактора действующие значения номинальных линейного напряжения $U_{\text{Л НОМ}}$ и тока $I_{\text{НОМ}}$ реактора, определяем его индуктивность по формуле:

$$L_p = \frac{\Delta U\% U_{\text{Л НОМ}}}{2\pi f_c \sqrt{3} I_{\text{НОМ}} 100}, \quad (4.2)$$

где f_c – частота сети.

Как правило, у выпускаемых реакторов падение напряжения при протекании номинального тока принимается равным 2 % или 4 % [107].

После определения индуктивности реактора задаёмся несколькими значениями ёмкости конденсатора фильтра C_2 , входящего в ветвь Z_2 .

Далее для каждого заданного значения ёмкости конденсатора C_2 по выражению (4.1) вычисляем частотные характеристики коэффициента передачи фильтра K , которые представляют его зависимости от угловой частоты $\omega = 2\pi f$.

На рисунке 4.12 показаны частотные характеристики модуля коэффициента передачи фильтра K , когда длина линии 6 кВ равна 9 км. Линия выполнена проводом марки А95. Сетевой реактор выбран по величине падения напряжения $\Delta U\% = 5\%$ [112]. Его индуктивность равна 0,0029 мГн. Значения ёмкостей конденсатора C_2 взяты равными 98 мкФ, 490 мкФ, 980 мкФ, 1960 мкФ.

Частотные характеристики построены в функции относительной частоты (номера гармоники), равной $\omega_{\text{отн}} = \omega / \omega_0$, где $\omega_0 = 314$ рад/с – круговая частота сети.

Анализ полученных графиков показывает, что модуль коэффициента передачи фильтра K существенно снижается при $C_2 = 98$ мкФ, если номер гармоники превышает значение 100. При остальных значениях C_2 модуль коэффициента передачи фильтра K существенно снижается, если номер гармоники превышает значение 50. Так как номера высших гармоник, генерируемых АВН, близки к этим значениям, то при ёмкостях конденсатора C_2 равных 490 мкФ, 980 мкФ и 1960 мкФ возможно улучшение синусоидальной формы напряжения.

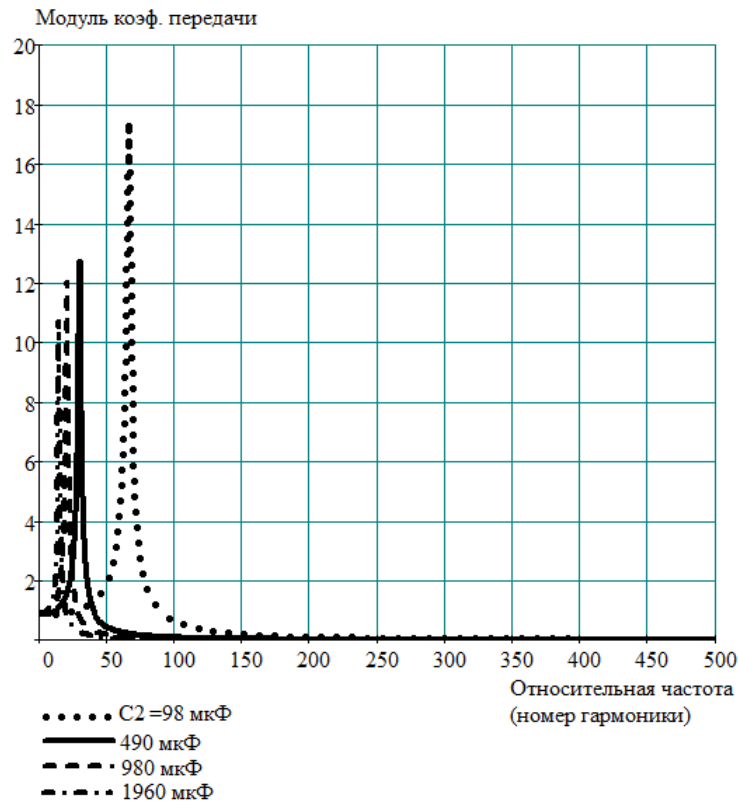


Рисунок 4.12 - Частотные характеристики модуля коэффициента передачи
фильтра АВН

Однако это не гарантирует получение требуемого коэффициента K_U .

Поэтому на втором этапе методами компьютерного моделирования уточняются параметры фильтра, при которых будет обеспечен нормативный коэффициент K_U . Эта задача решена при помощи разработанной компьютерной модели АВН (рисунок 2.17).

Исследовано влияние параметров фильтра АВН на искажение синусоидальной формы напряжения сети. Кроме того определялось значение реактивной мощности при разных значениях ёмкости фильтра C_2 и сетевого реактора L_p . На основании выполненных исследований построены графики зависимостей коэффициента K_U и реактивной мощности от ёмкости фильтра при наличии и отсутствии сетевого реактора АВН.

На рисунке 4.13 приведена зависимость коэффициента K_U от ёмкости фильтра C_2 для длины линии, равной 1 км. Из графиков видно, что коэффициент K_U без включения реактора равен 27,3 % при $C_2 = 327,6$ мкФ. При увеличении

ёмкости коэффициент K_U уменьшается и при значении $C2 = 2948$ мкФ коэффициент K_U равен 1,5 %. При включении реактора коэффициент K_U уменьшается и изменяется от 8 % при $C2 = 327,6$ мкФ до 1 % при $C2 = 2948$ мкФ.

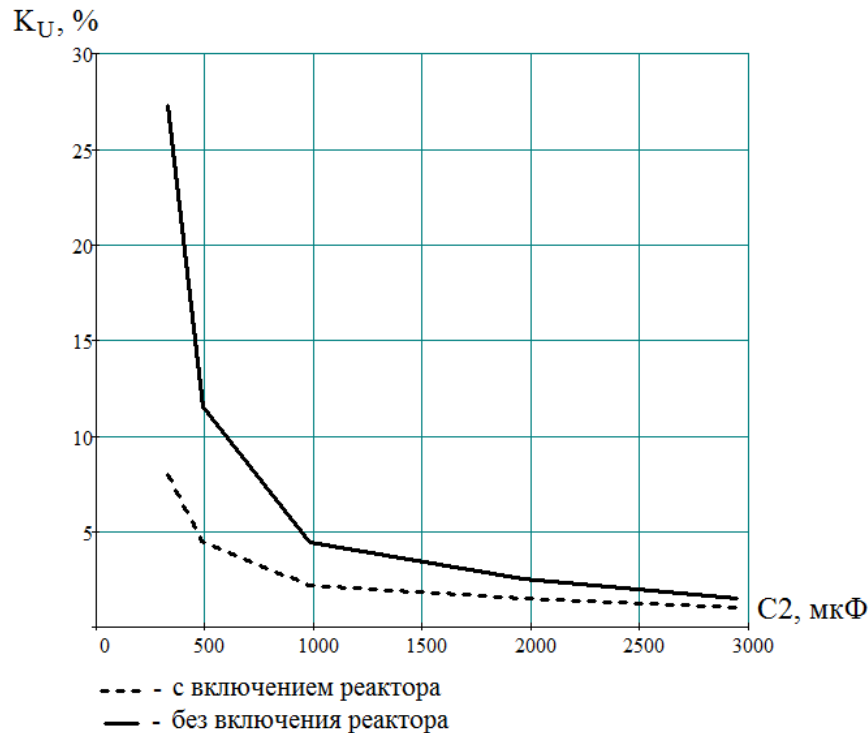


Рисунок 4.13 - Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения от ёмкости фильтра $C2$ для длины линии 1 км

На рисунке 4.14 приведена зависимость коэффициента K_U от ёмкости фильтра $C2$ для длины линии равной 9 км. Из графиков видно, что коэффициент K_U без включения реактора достигает значения равного 33,8 % при $C2 = 327,6$ мкФ. При увеличении ёмкости коэффициент K_U уменьшается и при $C2 = 2948$ мкФ коэффициент K_U равен 2,5 %. При включении реактора коэффициент K_U уменьшается и изменяется от 11,2 % при $C2 = 327,6$ мкФ до 1,5 % при $C2 = 2948$ мкФ.

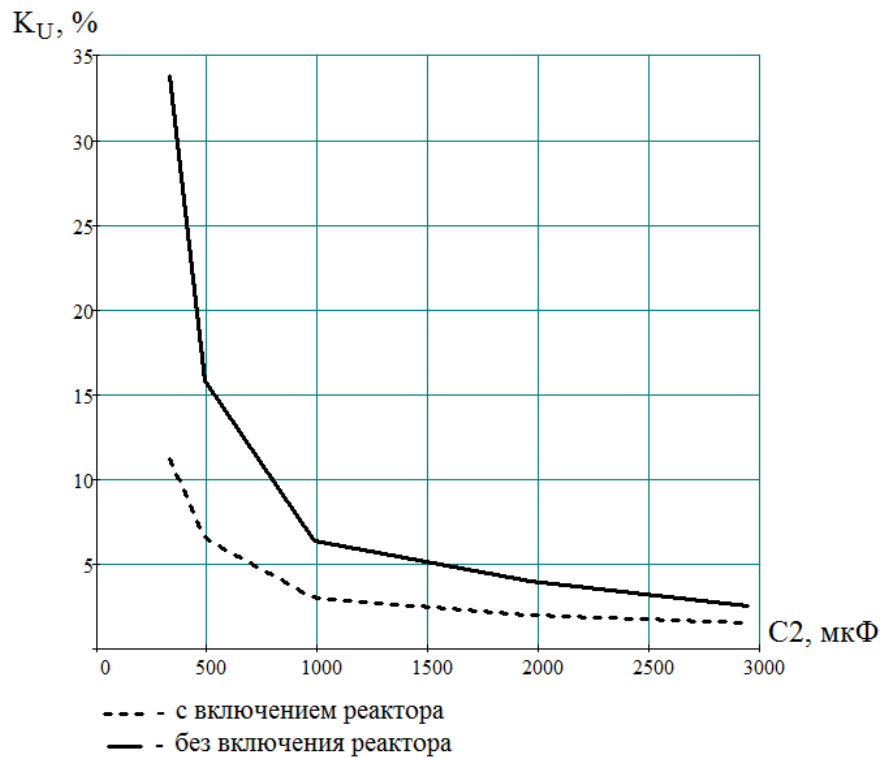


Рисунок 4.14 - Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения от ёмкости фильтра $C2$ для длины линии 9 км

На основании выполненных исследований можно сделать следующие выводы.

Увеличение ёмкости $C2$, независимо от длины линии, приводит к существенному уменьшению коэффициента K_U . Включение сетевого реактора приводит к уменьшению коэффициента K_U примерно в 1,5 раза.

Реактивная мощность с увеличением ёмкости конденсатора $C2$ практически не меняется как при отсутствии реактора, так и при его включении (рисунок 4.15).

Выполненные исследования позволили получить зависимости, позволяющие выбрать минимальную величину ёмкости $C2$ фильтра АВН, при которой обеспечивается заданный коэффициент K_U .

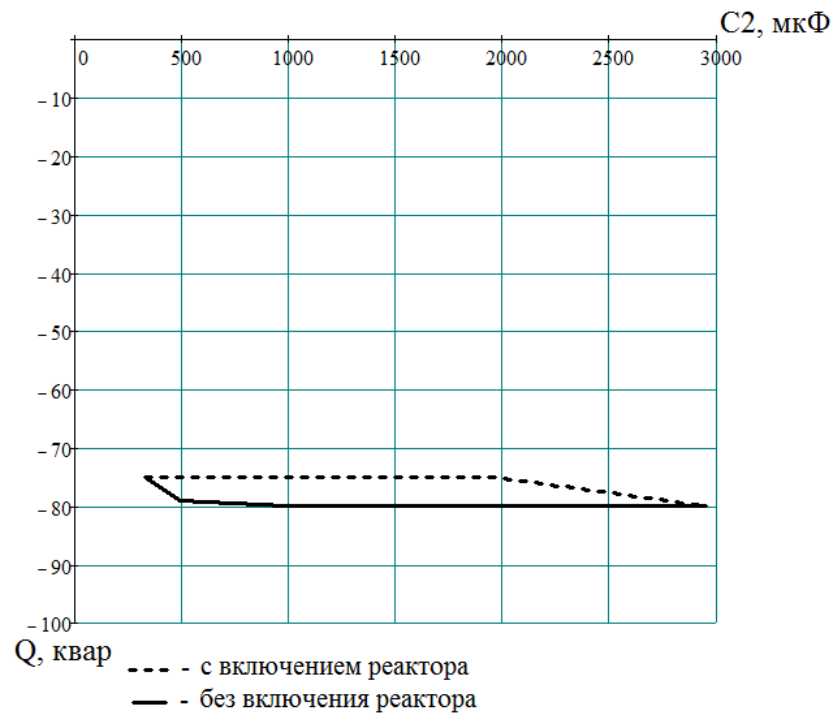


Рисунок 4.15 - Зависимость реактивной мощности от ёмкости фильтра C_2
для длины линии 9 км

Рассмотрим влияние фильтра АВН на спектр напряжения на входе АВН и на вводе 6 кВ буровой установки.

На рисунке 4.16 приведен спектр напряжения на входе АВН при отсутствии фильтра АВН. Подобный характер спектра характерен для ШИМ по синусоидальному закону. В низкочастотной части спектр содержит только основную гармонику с частотой 50 Гц ($k = 1$), а в области высоких частот группы комбинационных гармоник, расположенные вблизи частот, кратных несущей частоте ШИМ $f_{\text{нес}}$ [77].

На рисунке 4.17 представлен гармонический состав напряжения на входе АВН при включении фильтра. Сравнение рисунков 4.16 и 4.17 показывает, что включение фильтра практически не влияет на спектр напряжения на входе АВН.

На рисунке 4.18 приведен спектр напряжения на вводе 6 кВ БУ при отсутствии фильтра АВН. На рисунке 4.19 представлен гармонический состав напряжения на вводе 6 кВ БУ при включении фильтра. Сравнение рисунков 4.18 и 4.19 показывает, что включение фильтра позволяет существенно уменьшить значения

высших гармоник в спектре напряжения на вводе 6 кВ БУ и тем самым получить форму напряжения близкую к синусоиде.

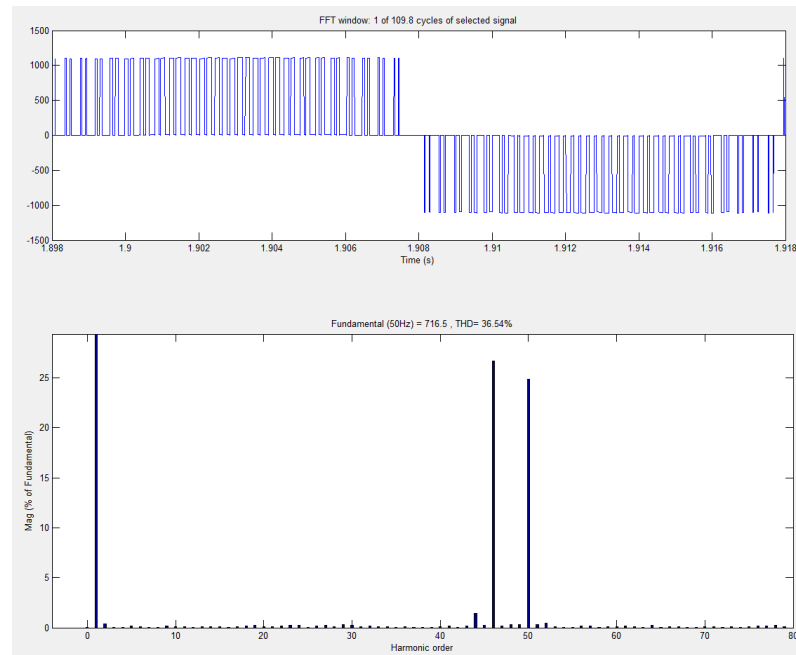


Рисунок 4.16 - Гармонический состав напряжения на входе АВН при отсутствии фильтра АВН. Длина линии 7 км

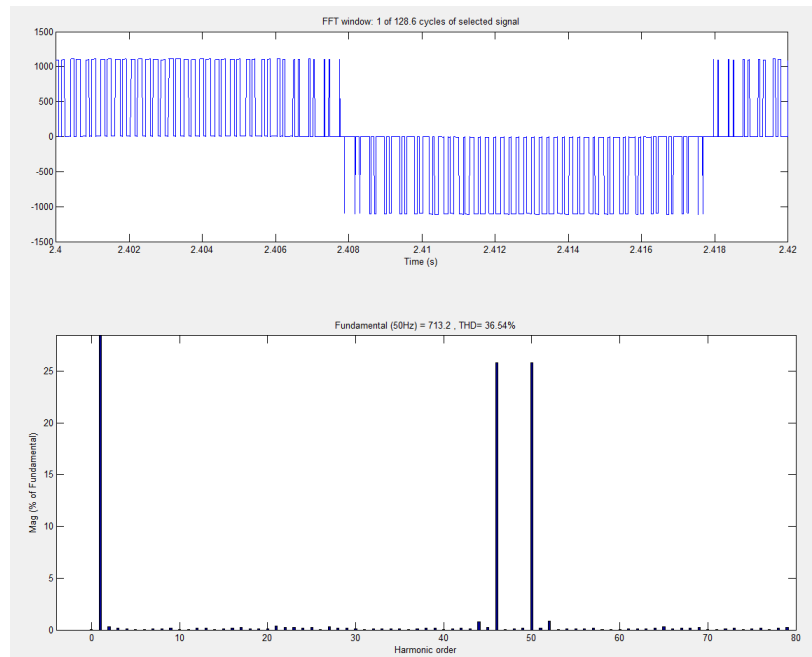


Рисунок 4.17 - Гармонический состав напряжения на входе АВН при включении фильтра АВН. Длина линии 7 км

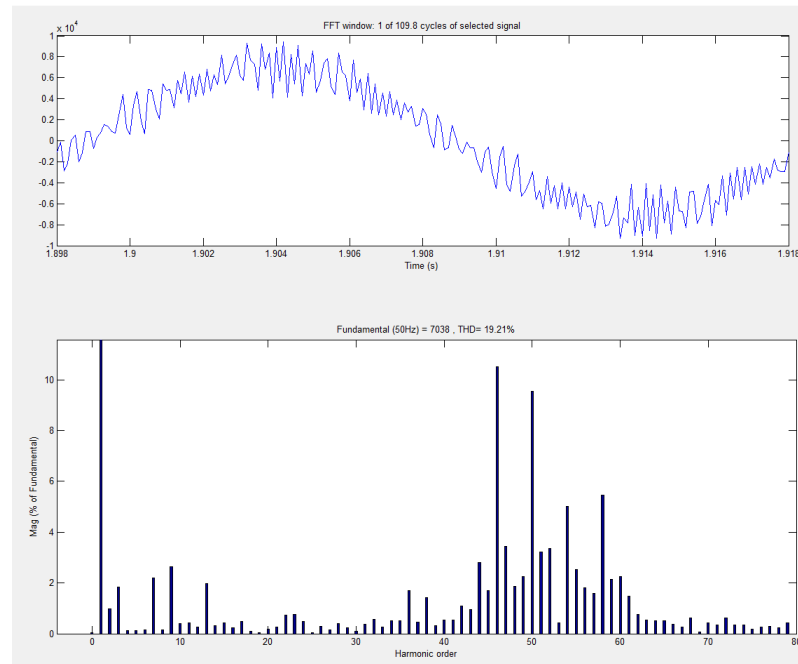


Рисунок 4.18 - Гармонический состав напряжения на вводе 6 кВ буровой установки при отсутствии фильтра АВН. Длина линии 7 км

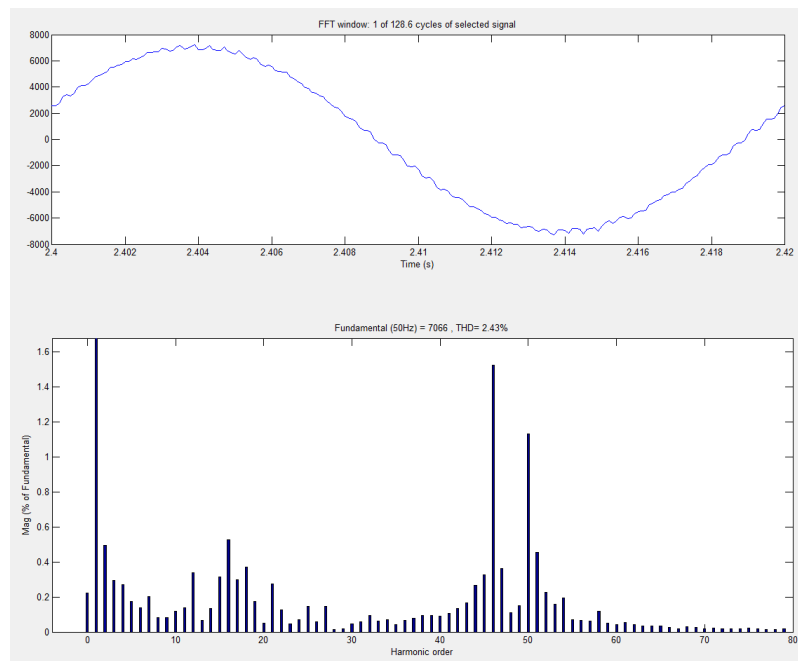


Рисунок 4.19 - Гармонический состав напряжения на вводе 6 кВ буровой установки при включении фильтра АВН. Длина линии 7 км

4.3. Особенности влияния АВН на качество электроэнергии при питании БУ с частотно-регулируемым электроприводом от линии электропередачи

Созданная компьютерная модель позволяет выполнить расчёты различных ПКЭ при питании ЭТК БУ с ЧРЭП от линии 6 кВ.

Актуальной задачей является обеспечение работоспособности БУ с питанием от существующих маломощных линий 6 кВ [27]. Поэтому все расчёты приведены в виде зависимости от длины линии L с заданным сечением. Такая форма представления зависимостей позволяет обосновать применение АВН в составе преобразователя частоты.

Исследования проводились для тех же условий работы электроприводов и системы электроснабжения, которые были приняты при исследовании влияния ступенчатого ФКУ на КЭ в случае питания БУ от ЛЭП 6 кВ (раздел 3.3).

При проведении исследований значения несущей частоты ШИМ взяты равными 9600 и 2400 Гц. Сигналы задания реактивного тока активного выпрямителя 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.

Графики, иллюстрирующие результаты расчётов, приведены на рисунках 4.20–4.29 [80, 84]. Расчёты выполнены для следующих вариантов: $i_y^* = 0$ А, фильтр отключён; $i_y^* = 500$ А, фильтр отключён; $i_y^* = 0$ А, фильтр включён; $i_y^* = 500$ А, фильтр включён.

Результаты исследований для значений несущей частоты ШИМ 9600 Гц.

На рисунке 4.20 приведены зависимости активной мощности при изменении длины линии.

Из графиков следует, что при изменении длины линии активная мощность P практически не изменяется. Включение фильтра АВН, а также изменение сигнала задания реактивного тока i_y^* также не влияет на величину P .

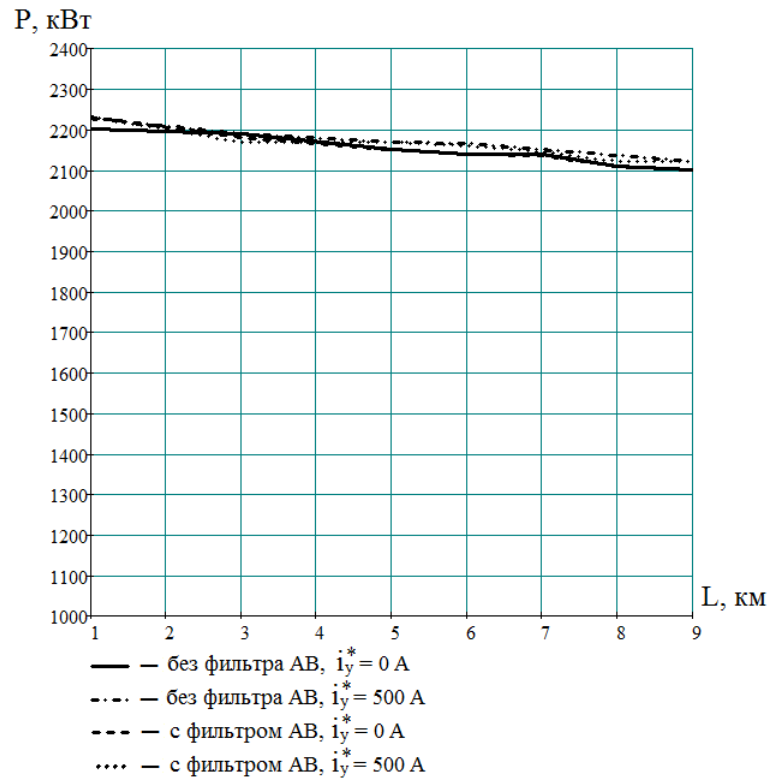


Рисунок 4.20 - График активной мощности в зависимости от длины линии для ЧРЭП БУ с АВ при $f_{\text{нес ШИМ}} = 9600 \text{ Гц}$.

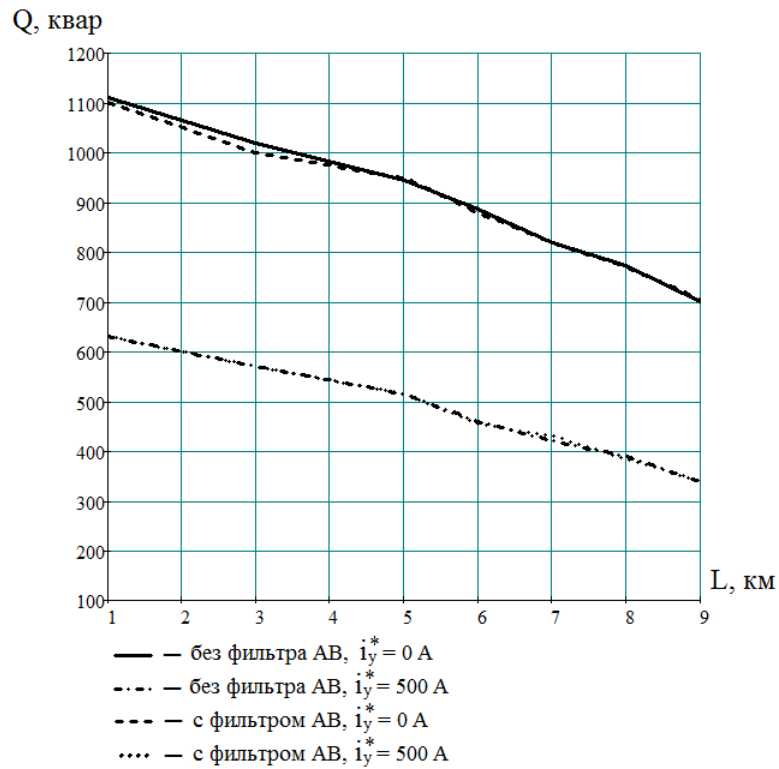


Рисунок 4.21 - График реактивной мощности в зависимости от длины линии для ЧРЭП БУ с АВ при $f_{\text{нес ШИМ}} = 9600 \text{ Гц}$

На рисунке 4.21 приведены зависимости реактивной мощности при изменении длины линии. Из графиков следует, что при увеличении длины линии Q уменьшается в связи с уменьшением напряжения на вводе линии. Включение фильтра АВН не влияет на величину реактивной мощности. Q значительно уменьшается при увеличении задания реактивного тока i_y^* от нуля до 500 А (практически в 2 раза).

На рисунке 4.22 приведена зависимость $\cos \varphi$ при изменении длины линии. Из графиков следует, что при увеличении длины линии $\cos \varphi$ увеличивается в связи с уменьшением Q на вводе линии. Включение фильтра АВН не влияет на величину $\cos \varphi$. Коэффициент мощности увеличивается при увеличении задания реактивного тока i_y^* от нуля до 500 А в среднем с 0,91 до 0,97.

На рисунке 4.23 приведена зависимость δU при изменении длины линии. Из графиков следует, что при увеличении длины линии δU увеличивается, однако увеличение задания реактивного тока i_y^* от нуля до 500 А приводит к уменьшению δU . Включение фильтра АВН не влияет на величину δU с увеличением длины линии.

На рисунке 4.24 приведена зависимость коэффициента K_U при изменении длины линии. Из графиков следует, что при увеличении длины линии коэффициент K_U возрастает. Увеличение задания реактивного тока i_y^* от нуля до 500 А не влияет на величину коэффициента K_U . При отсутствии фильтра АВН коэффициент K_U с увеличением длины линии значительно возрастает и превышает нормативное значение 5 % при всех длинах линии. Включение фильтра АВН приводит к существенному уменьшению коэффициента K_U до значений меньших нормативного значения 5 %, в том числе при длине линии 9 км.

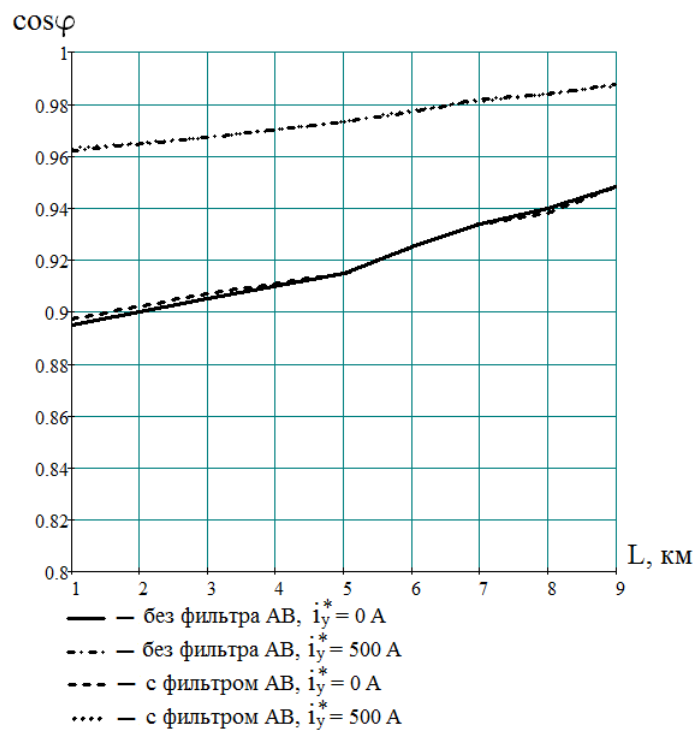


Рисунок 4.22 - График коэффициента мощности в зависимости от длины линии для ЧРЭП БУ с АВ при $f_{\text{нес ШИМ}} = 9600$ Гц

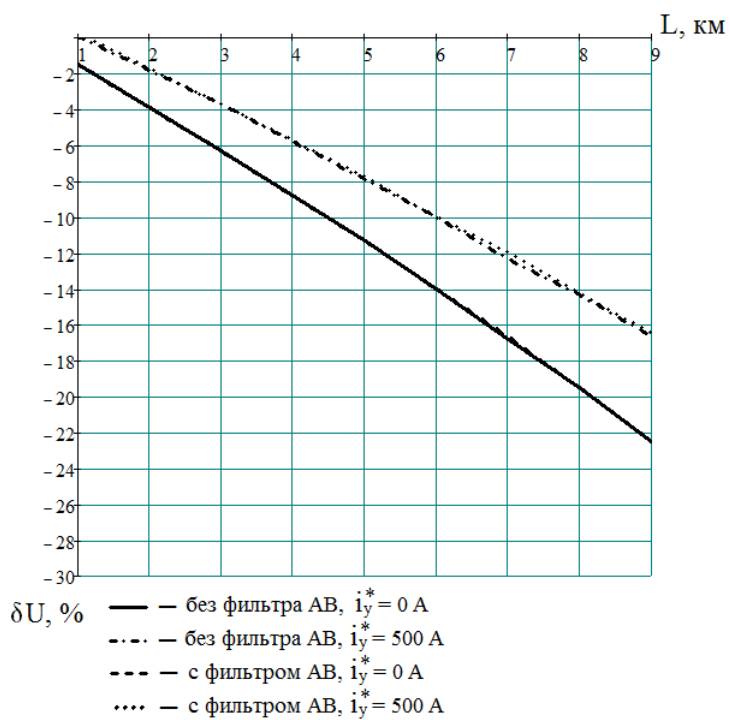


Рисунок 4.23 - График отклонения напряжения в зависимости от длины линии для ЧРЭП БУ с АВ при $f_{\text{нес ШИМ}} = 9600$ Гц

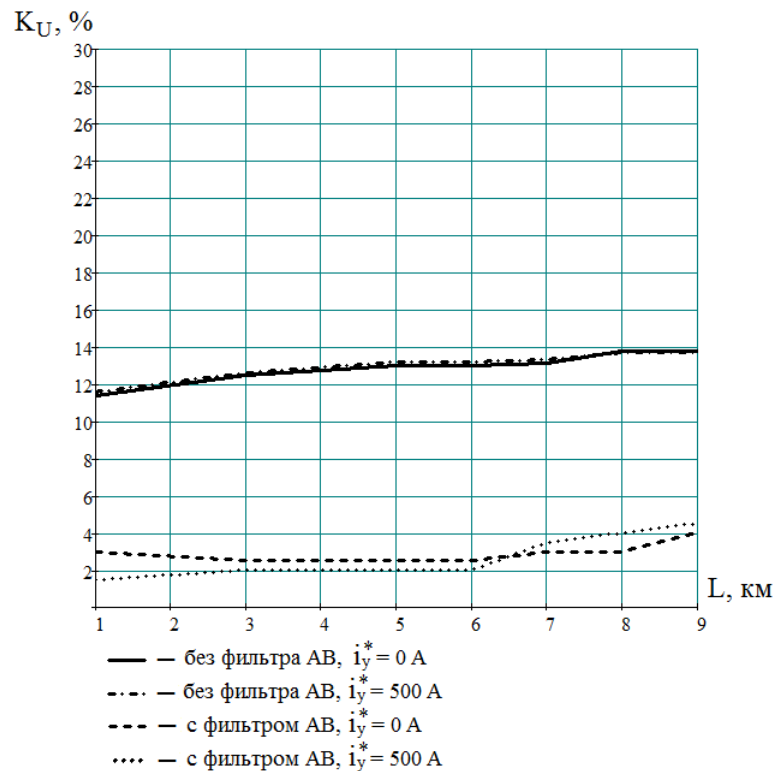


Рисунок 4.24 - График суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения в зависимости от длины линии для ЧРЭП БУ с АВ при $f_{\text{нес ШИМ}} = 9600$ Гц

Результаты исследований для значений несущей частоты ШИМ 2400 Гц.

На рисунке 4.25 приведена зависимость активной мощности P при изменении длины линии. Из графиков следует, что при изменении длины линии P практически не изменяется. Включение фильтра АВН, а также изменение сигнала задания реактивного тока i_y^* также не влияет на величину P . Сравнение результатов исследований для значений несущей частоты ШИМ 9600 Гц и 2400 Гц показывает, что её величина также не влияет на величину P .

На рисунке 4.26 приведена зависимость реактивной мощности Q при изменении длины линии. Из графиков следует, что при увеличении длины линии Q уменьшается в связи с уменьшением напряжения на вводе линии. Включение фильтра АВН не влияет на величину реактивной мощности. Q значительно уменьшается при увеличении задания реактивного тока i_y^* от нуля до 500 А (практически в 2 раза).

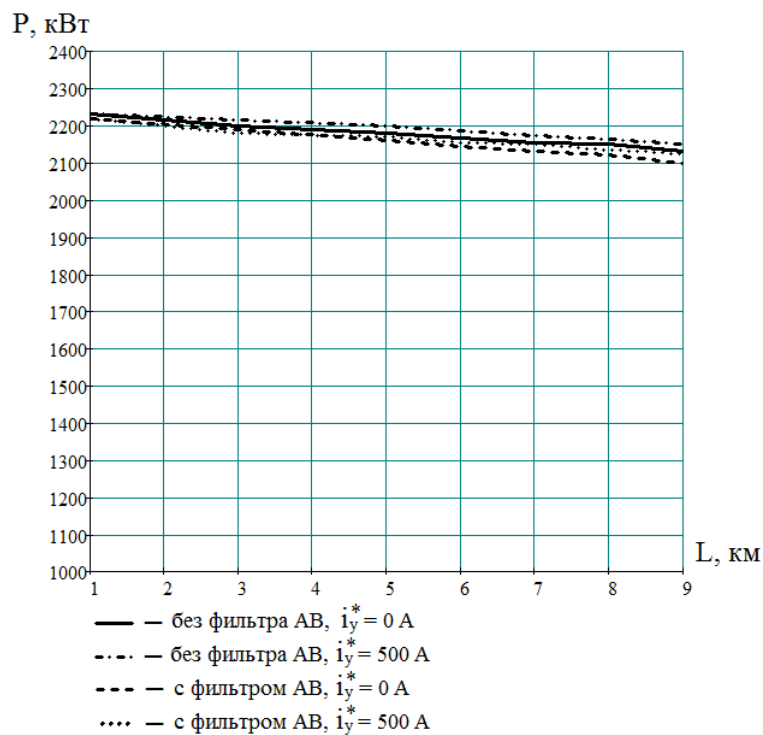


Рисунок 4.25 - График активной мощности в зависимости от длины линии для ЧРЭП БУ с АВ при $f_{\text{нес ШИМ}} = 2400 \text{ Гц}$

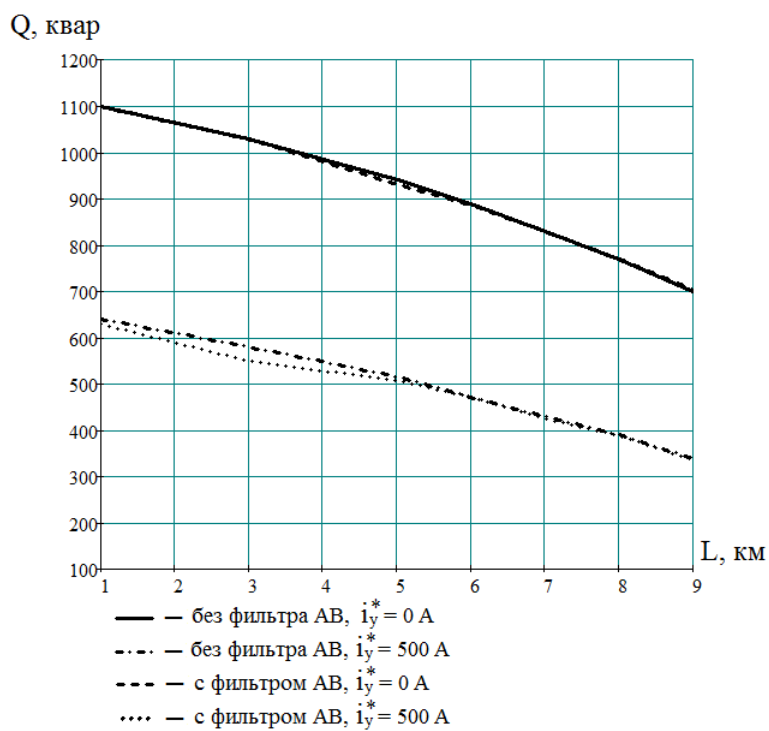


Рисунок 4.26 - График реактивной мощности в зависимости от длины линии для ЧРЭП БУ с АВ при $f_{\text{нес ШИМ}} = 2400 \text{ Гц}$

На рисунке 4.27 приведена зависимость $\cos \varphi$ при изменении длины линии. Из графиков следует, что при увеличении длины линии $\cos \varphi$ увеличивается в связи с уменьшением Q на вводе линии. Включение фильтра АВН не влияет на величину $\cos \varphi$. Коэффициент мощности увеличивается при увеличении задания реактивного тока i_y^* от нуля до 500 А (в среднем с 0,92 до 0,97).

Сравнение результатов исследований для значений несущей частоты ШИМ 9600 Гц и 2400 Гц показывает, что её величина практически не влияет на величину Q и $\cos \varphi$.

На рисунке 4.28 приведена зависимость δU при изменении длины линии.

Из графиков следует, что при увеличении длины линии δU увеличивается. Увеличение задания реактивного тока i_y^* от нуля до 500 А приводит к уменьшению δU . Включение фильтра АВН не влияет на величину δU с увеличением длины линии. Сравнение результатов исследований для значений несущей частоты ШИМ 9600 Гц и 2400 Гц показывает, что её величина не влияет на величину δU .

На рисунке 4.29 приведена зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения при изменении длины линии. Из графиков видно, что при увеличении длины линии и отсутствии фильтра коэффициент K_U возрастает от 22 до 40 %, что значительно больше нормативного значения 5 %.

Увеличение задания реактивного тока i_y^* от нуля до 500 А незначительно влияет на величину коэффициента K_U .

Включение фильтра АВН приводит к уменьшению коэффициента K_U более чем в 10 раз. Его значение в этом случае при изменении длины линии не превышает нормативного значения 5 %.

Сравнение результатов исследований для значений несущей частоты ШИМ 9600 Гц и 2400 Гц показывает, что при её уменьшении и отсутствии фильтра АВН коэффициент K_U возрастает более чем в 2 раза.

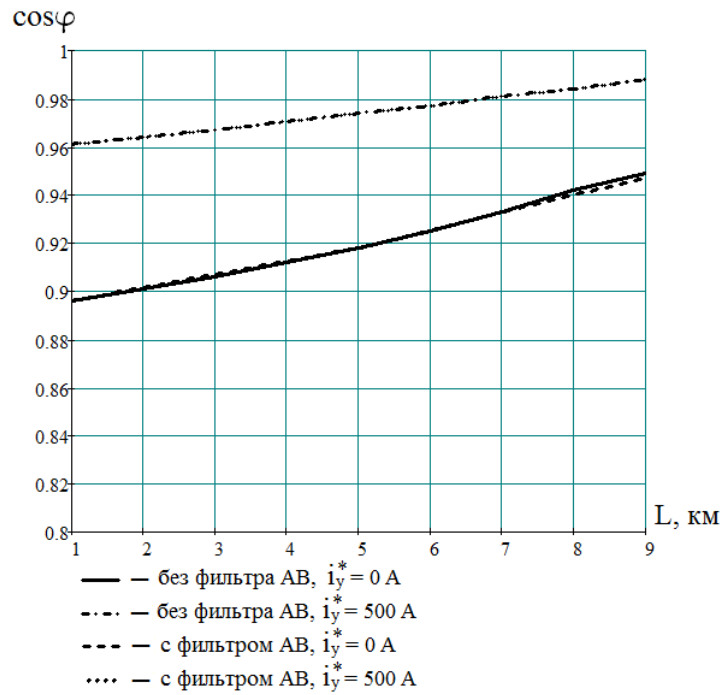


Рисунок 4.27 - График коэффициента мощности в зависимости от длины линии для ЧРЭП БУ с АВ при $f_{\text{нес ШИМ}} = 2400$ Гц

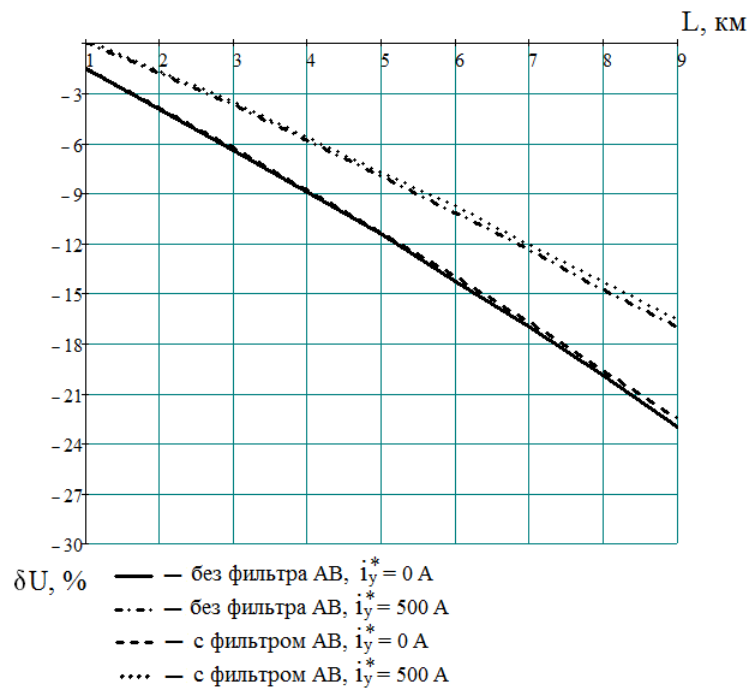


Рисунок 4.28 - График отклонения напряжения в зависимости от длины линии для ЧРЭП БУ с АВН при $f_{\text{нес ШИМ}} = 2400$ Гц

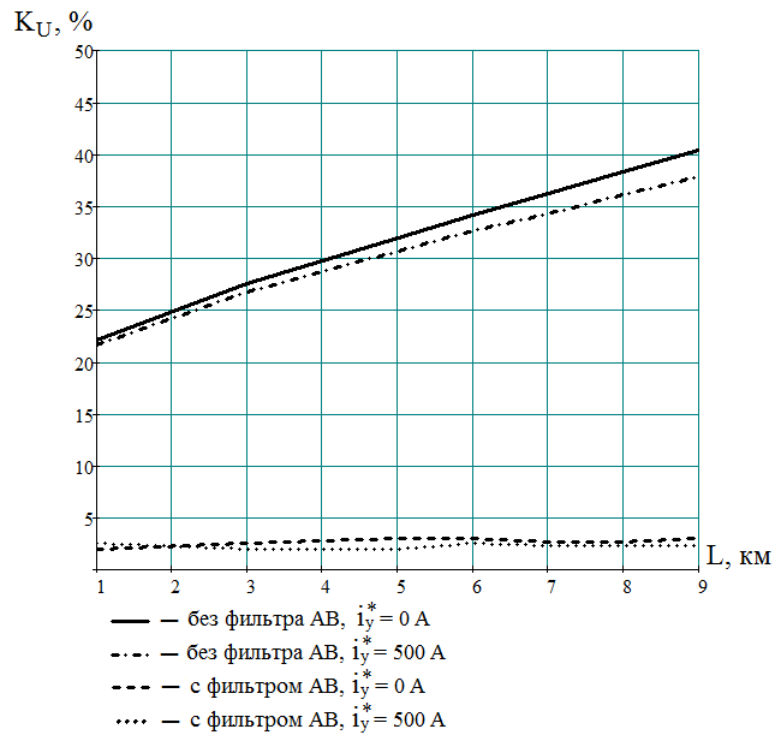


Рисунок 4.29 - График суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения в зависимости от длины линии для ЧРЭП БУ с АВН при

$$f_{\text{нес ШИМ}} = 2400 \text{ Гц}$$

На основании выполненных исследований можно сделать следующие выводы [80, 85].

Увеличение задания емкостного реактивного тока АВ приводит к уменьшению Q , увеличению $\cos \varphi$ и уменьшению δU .

Увеличение несущей частоты ШИМ приводит к уменьшению коэффициента K_U .

Эффективным средством улучшения формы напряжения сети при заданной несущей частоте является применение АВН совместно с фильтром.

Выводы

1. Установлено, что увеличение несущей частоты ШИМ, а также включение фильтра на стороне переменного тока АВН существенно уменьшают искажения синусоидальной формы напряжения сети на вводе 6 кВ буровой установки.

2. Увеличение задания емкостного реактивного тока АВ уменьшает реактивную мощность, увеличивает коэффициент мощности и уменьшает отклонение напряжения на вводе 6 кВ буровой установки.

3. При заданных условиях эксплуатации БУ для существующей системы электроснабжения выбор АВН должен осуществляться с учётом несущей частоты ШИМ и наличия фильтра АВН. При увеличении длины питающей линии необходимо увеличивать несущую частоту АВН и включать фильтр. Выбор несущей частоты ШИМ или параметров фильтра без учёта свойств системы электроснабжения может приводить к увеличению суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения выше предельно допустимых значений.

3. Предложена методика выбора параметров фильтра АВН, основанная на построении для выбранной схемы фильтра частотной характеристики коэффициента передачи фильтра K для разных значений параметров фильтра и уточнении методами компьютерного моделирования параметров фильтра, при которых будет обеспечен заданный коэффициент гармонических составляющих напряжения.

Особенностью рассмотренной методики является учёт индуктивных и активных сопротивлений системы электроснабжения ЭТК БУ при выборе параметров фильтра.

ГЛАВА 5. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ БУРОВЫХ УСТАНОВОК С ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

5.1. Структура и методика расчёта регуляторов САР АВН по напряжению и реактивной мощности

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 независимо от длины питающей линии 6 кВ и нагрузки электроприводов необходимо его автоматическое регулирование при помощи отрицательной обратной связи (о. о. с.) по напряжению на вводе 6 кВ БУ (на стороне высокого напряжения преобразовательного трансформатора Т).

Аналогично, для обеспечения постоянства Q независимо от длины питающей линии 6 кВ и нагрузки электроприводов необходимо её автоматическое регулирование при помощи о. о. с. по реактивной мощности на вводе 6 кВ БУ.

На рисунке 5.1 приведена функциональная схема АВН с САР напряжения для случая, когда регулируемой величиной является действующее значение основной гармоники линейного напряжения $U_{1л}$ на вводе 6 кВ БУ. Данная схема получена из функциональной схемы векторной САР АВН (рисунок 2.8) при добавлении о. о. с. по $U_{1л}$ и регулятора напряжения. Действующее значение основной гармоники линейного напряжения $U_{1л}$ вычисляется в блоке вычисления $U_{1л}$, на вход которого поступают измеренные мгновенные значения напряжения сети.

На рисунке 5.2 приведена функциональная схема АВН с САР реактивной мощности Q . Данная схема получена из функциональной схемы векторной САР АВН (рисунок 2.8) при добавлении о. о. с. по Q на вводе 6 кВ в БУ и регулятора реактивной мощности. Реактивная мощность вычисляется в блоке вычисления Q ,

на вход которого поступают измеренные мгновенные значения тока и напряжения сети.

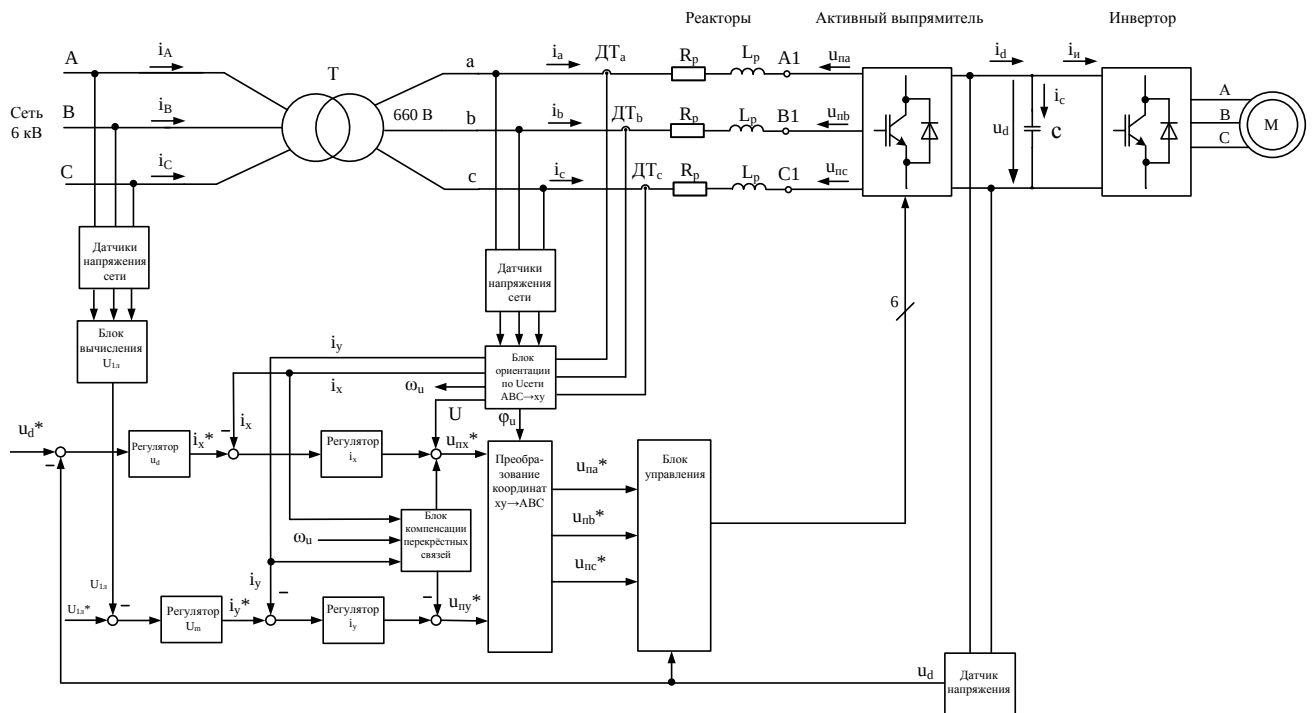


Рисунок 5.1 – Функциональная схема АВН с САР напряжения

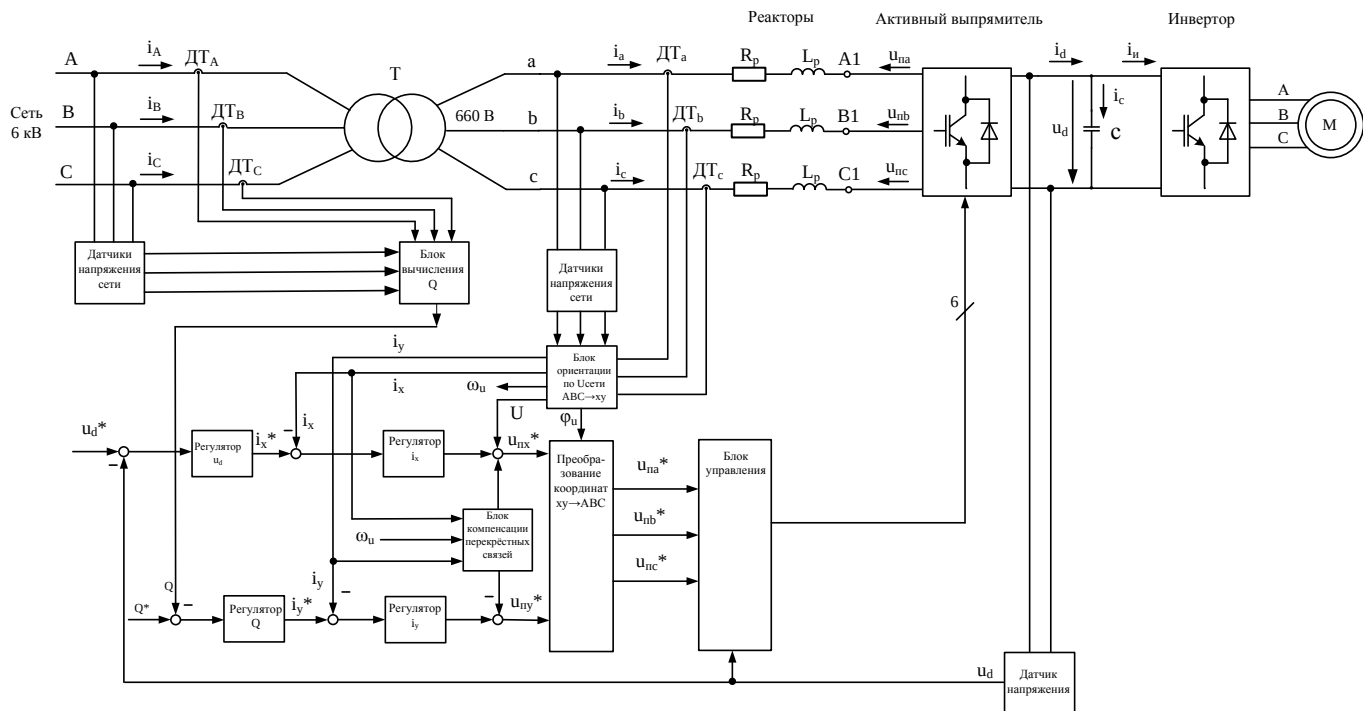


Рисунок 5.2 – Функциональная схема АВН с САР реактивной мощности

На рисунке 5.3, а приведена структурная схема САР АВН для случая, когда в качестве регулируемой величины выбрана реактивная мощность Q системы электроснабжения БУ. Структурная схема выполнена по принципу подчинённого регулирования координат, которая аналогична рассмотренной в [89].

При построении структурной схемы реактивная мощность Q принимается равной:

$$Q = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{лр}} , \quad (5.1)$$

где $U_{\text{ном}} = 6$ кВ – номинальное линейное напряжение;

$I_{\text{лр}}$ – реактивный ток линии электропередачи 6 кВ.

Реактивный ток линии 6 кВ равен:

$$I_{\text{лр}} = I'_y + I_p , \quad (5.2)$$

где $I'_y = i_y / k_{\text{тр}}$ – реактивный ток АВН, приведённый к напряжению 6 кВ; $k_{\text{тр}}$ – коэффициент трансформации трансформатора; i_y – реактивный ток АВН; I_p – реактивный ток, создаваемый нагрузкой, включённой на вводе БУ 6 кВ.

Внутренним контуром является замкнутый контур регулирования реактивного тока АВН i_y (рисунок 2.10, а). Передаточная функция регулятора реактивного тока $W_{\text{рты}}$ находится по формуле (2.25).

Внешним контуром является контур регулирования Q . В контур регулирования Q входят: контур регулирования реактивного тока i_y , регулятор реактивной мощности Q , пропорциональные звенья с передаточными коэффициентами $K_i = 1/k_{\text{тр}}$ и $K_Q = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}$, элемент суммирования реактивных токов в соответствии с (5.2). Реактивный ток I_p (рисунок 5.3, а) является возмущающим воздействием на объект управления.

Коэффициент обратной связи по реактивной мощности принят равным 1.

Передаточная функция регулятора Q находится по структурной схеме САР АВН (рисунок 5.3, а) в соответствии с методикой, изложенной в [89]. Её значение равно:

$$W_{\text{PQ}} = \frac{1}{T_{\text{иQ}} \cdot p} , \quad (5.3)$$

где $T_{иQ} = a_Q \cdot a_T \cdot T_n \cdot K_i \cdot K_Q$ – постоянная времени регулятора; a_Q – коэффициент настройки регулятора реактивной мощности.

Регулятор реактивной мощности PQ является И-регулятором.

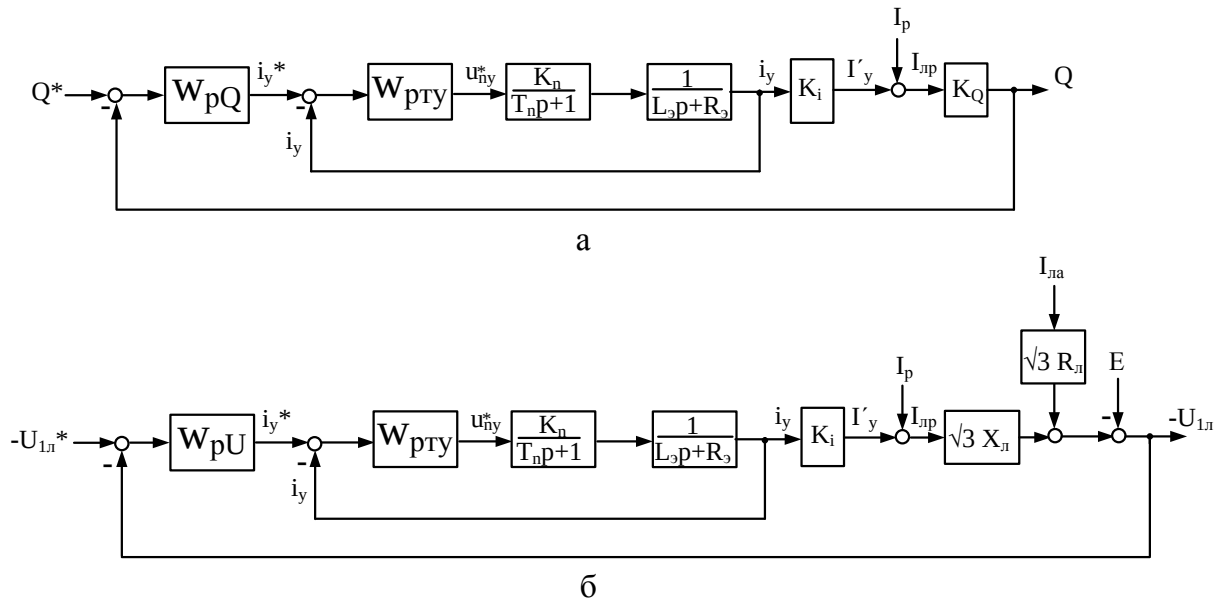


Рисунок 5.3 - Структурные схемы САР АВН:

а – с о. о. с. по реактивной мощности; *б* – с о. о. с. по напряжению

На рисунке 5.3, б приведена структурная схема САР АВН для случая, когда в качестве регулируемой величины выбрано линейное напряжение $U_{1л}$ на вводе в БУ 6 кВ. Структурная схема выполнена по принципу подчинённого регулирования координат, которая аналогична рассмотренной в [89].

При построении структурной схемы САР удобно воспользоваться формулой для определения потери линейного напряжения ΔU в линии электропередачи 6 кВ [10]:

$$\Delta U = \sqrt{3} (I_{ла} R_{л} + I_{лр} X_{л}), \quad (5.4)$$

где $I_{ла}$ – активный ток ЛЭП 6 кВ;

$R_{л}$, $X_{л}$ – активное и индуктивное сопротивления системы электроснабжения при питании от линии 6 кВ (при питании от СГ – активное и индуктивное сопротивления СГ).

При питании от линии электропередачи:

$$X_{\text{л}} = X_{\text{л6}} + X_{\text{сэ}},$$

где $X_{\text{л6}}$ – индуктивное сопротивление линии 6 кВ;

$X_{\text{сэ}}$ – индуктивное сопротивление системы электроснабжения от ЦПП 110/35/6 кВ до линии электропередачи 6кВ;

$$R_{\text{л}} = R_{\text{л6}} + R_{\text{сэ}};$$

$R_{\text{л6}}$ – активное сопротивление линии 6 кВ;

$R_{\text{сэ}}$ – активное сопротивление системы электроснабжения от ЦПП 110/35/6 кВ до линии электропередачи 6кВ.

Воспользовавшись равенством (5.4), запишем регулируемую величину – линейное напряжение $U_{\text{л}}$ в следующем виде:

$$U_{\text{л}} = E_{\text{с}} - \Delta U, \quad (5.5)$$

где $E_{\text{с}}$ – источник синусоидальной ЭДС системы электроснабжения, который считается источником бесконечной мощности.

Активный ток $I_{\text{ла}}$ и источник синусоидальной ЭДС $E_{\text{с}}$ могут рассматриваться как внешние воздействия на объект управления.

Внутренним контуром, как и в случае САР реактивной мощности Q , является замкнутый контур регулирования реактивного тока АВН.

Коэффициент обратной связи по напряжению принят равным 1.

Передаточная функция регулятора напряжения находится по структурной схеме САР АВН (рисунок 5.3, б) в соответствии с методикой, изложенной в [89]. Значение передаточной функции регулятора напряжения равно:

$$W_{\text{PU}} = \frac{1}{T_{\text{иU}} \cdot p}, \quad (5.6)$$

где $T_{\text{иU}} = a_{\text{U}} a_{\text{T}} T_{\text{п}} K_{\text{I}} X_{\text{л}} \sqrt{3}$ – постоянная времени регулятора, a_{U} – коэффициент настройки регулятора напряжения PU.

Регулятор напряжения, так же как регулятор реактивной мощности, является И-регулятором.

Постоянная времени $T_{иU}$ регулятора напряжения, в отличие от постоянной времени регулятора реактивной мощности $T_{иQ}$, зависит от индуктивного сопротивления X_L и, следовательно, от длины линии 6 кВ. При изменении длины линии 6кВ, чтобы получить оптимальные переходные процессы, регулятор напряжения необходимо перестраивать.

5.2. Исследование АВН с отрицательными обратными связями по напряжению и реактивной мощности в установившемся режиме при питании от линии электропередачи

В данном разделе приведены результаты исследований АВН с о. о. с. по напряжению и о.о.с. по реактивной мощности [81]. Сигнал задания по напряжению равен 6000 В, по реактивной мощности – 0 квар. Длина линии увеличивается от 1 до 9 км включительно. Несущая частота ШИМ $f_{нес \text{ ШИМ}} = 2400$ Гц. На стороне переменного напряжения АВН включён фильтр.

На рисунке 5.4 приведена зависимость активной мощности от длины линии. Графики активной мощности при регулировании по напряжению и регулировании по реактивной мощности практически совпадают. Из них следует, что активная мощность примерно изменяется от 2250 до 2140 кВт при увеличении длины линии от 1 до 9 км включительно.

На рисунке 5.5 приведена зависимость Q от длины линии. Из графиков следует, что кривая Q при регулировании по напряжению плавно снижается от плюс 875 до минус 1160 квар. При длине линии примерно 3 км происходит перекомпенсация Q . При регулировании по реактивной мощности её значение неизменно при увеличении длины линии и равно заданному значению 0 квар.

На рисунке 5.6 приведена зависимость $\cos \varphi$ от длины линии. Из графиков следует, что кривая $\cos \varphi$ при регулировании по напряжению сначала возрастает от 0,93 до 1 при изменении длины линии от 1 до 3 км, затем при изменении длины линии от 3 до 9 км снижается от 1 до 0,885. Это связано с тем, что при длине ли-

нии примерно 3 км происходит перекомпенсация Q и изменение её знака. При регулировании по реактивной мощности $\cos \varphi$ не изменяется и равен 1 при изменении длины линии.

На рисунке 5.7 приведена зависимость δU от длины линии. Из графиков следует, что кривая при регулировании по напряжению изменяется в пределах от минус 0,7 до 0,5 %, т.е. практически постоянна. При регулировании по Q график меняется в пределах от 2,3 до минус 12,5 % при увеличении длины линии от 1 до 9 км включительно. При длине линии равной 3 км δU становится отрицательным.

На рисунке 5.8 приведена зависимость коэффициента K_U от длины линии. Из графиков следует, что кривая при регулировании по напряжению изменяется в пределах от 1,5 до 2,5 %. При регулировании по реактивной мощности кривая изменяется в пределах от 2 до 3% при увеличении длины линии от 1 до 9 км включительно.

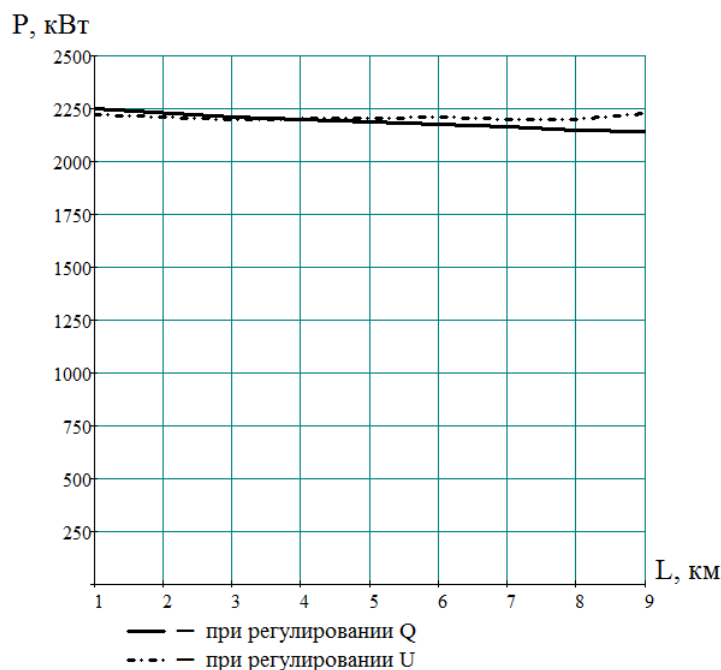


Рисунок 5.4 - График активной мощности в зависимости от длины линии при регулировании по Q и U

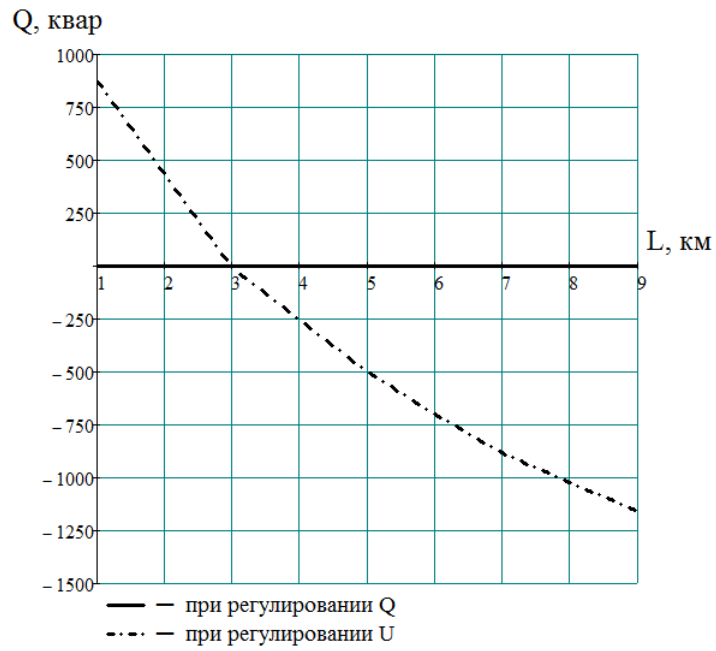


Рисунок 5.5 - График реактивной мощности в зависимости от длины линии при регулировании по Q и U

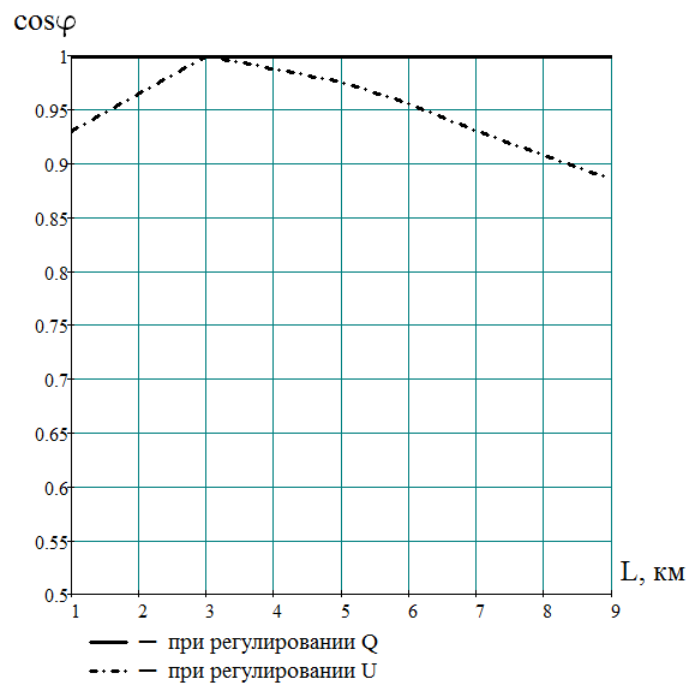


Рисунок 5.6 - График коэффициента мощности в зависимости от длины линии при регулировании по Q и U

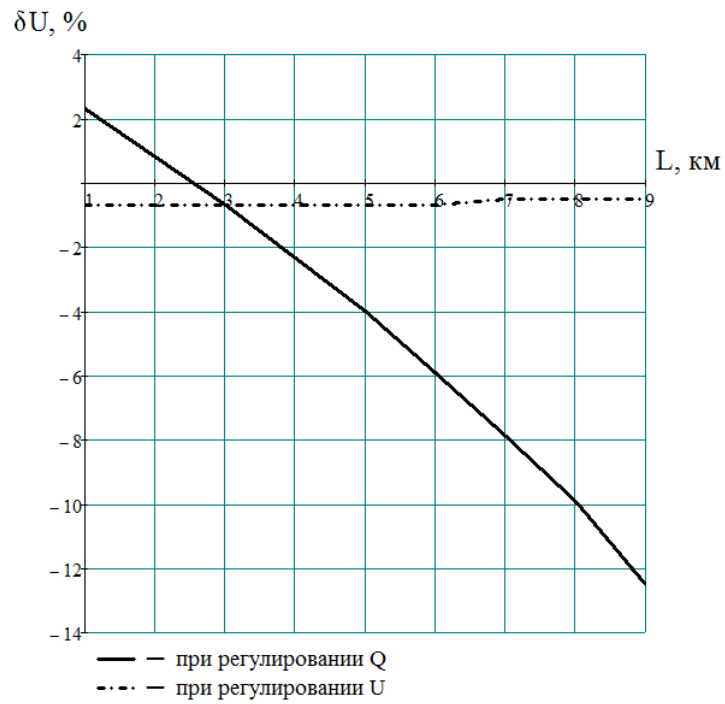


Рисунок 5.7 - График отклонения напряжения электропитания в зависимости от длины линии при регулировании по Q и U

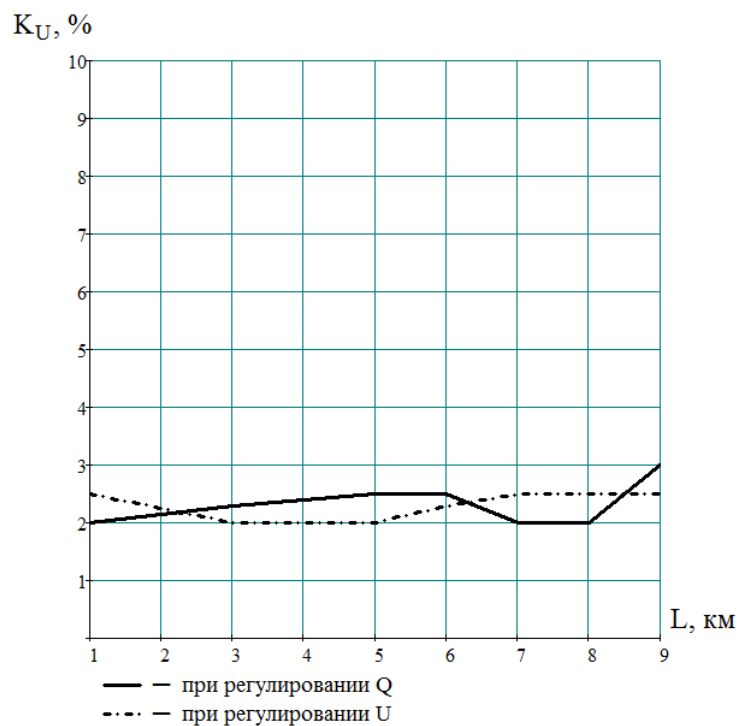


Рисунок 5.8 - График коэффициента K_U в зависимости от длины линии при регулировании по Q и U

Анализ полученных результатов исследования влияния АВН на величину реактивной мощности и ПКЭ позволяет сделать следующие выводы [81].

Применение АВН позволяет получить коэффициент K_U меньше 5 % при изменении длины линии от 1 до 9 км независимо от вида обратной связи.

Применение о.о.с. по Q в системе управления АВН позволяет получить коэффициент мощности равным 1, 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 нормативного значения 10 %.

5.3. Исследование АВН с отрицательной обратной связью по реактивной мощности в установившемся режиме при питании от автономных СГ

В данном разделе рассмотрено влияние АВН на величину реактивной мощности и уровень высших гармоник напряжения сети при питании ЭТК БУ от автономных СГ. Принято, что параллельно работают два СГ. Исследования проводились при несущей частоте ШИМ, равной 2400 Гц. Система управления АВН содержит о. о. с. по Q . Сигнал задания Q принят равным нулю. Рассмотрены два случая: при отсутствии фильтра АВН и при включённом фильтре АВН.

Принято, что регулятор напряжения СГ, не зависимо от нагрузки, поддерживает напряжение на шинах равное 6,3 кВ.

На рисунке 5.9 приведены зависимости активной мощности СГ от активной мощности ЧРЭП.

Из графиков следует, что кривые активной мощности при наличии и отсутствии фильтра АВН совпадают. Активная мощность СГ возрастает примерно от 1230 до 2267 кВт при увеличении активной мощности ЧРЭП от 800 до 1800 кВт. Разность между активными мощностями электроприводов БУ и СГ объясняется наличием дополнительной электрической нагрузки.

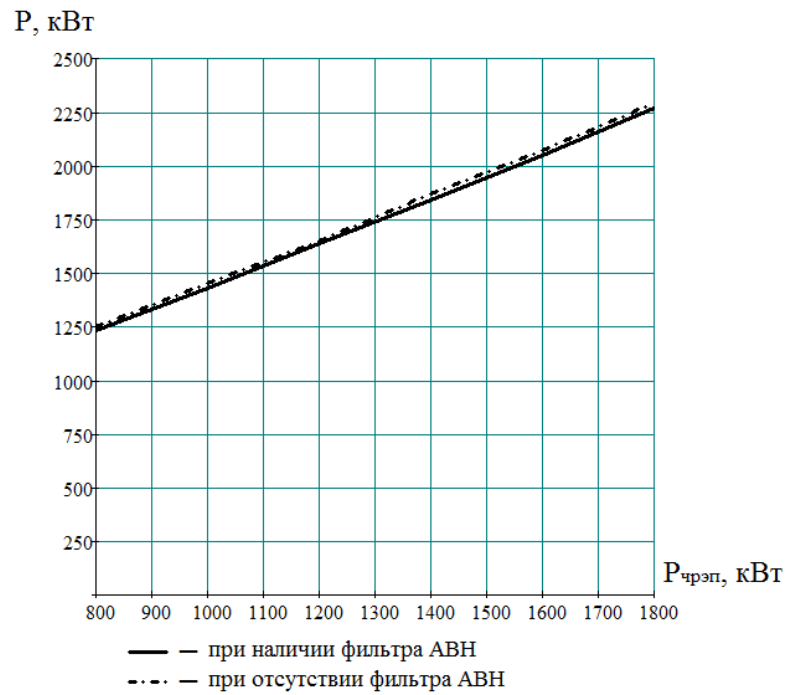


Рисунок 5.9 - График активной мощности СГ от активной мощности ЧРЭП при регулировании по Q

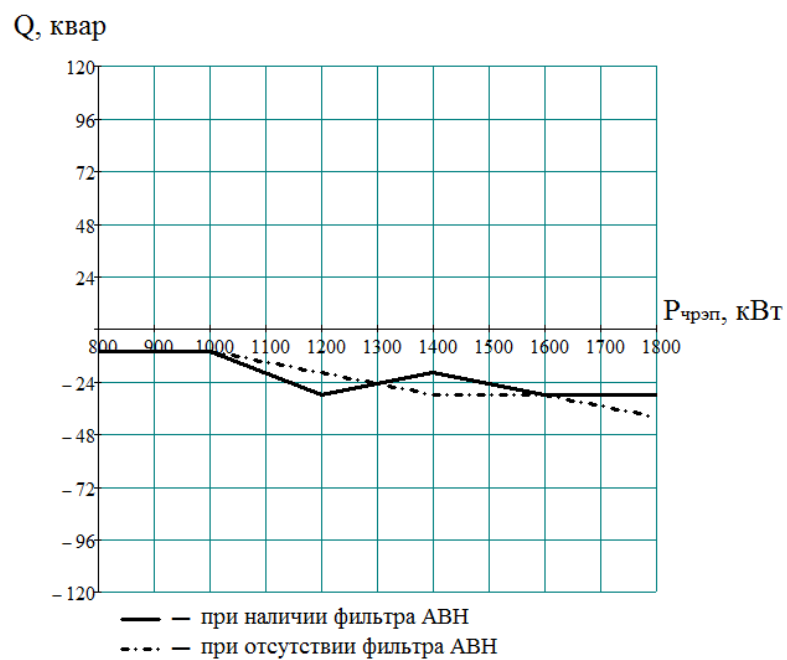


Рисунок 5.10 - График реактивной мощности СГ от активной мощности ЧРЭП при регулировании по Q

На рисунке 5.10 приведены зависимости реактивной мощности СГ от активной мощности ЧРЭП.

Графики реактивной мощности при наличии и отсутствии фильтра АВН практически совпадают. Q изменяется в пределах от минус 10 до минус 40 квар.

На рисунке 5.11 приведены зависимости коэффициента мощности СГ от активной мощности ЧРЭП. Из графиков видно, что кривые $\cos \varphi$ при наличии и отсутствии фильтра АВН совпадают. При увеличении активной мощности ЧРЭП $\cos \varphi$ практически постоянен и равен 1 (более точно 0,99985).

На рисунке 5.12 приведена зависимость полной мощности СГ от активной мощности ЧРЭП. Графики полной мощности при включении фильтра и отсутствии фильтра совпадают. Полная мощность увеличивается в пределах от 1250 до 2290 квар.

На рисунке 5.13 приведена зависимость коэффициента K_U синхронных генераторов от активной мощности ЧРЭП. Из графиков видно, что отсутствие фильтра АВН приводит к значительному искажению синусоидальной формы напряжения сети. Коэффициент K_U в этом случае достигает 23,9 %, что значительно выше нормативного значения 5 %. Однако, включение фильтра приводит к значительному снижению коэффициента K_U . Его величина не превышает нормативного значения 5 %.

На основании выполненных исследований сделаны следующие выводы [81].

Применение АВН с о. о. с. по Q , позволяет практически полностью компенсировать реактивную мощность в системе с автономными СГ не зависимо от нагрузки СГ.

Применение АВН с фильтром приводит к значительному снижению коэффициента K_U . Его величина не превышает нормативного значения 5 %. Отсутствие фильтра приводит к значительному увеличению коэффициента K_U .

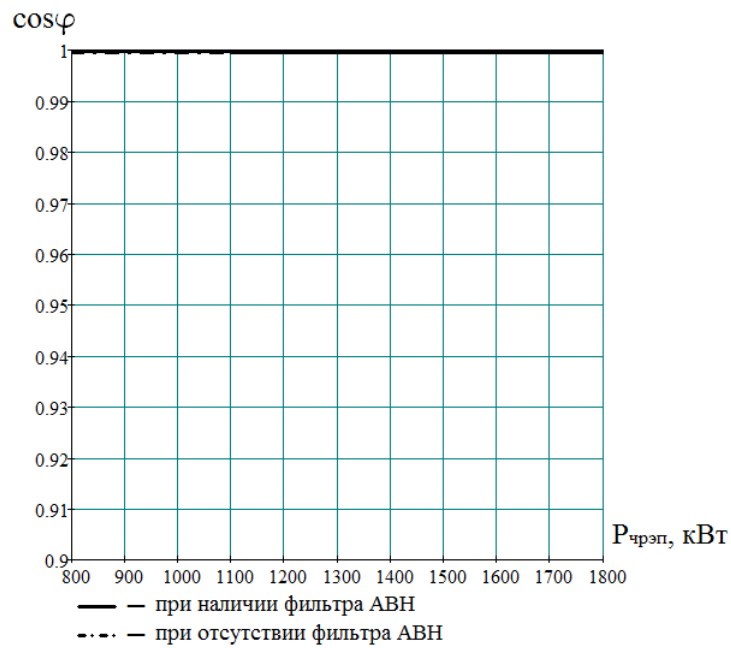


Рисунок 5.11 - График коэффициента мощности СГ от активной мощности ЧРЭП при регулировании по Q

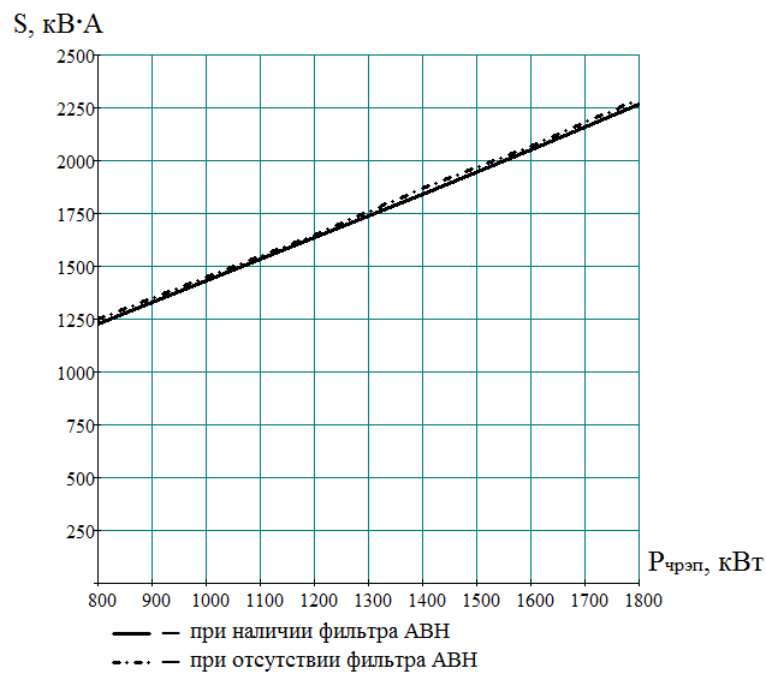


Рисунок 5.12 - График полной мощности СГ от активной мощности ЧРЭП при регулировании по Q

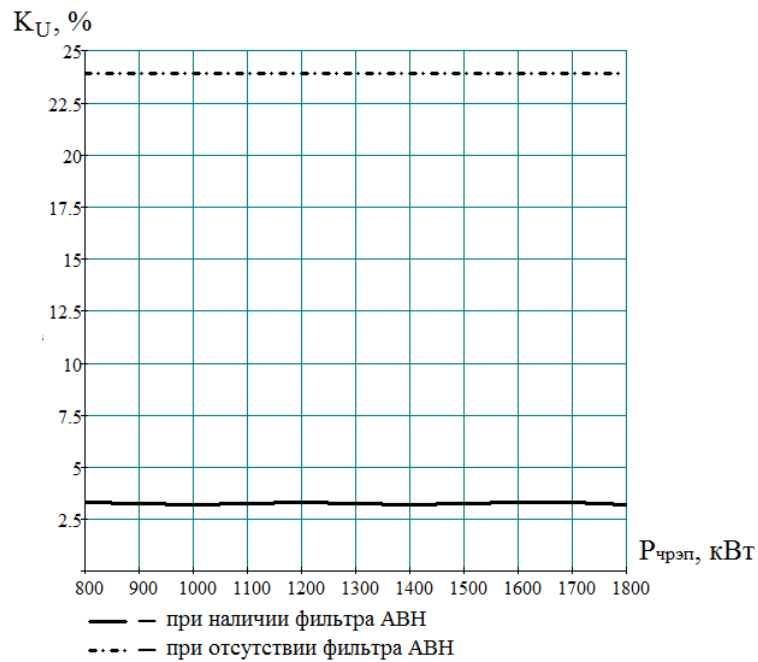


Рисунок 5.13 - График коэффициента K_U СГ от активной мощности ЧРЭП при регулировании по Q

5.4. Переходные режимы при пуске и торможении частотно-регулируемого электропривода с АВН

Разработанная компьютерная модель ЭТК БУ с ЧРЭП и АВН при питании от ЛЭП 6 кВ (рисунок 2.17) позволяет исследовать переходные процессы при пуске и торможении электропривода, оценить правильность выбора и настройки регуляторов АВН [81].

Рассмотрим работу АВН в динамике для случая повторно-кратковременного режима работы электропривода буровой лебёдки. В этом случае имеет место максимальное влияние электропривода на сеть в переходных режимах. Если при пуске и торможении электропривода лебёдки ПКЭ будут находиться в допустимых пределах, то при пуске и торможении других электроприводов БУ (насосов, ротора), для которых имеют место более лёгкие переходные процессы с точки зрения их влияния на сеть, применение АВН также обеспечит требуемые ПКЭ.

Исследование динамических режимов осуществлялось для двух случаев регулирования АВН. В первом случае регулируемой величиной является реактивная мощность Q на вводе БУ 6 кВ, во втором напряжение U на вводе БУ 6 кВ.

Величина задания реактивной мощности была принята равной нулю, а величина задания напряжения была принята равной номинальному напряжению $U_{\text{ном}} = 6$ кВ. Коэффициенты настройки регуляторов взяты равными двум.

Переходные процессы исследовались для наиболее тяжёлого случая, когда вес КБТ равен максимальному 1920 кН. Для этого случая при подъёме КБТ момент сопротивления на валу электродвигателя равен 17,16 кН·м, установившаяся скорость электродвигателя равна 80 рад/с. При спуске КБТ момент сопротивления на валу электродвигателя равен 12,9 кН·м, установившаяся скорость электродвигателя равна минус 80 рад/с. Времена пуска и торможения электропривода при спуске и подъёме КБТ взяты равными 1 с. Реальное время движения на установившейся скорости равно примерно 37 с. Чтобы ускорить процесс решения уравнений, время движения на установившейся скорости в модели взято равным 0,4 с.

На рисунках 5.14-5.33 приведены полученные на модели графики переходных процессов при пуске и торможении электропривода лебёдки [81].

Переходные процессы при регулировании АВН по напряжению сети U и движении КБТ вверх приведены на рисунках 5.14-5.18.

Переходные процессы при регулировании АВН по напряжению сети U и движении КБТ вниз приведены на рисунках 5.19-5.23.

Переходные процессы при регулировании АВН по реактивной мощности Q и движении КБТ вверх приведены на рисунках 5.24-5.28.

Переходные процессы при регулировании АВН по реактивной мощности Q и движении КБТ вниз приведены на рисунках 5.29-5.33.

Графики переходных процессов построены для следующих величин:

ω - угловая скорость электродвигателя; M - момент электродвигателя (рисунок 5.14, рисунок 5.19, рисунок 5.24, рисунок 5.29);

U_d - напряжение на конденсаторе инвертора (рисунок 5.15, рисунок 5.20, рисунок 5.25, рисунок 5.30);

I - ток нагрузки преобразовательного трансформатора T (рисунок 5.16, рисунок 5.21, рисунок 5.26, рисунок 5.31);

P - активная мощность на вводе 6 кВ БУ; Q - реактивная мощность на вводе 6 кВ БУ (рисунок 5.17, рисунок 5.22, рисунок 5.27, рисунок 5.32);

$\cos\varphi$ - коэффициент мощности по первой гармонике; δU - отклонение напряжения электропитания; K_U - суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (рисунок 5.18, рисунок 5.23, рисунок 5.28, рисунок 5.33).

Графики построены для случая, когда в момент времени $t = 0,1$ с происходит пуск электропривода. После пуска электропривод движется с установившейся скоростью и в момент времени $t = 1,5$ с осуществляется рекуперативное торможение электропривода. В момент времени $t = 2,5$ с наступает пауза. После окончания паузы цикл повторяется.

Все расчёты проводились при длине питающей линии L , равной 7 км.

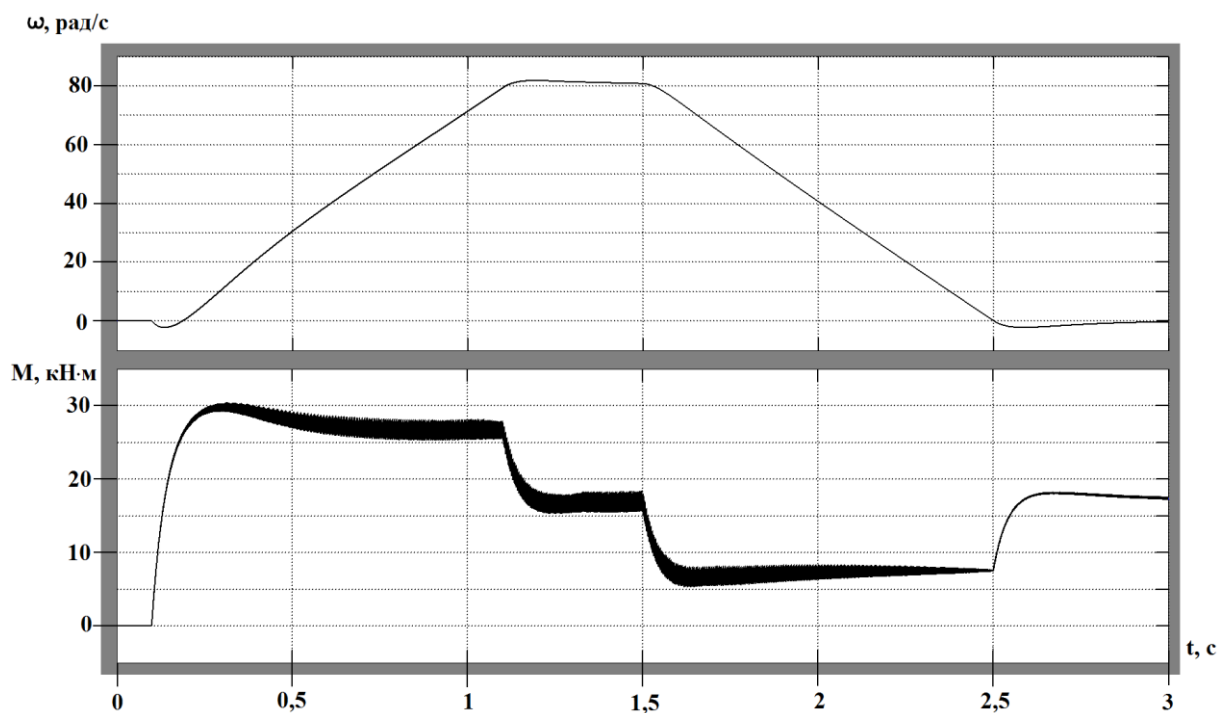


Рисунок 5.14 - Переходные процессы при движении КБТ вверх (регулирование АВН по напряжению сети):

ω - угловая скорость электродвигателя; M - момент электродвигателя

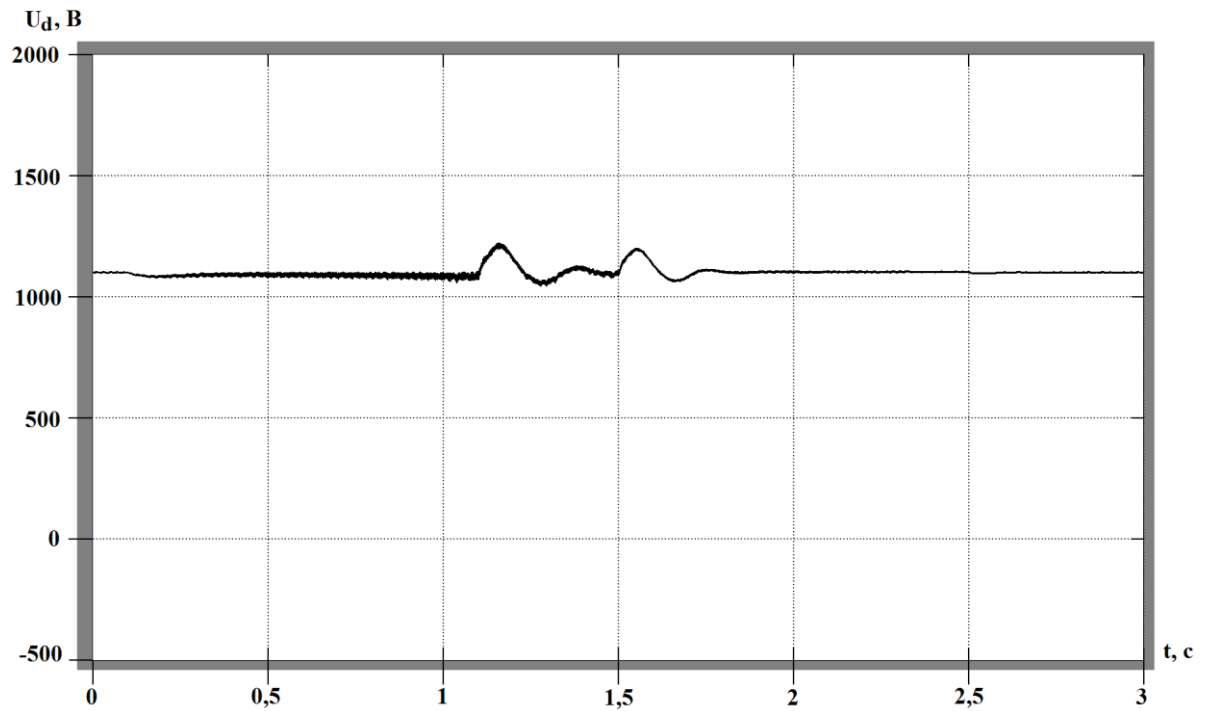


Рисунок 5.15 - Переходные процессы при движении КБТ вверх (регулирование АВН по напряжению сети): U_d - выпрямленное напряжение АВН

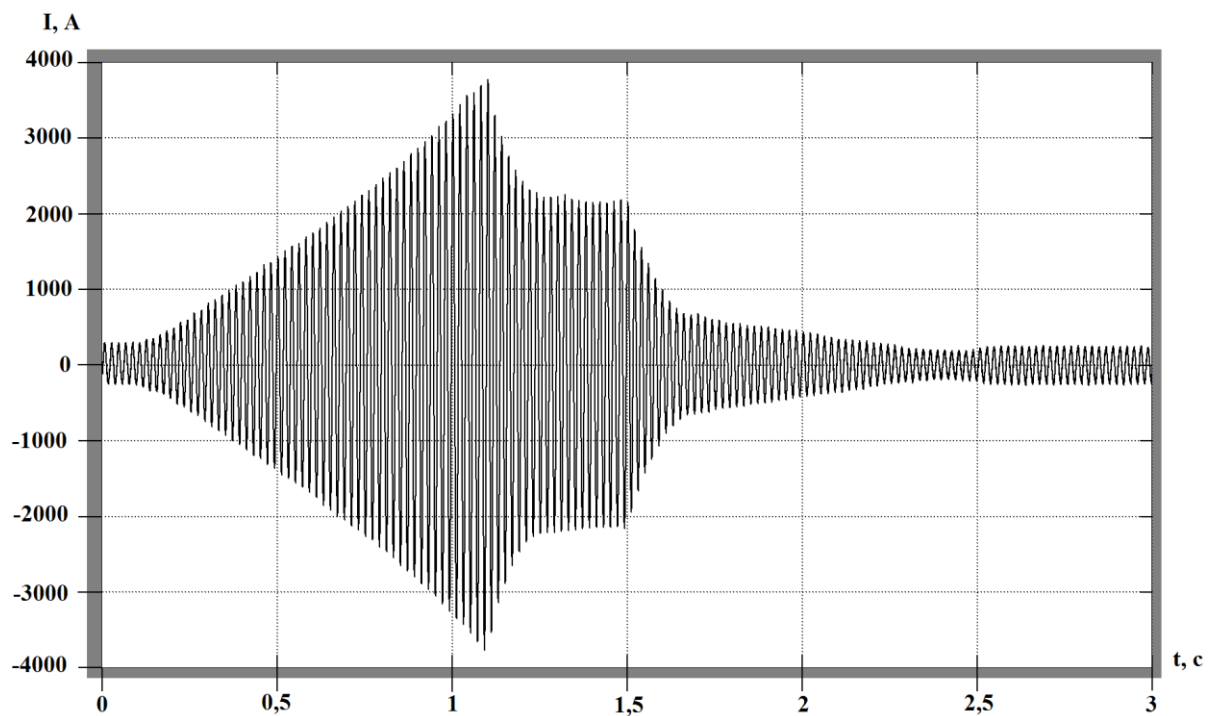


Рисунок 5.16 - Переходные процессы при движении КБТ вверх (регулирование АВН по напряжению сети): I - ток нагрузки трансформатора Т

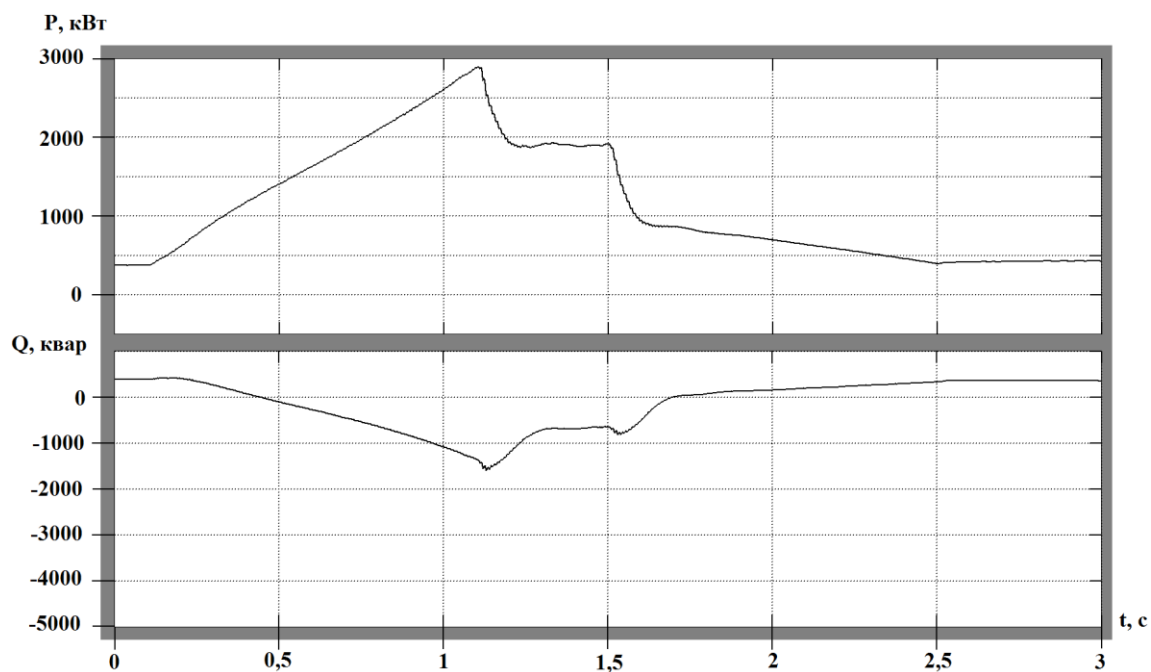


Рисунок 5.17 - Переходные процессы при движении КБТ вверх (регулирование АВН по напряжению сети): P - активная мощность на вводе 6 кВ БУ;
 Q - реактивная мощность на вводе 6 кВ БУ

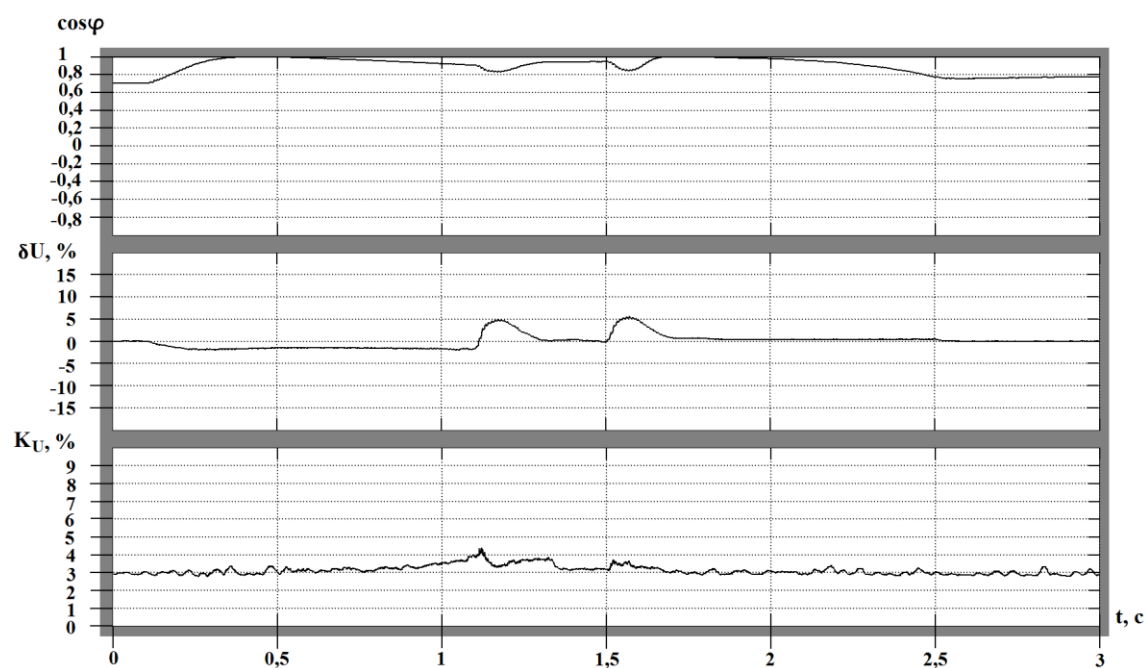


Рисунок 5.18 - Переходные процессы при движении КБТ вверх (регулирование АВН по напряжению сети): $\cos \varphi$ - коэффициент мощности; δU - отклонение напряжения электропитания; K_U - суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения

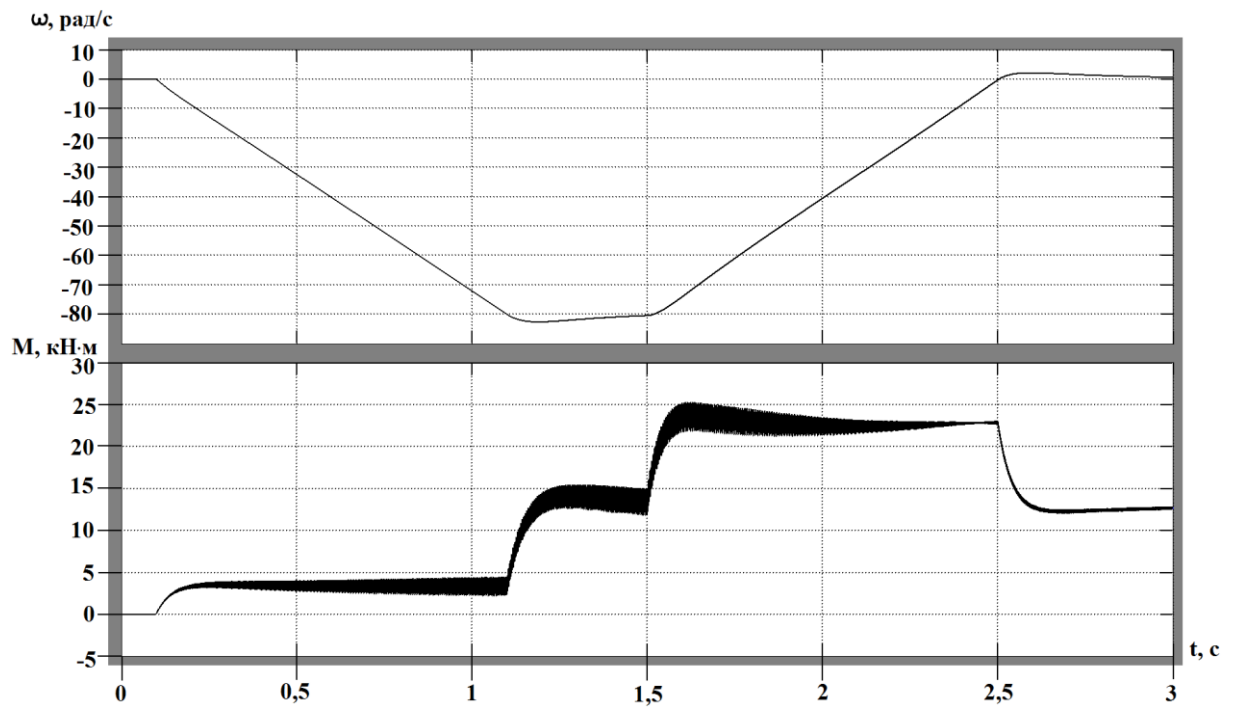


Рисунок 5.19 - Переходные процессы при движении КБТ вниз (регулирование АВН по напряжению сети): ω - угловая скорость электродвигателя;
 M - момент электродвигателя

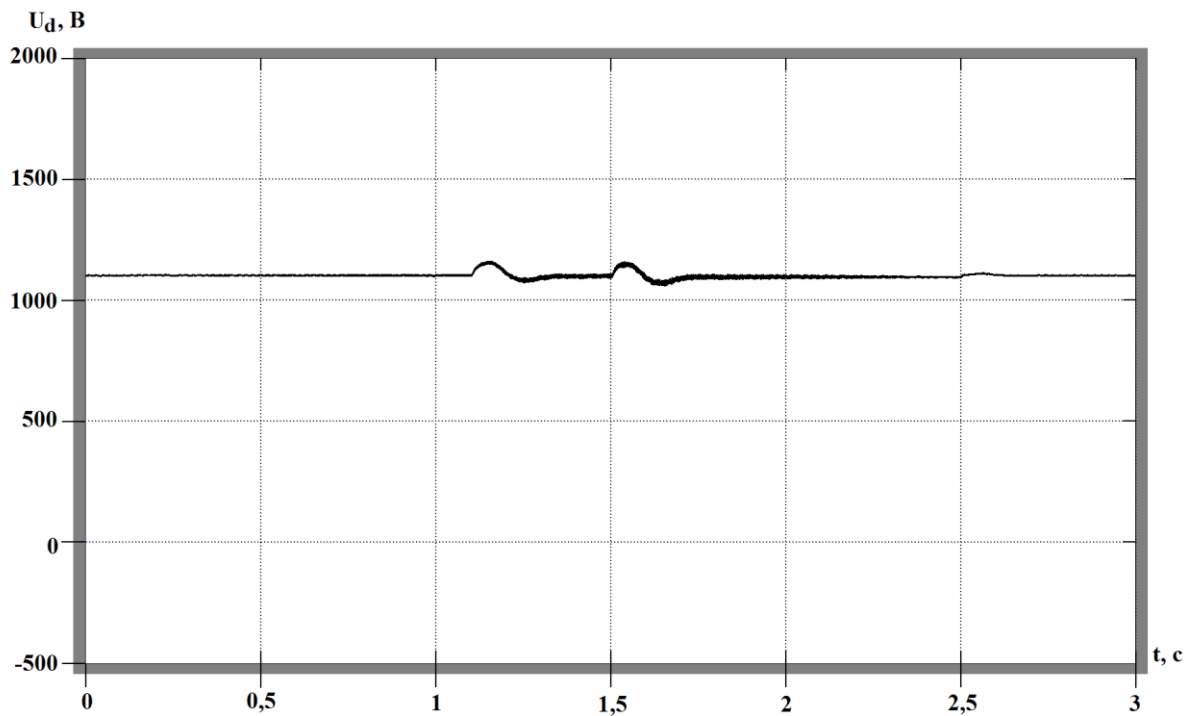


Рисунок 5.20 - Переходные процессы при движении КБТ вниз (регулирование АВН по напряжению сети): U_d - выпрямленное напряжение АВН

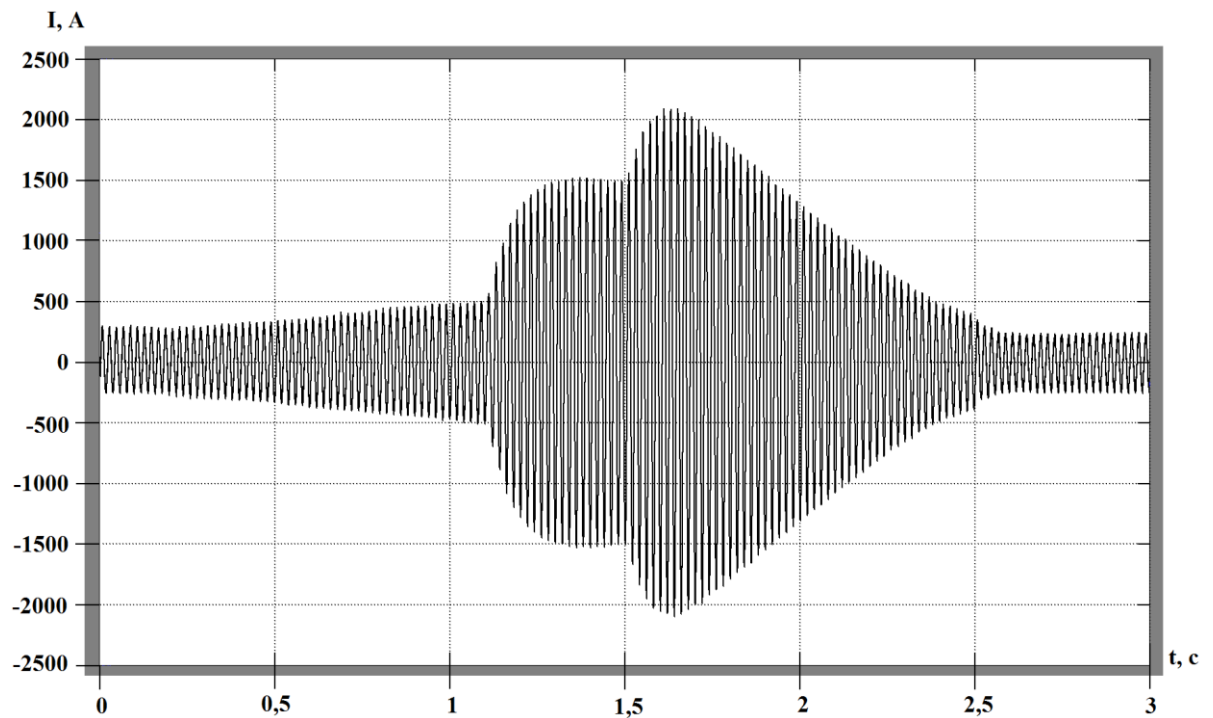


Рисунок 5.21 - Переходные процессы при движении КБТ вниз (регулирование АВН по напряжению сети): I - ток нагрузки трансформатора Т

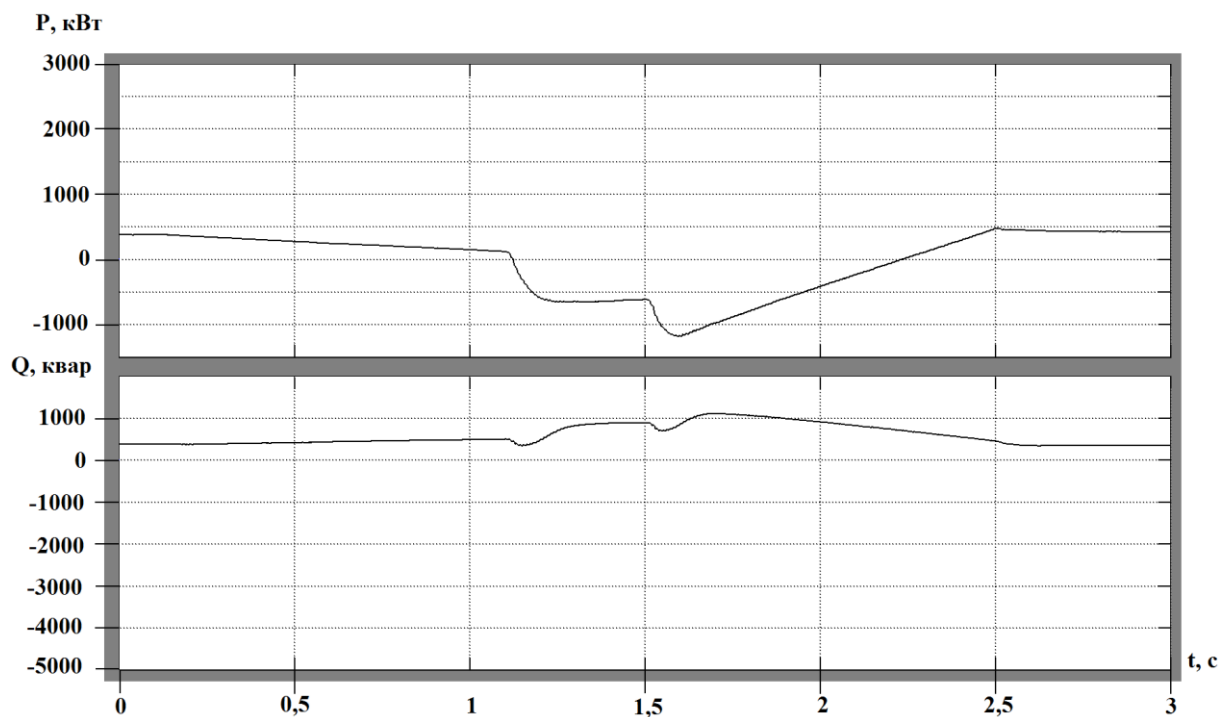


Рисунок 5.22 - Переходные процессы при движении КБТ вниз (регулирование АВН по напряжению сети): P - активная мощность на вводе 6 кВ БУ; Q - реактивная мощность на вводе 6 кВ БУ

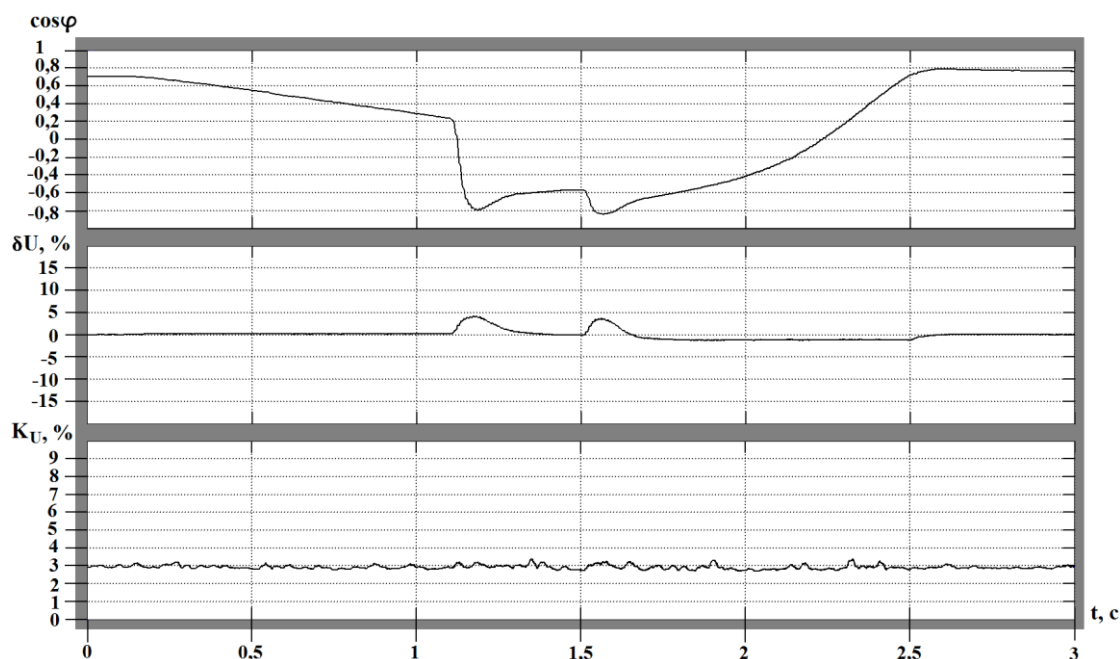


Рисунок 5.23 - Переходные процессы при движении КБТ вниз (регулирование АВН по напряжению сети): $\cos \varphi$ - коэффициент мощности; δU - отклонение напряжения электропитания; K_U - суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения

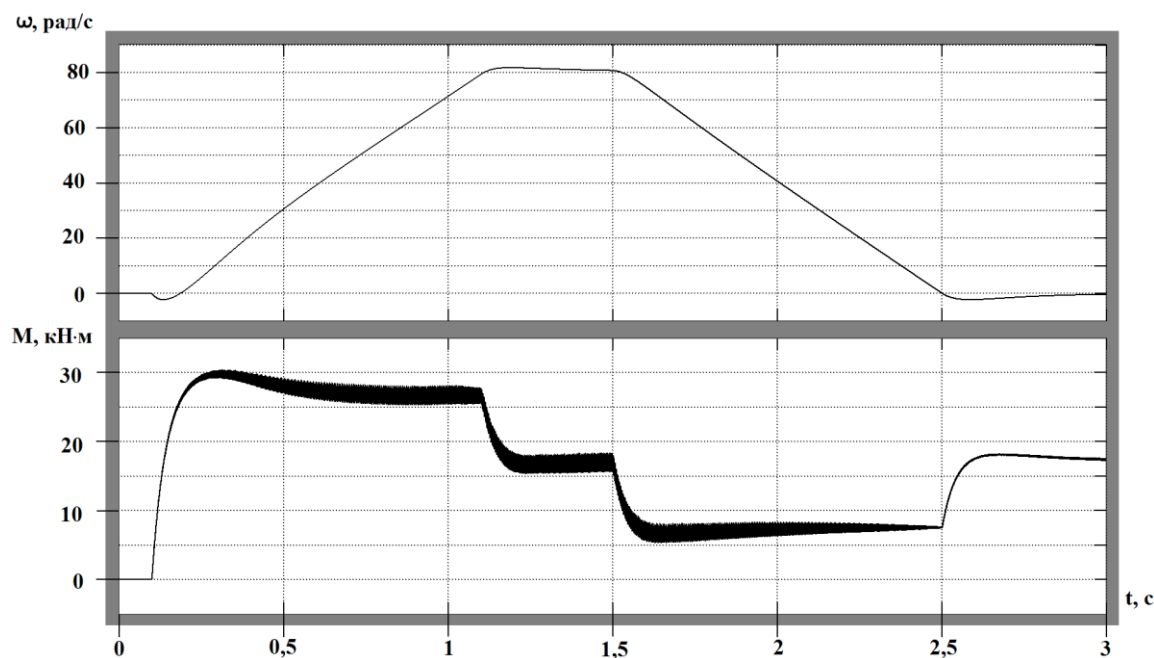


Рисунок 5.24 - Переходные процессы при движении КБТ вверх (регулирование АВН по реактивной мощности): ω - угловая скорость электродвигателя; M - момент электродвигателя

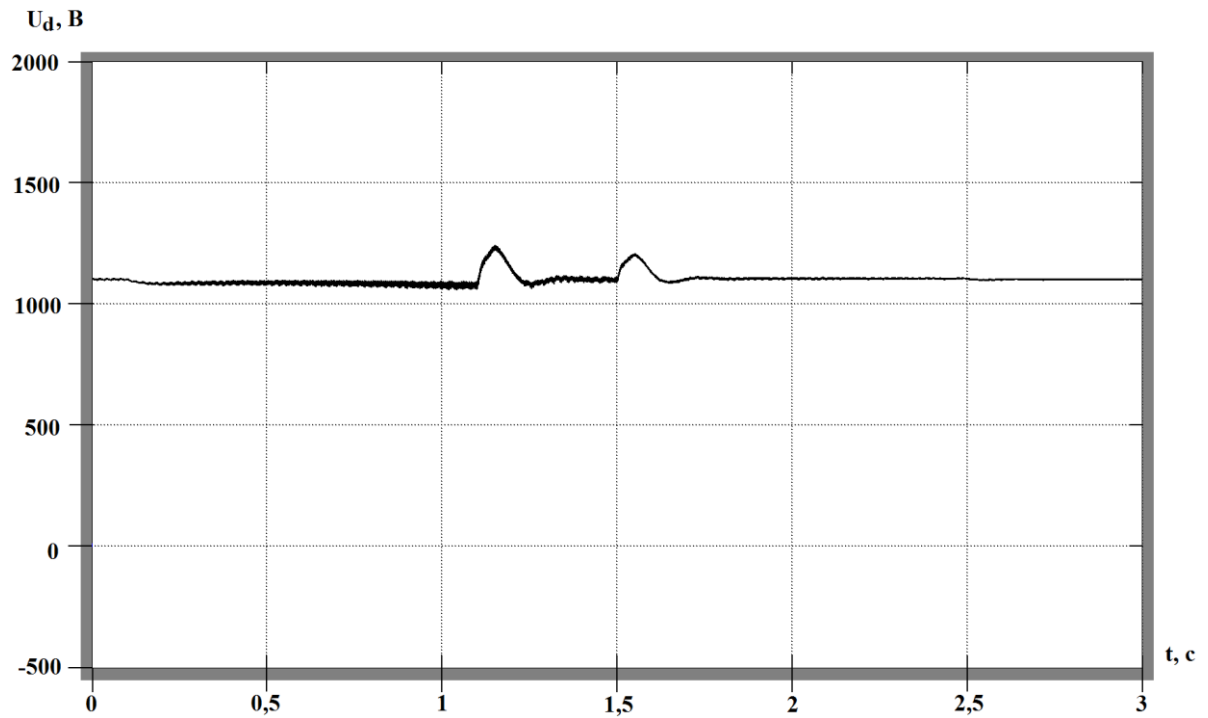


Рисунок 5.25 - Переходные процессы при движении КБТ вверх (регулирование АВН по реактивной мощности): U_d - выпрямленное напряжение АВН

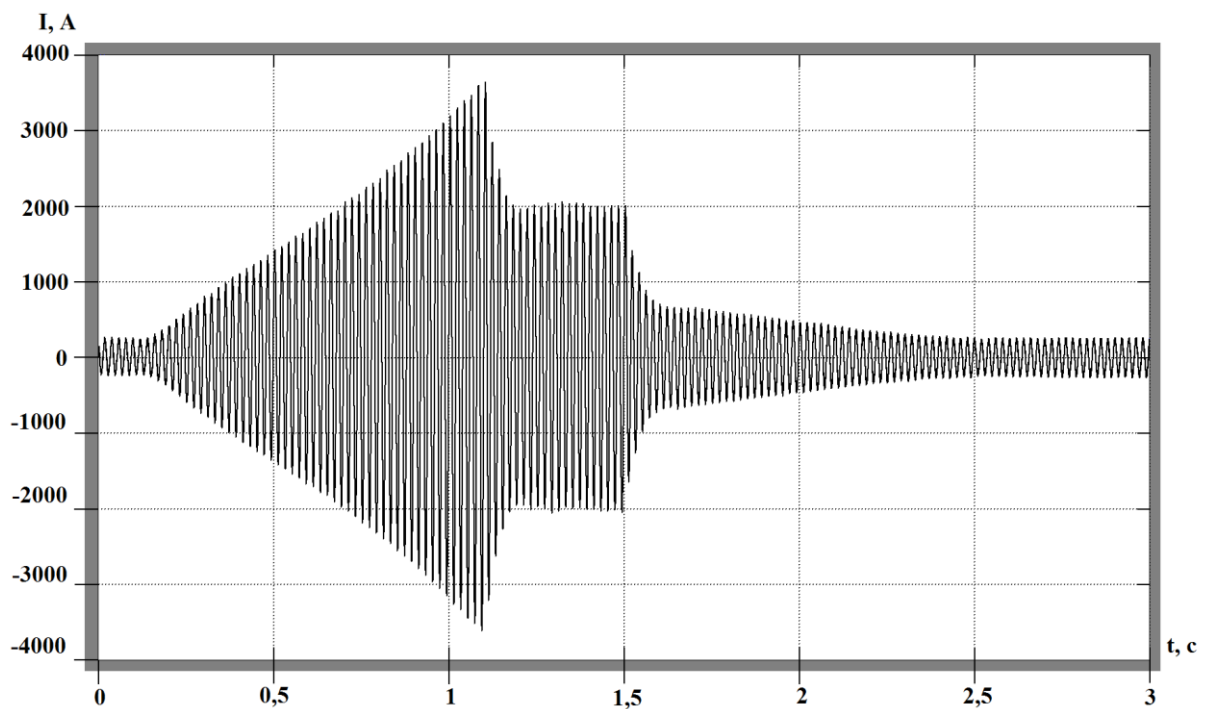


Рисунок 5.26 - Переходные процессы при движении КБТ вверх (регулирование АВН по реактивной мощности): I - ток нагрузки трансформатора Т

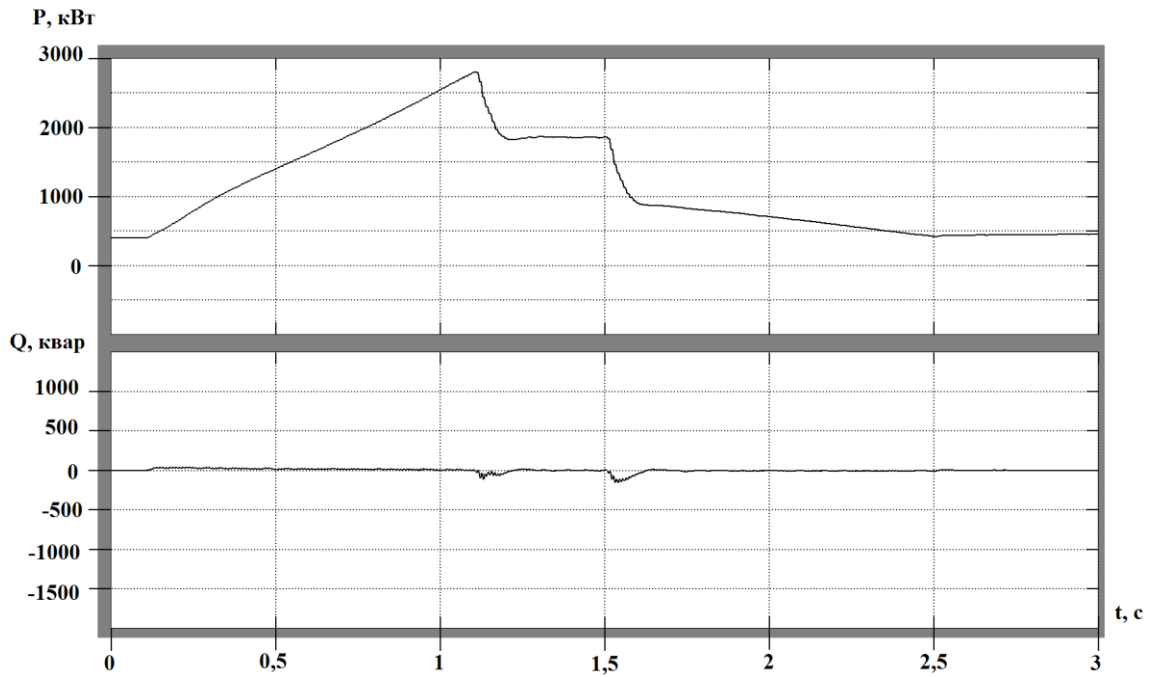


Рисунок 5.27 - Переходные процессы при движении КБТ вверх (регулирование АВН по реактивной мощности): P - активная мощность на вводе 6 кВ БУ;
 Q - реактивная мощность на вводе 6 кВ БУ

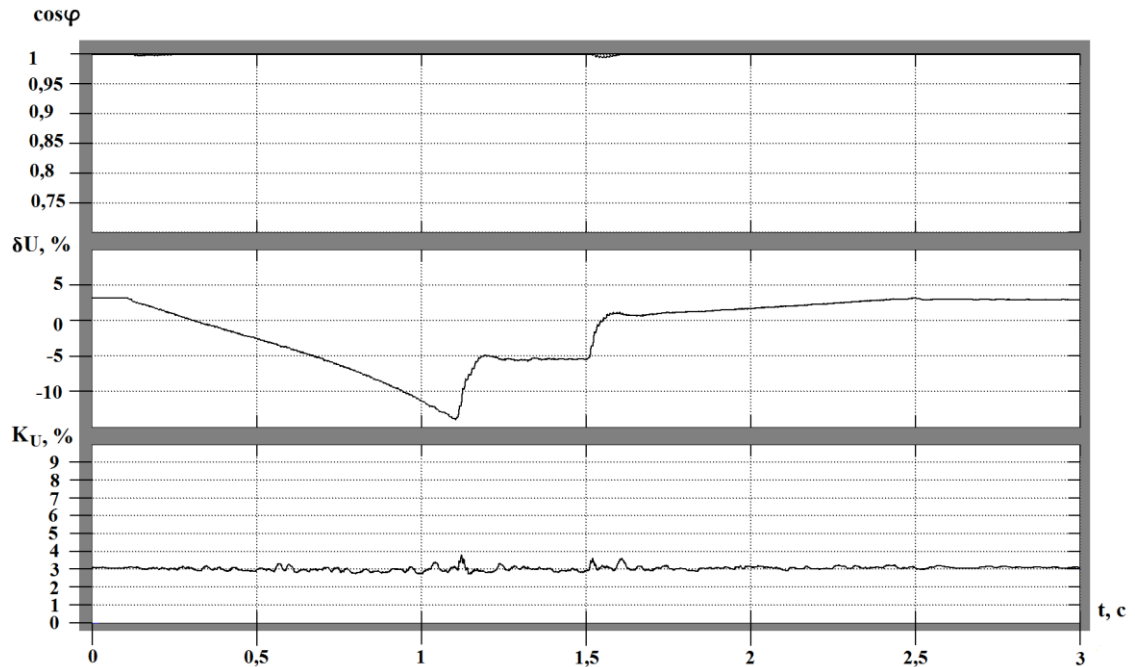


Рисунок 5.28 - Переходные процессы при движении КБТ вверх (регулирование АВН по реактивной мощности): $\cos \varphi$ - коэффициент мощности; δU - отклонение напряжения электропитания; K_U - суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения

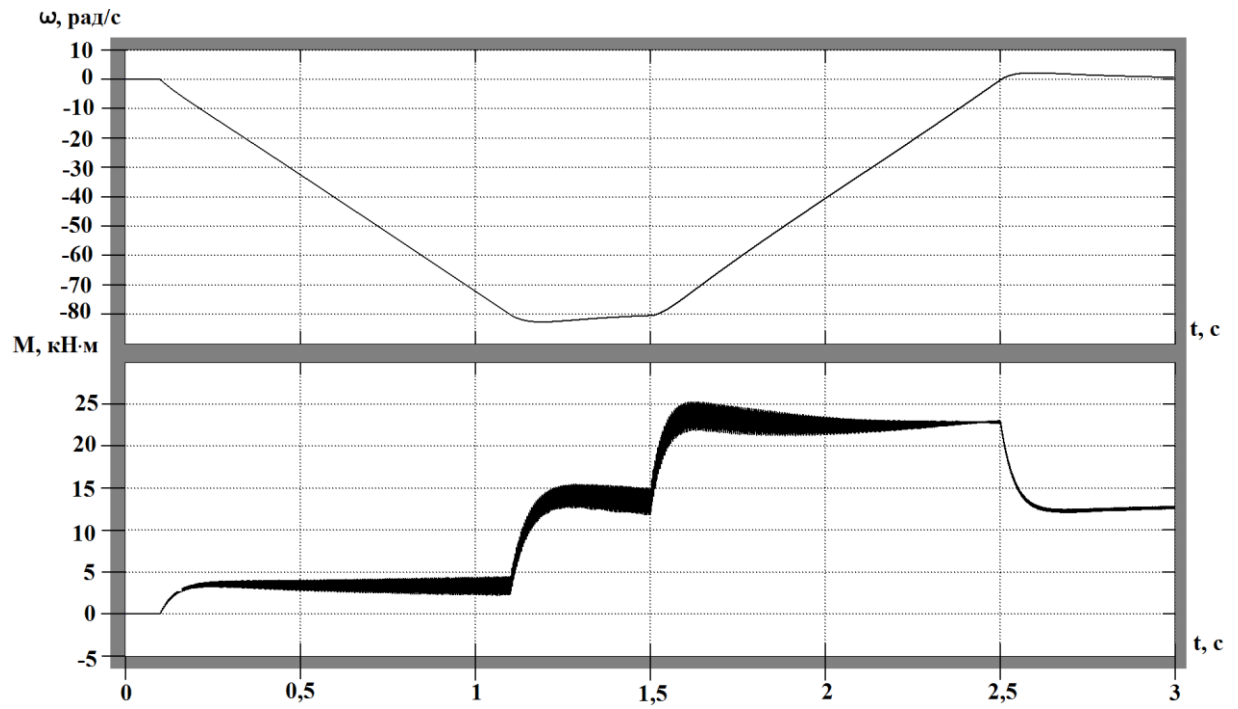


Рисунок 5.29 - Переходные процессы при движении КБТ вниз (регулирование АВН по реактивной мощности): ω - угловая скорость электродвигателя;
 M - момент электродвигателя

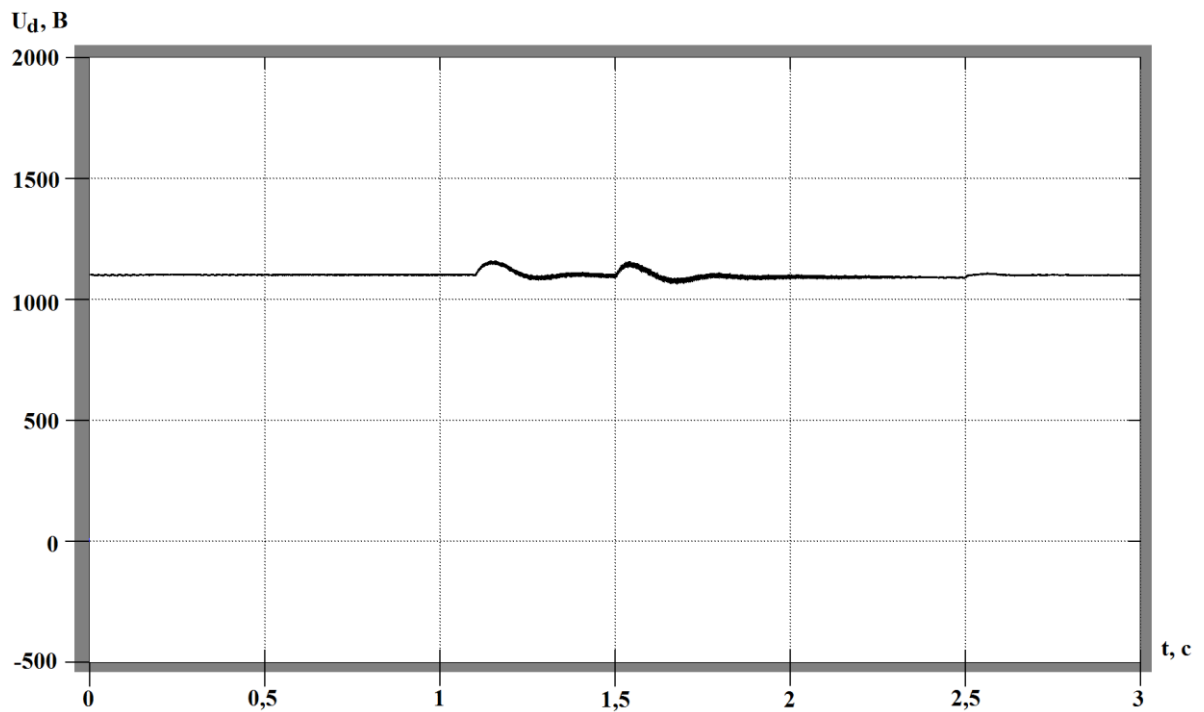


Рисунок 5.30 - Переходные процессы при движении КБТ вниз (регулирование АВН по реактивной мощности): U_d - выпрямленное напряжение АВН

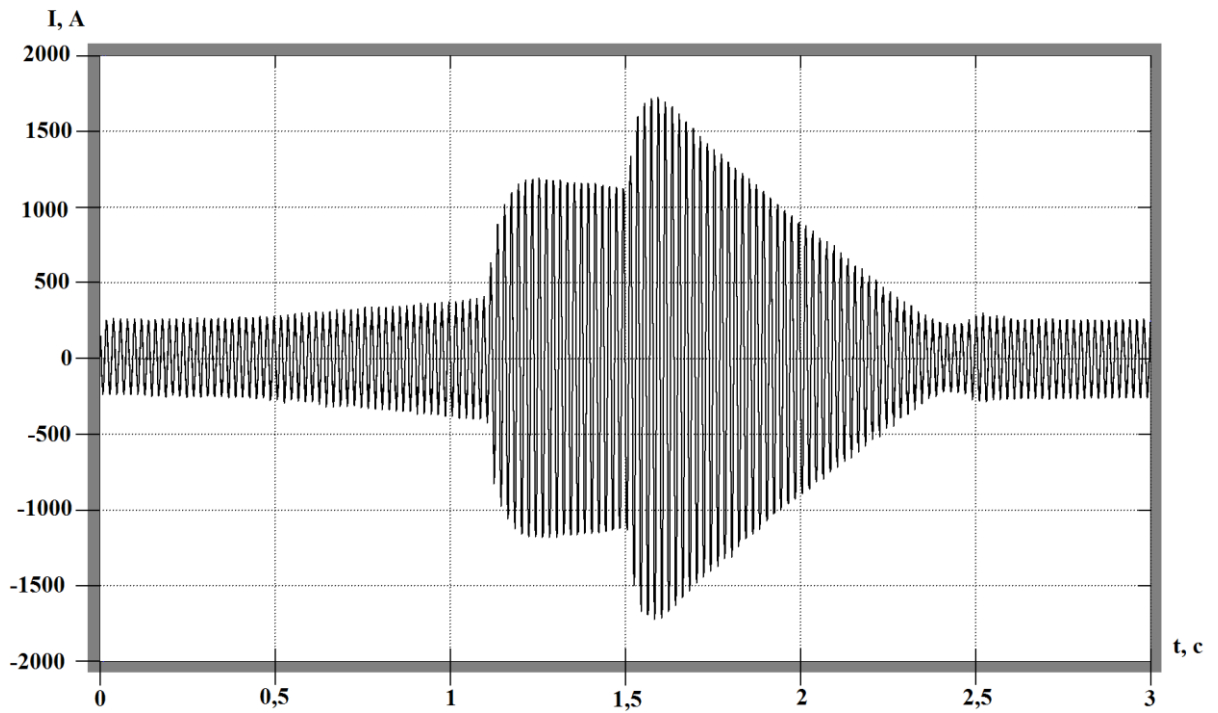


Рисунок 5.31 - Переходные процессы при движении КБТ вниз (регулирование АВН по реактивной мощности): I - ток нагрузки трансформатора Т

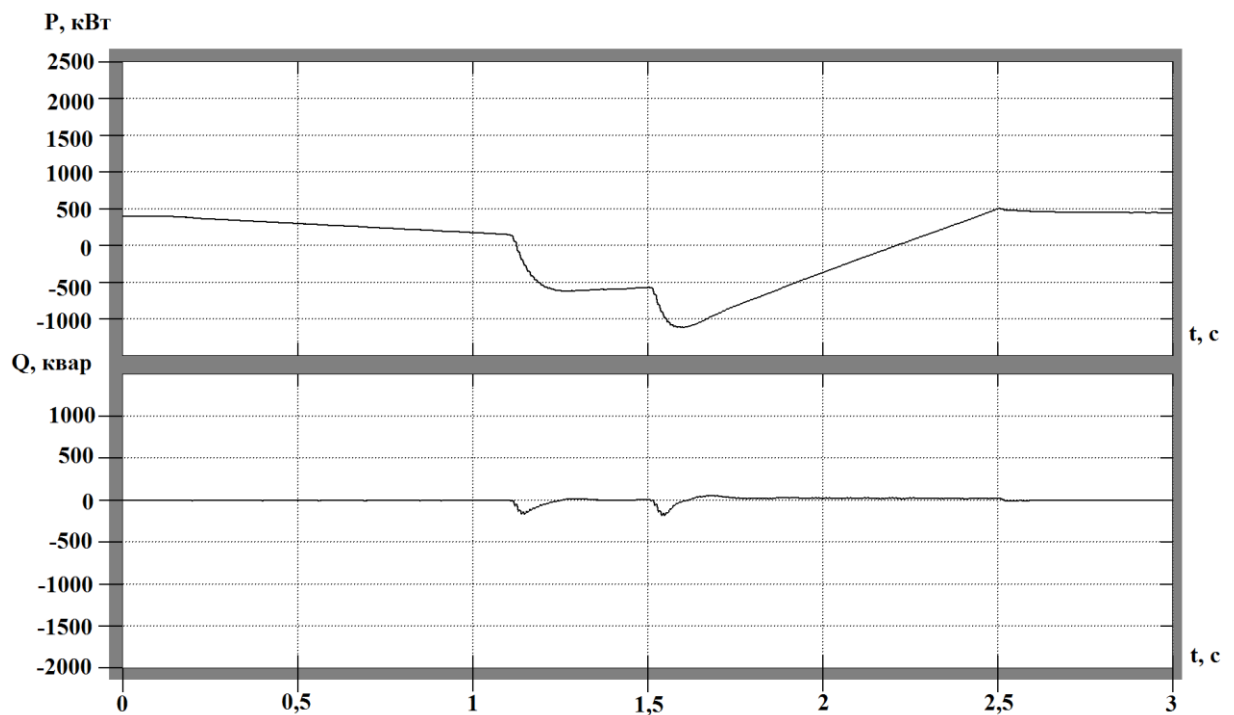


Рисунок 5.32 - Переходные процессы при движении КБТ вниз (регулирование АВН по реактивной мощности): P - активная мощность на вводе 6 кВ БУ;
 Q - реактивная мощность на вводе 6 кВ БУ

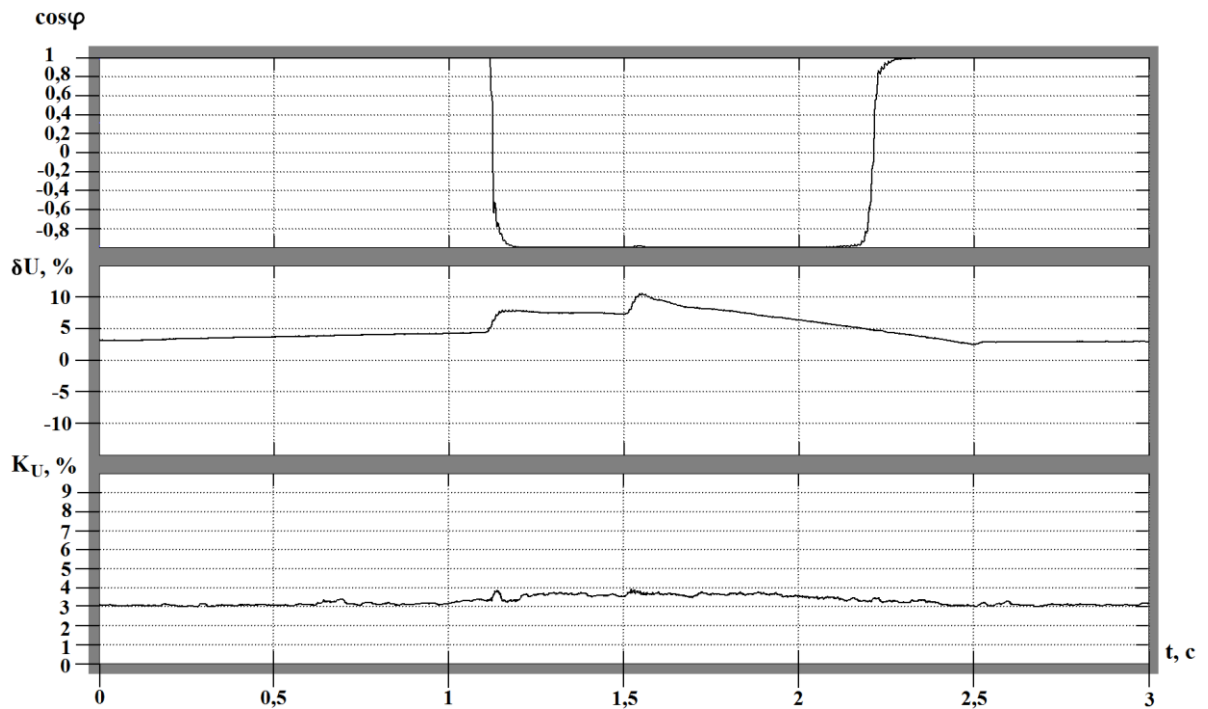


Рисунок 5.33 - Переходные процессы при движении КБТ вниз (регулирование АВН по реактивной мощности): $\cos \varphi$ - коэффициент мощности; δU - отклонение напряжения электропитания; K_U - суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения

Анализ графиков позволяет сделать следующие выводы [81].

Движение КБТ вверх. Регулирование АВН по напряжению U .

В переходных режимах отклонение напряжения не превышает 5 %.

Коэффициент K_U в переходных режимах не превышает 4,5 %.

Коэффициент мощности в переходных режимах изменяется в пределах от 0,8 до 1.

Выпрямленное напряжения АВН U_d практически остаётся на заданном уровне 1100 В. Возникающие изменения U_d в конце пуска и начале торможения электропривода кратковременны и не превышают 12 %.

В конце пуска электропривода ток нагрузки преобразовательного трансформатора Т достигает максимального значения 3750 А и далее уменьшается до установившегося амплитудного значения 2100 А.

В конце пуска электропривода активная мощность на вводе БУ достигает максимального значения 2800 кВт и далее уменьшается до установившегося значения 1800 кВт.

Движение КБТ вниз. Регулирование АВН по напряжению U .

В переходных режимах отклонение напряжения не превышает 5 %.

Коэффициент K_U в переходных режимах не превышает 3,5 %.

Коэффициент мощности в переходных режимах изменяется в пределах от 0,8 до минус 0,8. Изменение знака коэффициента мощности объясняется рекуперацией энергии в сеть при спуске КБТ.

Выпрямленное напряжение АВН U_d практически остаётся на заданном уровне 1100 В. Возникающие изменения U_d в конце пуска и начале торможения электропривода кратковременны и не превышают 11 %.

В начале торможения электропривода ток нагрузки преобразовательного трансформатора Т достигает максимального значения 2100 А. В установившемся режиме амплитуда тока равна 1500 А.

При движении КБТ вниз в установившемся режиме и при торможении АВН обеспечивает рекуперацию энергии в сеть. При рекуперации энергии в сеть в установившемся режиме активная мощность на вводе БУ равна минус 600 кВт. В начале торможения электропривода активная мощность на вводе БУ достигает значения минус 1200 кВт (максимальное значение по абсолютной величине).

Движение КБТ вверх. Регулирование АВН по реактивной мощности Q .

В конце пуска электропривода отклонение напряжения достигает минус 14 %. В установившемся режиме отклонение напряжения равно минус 5 %.

Коэффициент K_U в переходных режимах не превышает 3,9 %.

Коэффициент мощности в переходных режимах практически не изменяется и равен 1.

Выпрямленное напряжение АВН U_d практически остаётся на заданном уровне 1100 В. Возникающие изменения U_d в конце пуска и начале торможения электропривода кратковременны и не превышают 12 %.

В конце пуска электропривода ток нагрузки преобразовательного трансформатора Т достигает максимального значения 3700 А и далее уменьшается до установившегося амплитудного значения 2000 А.

В конце пуска электропривода активная мощность на вводе БУ достигает максимального значения 2800 кВт и далее уменьшается до установившегося значения 1800 кВт.

Движение КБТ вниз. Регулирование АВН по реактивной мощности Q.

В начале торможения электропривода отклонение напряжения достигает 10 %.

Коэффициент K_U в переходных режимах не превышает 3,9 %.

Коэффициент мощности в переходных режимах изменяется в пределах от 1 до минус 1. Изменение знака коэффициента мощности объясняется рекуперацией энергии в сеть при спуске КБТ.

Выпрямленное напряжения АВН U_d практически остаётся на заданном уровне 1100 В. Возникающие изменения U_d в конце пуска и начале торможения электропривода кратковременны и не превышают 11 %.

В начале торможения электропривода ток нагрузки преобразовательного трансформатора Т достигает максимального значения 1700 А. В установившемся режиме амплитуда тока равна 1200 А.

При движении КБТ вниз в установившемся режиме и при торможении АВН обеспечивает рекуперацию энергии в сеть. При рекуперации энергии в сеть в установившемся режиме активная мощность на вводе БУ равна минус 600 кВт. В начале торможения электропривода активная мощность на вводе БУ достигает значения минус 1200 кВт (максимальное значение по абсолютной величине).

Предложенные структурные схемы САР АВН позволяют получить хорошее качество переходных процессов при пуске и торможении электропривода. Изменения всех величин на графиках рисунков 5.14-5.33 происходят без значительных колебаний, с достаточным быстродействием. Наличие АВН обеспечивает рекуперацию энергии в сеть при движении КБТ вниз.

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 значительно уменьшить потребление реактивной мощности и увеличить коэффициент мощности в переходных и установившихся режимах работы электропривода по сравнению со случаем регулирования по напряжению.

Выполненные в данном разделе исследования показали, что АВН при движении КБТ вниз в установившемся режиме и при торможении обеспечивает рекуперацию энергии в сеть. Однако в случае питания ЭТК БУ от автономных СГ (дизельной электростанции ДЭС) рекуперация энергии в сеть невозможна, так как при малых технологических нагрузках и при рекуперации энергии электропривода лебёдки во время СПО требуется дополнительная загрузка активной мощностью дизель-генераторов, чтобы обеспечить нормальный режим их работы [54]. В противном случае увеличивается удельный расход топлива, ухудшаются условия эксплуатации дизеля и сокращается его моторесурс [54]. Поэтому в звене постоянного тока необходима установка тормозного резистора, аналогично варианту ПЧ с неуправляемым выпрямителем (рисунок 1.1) [7]. АВН при рекуперации энергии должен закрываться и вся энергия выделяется в тормозном резисторе.

Другим возможным вариантом является применение специальной системы загрузки дизель-генераторов, которая впервые нашла применение на морских БУ [54]. Она должна автоматически обеспечить заданный нижний предел активной мощности на выходе дизель-генераторов в режиме холостого хода буровых механизмов и в режиме рекуперативного торможения привода лебёдки.

5.5. Сравнение результатов исследования частотно-регулируемых электроприводов с ФКУ-С и АВН

В таблице 5.1 приведены результаты исследования влияния ФКУ и АВН на величину реактивной мощности и ПКЭ.

Таблица 5.1 - Результаты исследования систем ЧРЭП с ФКУ-С и АВН

	$\delta U, \%$	$\cos \varphi$	$K_U, \%$
Питание от линии 6 кВ. Длина линии 9 км.			
ФКУ-С	-8	0,987	≤ 5
АВН Регулирование по реактивной мощности	-12.5%	≈ 1	3,0
АВН Регулирование по напряжению	≈ 0	0,88	2,5
Питание от автономных СГ. Мощность электроприводов 1800 кВт			
ФКУ-С	5	≈ 1	4,95-5,5
АВН Регулирование по реактивной мощности	5	≈ 1	3,2

На основании выполненных исследований и сравнения данных, приведённых в таблице 5.1, можно сделать следующие выводы [88].

1. Применение ФКУ-С или АВН позволяют значительно уменьшить отклонение напряжения по сравнению с работой электропривода без ФКУ или АВН (при тех же длинах линии).

Применение ФКУ-С или АВН позволяет увеличить длину линии по сравнению со случаем работы электропривода без ФКУ или АВН.

2. АВН осуществляет непрерывное регулирование реактивной мощности, позволяющее поддерживать заданное напряжение и высокий коэффициент мощности как в установившихся, так и переходных режимах работы.

Применение ФКУ-С позволяет осуществить ступенчатое изменение компенсирующей мощности. Следствием этого является скачкообразное изменение напряжения и коэффициента мощности, что является недостатком ФКУ-С. Однако это устройство проще и дешевле, чем АВН.

3. ФКУ-С и АВН позволяют значительно уменьшить суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения по сравнению со случаем работы электропривода без ФКУ или АВН.

4. АВН позволяет получить меньший коэффициент K_U , чем применение 12-пульсного выпрямителя той же мощности с ФКУ-С.

5. АВН позволяет обеспечить режим рекуперации энергии по сравнению со случаем ЧРЭП с неуправляемым выпрямителем.

К основным недостаткам АВН по сравнению с неуправляемым относятся большая стоимость, большие потери на силовых ключах и тем самым более дорогая система охлаждения, сложная система управления. Однако в работе [53] отмечается, что суммарное снижение КПД выпрямительной части ПЧ не является значительным и можно принять суммарный КПД АВН равным 95%. При этом некоторое увеличение потерь в АВН компенсируется снижением потерь в электрооборудовании и линии электропередачи за счёт компенсации реактивной мощности и уменьшения высших гармоник тока.

В отличие от случая применения АВН в составе преобразователей частоты, для ФКУ-С необходимо иметь дополнительные площади для размещения электрооборудования ФКУ.

Для находящихся в эксплуатации буровых установок для разведочного и эксплуатационного бурения на нефть и газ с частотно-регулируемыми электроприводами, содержащими неуправляемый выпрямитель, рекомендуется применение относительно простых ФКУ со ступенчатым регулированием реактивной мощности и «ненастроенными» фильтрами. При разработке нового электрооборудования для буровых установок на нефть и газ рекомендуется применение в составе преобразователей частоты активных выпрямителей напряжения.

Выводы

1. Предложены структурные схемы САР АВН для случаев, когда в качестве регулируемых величин выбираются реактивная мощность и напряжение в точке ввода БУ 6 кВ. Все структурные схемы выполнены по принципу подчинённого регулирования координат.

2. АВН с о. о. с. по напряжению обеспечивает в установившихся режимах работы электроприводов при питании от ЛЭП 6 кВ нормативные показатели по компенсации реактивной мощности, отклонению напряжения (10 %) и по коэффициенту K_U (5 %). Применение АВН позволяет обеспечивать нормальную работу БУ при длине линии до 9–10 км.

3. Применение АВН с о. о. с. по реактивной мощности в системе с автономными СГ позволяет практически полностью компенсировать реактивную мощность в системе с автономными СГ независимо от их нагрузки СГ.

4. Применение АВН с фильтром в системе с автономными СГ приводит к значительному снижению коэффициента K_U . Его величина не превышает нормативного значения 5 %. Отсутствие фильтра приводит к значительному возрастанию коэффициента K_U .

5. Предложенные структурные схемы САР АВН на основе принципа подчинённого регулирования координат позволяют получить хорошее 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.

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

6. Регулирование АВН по реактивной мощности позволяет значительно уменьшить потребление реактивной мощности и увеличить коэффициент мощности в переходных и установившихся режимах работы электропривода по сравнению со случаем регулирования по напряжению.

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 реактив-

ную 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов, Б. И. Методы выбора параметров фильтро-компенсирующих устройств ступенчатого типа для тиристорных электроприводов в системах соизмеримой мощности / Б. И. Абрамов, Б. М. Парфёнов, Ю. В. Шевырёв // Электротехника. – 2001. – №1. – С. 38–42.
2. Абрамов, Б. И. Прогнозирование качества и оптимальное проектирование электротехнических комплексов./ Б. И. Абрамов, А.И. Коган, Б.И. Моцохейн, Б.М. Парфёнов, Т.З. Портной// Автоматизированный электропривод. Сб. науч. тр. ОАО “Электропривод” – 2002. – С. 4–26.
3. Абрамов, Б. И. Перспективы совершенствования электроприводов постоянного тока / Б.И. Абрамов, А.И. Коган, О.И. Кожakov, Б.И. Моцохейн, Б.М.Парфёнов // Электричество. – 2002.– №3.– С. 43–48.
4. Абрамов, Б. И. Регулирование качества электроэнергии в системах электро-снабжения современных буровых установок наземного и морского бурения / Б. И. Абрамов, В. М. Пономарёв, А. И. Коган, О. И. Кожakov, В. А. Шиленков, Ю. В Шевырёв // Труды VII Международной (VII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу: ФГБОУ ВПО "Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина". - Иваново, 2012. - С. 465–470
5. Абрамов, Б. И. Современное и перспективное электрооборудование установок для бурения скважин глубиной до 3900 м./ Б. И. Абрамов, Е.И. Авдийский, А.И. Коган и др.// Электротехника. – 2001. – №1. – С. 11–16.
6. Абрамов, Б. И. Современные концепции построения систем автоматизированного электропривода для электротехнических комплексов горных машин и буровых установок / Б. И. Абрамов, А. И. Коган, Б. М. Парфёнов и др. // Электротехника. – 2002.–№3.– С. 36–41.
7. Абрамов, Б. И. Создание современных электротехнических комплексов для управления наземных и морских буровых установок / Б. И. Абрамов, О. И. Кожakov, В. А. Шиленков, В. К. Васильев, Д. А. Таран, Е. В. Кириллов // Труды

- VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. - Саранск : Изд-во Мордов. ун-та. – 2014.- Т. 2. - С. 150–154.
8. Абрамов, Б.И. Частотно-регулируемый электропривод буровых установок БУ - 4200/250 / Б. И. Абрамов, А. И. Коган и др. //Электротехника. – 2009. – №1. – С. 8-13.
 9. Алатырев, М.С. Гармонический состав потребляемого тока и коэффициент мощности выпрямителей на полностью управляемых полупроводниковых приборах / М. С. Алатырев, К. В. Быков // Электротехника. – 2000. – №4. – С. 23–27.
 10. Анастасиев, П. И Справочник по проектированию электрических сетей и электрооборудования/ П. И Анастасиев, М. Д. Бершицкий, Б. Н. Буре и др. - М.: Энергоатомиздат, 1991. - 464 с.
 11. Арриллага, Д. Гармоники в электрических сетях / Д. Арриллага, Д. Брэдли, П. Боджер. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 319 с.
 12. Бабкин, Е. А. Совершенствование, исследование и диагностирование систем управления асинхронного частотно-регулируемого электропривода механизмов буровой установки : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Бабкин Евгений Александрович. - М., 2010. - 235 с.
 13. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник / Л. А. Бессонов. - М.: Гардарики, 2007. - 701 с.
 14. Бородацкий, Е. Г. Преобразователь частоты для горнотранспортных систем / Е. Г. Бородацкий, П. А. Васильев, С. И. Шилин, И. В. Васильев // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. - Саранск : Изд-во Мордов. ун-та. – 2014. - Т. 2. - С. 257-260.
 15. Боярская, Н. П. Совершенствование методов компенсации высших гармоник в электрических сетях 0,4-10 кВ : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.14.02 / Боярская Наталия Петровна. - Красноярск., 2011. - 20 с.

- 16.Васин, И. М. Особенности создания гребного автоматизированного электропривода для судов с электродвижением ледового класса / И. М. Васин // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. - Саранск : Изд-во Мордов. ун-та. – 2014. - Т. 2. - С. 458-462.
- 17.Виноградов, А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А.Б. Виноградов. - Иваново : ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2008.– 298 с.
- 18.Герман-Галкин, С. Г. Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде Matlab-Simulink / С. Г. Герман-Галкин. – СПб.: Издательство "Лань", 2013. - 448 с.
- 19.Герман-Галкин, С. Г. Электрические машины: Лабораторные работы на ПК / С. Г. Герман-Галкин, Г. А. Кардонов. - СПб.: КОРОНА принт, 2010. - 256 с.
- 20.Герман-Галкин, С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК/ С. Г. Герман-Галкин. - СПб.: Издательство "Корона.Век", 2011. - 368 с.
- 21.Глебов, И. А. Системы возбуждения синхронных генераторов с управляемыми преобразователями / И.А. Глебов. – М.-Л.: Изд. АН СССР, 1960. – 556 с.
- 22.ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
- 23.ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. - М. : Стандартинформ, 2014. - 20 с.
- 24.Грин, А. В. Фильтрокомпенсирующие устройства для обеспечения электромагнитной совместимости в электротехнических комплексах с вентильной нагрузкой: Автореф. дис. ... канд. техн. наук/ Санкт-Петербургский государственный горный ин-т.– СПб., 1998. – 19 с.
25. Гринберг, Р. П. Разработка регулятора пассивных фильтров для систем электроснабжения : дис. ...канд. техн. наук : 05.09.01 / Гринберг Роман Петрович. - М., 2005. - 154 с.
- 26.Гультияев, А. Визуальное моделирование в среде MATLAB / А. Гультияев. –

СПб.: Питер, 2000. – 432 с.

27. Давидовский, Г. А. Электроэнергетика западно–сибирского нефтегазового комплекса / Г. А. Давидовский, В. П. Росляков, В. А. Фомин. - М.: Энергоатомиздат, 1989. – 168 с.
28. Добрусин, Л. А. Основы теории и проектирования оптимальных фильтрокомпенсирующих устройств для преобразователей: Автореф. дис. ... докт. техн. наук / Всероссийский электротехнический институт. – М., 1999. – 40 с.
29. Добрусин, Л. А. Фильтрокомпенсирующие устройства для преобразовательной техники / Л.А. Добрусин. – М.: НТФ Энергопрогресс, 2003..– 84 с.
30. Добрусин, Л. А. Методология и библиотека моделей для анализа влияния преобразователей на качество электроэнергии / Л. А. Добрусин // ЭЛЕКТРО. – 2003. – №5. – С. 28-33.
31. Добуш, В. С. Компенсация высших гармоник с учетом фазовых соотношений в электротехническом комплексе промышленных предприятий : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Добуш Василий Степанович. - СПб., 2013. - 20 с.
32. Дробкин, Б.З. Высокодинамичные энергоэффективные электроприводы горных машин / Б.З. Дробкин, А.П. Емельянов, А.Е. Козярук, А.О. Свириденко // Горное оборудование и электромеханика. - 2011. - №4. - С. 34-39.
33. Епифанцев, С. Н. Качество электроэнергии: современные требования и их обеспечение в электрических сетях железных дорог / С. Н. Епифанцев, И. В. Жежеленко, В. А. Овсейчук, Г. Г. Трофимов, С. В. Шимко. - М.: ЭкоПресс, 2014. - 264 с.
34. Ермолов, С. А. Снижение амплитуды высших гармоник в системах электроснабжения листопрокатных цехов металлургических предприятий : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Ермолов Сергей Анатольевич. - Липецк, 2007. - 18 с.
35. Ершов, М. С. Устойчивость промышленных электротехнических систем/ М. С. Ершов, А. В. Егоров, А. А. Трифионов. – М.: ООО Издательский дом Недра, 2010. - 319 с.
36. Ефимов, А. А. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах

- переменного тока / А.А. Ефимов, Р.Т. Шрейнер. - Новоуральск: Изд-во НГТИ, 2001. – 412 с.
37. Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 264 с.
38. Жежеленко, И. В. Электрические потери от высших гармоник в системах электроснабжения / И. В. Жежеленко // Электрика. - 2010. - №4. - С. 3-6.
39. Жежеленко, И. В. Электромагнитная совместимость потребителей : монография / И. В. Жежеленко, А. К. Шидловский, Г. Г. Пивняк, Ю. Л. Саенко, Н. А. Нойбергер. - М.: Машиностроение, 2012. - 351 с.
40. Железко, Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии / Ю. С. Железко. - М.: изд-во ЭНАС, 2009. - 456 с.
41. Захаров, А. А. Расчёт выходного фильтра / А. А. Захаров // Современная электроника. – 2005. – №6. – С. 48-50.
42. Золов, П. Д. Моделирование работы активного выпрямителя напряжения в электромеханической системе с двухсторонним обменом энергии / П. Д. Золов, Н. А. Поляков // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. - Саранск : Изд-во Мордов. ун-та. – 2014. - Т. 1. - С. 165-169.
43. Карташев, И. И. Управление качеством электроэнергии / И. И. Карташев, В. И. Тульский, Р. Г. Шамонов, Ю. В. Шаров, А. Ю. Воробьев. - М.: Издат. дом МЭИ, 2006. - 320 с.
44. Ключев, В. И. Теория электропривода: учеб. для вузов / В. И. Ключев. - 2-е изд. перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 2001. - 704 с.
45. Козярук, А. Е. Высокоэффективный электропривод машин и технологий минерально-сырьевого производства. Структура и реализация / А. Е. Козярук // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. - Саранск : Изд-во Мордов. ун-та. – 2014. - Т. 2. - С. 135-138.
46. Козярук, А. Е. Техничко-экономические показатели ЭЭС горных машин при использовании преобразователей частоты с активным выпрямителем /

- А. Е. Козярук, А. В. Кулыгин // ЭЛЕКТРОСИЛА. Приложение к сборнику № 42. – 2003. – С. 57-64.
47. Кондратьев, Д. Е. Трёхфазные выпрямители с активной коррекцией коэффициента мощности и двунаправленной передачей энергии : дис. ...канд. техн. наук : 05.09.12 / Кондратьев Дмитрий Евгеньевич. - М., 2008. - 194 с.
48. Корнилов, Г. П. Анализ показателей качества электроэнергии в системе промышленного электроснабжения с мощными тиристорными электроприводами / Г. П. Корнилов, Т. Р. Храмшин, А. Н. Шеметов, А. А. Николаев // Вестник МГТУ. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. – № 3. – С. 6-11.
49. Кудрин, Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий : учеб. для студентов вузов, обучающихся по курсу «Электроснабжение промышленных предприятий» / Б. И. Кудрин. – М.: Интермет Инжиниринг, 2005 – 672 с.
50. Масандилов, Л. Б. Машиностроение. Энциклопедия. Т. IV-2 Электроприводы / Л. Б. Масандилов, Ю. Н. Сергиевский, С. К. Козырев и др. – М.: Машиностроение., 2012. - 520 с.
51. Меньшов, Б. Г. Электротехнические установки и комплексы в нефтегазовой промышленности / Б. Г. Меньшов, М. С. Ершов, А. Д. Яризов. – М.: Недра, 2000. – 487 с.
52. Миронов, Л. М. Гармонический анализ токов системы непосредственный преобразователь частоты – асинхронный двигатель / Л. М. Миронов, Д. А. Благодаров, Г. А. Третьяк // Электрика. - 2003. - № 10. - С. 16-19.
53. Момот, Б. А. Снижение влияния частотно-регулируемого привода переменного тока на качество электрической энергии в сетях с автономным источником : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Момот Борис Александрович. - СПб., 2014. - 151 с.
54. Моцохейн, Б. И. Электротехнические комплексы буровых установок / Б. И. Моцохейн. – М.: Недра, 1991. – 253 с.
55. Моцохейн, Б. И. Электропривод, электрооборудование и электроснабжение буровых установок/ Б. И. Моцохейн, Б. М. Парфенов, В. М. Шпилевой. – Тюмень: ТюмГНГУ, 1999 – 263 с.

56. Нгуен Чи Тхань. Централизованное снижение напряжений высших гармоник в сети с распределенными нелинейными нагрузками с помощью пассивных фильтров : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.14.02 / Нгуен Чи Тхань. - Иркутск, 2012. - 18 с.
57. Непомнящий, В. А. Экономические потери от нарушения электроснабжения потребителей / В. А. Непомнящий. - М.: Издат. дом МЭИ, 2010. - 188 с.
58. Новосёлов, Ю. Б. Электрификация нефтяной и газовой промышленности Западной Сибири / Ю. Б. Новосёлов, В. П. Росляков В. А. Шпилевой. – М: Недра, 1980. - 182 с.
59. Обухов, С. Г. Широтно-импульсная модуляция в трёхфазных инверторах напряжения / С. Г. Обухов, Е. Е. Чаплыгин, Д. Е. Кондратьев // Электричество. – 2008. - №7. – С. 23-31.
60. Онищенко Г. Б. Теория электропривода: учебник для студ. высш. учебн. заведений / Г. Б. Онищенко. - М.: ООО "Образование и исследование", 2013. - 352 с.
61. Онищенко, Г.Б. Проблемы и перспективы развития электропривода / Г.Б. Онищенко, М. Г. Юньков // Труды VIII международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та. – 2014. – Т. 1. – С. 5-9.
62. Осипов, О. И. Асинхронный тихоходный электропривод шахтной подъемной установки / О. И. Осипов, А. Г. Иванов, П. С. Игнатьев, А. В. Гусев // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. - Саранск : Изд-во Мордов. ун-та. – 2014.- Т. 2. - С. 367-369.
63. Парфёнов, Б. М. Тиристорные электроприводы главных механизмов буровых установок в системах электроснабжения соизмеримой мощности / Б. М. Парфёнов, Ю. В. Шевырёв, А. В. Шинянский. - М.: Информэлектро, 1984. – 37 с.
64. Парфёнов, Б. М. Улучшение электроэнергетических характеристик электроприводов буровых установок при помощи фильтро-компенсирующих уст-

- ройств / Б. М. Парфёнов, Ю. В. Шевырёв, // ЭЛЕКТРО. – 2003. – №5. – С. 43-48.
- 65.Пронин, М. В. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчёт) / Пронин М. В., Воронцов А. Г. - СПб.: «Электросила», 2003.– 172 с.
- 66.Сарваров, А. С. Оценка эффективности затрат на повышение энергетических показателей в сетях с полупроводниковыми преобразователями / А. С. Сарваров, Ю. В. Шевырёв, О. В. Фёдоров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2015. – Т. 15, № 3. – С. 11-19.
- 67.Свириденко, А. О. Энергосбережение в электроприводе переменного тока с активным выпрямителем : дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Свириденко Алексей Олегович. - СПб., 2011. - 168 с
- 68.Сердюк, Н. И. Бурение скважин различного назначения / Н. И. Сердюк, В. В. Куликов, А. А. Тунгусов, С. И. Минаков, И. В. Сауков, А. Е. Кравченко, Б. В. Шибанов, В. Г. Манчуков, Ю. Н. Ермаков, В. Ю. Бебенин, В. М. Митровка, М. Г. Лысов. - М.: Российский государственный геологоразведочный университет, 2006. - 624 с.
- 69.Скамьин, А. Н. Обоснование структуры и параметров системы компенсации реактивной мощности при наличии высших гармоник в напряжении и токе : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Скамьин Александр Николаевич. - СПб., 2011. - 20 с.
- 70.Солодухо, Я. Ю. Тенденции компенсации реактивной мощности. Ч.1. Реактивная мощность при несинусоидальных режимах работы / Я. Ю. Солодухо. – М.: Информэлектро, 1987. – 50 с.
- 71.Солодухо, Я. Ю. Тенденции компенсации реактивной мощности. Ч.2. Методы и средства компенсации реактивной мощности / Я. Ю. Солодухо.– М.: Информэлектро, 1988. – 49 с.
- 72.Суслов, М. А. Улучшение показателей качества электроэнергии в нефтепромысловых сетях / М. А. Суслов, А. М. Чуриков, Ю. В. Шевырёв // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному

- электроприводе АЭП-2014. - Саранск : Изд-во Мордов. ун-та. – 2014. - Т. 2. - С. 177-182.
73. Терехов, В. М. Системы управления электроприводов: учебник для студ. высш. учеб. заведений / В. М. Терехов, О. И. Осипов; под ред. В. М. Терехова. - М.: Издательский центр «Академия», 2005. - 304 с.
74. Фокеев, А. Е. Исследование силовых трансформаторов при несинусоидальных режимах: дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Фокеев Александр Евгеньевич. - М., 2012. - 147 с.
75. Храмшин, Т. Р. Анализ и исследование высших гармоник в системах электропитания прокатных станов с активными выпрямителями / Т. Р. Храмшин, Г. П. Корнилов, А. А. Николаев, Р. Р. Храмшин, Д. С. Крубцов, А. Н. Горев // Труды VII Международной (VII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводе: ФГБОУ ВПО "Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина". - Иваново, 2012. - С. 565-569
76. Храмшин, Т. Р. Повышение устойчивости мощных активных выпрямителей при провалах напряжения / Т. Р. Храмшин, Г. П. Корнилов, Д. С. Крубцов, Р. Р. Храмшин // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводе АЭП-2014. - Саранск : Изд-во Мордов. ун-та. – 2014. - Т. 2. - С. 334-338.
77. Чаплыгин, Е. Е. Инверторы напряжения и их спектральные модели: учебное пособие по курсам «Автономные преобразователи» и «Моделирование электронных устройств и систем». – М.: Издательство МЭИ, 2003. – 64 с.
78. Шевырева, Н. Ю. Моделирование частотно-регулируемого электропривода буровой установки и оценка его влияния на качество электроэнергии / Н. Ю. Шевырева, В. Н. Фащиленко // Вести высших учебных заведений Черноземья. - 2013. - №2. - С. 15-21.
79. 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.
80. Шевырева, Н. Ю. Моделирование частотно-регулируемого электропривода с активным выпрямителем / Н. Ю. Шевырева // Главный энергетик. - 2015. - №8. - С. 69-74.
81. 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.
82. 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.
83. 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.
84. Шевырева, Н. Ю. Математические модели электротехнических комплексов буровых установок с частотно-регулируемым электроприводом / Н. Ю. Шевырева, В. Н. Фащенко // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Двадцатая Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тезисы докладов Т. 2. - М.: Издательский дом МЭИ, 2014, - С. 272.
85. Шевырева, Н. Ю. Обоснование применения активного выпрямителя для частотно-регулируемых электроприводов буровых установок / Н. Ю. Шевырева, В. Н. Фащенко // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Двадцать первая Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тезисы докладов Т. 2. - М.: Издательский дом МЭИ, 2015, - С. 232.

- 86.Шевырева, Н. Ю. Программа расчёта энергетических характеристик частотно-регулируемого электропривода буровой установки / Н. Ю. Шевырева, В. Н. Фащиленко // XI Международная конференция «Новые идеи в науках о Земле»: Тезисы докладов Т 2. - М. : Ваш полиграфический партнёр, 2013, - С. 157.
- 87.Шевырева, Н. Ю. Обеспечение электромагнитной совместимости в электротехнических комплексах буровых установок с частотно-регулируемым электроприводом / Н. Ю. Шевырева, В. Н. Фащиленко // 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.
- 88.Шевырева, Н. Ю. Сравнительный анализ применения фильтро-компенсирующего устройства и активного выпрямителя для частотно-регулируемого электропривода / Н. Ю. Шевырева, В. Н. Фащиленко // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Двадцать вторая Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тезисы докладов Т. 2. - М. : Издательский дом МЭИ, 2016, - С. 124.
- 89.Шевырёв, Ю. В. Динамические процессы в электромеханических системах соизмеримой мощности с фильтро-компенсирующими устройствами / Ю. В. Шевырёв // Электротехника. – 2004. – №12. – С. 24-30.
- 90.Шевырёв, Ю. В. Обоснование и повышение энергетических показателей регулируемых электроприводов буровых установок: дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.03 / Шевырёв Юрий Вадимович. - М., 2005. - 333 с.
- 91.Шевырёв, Ю. В. Повышение качества электрической энергии в сетях с полупроводниковыми преобразователями / Ю. В. Шевырёв // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2011. - №4. - С. 234-241.
- 92.Шевырёв, Ю. В. Способы повышения электроэнергетических показателей электротехнических комплексов буровых установок с тиристорным электроприводом постоянного тока / Ю. В. Шевырёв // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2004. – №6 – С. 64-69.

93. Шевырёв, Ю. В. Математические модели электротехнических комплексов горных машин и буровых установок с тиристорным электроприводом постоянного тока / Ю. В. Шевырёв // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М.: ОАО “ВНИИОЭНГ”, 2004. – №12. – 20-27.
94. Шевырёв, Ю. В. Закономерности влияния фильтро-компенсирующих устройств на электроэнергетические показатели электротехнических комплексов буровых установок с регулируемым электроприводом / Ю. В. Шевырёв // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М.: ОАО “ВНИИОЭНГ”, 2005. – №1. С. 27-34.
95. Шейнихович, В. В. Качество электрической энергии на судах/ В. В. Шейнихович, О. Н. Климанов, Ю. И. Пайкин, Ю. Я. Зубарев. – Л.: Судостроение, 1988. – 160 с.
96. Шехтман, М. Г. Работа генератора на выпрямительную нагрузку / М. Г. Шехтман // Труды Ленинградского индустриального института. – Л.: 1940. – Вып. 3. – С. 104-124.
97. Шипилло, В. П. Влияние тиристорного электропривода на питающую сеть/ В. П. Шипилло // Электротехническая промышленность. Сер. Электропривод. – 1970. – № 1. – С. 5-10.
98. Шрейнер, Р. Т. Активный фильтр как новый элемент энергосберегающих систем электропривода / Р. Т. Шрейнер, А. А. Ефимов // Электричество. - 2000. - №3. – С. 46-54.
99. Шрейнер, Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р. Т. Шрейнер. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
100. Antoniewicz, P. Predictive direct power control of three-phase boost rectifier / P. Antoniewicz, M. P. Kaźmierkowski // Bulletin of the Polish Academy of sciences. - 2006. - № 3 - P. 287-292.
101. Aswathi G, Simulation of Active Front End Converter Based VFD for Induction Motors / G. Aswathi, S. Nalini, R. Sudeep Kumar // International Journal of Scientific and Engineering Research. 2013. № 6.- P. 322-327.

102. Bhim Singh, A Review of Three-Phase Improved Power Quality AC-DC Converters/ Bhim Singh, N. Brij Singh, Ambrish Chandra, Kamal Al-Haddad, Ashish Pandey, Dwarka P. Kothari / IEEE Transactions on Industrial Electronics. - 2004.- № 3. P. 641-660.
103. Morán Luis, Practical Problems Associated with The Operation of ASDs Based on Active Front End Converters in Power Distribution Systems/ Luis Morán, José Espinoza, Mauricio Ortiz, José Rodríguez, Juan Dixon// Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting - 2004 -P. 2568-2571
104. Rajendra Aparnathi, Ved Vyas Diwedi, Study of the LCL Filter for Three Phase inverter in higher stability for the Active damping Method using Genetic Algorithm Base. International Journal of Advancements in Technology, Vol. 4, No. 1 (March 2013), pp. 36-49.
105. Saleem Naziya, Vector Control of Active Front-End Rectifier for Electric Motors under Unbalanced Condition/ Naziya Saleem, T. M. Thamizh Thentral // International Journal of Science and Research. - 2015.- № 4. - P. 1375-1379
106. Yoon John, Motors, drives, and HVAC efficiency / John Yoon // Consulting-Specifying Engineer. - 2016, № 1, P. 50-63.
107. Изделия фирмы «Elhand Transformatory» – <http://www.ru.elhand.pl/izdjelija/drossjeli>
108. Печатный каталог продукции ОАО «СКЗ«КВАР» – <http://www.kvar.su/books/katalog-2013.pdf>
109. ABB. Промышленные приводы АББ ACS800 мультидрайв 1,1 до 5600 кВт, (каталог) 2013.
110. Schneider Electric. Активный выпрямитель напряжения Altivar AFE 2010 (каталог) 2010.
111. Vacon. Оборудование Vacon для многодвигательных приводов с общей шиной постоянного тока (каталог).

112. Siemens. SINAMICS - Low Voltage Engineering Manual SINAMICS G130, G150, S120 Chassis, S120 Cabinet Modules, S150 Version 6.0 July 2010. Supplement to Catalogs D 11 2011 and D 21.3 2011 (каталог).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акт внедрения результатов диссертационной работы

«Утверждаю»

Генеральный директор
ООО «Электротехническая промышленная компания»,
действительный член Академии электротехнических наук

Б.И. Абрамов

24 марта 2016 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы
ШЕВЫРЕВОЙ Наталии Юрьевны на тему
«ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИИ БУРОВЫХ УСТАНОВОК
С ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ»,
представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук

В научно-технических разработках ООО «Электротехническая промышленная компания» при проектировании нового электрооборудования для буровых установок с частотно-регулируемым электроприводом внедрены и используются следующие результаты диссертационной работы Шевыревой Н.Ю.

1. Компьютерные модели для расчёта показателей качества электроэнергии на этапе проектирования частотно-регулируемых электроприводов (ЧРЭП) буровых установок (БУ).

2. Зависимости для определения влияния фильтро-компенсирующего устройства (ФКУ) на коэффициент мощности, отклонение напряжения и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения.

3. Технические требования к ФКУ по величине максимальной реактивной мощности, числу ступеней и рекомендуемой настройке фильтров.

4. Зависимости для оценки влияния настройки фильтра активного выпрямителя напряжения (АВН), несущей частоты АВН, задания реактивного тока АВН на коэффициент мощности, отклонение напряжения и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения.

5. Структуры систем автоматического регулирования АВН по реактивной мощности и напряжению в системе электроснабжения БУ с ЧРЭП.

Внедрение результатов диссертационной работы позволяет получить нормативные значения отклонения напряжения электропитания и суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения и заданное значение коэффициента мощности в системе электроснабжения БУ с ЧРЭП.

Начальник отдела разработки

ООО «Электротехническая промышленная компания»,
канд. техн. наук



Р.М.Валиев