

На правах рукописи



КОЗЛОВ ВИКТОР АЛЕКСАНДРОВИЧ

**СОГЛАСОВАННЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ
ТРЕХФАЗНОЙ ТРЕХПРОВОДНОЙ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ
ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2014г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Братский государственный университет» на кафедре «Электроэнергетика и электротехника».

Научный руководитель: **Большанин Георгий Анатольевич,**
кандидат технических наук, доцент.

Официальные оппоненты: **Горелов Валерий Павлович,**
Заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Электроэнергетические системы и электротехника» Федерального бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Новосибирская государственная академия водного транспорта" (ФБОУ ВПО «НГАВТ»).

Сулайманов Алмаз Омурзакович,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий научно-исследовательской лабораторией "Моделирование электроэнергетических систем" Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО «НИ ТПУ»).

Ведущая организация: Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет (НИ ИрГТУ), г. Иркутск.

Защита состоится «18» февраля 2015 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.10 при ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Научного исследовательского Томского политехнического университета по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 53-а и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/2800/worklist>.

Автореферат разослан "22" декабря 2014 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Кабышев А. В.

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современная высоковольтная линия электрической передачи (ЛЭП) с распределенными параметрами должна передавать электрическую энергию, отвечающую стандарту ГОСТ Р 54149–2010. Однако, высоковольтная ЛЭП может иметь недостаточную пропускную способность из-за наличия отраженных волн электромагнитного поля. Сложившуюся ситуацию можно исправить, применив мероприятия по обеспечению стабильного согласования протяженной ЛЭП с нагрузкой.

В современной электротехнике теоретически разработана и практически доказана состоятельность условия согласованного режима однопроводной длинной линии, которые применимы для согласования трёхфазной трёхпроводной симметричной длинной линии, входящей в состав симметричной электроэнергетической системы (ЭЭС). Однако эти условия не работают для симметричной (симметричны первичные параметры) трёхфазной трёхпроводной ЛЭП передающей электроэнергию несимметричной нагрузке и для несимметричной (несимметричны первичные параметры) трёхфазной трёхпроводной ЛЭП.

Условия согласования трёхфазной трёхпроводной симметричной длинной линии, входящей в состав симметричной ЭЭС, не учитывают во вторичных параметрах ЛЭП следующие первичные параметры: емкостную связь между соседними проводами, резистивную составляющую электромагнитной связи между соседними проводами и индуктивную связь между этими проводами (поперечные параметры ЛЭП). При выполнении научно-исследовательской работы была разработана математическая модель, учитывающая первичные параметры, на основании которых можно определить вторичные параметры несимметричных трёхфазных трёхпроводных высоковольтных ЛЭП.

Исследование посвящено формированию условий согласования трёхфазных трёхпроводных высоковольтных ЛЭП, разработке способа стабилизации согласованного режима несимметричных трёхфазных трёхпроводных высоковольтных ЛЭП, сравнительному анализу пропускной способности согласованной трёхфаз-

ной трёхпроводной высоковольтной ЛЭП, формированию законов распределения токов и напряжений вдоль согласованных несимметричных трёхфазных трёхпроводных высоковольтных ЛЭП, а также формулированию рекомендаций по развитию данного направления.

Идея работы состоит в учёте особенностей определения условий согласованного режима работы несимметричной трёхфазной трёхпроводной ЛЭП с последующей стабилизацией согласованного режима работы ЛЭП.

Степень разработанности проблемы.

В высоковольтных электрических сетях среднего, высокого и сверхвысокого напряжения улучшение показателей качества электроэнергии достигается за счет стабилизации согласованного режима работы ЛЭП, а значит, выполнения условий согласования однопроводной высоковольтной ЛЭП. Эти условия были опубликованы В. А. Вениковым.

Согласование линии с нагрузкой достигнуто А.В. Соловьевым при проектировании печатных плат (электроника).

В слаботочной ЛЭП для её согласования с электрической нагрузкой применяются согласующие резисторы, диоды Шотки, результаты исследований Д. Фурман, И. Бирюкова (электроника).

В высоковольтных электрических сетях осуществили согласование в коммутационных устройствах однопроводной ЛЭП Б. Г. Птицын, В. Д. Селемир, К. С. Шилин, С. К. Любутин, Г. А. Месяц, С. Н. Рукин.

Для снижения уровней несинусоидальности токов и напряжений может быть использовано согласование высоковольтной ЛЭП с нагрузкой, величины, сопротивления которой можно варьировать, применяя различные модификации фильтрующих устройств, таких, как активные фильтры. Об этом свидетельствуют результаты исследований А. В. Половнева, Л. В. Насоновой, И. М. Ясинского, А. Н. Яковлева, Ю. М. Казанцева, К. Г. Гордеева, А. Ф. Лекарева, В. Г. Солдатенко, С. Чиккарелли, А. Рагхупати, Б. С. Банистера, Б. Ф. Змия, Н. А. Дружининой и др.

В работах Б. П. Афанасьева, О. Е. Гольдина задача обеспечения согласования ЛЭП с нагрузкой решается с помощью переходных устройств, осуществляю-

щих преобразование величины произвольного нагрузочного комплексного или активного сопротивления слаботочной нагрузки в другую величину активного сопротивления, равную волновому сопротивлению линии. В качестве переходного устройства используется диапазонное устройство. Наряду с диапазонными устройствами на практике могут применяться переходные устройства, предназначенные для работы на фиксированной длине волны – это четвертьволновой трансформатор сопротивления, реактивный шунт и т.п.

Целью диссертационного исследования является формирование метода и обоснование возможности создания согласованного режима работы трёхфазной трёхпроводной высоковольтной ЛЭП для повышения её пропускной способности.

Для реализации данной цели в работе были поставлены следующие **задачи**:

1. Уточнение условий согласованного режима работы высоковольтной трёхфазной трёхпроводной ЛЭП.
2. Определение законов распределения напряжений и токов вдоль согласованной высоковольтной трёхфазной трёхпроводной ЛЭП различного исполнения.
3. Сравнительный анализ пропускной способности согласованной и несогласованной высоковольтных трёхфазных трёхпроводных ЛЭП.
4. Разработка способа стабилизации согласованного режима работы высоковольтной трёхфазной трёхпроводной ЛЭП.
5. Разработка программного обеспечения для формирования управляющих сигналов корректирующим органам стабилизирующим согласованный режим работы трёхфазной трёхпроводной высоковольтной ЛЭП.

Объектом исследования является трёхфазная трёхпроводная линия электрической передачи с распределенными параметрами среднего, высокого и сверхвысокого напряжения.

Предметом исследования является согласованный режим работы трёхфазной трёхпроводной ЛЭП среднего, высокого и сверхвысокого напряжения.

Теоретико-методологическую основу исследования составляют фундаментальные положения теории электротехники о дальних линиях электропередачи, труды отечественных и зарубежных ученых.

Эмпирическая база исследования представлена данными Министерства образования и науки РФ, материалами, опубликованными в монографиях, периодической печати.

Научная новизна диссертационного исследования состоит в следующем:

Разработаны алгоритмы и программное обеспечение, позволяющие осуществить стабилизацию согласования режима несимметричной трёхфазной трёхпроводной высоковольтной ЛЭП с нагрузкой.

Теоретическая значимость работы состоит в том, что полученные автором результаты исследования могут быть использованы для развития теории дальних линий электропередачи, в частности, подходов к совершенствованию механизма согласования несимметричной трёхфазной трёхпроводной высоковольтной ЛЭП с нагрузкой.

Практическая значимость исследования

1. Заключается в разработке способа, позволяющего создать интеллектуальную электрическую сеть нового поколения (интеллектуальные сети - Smart Grids) в рамках обеспечения согласованного режима работы трёхфазной трёхпроводной высоковольтной ЛЭП.

2. Согласование трёхфазной трёхпроводной высоковольтной ЛЭП позволит осуществить повышение её пропускной способности.

3. Согласование трёхфазной трёхпроводной высоковольтной ЛЭП позволит осуществить повышение качества электрической энергии.

4. Результаты исследований внедрены в 2011-2013гг. в учебный процесс на кафедре «Электроэнергетика и электротехника» ФГБОУ ВПО «БрГУ» г.Братск.

5. Работа выполнена в рамках государственной бюджетной научно-исследовательской работы ГБНИР 06-У-0902, № гос. регистрации 01201001583: “Исследование методов оптимального распределения, преобразования и потребления электрической энергии в современных электроэнергетических системах”.

6. Результаты исследований могут быть использованы в образовательном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению 140000 – Энергетика, энергетическое машиностроение и электротехника.

Допущения использованные в работе

1. Трёхфазная трёхпроводная ЛЭП принята относительно однородной.
2. Трёхфазная трёхпроводная ЛЭП в одном из трех рассматриваемых случаев принята относительно симметричной (величины тока и напряжения в фазах отличаются не более, чем на 5% друг от друга).
3. Мощность источника питания ЛЭП с распределенными параметрами считается неизменной.

Методы исследований

Для решения поставленных задач использовались фундаментальные законы и методы теоретических основ электротехники.

Реализация разработанных средств моделирования распределения токов и напряжений вдоль ЛЭП осуществлена посредством объектно ориентированного программирования. Тестирование и экспериментальные исследования созданных средств выполнены с помощью сертифицированных программ: MATLAB, MathCAD, National Instruments LabVIEW.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Условия согласованного режима работы несимметричной и симметричной трёхфазной трёхпроводной высоковольтной ЛЭП.
2. Сравнительный анализ пропускной способности согласованной и несогласованной высоковольтных трёхфазных трёхпроводных ЛЭП.
3. Алгоритм и программное обеспечение, направленные на стабилизацию согласованного режима работы трёхфазной трёхпроводной высоковольтной ЛЭП различного исполнения.

Личный вклад автора в диссертационную работу заключается в постановке задач исследования, планировании и проведении экспериментов, обработке и интерпретации полученных результатов, в том числе и в качестве изобретений. Обсуждение методов решения поставленных задач проводилось с научным руководителем.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Результаты диссертационного исследования соответствуют следующим пунктам паспорта специальности 05.14.02: 10. Теоретический анализ и расчетные исследования по транспорту электроэнергии переменным и постоянным током, включая проблему повышения пропускной способности транспортных каналов; 12. Разработка методов контроля и анализа качества электроэнергии и мер по его обеспечению.

Апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы обсуждены на следующих конференциях:

– Восьмая всероссийская научно-техническая конференция «Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири» (г. Братск, 2010);

– Седьмая международная научно-практическая конференция «Современные вопросы науки – XXI век» (г. Тамбов, 2011);

– Всероссийский конкурс научных работ студентов, магистрантов и аспирантов «Компьютерные технологии и информационные системы в электротехнике: сборник материалов» (г. Тольятти, 2011);

– Восьмая международная научно-практическая конференция «Новости передовой науки» (г. София, 2012);

– Вторая международная научно-техническая конференция студентов, магистрантов, аспирантов «Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов» (г. Тольятти, 2012);

– Одиннадцатая всероссийская научно-техническая конференция «Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири» (г. Братск, 2013).

Основные результаты исследования опубликованы в 34 научных работах, в том числе 4 статьи в рецензируемых периодических изданиях по перечню ВАК РФ:

1. Козлов В. А., Большанин Г. А. Системы. Методы. Технологии, БрГУ, г. Братск, №4, 2011г.;

2. Козлов В. А., Большанин Г. А. Системы. Методы. Технологии, БрГУ, г. Братск, №1, 2013г.;

3. Козлов В. А., Большанин Г. А. Производственно технический журнал «Главный энергетик», г. Москва, №6, 2013г.;

4. Козлов В. А., Большанин Г. А. Научно-технический журнал «Электротехнические комплексы и системы управления», г. Воронеж, №1, 2014г.

Получено 5 патентов РФ на изобретения RU №2490767, RU №2488218, RU №2502176, RU №2502177, RU №2520578 и свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ №2012611400.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Объем основной части диссертации составляет 161 страницу, включая 66 рисунков, 30 таблиц, списка литературы из 117 наименований.

II. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** показана актуальность и степень разработанности темы исследования, цели и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методы исследования, основные положения, выносимые на защиту, апробация результатов исследования, структура работы.

В **Главе 1** рассмотрены существующие способы повышения качества электроэнергии в линиях с распределенными параметрами.

ЛЭП предназначены для транспортировки электрической энергии от источника к потребителю. Для повышения пропускной способности и передачи большого потока электрической энергии ЛЭП используют при высоком напряжении трёхфазного трёхпроводного исполнения. Но, тем не менее, пропускной способности таких ЛЭП нередко оказывается не достаточно для передачи требуемого количества электрической энергии крупным потребителям. Одним из возможных путей повышения пропускной способности трёхфазной трёхпроводной высоковольтной ЛЭП является её согласование с электрической нагрузкой. Кроме того, согласо-

ние ЛЭП с электрической нагрузкой является действенным способом повышения качества электрической энергии.

В теории электротехники известно условие согласования нагрузки с однопроводной ЛЭП, которое отражено равенством (В.А. Веников):

$$\underline{Z}_{2n} = \underline{Z}_{cn}, \quad (1)$$

где \underline{Z}_{2n} – изображение полного сопротивления электрической нагрузки на комплексной плоскости на частоте n -ой гармонической составляющей напряжения и тока, Ом; \underline{Z}_{cn} – волновое сопротивление линии, Ом.

Условия согласования трёхпроводной ЛЭП с электрической нагрузкой имеют вид отличный от формулы (1). Своеобразие этих условий обусловлено тем, что передача электрической энергии по трёхпроводной ЛЭП обеспечивается тремя парами волн электромагнитного поля, а по однопроводной – одной (М.В. Костенко, Л.С. Перельман, Ю.П. Шкарин, Г.А. Большанин).

Рассмотрены существующие технические решения, направленные на улучшение качества электрической энергии, из которых ни одно не применимо для согласования несимметричной трёхфазной трёхпроводной высоковольтной ЛЭП.

В **Главе 2** выполнен анализ математических моделей трёхфазных трёхпроводных высоковольтных ЛЭП различного исполнения, определены условия согласованного режима работы этих ЛЭП.

Первой проанализирована несимметричная (несимметричны первичные параметры) трёхфазная трёхпроводная высоковольтная линия электропередачи (рисунок 1), доставляющая электроэнергию несимметричной нагрузке.

Символы, используемые на рисунке 1 определены в монографии “Распределение электрической энергии пониженного качества по участкам электроэнергетических систем” (Большанин, Г.А. Распределение электрической энергии пониженного качества по участкам электроэнергетических систем. В 2кн. Кн. 1/ Г.А. Большанин. – Братск: БрГУ, 2006. – 807с.).

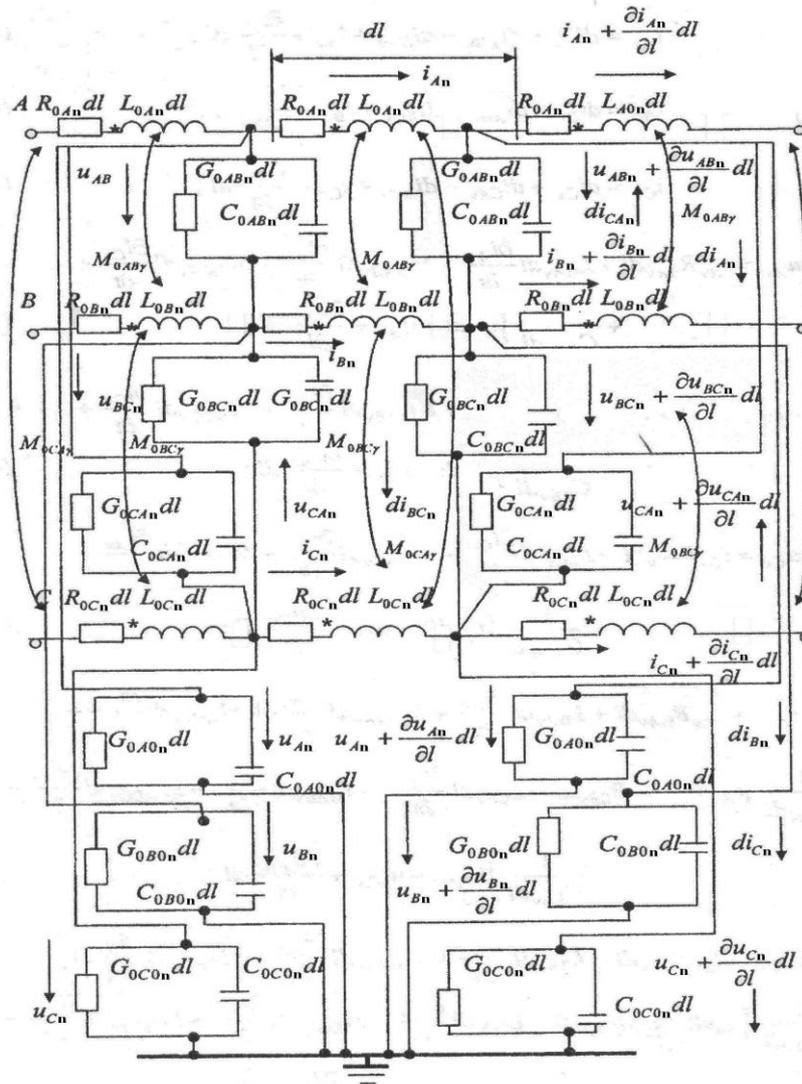


Рисунок 1. Электрическая схема замещения элементарного участка высоковольтной трёхфазной трёхпроводной ЛЭП.

Условия согласования для несимметричной трёхфазной трёхпроводной высоковольтной ЛЭП, представленной на рисунке 1, определены в изобретении RU №2502176 (авторы В.А. Козлов, Г.А. Большанин) и имеют вид:

$$\frac{\dot{U}_{An\gamma_1}}{\dot{I}_{An\gamma_1}} = \frac{\dot{U}_{A.2}}{\dot{I}_{A.2}}; \quad \frac{\dot{U}_{Bn\gamma_1}}{\dot{I}_{Bn\gamma_1}} = \frac{\dot{U}_{B.2}}{\dot{I}_{B.2}}; \quad \frac{\dot{U}_{Cn\gamma_1}}{\dot{I}_{Cn\gamma_1}} = \frac{\dot{U}_{C.2}}{\dot{I}_{C.2}}, \quad (2)$$

где

$$\dot{U}_{An\gamma_1} = \dot{U}_{1An} e^{-\gamma_1 l}; \quad \dot{U}_{Bn\gamma_1} = \dot{U}_{1Bn} e^{-\gamma_1 l}; \quad \dot{U}_{Cn\gamma_1} = \dot{U}_{1Cn} e^{-\gamma_1 l};$$

$$\dot{I}_{An\gamma_1} = \dot{I}_{1An} e^{-\gamma_1 l} + \frac{\dot{I}_{1Bn} \cdot \underline{Z}_{cB1n}}{\underline{Z}_{cAB1n}} e^{-\gamma_1 l} + \frac{\dot{I}_{1Cn} \cdot \underline{Z}_{cC1n}}{\underline{Z}_{cCA1n}} e^{-\gamma_1 l};$$

$$\dot{I}_{Bn\gamma_1} = \dot{I}_{1Bn} e^{-\gamma_1 n l} + \frac{\dot{I}_{1An} \cdot \underline{Z}_{cA1n}}{\underline{Z}_{cAB1n}} e^{-\gamma_1 n l} + \frac{\dot{I}_{1Cn} \cdot \underline{Z}_{cC1n}}{\underline{Z}_{cBC1n}} e^{-\gamma_1 n l};$$

$$\dot{I}_{Cn\gamma_1} = \dot{I}_{1Cn} e^{-\gamma_1 n l} + \frac{\dot{I}_{1An} \cdot \underline{Z}_{cA1n}}{\underline{Z}_{cCA1n}} e^{-\gamma_1 n l} + \frac{\dot{I}_{1Bn} \cdot \underline{Z}_{cB1n}}{\underline{Z}_{cBC1n}} e^{-\gamma_1 n l};$$

\dot{U}_{1An} , \dot{U}_{1Bn} , \dot{U}_{1Cn} – фазные напряжения в начале ЛЭП, В; $\dot{U}_{An\gamma_1}$, $\dot{U}_{Bn\gamma_1}$, $\dot{U}_{Cn\gamma_1}$ – фазные напряжения в начале ЛЭП от первой пары (условно) волн электромагнитного поля; $\dot{I}_{An\gamma_1}$, $\dot{I}_{Bn\gamma_1}$, $\dot{I}_{Cn\gamma_1}$ – линейные токи в начале линии от первой пары (условно) волн электромагнитного поля; $\dot{I}_{A.2}$; $\dot{I}_{B.2}$; $\dot{I}_{C.2}$ – линейные токи электрической нагрузки в конце ЛЭП; $\dot{U}_{A.2}$, $\dot{U}_{B.2}$, $\dot{U}_{C.2}$ – фазные напряжения на клеммах электрической нагрузки (конец линии); γ_{1n} – коэффициент распространения первой пары волн электромагнитного поля; \underline{Z}_{cA1n} , \underline{Z}_{cB1n} , \underline{Z}_{cC1n} – собственные волновые сопротивления ЛЭП, Ом; l – протяженность ЛЭП, км; \underline{Z}_{cAB1n} ; \underline{Z}_{cBC1n} ; \underline{Z}_{cCA1n} – взаимные волновые сопротивления для первой пары волн (условно) электромагнитного поля, Ом; \dot{I}_{1An} , \dot{I}_{1Bn} , \dot{I}_{1Cn} – линейные токи в начале ЛЭП, А.

Законы распределения напряжения и тока в линейном проводе А, как и для других линейных проводов, при исключении первой (условно) отраженной волны электромагнитного поля с учётом формулы (2) запишутся так:

$$\dot{U}_{An} = \frac{1}{3} \left(\dot{U}_{1An} \cdot e^{-\gamma_1 n l} + \dot{U}_{1An} ch\gamma_{2n} l - \dot{I}_{1An} \underline{Z}_{cA2n} sh\gamma_{2n} l + \dot{U}_{1An} ch\gamma_{3n} l - \dot{I}_{1An} \underline{Z}_{cA3n} sh\gamma_{3n} l \right) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{An} = \frac{1}{3} \left(\dot{I}_{1An} \cdot e^{-\gamma_1 n l} - \frac{\dot{U}_{1An}}{\underline{Z}_{cA2n}} sh\gamma_{2n} l + \dot{I}_{1An} ch\gamma_{2n} l - \frac{\dot{U}_{1An}}{\underline{Z}_{cA3n}} sh\gamma_{3n} l + \right. \\ \left. + \dot{I}_{1An} ch\gamma_{3n} l + \frac{\dot{I}_{1Bn} \underline{Z}_{cB1n}}{\underline{Z}_{cAB1n}} \cdot e^{-\gamma_1 n l} - \frac{\dot{U}_{1Bn}}{\underline{Z}_{cAB2n}} sh\gamma_{2n} l + \frac{\dot{I}_{1Bn} \underline{Z}_{cB2n}}{\underline{Z}_{cAB2n}} ch\gamma_{2n} l - \right. \\ \left. - \frac{\dot{U}_{1Bn}}{\underline{Z}_{cAB3n}} sh\gamma_{3n} l + \frac{\dot{I}_{1Bn} \underline{Z}_{cB3n}}{\underline{Z}_{cAB3n}} ch\gamma_{3n} l + \frac{\dot{I}_{1Cn} \underline{Z}_{cC1n}}{\underline{Z}_{cCA1n}} \cdot e^{-\gamma_1 n l} - \right. \\ \left. - \frac{\dot{U}_{1Cn}}{\underline{Z}_{cCA2n}} sh\gamma_{2n} l + \frac{\dot{I}_{1Cn} \underline{Z}_{cC2n}}{\underline{Z}_{cCA2n}} ch\gamma_{2n} l - \frac{\dot{U}_{1Cn}}{\underline{Z}_{cCA3n}} sh\gamma_{3n} l + \frac{\dot{I}_{1Cn} \underline{Z}_{cC3n}}{\underline{Z}_{cCA3n}} ch\gamma_{3n} l \right), \quad (4) \end{aligned}$$

где γ_{2n} , γ_{3n} – коэффициенты распространения соответственно 2-ой и 3-ей пары волн электромагнитного поля; \underline{Z}_{cA2n} , \underline{Z}_{cA3n} – собственные волновые сопротивле-

ния линии А, Ом; \underline{Z}_{cAB2n} , \underline{Z}_{cAB3n} , \underline{Z}_{cCA2n} , \underline{Z}_{cCA3n} – взаимные волновые сопротивления ЛЭП линии А, Ом.

Получены условия согласованного режима работы симметричной трёхфазной трёхпроводной высоковольтной ЛЭП (симметричны первичные параметры ЛЭП), входящей в состав несимметричной электроэнергетической системы (изобретение RU №2488218, авторы В.А. Козлов, Г.А. Большанин), которые представят в следующем виде:

$$\frac{\dot{U}_{An\gamma_{1.H}}}{\dot{I}_{An\gamma_{1.H}}} = \frac{\dot{U}_{A.2.H}}{\dot{I}_{A.2.H}}; \quad \frac{\dot{U}_{Bn\gamma_{1.H}}}{\dot{I}_{Bn\gamma_{1.H}}} = \frac{\dot{U}_{B.2.H}}{\dot{I}_{B.2.H}}; \quad \frac{\dot{U}_{Cn\gamma_{1.H}}}{\dot{I}_{Cn\gamma_{1.H}}} = \frac{\dot{U}_{C.2.H}}{\dot{I}_{C.2.H}}, \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} \dot{U}_{An\gamma_{1.H}} &= \dot{U}_{1An.H} \cdot e^{-\gamma_{1n}l}; & \dot{U}_{Bn\gamma_{1.H}} &= \dot{U}_{1Bn.H} \cdot e^{-\gamma_{1n}l}; & \dot{U}_{Cn\gamma_{1.H}} &= \dot{U}_{1Cn.H} \cdot e^{-\gamma_{1n}l}; \\ \dot{I}_{An\gamma_{1.H}} &= \dot{I}_{1An.H} \cdot e^{-\gamma_{1n}l}; & \dot{I}_{Bn\gamma_{1.H}} &= \dot{I}_{1Bn.H} \cdot e^{-\gamma_{1n}l}; & \dot{I}_{Cn\gamma_{1.H}} &= \dot{I}_{1Cn.H} \cdot e^{-\gamma_{1n}l}. \end{aligned}$$

Законы распределения напряжения и тока для формулы (5) приведены в статье журнала из перечня ВАК [1].

Рассмотрена трёхфазная трёхпроводная симметричная длинная высоковольтная ЛЭП, доставляющая электроэнергию к симметричной нагрузке (симметричная электроэнергетическая система).

Условия согласования симметричной трёхфазной трёхпроводной высоковольтной ЛЭП (симметричны первичные параметры ЛЭП), входящей в состав симметричной электроэнергетической системы, следует представить так:

$$\frac{\dot{U}_{An.S}}{\dot{I}_{An.S}} = \frac{\dot{U}_{A.2.S}}{\dot{I}_{A.2.S}} = \frac{\dot{U}_{Bn.S}}{\dot{I}_{Bn.S}} = \frac{\dot{U}_{B.2.S}}{\dot{I}_{B.2.S}} = \frac{\dot{U}_{Cn.S}}{\dot{I}_{Cn.S}} = \frac{\dot{U}_{C.2.S}}{\dot{I}_{C.2.S}}, \quad (6)$$

где $\dot{U}_{An.S}$, $\dot{U}_{Bn.S}$, $\dot{U}_{Cn.S}$ – фазные напряжения на клеммах источника электроэнергии на частоте n -ой гармонической составляющей (начало ЛЭП), В; $\dot{U}_{A.2.S}$, $\dot{U}_{B.2.S}$, $\dot{U}_{C.2.S}$ – фазные напряжения на клеммах симметричной электрической нагрузки (конец ЛЭП), В; $\dot{I}_{An.S}$, $\dot{I}_{Bn.S}$, $\dot{I}_{Cn.S}$ – линейные токи в начале ЛЭП на частоте n -ой гармонической составляющей, А; $\dot{I}_{A.2.S}$, $\dot{I}_{B.2.S}$, $\dot{I}_{C.2.S}$ – токи в конце ЛЭП, А.

Законы распределения напряжения и тока для вышеприведенной формулы приведены в статье журнала из перечня ВАК [1].

На рисунке 2 показана схема алгоритма работы линии А трёхфазного трёхпроводного участка ЛЭП. Линия получает электроэнергию от генератора (Г), передает её к потребителю $\underline{Z}_{H.1}$. В этом случае обеспечивается согласованный режим работы ЛЭП, т.е. соблюдаются условия:

$$\left. \begin{aligned} \underline{Z}_{cA1n} &= \underline{Z}_{H.1.A}; \\ \underline{Z}_{cB1n} &= \underline{Z}_{H.1.B}; \\ \underline{Z}_{cC1n} &= \underline{Z}_{H.1.C}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Графическая интерпретация распределения активной мощности вдоль согласованной линии А показана на рисунке 3 (линия 1).

При добавлении к имеющейся обобщенной нагрузке нагрузки $\underline{Z}_{H.2}$ линия окажется несогласованной с нагрузкой, а распределение активной мощности вдоль анализируемой линии примет иной вид (рисунок 3 (линия 2)). Совокупность сопротивлений $\underline{Z}_{H.1.A}$ и $\underline{Z}_{H.2}$ характеризуется величиной обобщенного сопротивления \underline{Z}_H . Нагрузками $\underline{Z}_{H.1.A}$ и \underline{Z}_H потребляется другая по величине активная мощность. Это отличие менее существенно по сравнению с разницей величин активных мощностей ΔP согласованной (линия 1) и несогласованной (линия 2) трёхпроводной ЛЭП в начале линии А. Доставить электроэнергию к нагрузке $\underline{Z}_{H.2}$, в рамках стабилизации согласованного режима работы ЛЭП, можно и от системы компенсирующих устройств КУ, куда могут входить устройства такие, как ГЭС средней или малой мощности, накопители электрической энергии, устройства компенсации реактивной мощности и т.п.



Рисунок 2. Схема алгоритма работы линии А трёхфазной ЛЭП.

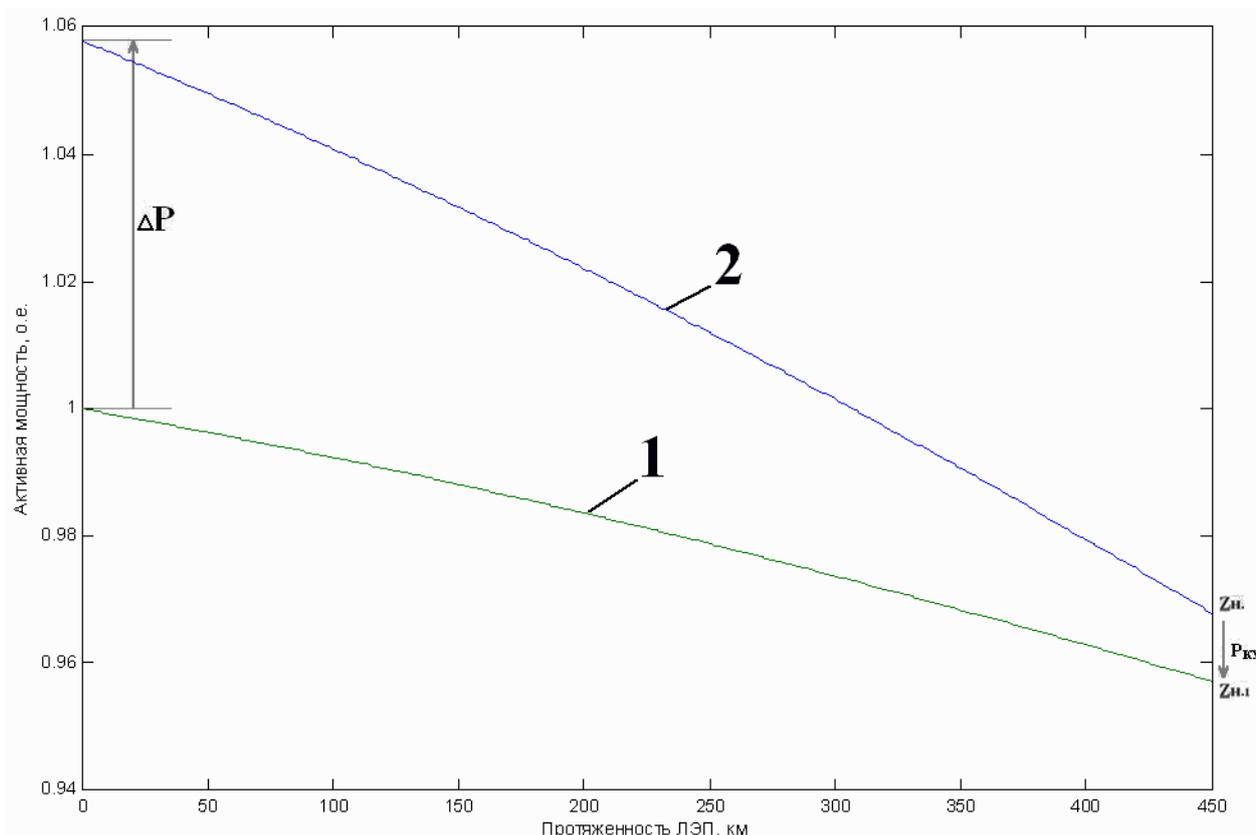


Рисунок 3. Графическая интерпретация распределения активной мощности трёхфазной трёхпроводной согласованной (1) и несогласованной ЛЭП (2) вдоль линейного провода А.

Коэффициент полезного действия ЛЭП без согласования (рисунок 3) равен 91.5%. А коэффициент полезного действия согласованной ЛЭП – 95,72%. Согласование на основной частоте одной пары волн электромагнитного поля привело к увеличению к.п.д. трёхфазной трёхпроводной ЛЭП на 4,22%.

Пропускная способность линии, изображенной на рисунке 2, была ограничена активной мощностью на источнике питания согласованной линии А. Эта мощность на рисунке 3 принята за единицу (линия 1). Тогда значение активной мощности несогласованной линии А (линия 2), на источнике питания будет иметь величину 1,057.

Отмеченные факты свидетельствуют о повышении пропускной способности линии А входящей в состав трёхфазной трёхпроводной ЛЭП.

В **Главе 3** разработан алгоритм стабилизации согласованного режима работы трёхпроводной высоковольтной ЛЭП (рисунок 4). Работоспособность алгорит-

ма с учётом возможного изменения нагрузки во времени проверялась при помощи программы компьютерного моделирования в среде National Instruments LabVIEW 2009.

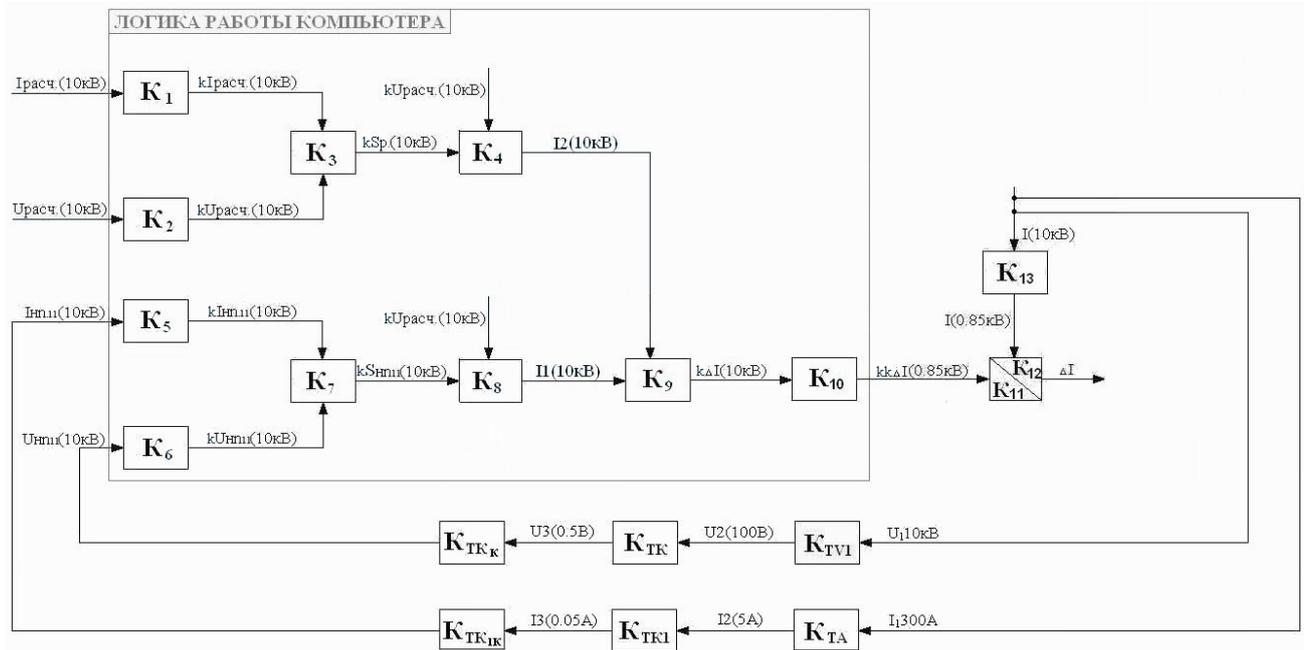


Рисунок 4. Схема автоматического регулирования нагрузки ЛЭП.

Из рисунка 4 видно, что токи и напряжения, поступившие в блок “ЛОГИКА РАБОТЫ КОМПЬЮТЕРА”, способствуют получению значений полных мощностей измеренной $kS_{нн1}(10кВ)$ и расчетной $kS_p(10кВ)$. Затем на основании расчетной величины напряжения для согласованной ЛЭП $kU_{РАСЧ.}(10кВ)$, определяются расчетный ток согласованной ЛЭП $I2(10кВ)$ и ток $I1(10кВ)$, полученный на основании измеренных величин $I_{нн.11}(10кВ)$, $U_{нн11}(10кВ)$. Далее выполняется сравнение тока согласованной ЛЭП $I2(10кВ)$ и тока $I1(10кВ)$. Если результирующее значение $k\Delta I(10кВ)$ равно нулю, то говорят о факте согласования ЛЭП с нагрузкой.

Алгоритм, представленный на рисунке 4, может быть оптимизирован, как это сделано в программе ЭВМ №2012611400 (В.А. Козлов, Г.А. Большанин). Оптимизация предполагает исключение процедуры определения величин полных мощностей $kS_{нн1}(10кВ)$ и $kS_p(10кВ)$ (рисунок 4).

Блок КУ изображенный на рисунках 2 и 5 включает в свой состав такие технические средства, как статический тиристорный компенсатор (СТК), источники активной мощности (средние ГЭС и т.п.), которые здесь используются для изменения обобщенного сопротивления нагрузки.

На рисунке 6 показана схема алгоритма выбора КУ, где с учётом допущений и по известным величинам ΔZ_{04p} , ΔZ_{06p} , ΔZ_{07p} , ΔZ_{08p} , ΔZ_{09p} , полученным при реализации алгоритма программы ЭВМ №2012611400 (В.А. Козлов, Г.А. Большанин), получают значения единицы или нуля для блока N, что делает возможным реализацию другой части алгоритма, которая сравнивает измеренные и расчетные величины активной и реактивной мощности нагрузки. В результате этих действий получают величины активной ΔP , реактивной ΔQ мощностей компенсирующих устройств. На величину реактивной мощности нагрузки может влиять КУ2 в виде, например, статического синхронного компенсатора, а на величину активной мощности КУ1 в виде, например, малой ГЭС, дизель-генератора и т.п.

Величина разницы между согласованной и несогласованной трёхфазной трёхпроводной ЛЭП определяется по сопротивлению и по напряжению, как показано в патенте RU №2488218 (авторы В.А. Козлов, Г.А. Большанин).

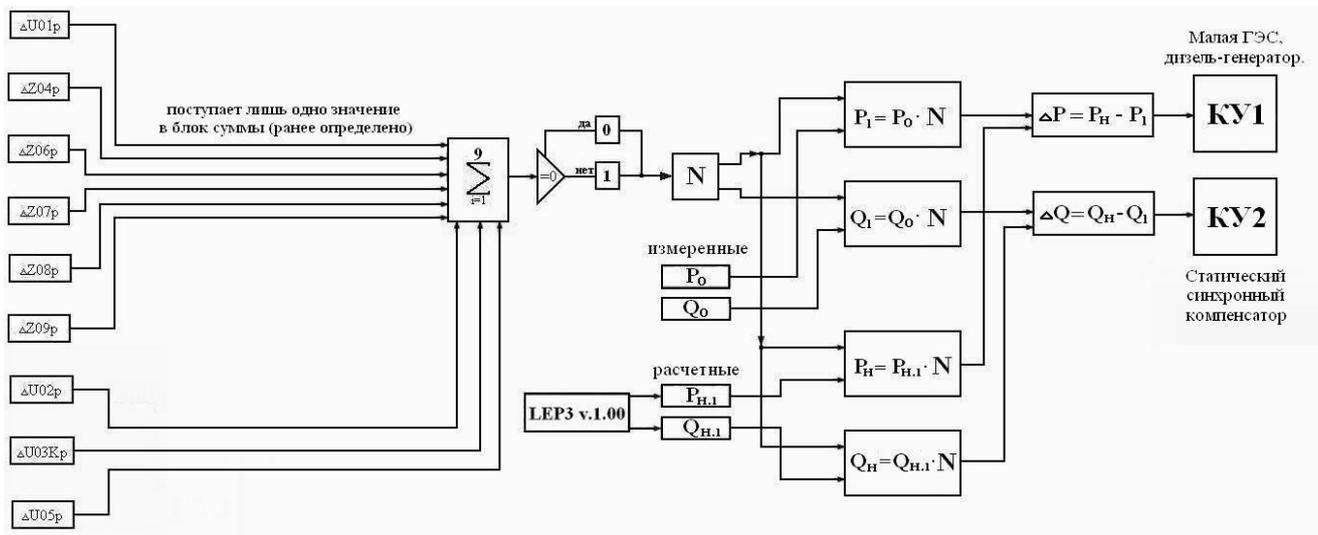


Рисунок 6. Схема алгоритма выбора группы компенсирующих устройств.

Кроме того, в главе 4 приведены результаты экономического и технического обоснования мероприятия по согласованию ЛЭП с нагрузкой. Результатом эконо-

мического обоснования является то, что срок окупаемости КУ активной и реактивной мощности равен 4,76 года при стоимости строительства (затратах) ГАЭС 15 млрд.руб. и экономии от мероприятия согласования ЛЭП с нагрузкой в 1,923млрд.руб в год. Таким образом, после 4,76 лет (здесь не учитываются затраты на оплату труда персонала) эксплуатации ГАЭС согласованный режим работы ЛЭП позволит получить прибыль и не потребует существенных денежных вложений вплоть до капитального ремонта оборудования (капитальный ремонт производится через 25 лет эксплуатации). Затраты на закупку оборудования ГАЭС первоначально составили 2,277млрд.руб.

Результатом технического обоснования для компенсирующего устройства активной мощности (КУ АМ), которое установлено на шинах нагрузки (420МВт) А (1 линия), является компенсация мощности от КУ АМ за год в дневное А, В (2 линия) и ночное А, В (3 линия) время суток (рисунок 7). Из рисунка 7 видно, что КУ АМ успешно справляется с изменением активной мощности нагрузки в течение года.

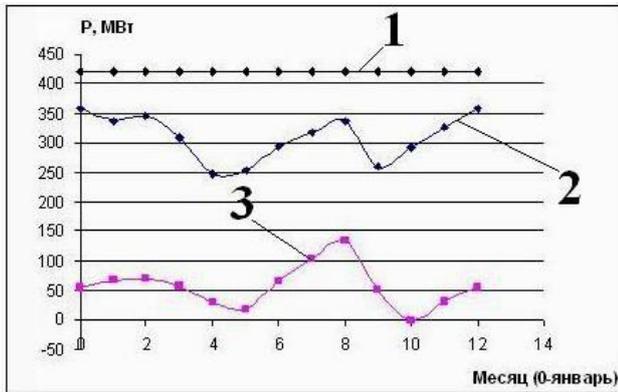
Номинальная мощность КУ АМ, установленного на шинах нагрузки, составила 357МВт.

Напряжение выбранного генератора должно изменяться от 100% до 120%. При этом частота генератора будет неизменной. С учётом сказанного определяется диапазон изменения напряжения генератора в процентном соотношении за год, на основании которого можно утверждать, что наибольшее отклонение напряжения нагрузки от номинального составляет 16,4%. Однако, при этом основная частота останется неизменной (рисунок 8).

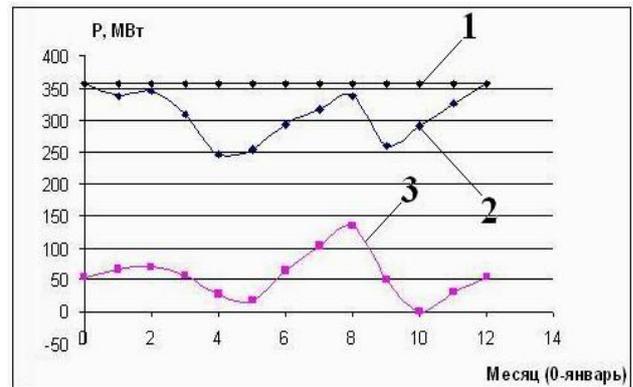
Отклонение напряжения генератора от заданного значения находится в пределах 0,5% при температурных изменениях от $0^{\circ}C$ до $50^{\circ}C$.

На рисунке 9 показаны установленная мощность компенсирующего устройства реактивной мощности (КУ РМ), подключенного к шинам нагрузки (141,75МВАр) (линия 1), и реальная вырабатываемая мощность КУ РМ, которое установлено на шинах нагрузки, за год в дневное (линия 2) и ночное (линия 3)

время суток. Из рисунка 9 видно, что КУ РМ успешно компенсирует изменения потребления реактивной мощности нагрузки в течение года.



(А)



(В)

Рисунок 7. Установленная мощность КУ АМ:

(А) Сравнение с установленной мощностью КУ АМ реально потребляемой активной мощности: 1 – установленная мощность КУ АМ (420МВт);

2 – мощность, вырабатываемая КУ АМ за год (день); 3 – мощность,

вырабатываемая КУ АМ за год (ночь); (В) Сравнение с номинальной мощностью

компенсирующего устройства реально потребляемой активной мощности:

1 – номинальная мощность КУ АМ ($420\text{МВт} \cdot 0,85$).

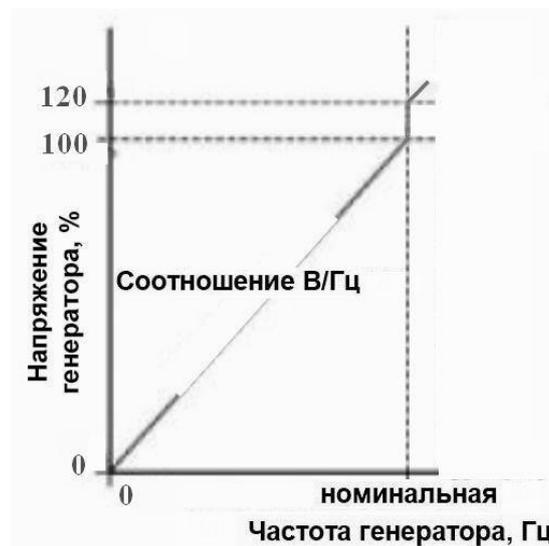


Рисунок 8. Характеристика соотношения В/Гц.

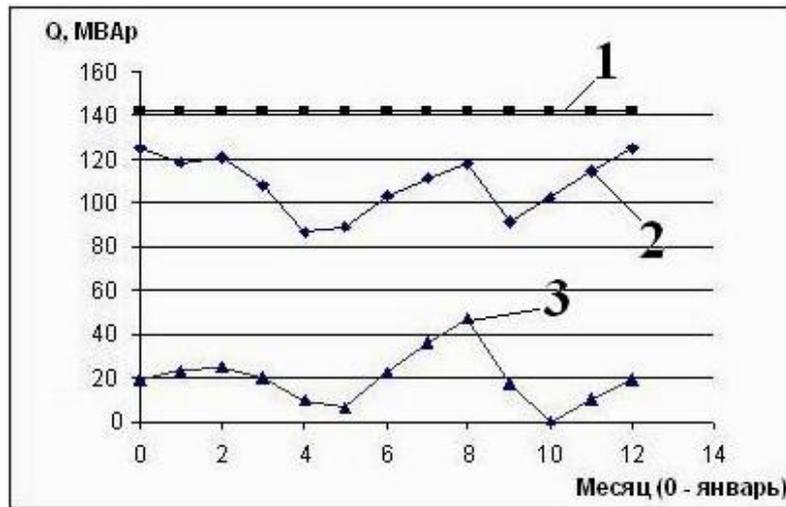


Рисунок 9. Графики реактивной мощности КУ РМ.

1 – установленная мощность КУ РМ (141,75МВАр); 2 – мощность, вырабатываемая КУ РМ за год (день);

3 – мощность, вырабатываемая КУ РМ за год (ночь).

На рисунке 10 показан график некомпенсированной реактивной мощности, КУ РМ установленного на шинах нагрузки длинной ЛЭП, днем (1 линия) и ночью (2 линия).

Максимальная погрешность работы компенсирующего устройства реактивной мощности составляет менее 1%. (рисунок 10).

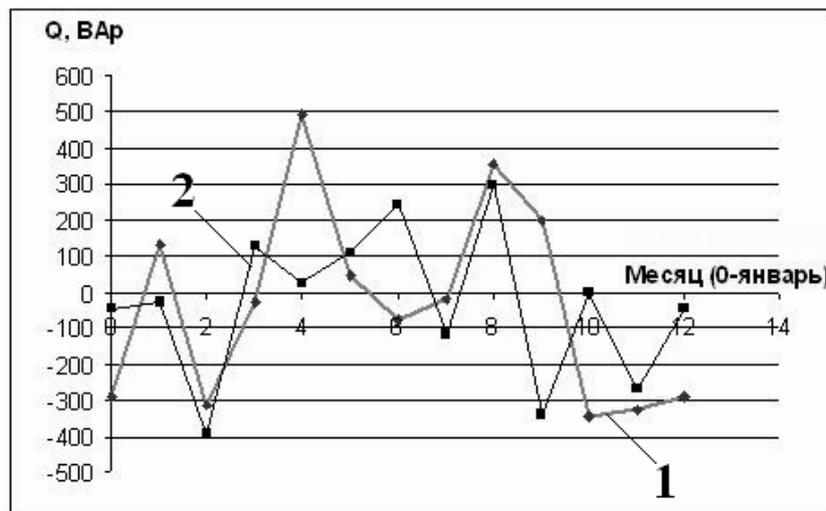


Рисунок 10. Погрешность работы КУ РМ за год:

1 – некомпенсированная мощность КУ РМ за год (день);

2 – некомпенсированная мощность КУ РМ за год (ночь).

Срок окупаемости предлагаемых компенсирующих устройств активной и реактивной мощности, работающих на шинах нагрузки по изобретениям RU №2488218, RU №2502176 и обеспечивающих стабильность согласованного режима работы ЛЭП, равен 4,76 года (таблица 1) с учётом возможности передачи электроэнергии непосредственно от КУ АМ и КУ РМ и с учётом того, что согласование ЛЭП с нагрузкой реализуется для наименьшего значения активной мощности длительно потребляемой нагрузкой в течение года.

Таблица 1

Сводная таблица

Стоимость ГАЭС, т.руб.	Стоимость УК РМ, т.руб.	Общая стоимость, т.руб. (1)+(2)	Эффективность со- гласования по наи- меньшему значению активной мощности нагрузки, т.руб. в год	Срок окупаемости систе- мы КУ активной и реак- тивной мощности, лет
1	2	3	4	5
15000000	92394	15092394	3167847,958	4,76

В Заключении приведены основные выводы работы.

1. Сформулированы законы распределения токов и напряжений вдоль согласованной несимметричной трёхфазной трёхпроводной высоковольтной ЛЭП передающей электроэнергию несимметричной нагрузке.

2. Сформулированы законы распределения токов и напряжений вдоль согласованной симметричной трёхфазной трёхпроводной высоковольтной ЛЭП, передающей электроэнергию несимметричной нагрузке.

3. При согласовании несимметричной трёхфазной трёхпроводной высоковольтной ЛЭП достигается исключение лишь одной отраженной волны электромагнитного поля в каждом линейном проводе.

4. При согласовании симметричной ЛЭП, входящей в состав симметричной электроэнергетической системы, достигается исключение всех отраженных волн электромагнитного поля.

5. Пропускная способность трёхфазной трёхпроводной высоковольтной ЛЭП при её согласовании с нагрузкой увеличивается.

6. Согласование ЛЭП с электрической нагрузкой способствует существенному увеличению коэффициента полезного действия электрической передачи.

7. Разработано и апробировано программное обеспечение, позволяющее выработать сигналы корректирующим органам для стабилизации согласованного режима работы трёхфазной трёхпроводной высоковольтной длинной ЛЭП.

8. Срок окупаемости компенсирующих устройств активной и реактивной мощности обеспечивающих стабильность согласованного режима работы ЛЭП равен 4,76 года.

9. Определены возможные погрешности работы компенсирующих устройств активной и реактивной мощности. Отклонение напряжения на шинах генератора от заданного значения находится в пределах 0,5% при температурных изменениях от 0°C до 50°C . Максимальная погрешность работы компенсирующего устройства реактивной мощности составляет менее 1%.

Основные положения диссертационного исследования изложены автором в следующих публикациях:

Статьи в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК:

1. Козлов, В. А. Согласованный режим работы однородной трёхпроводной линии электропередачи / В. А. Козлов, Г. А. Большанин // Системы. Методы. Технологии. – 2011. – №4. – С. 70-76. (0,693 / 0,347 п. л.).

2. Козлов, В. А. Коэффициент полезного действия высоковольтной трёхфазной трёхпроводной линии электрической передачи с распределенными параметрами / В. А. Козлов, Г. А. Большанин // Системы. Методы. Технологии. – 2013. – №1. – С. 71-75. (0,578 / 0,289 п. л.).

3. Козлов, В. А. Согласование трёхфазной трёхпроводной высоковольтной линии электропередачи с электрической нагрузкой / В. А. Козлов, Г. А. Большанин // Главный энергетик. – 2013. – №6. – С. 32-38. (0,809 / 0,404 п. л.).

4. Козлов, В. А. Учёт стрелы провеса линейного провода трёхфазной трёхпроводной линии электропередачи при её согласовании с электрической нагрузкой / В. А. Козлов, Г. А. Большанин // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2014. – №1. – С. 77-82. (0,693 / 0,347 п. л.).

Публикации в сборниках статей, журналах, других периодических изданиях, патенты, программы ЭВМ:

5. Козлов, В. А. Согласование электрической нагрузки с питающей сетью как средство повышения качества электрической энергии / В. А. Козлов // Труды Братского государственного университета: Сер.: Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири: в 2 т. Т.2. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010. – С. 62-64. (0,121 п. л.)

6. Козлов, В. А. Согласованный режим работы однородной трёхпроводной ЛЭП 220кВ и выше как средство улучшения электромагнитной обстановки / В. А. Козлов, Г. А. Большанин // Наука сегодня: теоретические аспекты и практика применения. Ч.4: Сб. науч. трудов. – Тамбов: Изд-во ТРОО «Бизнес-Наука-Общество», 2011. – С. 63-66. (0,161 / 0,081 п. л.).

Общий объем опубликованных работ составляет 17,437 п. л.