

На правах рукописи



Шишков Евгений Михайлович

**АНАЛИЗ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ МНОГОЦЕПНЫХ
ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА
ФАЗНЫХ КООРДИНАТ**

Специальность 05.14.02 – «Электрические станции
и электроэнергетические системы»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2013

Работа выполнена на кафедрах «Электрические станции» и «Автоматизированные электроэнергетические системы» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный технический университет» (г. Самара).

Научный руководитель — **ВЕДЕРНИКОВ Александр Сергеевич**
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты — **ХРУЩЁВ Юрий Васильевич**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (г. Томск), профессор кафедры «Электрические сети и электротехника»

— **ЕГОРОВ Александр Олегович**
кандидат технических наук,
ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург), доцент кафедры «Автоматизированные электрические системы»

Ведущая организация — ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» (г. Иваново)

Защита состоится «9» октября 2013 г. в 14 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.269.10 при ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (г. Томск, ул. Белинского, д. 55).

Автореферат разослан «27» августа 2013 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
Д 212.269.10 д.т.н., с.н.с.



Кабышев Александр Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность темы. Для современных электроэнергетических систем (ЭЭС) характерны, с одной стороны, рост мощностей систем электроснабжения, а с другой – значительное ужесточение территориальных и иных ограничений. Это приводит к необходимости географического сближения и функционального соединения передачи больших (на уровне ГВт) электрических мощностей и их распределения, то есть создания в ЭЭС специфических комплексных электроустановок, объединяющих в непосредственной близости элементы системных и распределительных электрических сетей.

С учетом теоретического и технического обеспечения решения этих проблем, не претендуя на исчерпывающую полноту, можно выделить эффективные современные конструкции кабельных сетей, использующих полимерную, масло- и газонаполненную изоляцию или явление высокотемпературной сверхпроводимости и электрические сети на базе компактных воздушных линий с междуфазными изолирующими распорками или многоцепных воздушных линий (МВЛ).

Анализ показывает, что в условиях жестких территориальных ограничений на развитие электрических сетей в целом ряде случаев экономически целесообразно применение *комбинированных МВЛ*, на опорах которых размещены две и более трёхфазных ВЛ *разных* номинальных напряжений. Таким образом принципиальной особенностью МВЛ является *совмещение* на отдельных ее участках в единой конструкции *ВЛ большой электрической мощности высокого и сверхвысокого напряжения и ВЛ распределительной сети*. Это значительно сокращает затраты, уменьшая площади, отчуждаемые под трассы ВЛ и территории подстанций, снижает уровни напряжённостей электромагнитного поля вблизи ВЛ, что особенно немаловажно в условиях густонаселённых районов страны с высокой концентрацией энергопотребления.

Компактность комбинированных МВЛ, определяет высокую интенсивность электромагнитного взаимодействия между их отдельными элементами, не учитывать которое совершенно недопустимо. Поэтому очевидна необходимость перспективного развития и усовершенствования математического аппарата промышленных вычислительных комплексов, предназначенных для обеспечения технологических процессов эксплуатации и проектирования в части расчёта и анализа стационарных электрических режимов.

Развитие электроэнергетики и, в частности, рост электропотребления российских мегаполисов ставит вопросы о целесообразности применения комбинированных МВЛ на территории России. Сооружение комбинированных МВЛ можно рассматривать, как одно их перспективных проявлений синергетического эффекта от объединения объектов магистрального и распределительного сетевых комплексов.

Решение этих задач необходимо для реализации программы обеспечения энергосбережения в Российской Федерации. Сказанное выше определяет **актуальность темы и проблемы** диссертации, а также основные направления **практического применения** её результатов.

Целью работы является научное обоснование, разработка и практическая реализация математической модели стационарных режимов несимметричных МВЛ на основе метода фазных координат. Для достижения этой цели сформулированы и решены следующие научные и практические задачи.

Научные задачи.

- Обоснование и разработка уточнённых методов математического моделирования МВЛ, учитывающих электромагнитное взаимодействие их отдельных элементов в установившихся режимах.
- Исследование специфических особенностей установившихся режимов МВЛ.
- Научное обоснование приближённого эквивалентирования многопроводных схем замещения (МСЗ) МВЛ.

Практические задачи.

- Разработка методики расчёта потерь мощности в установившемся режиме при передаче электрической энергии по МВЛ.
- Реализация подхода к коммерческому разделению потерь между собственниками отдельных частей МВЛ.
- Выработка рекомендаций по моделированию МВЛ однолинейными схемами замещения, оптимизации конструкции МВЛ и др.
- Практическая оценка несимметрии напряжения в конце цепи МВЛ в установившемся режиме.

Основной идеей настоящей работы является разработка усовершенствованной модели МВЛ с широкими возможностями учёта внешних и внутренних несимметрий и дальнейшего использования в перспективных программных решениях для сетей с большими топологическими размерами на основе табличных методов представления и анализа установившихся режимов.

Научная новизна.

- Развёрнутая математическая модель МВЛ в виде МСЗ и обобщённого четырёхполюсника (ОЧП), учитывающая внутреннюю параметрическую несимметрию трёхфазных цепей МВЛ.
- Методика расчёта установившегося режима МВЛ, учитывающая электромагнитное и электростатическое взаимодействие её отдельных элементов.
- Методика приближённого эквивалентирования МСЗ однопроводными схемами, учитывающими внутреннюю несимметрию МВЛ.

Практическая ценность.

- Разработан подход к оптимизации конструкции МВЛ по условию минимума потерь мощности на основе анализа их установившихся режимов.
- Предложены способы учёта влияния неоднородной структуры МВЛ и мест подключения нагрузок и источников при расчёте установившихся режимов.
- Даны рекомендации по снижению затрат на сооружение комбинированных МВЛ за счёт минимизации площади её санитарно-защитной зоны.

Основные положения, выносимые на защиту.

- Математическая модель в виде МСЗ и ОЧП, реализованная в виде методики расчёта установившихся режимов МВЛ.

- Методика приближённого эквивалентирования МСЗ однопроводными схемами, учитывающими внутреннюю несимметрию МВЛ.
- Результаты аналитических и расчетных исследований установившихся режимов МВЛ.

Достоверность полученных результатов научных положений и выводов исследований базируется на использовании фундаментальных основ теоретической электротехники, а также использовании теории установившихся и переходных процессов в электрических системах. Ряд выводов основан на корректном применении математических методов и подтверждается адекватным поведением моделей, а также удовлетворительным совпадением результатов, полученных в компьютерных экспериментах и на реальных объектах.

Связь работы с научными программами, планами, темами, грантами.

Работа на тему «Разработка математической модели трёхфазных несимметричных электротехнических систем высокого напряжения» выполнена в рамках *тематического плана СамГТУ на 2011 год* (рег. № 01201157430 от 22.04.2011). Отдельные результаты диссертационной работы отмечены дипломами победителя областного конкурса «Молодой учёный» (г. Самара, 2011, 2013 гг.). Работа на тему «Разработка информационно-аналитической модели для оптимизации режимов работы систем управления уровнем потерь и организации энергосберегающих технологий в электротехнических комплексах и системах электроснабжения» выполнена в рамках *государственного задания на НИР в 2012 году* (рег. № 01201261244 от 17.05.2012). Работа на тему «Разработка математической модели УР многоцепной комбинированной воздушной линии электропередачи» поддержана *грантом для аспирантов СамГТУ* (приказ ректора ФГБОУ ВПО «СамГТУ» №2/1387 от 18.06.2012).

Объектом исследования является многоцепная воздушная линия электропередачи с двумя и более цепями одного или нескольких номинальных напряжений.

Основные методы научных исследований. При выполнении данного исследования использованы методы математического анализа и моделирования, уравнения математической физики, метод фазных координат. Аналитические выводы являются базисом для разработки расчётных моделей и методик. Исследования и компьютерные эксперименты проводились с использованием уточненных моделей реальных электроэнергетических объектов. Оценка их корректности и репрезентативности проводилась путём сравнения с данными измерений в условиях эксплуатации МВЛ.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы внедрены в практику проектирования и эксплуатации в филиале ОАО «СО ЕЭС» - «ОДУ Средней Волги» (г. Самара), ЗАО «РОСПРОЕКТ» (г. Санкт-Петербург). Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе кафедр «Электрические станции» и «Автоматизированные электроэнергетические системы» ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет» (г. Самара).

Личный вклад автора выражается во включённом участии на всех этапах исследования. Автором предложены модели МВЛ в установившихся режимах. Сформулированы направления практического применения уточнённых моделей. На основе анализа топологической структуры линий дана их классификация. Выполнены компьютерные эксперименты по моделированию установившихся режимов МВЛ с последующим сравнением результатов с данными, полученными из эксплуатации.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы и отдельные ее разделы докладывались и обсуждались на Всероссийской научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодёжи» (г. Екатеринбург, 2010); на Международной конференции «Проблемы повышения энергоэффективности и надёжности электрических сетей и систем электроснабжения предприятий нефти и газа» (г. Самара, 2010); на V открытой молодёжной научно-практической конференции «Диспетчеризация в электроэнергетике: проблемы и перспективы» (г. Казань, 2010); на Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск, 2010); на XVII-ой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 2011); на II Международной научно-практической конференции «Энергосбережение, электромагнитная совместимость и качество в электрических системах» (г. Пенза, 2011); на X международной молодёжной научно-технической конференции «Будущее технической науки» (г. Нижний Новгород, 2011); на Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодёжи» (г. Самара, 2011); на Тринадцатой международной конференции «International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems» (г. Варна, 2011); на Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск, 2011); на Международной научно-практической конференции «Электрические аппараты и электротехнические комплексы и системы» (г. Ульяновск, 2012); на Седьмой Международной молодёжной научной конференции «Тинчуринские чтения» (г. Казань, 2012); на XVIII-ой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 2012); на третьей Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодёжи» (г. Екатеринбург, 2012).

Публикации. Основные научные результаты диссертации отражены в 15 публикациях, в том числе 5 публикациях в рецензируемых научных журналах из Перечня, утверждённого ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка и приложений. Общий объём работы содержит 137 стр. основного текста, включая 29 рисунков, 8 таблиц и список литературы из 112 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрывается актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы. Обоснованы научная новизна и практическая значимость работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, сведения об апробации и внедрении результатов работы.

В первой главе рассматривается классификация и приводятся основные сведения о многоцепных воздушных линиях.

Наибольшее распространение среди МВЛ получили в настоящее время двухцепные воздушные линии (ДВЛ), протяжённость которых в российских магистральных и распределительных сетях составляет около 20% от общей протяжённости всех воздушных линий.

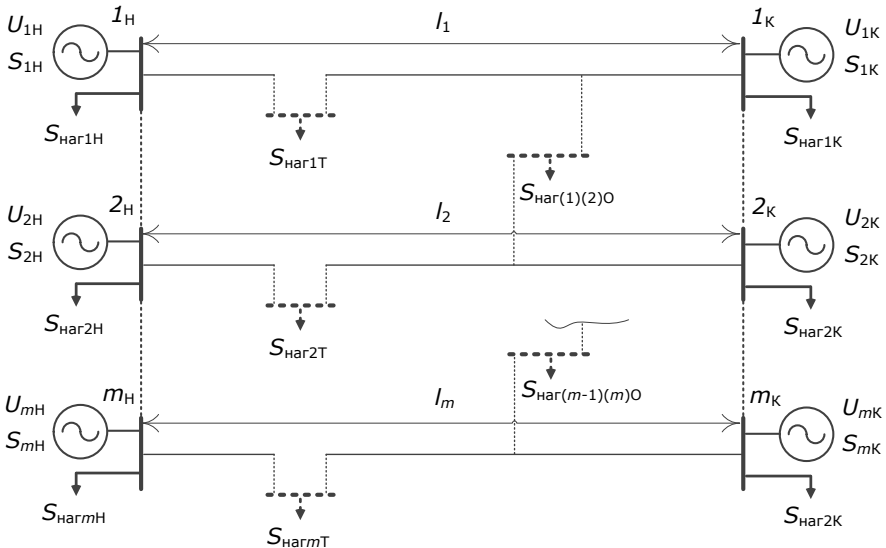


Рис. 1. Обобщённая схема подключения m -цепной воздушной линии электропередачи.

Если для ДВЛ 35–330 кВ применяются преимущественно унифицированные конструкции металлических и железобетонных опор, то конструкции опор МВЛ разнообразны и в значительной степени уникальны. Отличаются опоры материалом, исполнением и способом крепления, подвязки проводов. В последнее время большое распространение получает прогрессивный тип металлических одностоечных столбовых опор с применением многогранных гнутых стоек (МГС). Это позволяет создавать столбовые многоцепные опоры, используемые на линиях 110–220 кВ.

Несимметричное расположение на опорах МВЛ фазных проводов по отношению друг к другу обуславливает неодинаковость индуктивностей и емкостей разных фаз. Также на указанные параметры оказывает влияние грозо-защитный трос или тросы.

На рис. 1 представлена обобщённая схема подключения комбинированной МВЛ с числом цепей различной длины l_i , равным m . Узлы начал i_n и концов i_k каждой i -й цепи одного номинального напряжения могут быть подключены к разным и общим шинам, т.е. электрически соединяться. К каждому из

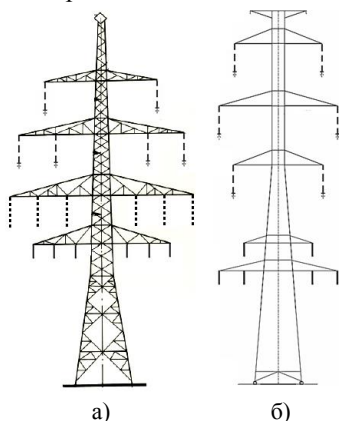


Рис. 2. Конструкции промежуточных опор шестипроходной (а) МВЛ 2×380 кВ (---) + 2×220 кВ (- - -) + 2×110 кВ (—) и четырёхцепной (б) линии «Donau» 2×400 кВ (---) + 2×110 кВ.

Согласно ГОСТ 24291-90, линия электропередачи, на опорах которой подвешено несколько комплектов фазных проводов разных номинальных напряжений, называется комбинированной линией электропередачи.

В последнее время сооружается всё больше комбинированных МВЛ с числом цепей, равным трём и более. Так, одним из характерных примеров такой линии является шестипроходная линия, сооружённая в Германии, где на двух высших траверсах опоры подвешены две линии 380 кВ, а на нижних и средних траверсах – по две линии 220 и 110 кВ. Эта достаточно громоздкая опора (рис. 2, а) с высотой 63,4 м имеет горизонтальный габарит 33,8 м. При этом территория, занимаемая полосой отчуждения, оказывается значительно меньше в сравнении с подвешиванием цепей каждого номинального напряжения на отдельно стоящих двухцепных линиях.

Совсем недавно линии такого типа стали сооружаться и в России, но отечественная практика пока ограничивается применением комбинированных четырёхцепных ВЛ 220–110 кВ. Ещё одним из примеров таких линий является введённая в эксплуатацию в 2011 году четырёхцепная комбинированная МВЛ «Donau» (рис. 2, б). Две цепи верхнего подвеса имеют класс напряжения 400 кВ, а цепи нижнего подвеса – 110 кВ.

узлов i_n и i_k могут быть отключены обобщённый источник питания S_i напряжением U_i и обобщённая нагрузка $S_{нагi}$, а следовательно потоки мощности в цепях МВЛ могут быть направлены как встречно, так и согласно. Кроме того, на каждой из цепей МВЛ могут иметься одна или несколько транзитных подстанций с нагрузками $S_{нагiT}$, а цепи одного класса напряжения могут объединены отпайками отбора мощности $S_{наг(i-1)(i)0}$. Поскольку длина каждой цепи представленной на рис. 1 МВЛ различна и определяется географическим положением потребителей, то на разных участках своей трассы количество цепей, объединённых на опорах МВЛ, может быть различным.



Рис. 3. Модель МВЛ в виде обобщённой n -полюсной многопроводной схемы замещения для m -цепной МВЛ с k грозозащитными тросами.

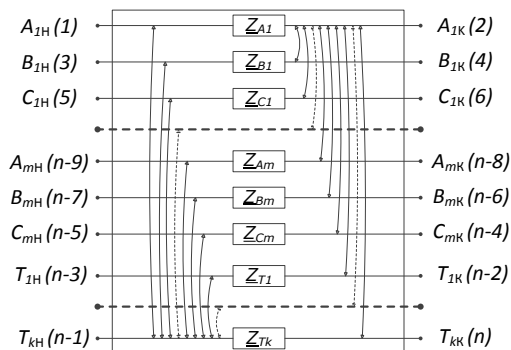


Рис. 4. Фрагмент продольной части эквивалентной схемы m -цепной МВЛ с k грозозащитными тросами в Z -форме, состоящая из комплексных сопротивлений с взаимными индуктивными связями фазы А и троса Т.

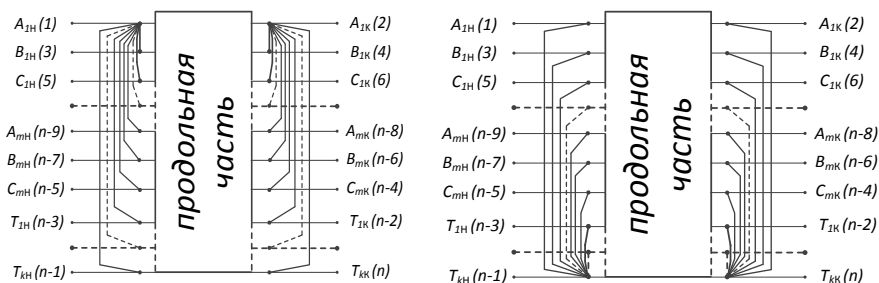


Рис. 5. Фрагмент поперечной части эквивалентной схемы m -цепной МВЛ с k грозозащитными тросами, состоящая из емкостных проводимостей, одинаковая в Z и Y -формах и показанная в виде условных связей фазы A_1 1-ой цепи и троса T_k .

Одной из проблем сооружения подобных линий в России можно отметить определение границ санитарно-защитной зоны вдоль её трассы. Согласно действующему СанПиН №2971-84 «Санитарные нормы и правила защиты населения от воздействия электрического поля, создаваемого воздушными линиями электропередачи переменного тока промышленной частоты» размер санитарно-защитной зоны для линии класса напряжения 500 кВ определяется, как территория по обе стороны трассы ВЛ на расстоянии 30 м от проекции на землю крайних фаз ВЛ. В то же время, санитарно-защитная зона ВЛ определяется, как территория вдоль трассы линии, в которой напряженность электрического поля превышает 1 кВ/м. Очевидно, что тщательное моделирование возможных режимов работы МВЛ и вычисление значений напряженности на стадии проектирования можно рассматривать как предпосылки для уменьшения площади санитарно-защитных зон МВЛ и, следовательно, значительной экономии средств, затраченных на их строительство в условиях высокой стоимости земельных участков в зонах жилой застройки мегаполисов.

Проблеме моделирования электрических полей промышленной частоты и снижения их влияния на население и окружающую среду посвящено большое количество работ, авторами которых являются Б.Э. Бонштедт, В.Г. Гольдштейн, Г.А. Гринберг, Н.И. Гумерова, Б.В. Ефимов, И.А. Ефремов, К.П. Кадомская, Ф.Г. Кайданов, М.В. Костенко, М.Л. Левинштейн, Д.Г. Мессерман, Л.С. Перельман, В.М. Салтыков, Ф.Х. Халилов, Ю.П. Шкарин, J.R. Carson, L.M. Wedepohl, R.G. Wesley и др.

Очевидно, что электромагнитные поля для МВЛ, возникающие в квазистационарных процессах установившихся режимов, практически не поддаются симметрированию традиционными средствами, как по параметрам режима (особенно для ЛЭП разных напряжений), так и по параметрам сети. В частности, общеизвестную транспозицию для девяти и более фазных проводников, находящихся под различным напряжением, реализовать для получения необходимого эффекта практически невозможно.

Наиболее заметным фактором, влияющим на параметры установившегося режима МВЛ, по определению являются многопроводность, а также компактность конструкции, то есть малые расстояния между всеми фазными проводами и тросами цепей. Физическим отражением этого являются значительные электромагнитные взаимные связи цепей (ВСЦ), их фазных проводов и грозозащитных тросов. Естественно, что для МВЛ не применимы широко известные мероприятия, как применение транспозиции и допущение о расположении фаз одной цепи по вершинам правильного треугольника, которые используются для создания приближенно симметричной картины электромагнитного поля в трехфазных ВЛ. С точки зрения трехфазного построения технологий, оборудования и режимов в электрических системах это определяет их несимметрию по внутренним параметрам и параметрам режимов, значительно более сложную в сравнении с одноцепными ВЛ.

Основные принципы анализа установившихся режимов МВЛ и влияния конструктивных особенностей на их параметры базируются на многочислен-

ных исследованиях отечественных и зарубежных учёных: В.Г. Гольдштейна, В.П. Закорюкина, А.В. Крюкова, К.П. Кадомской, А.М. Гусейнова, Ю.Н. Астахова, В.А. Веникова, Э.Я. Зуева, В.М. Макарова, Т.Н. Бобровской, Г.А. Евдокучина, М.Ш. Мисриханова и др.

В работе рассмотрены основные принципы анализа установившегося МВЛ и влияния конструктивных особенностей на их параметры с учетом применения актуальных способов оценки параметров установившихся режимов и коммерческого учета электрической энергии для МВЛ. По результатам проведения анализа можно констатировать очевидную невозможность использования традиционных допущений о внутренней симметрии цепи и пренебрежении ВСЦ. Широко используемые в настоящее время в технологических процессах проектировании и эксплуатации МВЛ симметричные математические модели самих линий и их установившихся режимов несостоятельны и требуют глубокой переработки.

В соответствие с поставленными выше задачами работы предложены принципы и реализация их решения.

Вторая глава посвящена разработке математической модели комбинированной МВЛ в установившемся режиме. При этом общий электромагнитный процесс в этой специфичной электроустановке с распределенными параметрами является объединением парциальных связанных процессов - продольного электромагнитного и поперечного электростатического. В предлагаемых расчетных моделях они приближенно отображаются в виде общей многопроводной схемы замещения (МСЗ), изображенной на рис. 3, с сосредоточенными параметрами в виде объединения продольных (рис. 4) и поперечных (рис. 5) парциальных схем, сформированных раздельно. В связи с этим, при расчёте линий электропередачи в общем случае применяют упрощённые однолинейные Т- и П-образные схемы замещения с сосредоточенными параметрами. Такой подход подразумевает отказ от учёта принципиальной несимметрии трёхфазной МВЛ, что негативно сказывается на точности конечного результата расчёта установившегося режима.

Общим подходом к реализации задач анализа квазистационарных режимов электроэнергетических систем является применение в качестве базисной концепции физико-математического моделирования рассматриваемых процессов с использованием системы дифференциальных уравнений Максвелла для электрических и магнитных полей.

Установившиеся режимы МВЛ традиционно моделируются приближенно, чаще всего, без учета электромагнитного и электростатического влияния соседних проводников, гроззащитных тросов и цепей в целом (для МВЛ), а также земли и, самое главное, принципиальной несимметрии одноцепных и особенно многоцепных линий. Однако, в современных условиях, требования к погрешности расчетов установившихся режимов стали намного жестче в связи с появлением ряда практических задач, связанных с учетом электроэнергии, повышением пропускной способности за счет использования внутренних свойств МВЛ и прогнозирования режимов их работы при значитель-

ной разнице в загрузке линий и др. Тем не менее, в работе был принят ряд допущений. Параметры каждой среды были приняты однородными и изотропными, а объемными зарядами принято решение пренебречь. Многослойность земли учитываем, введя эквивалентные сопротивления $\rho_s = const$, и предположим $\varepsilon_s = const$, $\mu = \mu_0 = const$. Строение многожильной структуры проводов учитываем, вводя поправочные коэффициенты, полученные эмпирически. Ионизационными процессами и объемными зарядами воздуха при напряжениях ниже коронного пренебрегаем, так же, как и влиянием общей короны, учитываемое эмпирическими вольт-кулоновыми характеристиками.

По результатам выполненного анализа можно утверждать, что для реализации задачи данной работы целесообразно использовать теорию четырехполюсников. Для этого МВЛ представлена в виде обобщенного четырехполюсника (ОЧП). На рис. 3 узлы, обозначенные символами H и K составляют обобщенные вход и выход ОЧП соответственно. Для конфигурации m -цепной МВЛ с k грозозащитным тросом n узлов начал и концов ($H - K$) проводов цепях МВЛ обозначены следующим образом: i цепи МВЛ – A_i, B_i, C_i , m -й цепи – A_m, B_m, C_m , первого троса – T_1 , k -го троса – T_k . Продольная часть представлена в сокращенном виде. Здесь показаны все продольные активно-индуктивные сопротивления проводов и тросов МВЛ, а взаимные сопротивления – только для одного провода фазы A_1 i цепи и троса T_k .

Продольная часть МСЗ в виде собственных и взаимных активно-индуктивных сопротивлений (рис. 4) исходно моделируется в естественном виде комплексных сопротивлений по справочным данным и формулам, известным в теоретической электротехнике. На рис. 5 представлена поперечная часть многопроводной схемы замещения, задаваемая в виде емкостных проводимостей, показанных для узла начала фазы A_1 i цепи и узла конца троса T_k .

Анализ показывает, что Z -форма даёт возможность в виде падений напряжения учесть взаимноиндуктивные процессы. Однако, эта форма неудобна для практического применения из-за трудности формирования систем уравнений по II-ому правилу Кирхгофа или методу контурных токов, поскольку они не применяются на практике в расчетах установившихся режимов. Она плохо стыкуется с традиционными узловыми способами моделирования нагрузок, собственных и взаимных емкостей линии, мощностей, токов и напряжений в узлах питания.

В связи с этим в качестве расчетной формы принята продольная часть эквивалентной схемы МВЛ в виде узловых проводимостей, представленная на рис. 6 и получившую название Y – формы. Она заведомо эквивалентна по начальным и конечным параметрам режима в узлах с 1 по n Z -форме и в ней нет взаимноиндуктивных связей, которые эквивалентированы комплексными сопротивлениями и проводимостями.

В настоящее время, в большинстве программных средств, применяемых в расчетах электросетевыми предприятиями, используются методы анализа

стационарных режимов электрических сетей, которые основаны на однопроводном представлении трехфазных цепей.

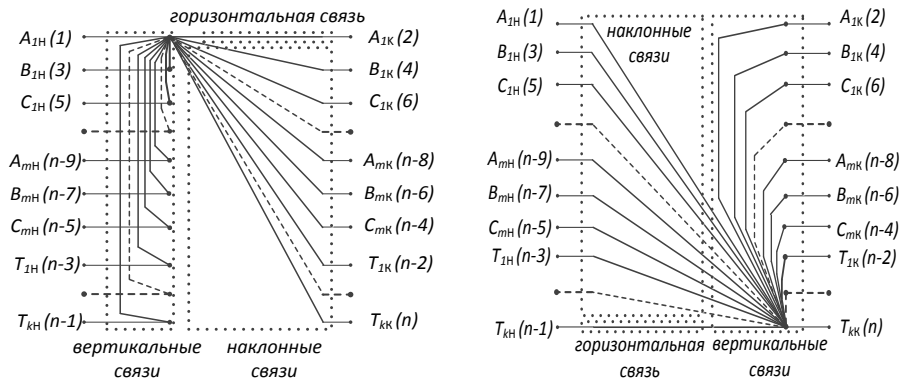


Рис. 6. Фрагмент продольной части эквивалентной схемы t -цепной МВЛ с k грозозащитными тросами в Y – форме, состоящая из кондуктивных комплексных сопротивлений (проводимостей) для узла начала фазы $A_1 I$ цепи и узла конца троса T_k .

Это обстоятельство привело к необходимости решения задачи адаптации изложенных в предыдущих параграфах многопроводных математических моделей, учитывающей взаимные связи цепей МВЛ, к используемым в промышленности программным продуктам, основанным на однопроводных моделях воздушных линий и их установившихся режимов.

В соответствии с данной задачей, в настоящем исследовании разработана и описана методика приближённого эквивалентирования многопроводной многоцепной комбинированной воздушной линии однолинейной схемой замещения (рис. 7), в которой приближённо учитываются взаимные индуктивные и емкостные связи отдельных проводников и цепей МВЛ в целом.

Допустим, что фазы A_1, B_1, C_1 относятся первой цепи, а фазы A_m, B_m, C_m – к m -й цепи. Тогда уравнения падения напряжений для каждого фазного проводника определяются в соответствии со следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{A_m} = & (\underline{Z}_{A_m A_1} + a^2 \underline{Z}_{A_m B_1} + a \underline{Z}_{A_m C_1}) \dot{I}_I + (\underline{Z}_{A_m A_2} + a^2 \underline{Z}_{A_m B_2} + a \underline{Z}_{A_m C_2}) \dot{I}_{II} + \dots + \\ & + (\underline{Z}_{A_m A_m} + a^2 \underline{Z}_{A_m B_m} + a \underline{Z}_{A_m C_m}) \dot{I}_m; \\ \Delta \dot{U}_{B_m} = & (\underline{Z}_{B_m A_1} + a^2 \underline{Z}_{B_m B_1} + a \underline{Z}_{B_m C_1}) \dot{I}_I + (\underline{Z}_{B_m A_2} + a^2 \underline{Z}_{B_m B_2} + a \underline{Z}_{B_m C_2}) \dot{I}_{II} + \dots + \\ & + (\underline{Z}_{B_m A_m} + a^2 \underline{Z}_{B_m B_m} + a \underline{Z}_{B_m C_m}) \dot{I}_m; \\ \Delta \dot{U}_{C_m} = & (\underline{Z}_{C_m A_1} + a^2 \underline{Z}_{C_m B_1} + a \underline{Z}_{C_m C_1}) \dot{I}_I + (\underline{Z}_{C_m A_2} + a^2 \underline{Z}_{C_m B_2} + a \underline{Z}_{C_m C_2}) \dot{I}_{II} + \dots + \\ & + (\underline{Z}_{C_m A_m} + a^2 \underline{Z}_{C_m B_m} + a \underline{Z}_{C_m C_m}) \dot{I}_m. \end{aligned}$$

Здесь ΔU_i - падения напряжений в цепях МВЛ; I_i - токи, протекающие в ветвях эквивалентной однолинейной схемы; Z_{ii} - эквивалентные комплексные собственные сопротивления ветвей; Z_{ij} - эквивалентные комплексные взаимные сопротивления ветвей.

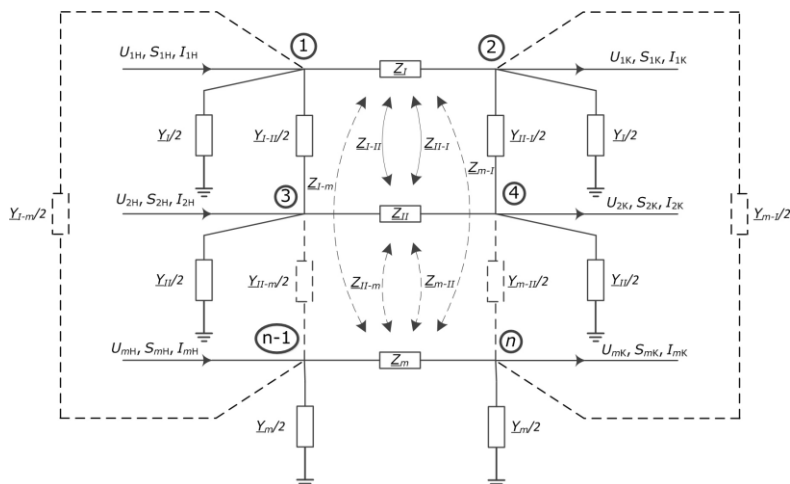


Рис. 7. Эквивалентная однолинейная схема однородного участка МВЛ в Y – форме.

В приведённых выражениях первое слагаемое определяет падение напряжения, вызванное током в первой цепи, второе слагаемое определяет величину падения напряжения, вызванного током во второй цепи МВЛ и т.д. Таким образом, с помощью аналогичных выражений возможно организовать процедуру разделения потерь между собственниками различных цепей МВЛ с целью их коммерческого учёта. Это позволит отказаться от превалирующего в настоящего время волевого подхода к разделению потерь, обосновав и упорядочив хозяйственные отношения между субъектами, эксплуатирующими МВЛ в условиях рыночных отношений.

В третьей главе рассмотрены вопросы математического моделирования установившегося режима многопроводной комбинированной МВЛ.

Для составления МСЗ в виде, принятом в моделировании стационарных режимов для несимметричной МВЛ с числом цепей, равным m , необходимо определить следующие допущения.

1. Многоцепную линию с количеством фазных проводников от 6 до $3m$ и с числом заземленных или изолированных грозозащитных тросов от 0 до k допустимо изобразить, как n -полюсную многопроводную схему замещения, изображённой на рис. 3.

2. Электростатическое и электромагнитное взаимодействие проводников и цепей МВЛ эквивалентно учитывается наличием взаимных емкостных и индуктивных элементов.

3. Собственные емкости цепей и емкости взаимных связей учитываются в соответствии с общими принципами расчета установившегося режима, то есть, при формировании расчетной схемы замещения поперечные емкости задаются половинными значениями в начале и конце линии, а продольными емкостями можно пренебречь.

4. Параметры режима цепей могут быть различны по величине и направлены в разные стороны, поэтому в соответствующих одноименных или разных узлах МВЛ задаются трехфазные равные или неравные по величине нагрузки и напряжения в источниках питания. Последнее означает, что известна трехфазная система напряжений на раздельных шинах МВЛ или в отдельности по цепям за предвключенным трехфазным реактивным сопротивлением, приближенно определенным по известной методике.

5. Нагрузки моделируются в виде постоянных комплексных трехфазных сопротивлений. Их приближенные значения при необходимости можно уточнить в итерационном процессе расчета параметров режима МВЛ.

Алгоритм расчёта установившегося режима МВЛ в Z-форме:

- составление эквивалентной МСЗ для МВЛ;
- вычисление параметров $\underline{Z}$ и $B=A^{-1}$;
- применение уравнений Ома и Кирхгофа для МСЗ.

Допустим, что изначально получены матрицы параметров МВЛ Z и B , а также заданы параметры установившегося режима в форме векторов токов I_H и напряжений U_H в начале МВЛ и необходимо определить U_K , I_K в конце МВЛ. Тогда задача расчета установившегося режима для МВЛ для схемы, представленной на рис. 3, реализуется следующей алгоритмической последовательностью действий.

1. По закону Ома, рассчитывается для левой поперечной части многопроводной схемы вектор-столбец емкостных токов в следующем виде:

$$\dot{I}_{cH} = j \cdot \omega \cdot B \cdot \dot{U}_H / 2,$$

где B – матрица емкостных коэффициентов МВЛ; ω – частота.

В матричном виде данное выражение имеет следующий вид:

$$\begin{pmatrix} \dot{I}_{cA1H} \\ \vdots \\ \dot{I}_{cCmH} \\ \dot{I}_{cT1H} \\ \vdots \\ \dot{I}_{cTKH} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} j\omega \cdot \begin{pmatrix} B_{A1A1} & \cdots & B_{A1Cm} & B_{A1T1} & \cdots & B_{A1Tk} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{CmA1} & \cdots & B_{CmCm} & B_{CmT1} & \cdots & B_{CmTk} \\ B_{T1A1} & \cdots & B_{T1Cm} & B_{T1T1} & \cdots & B_{T1Tk} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{TKA1} & \cdots & B_{TKCm} & B_{TKT1} & \cdots & B_{TKTk} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{U}_{A1H} \\ \vdots \\ \dot{U}_{CmH} \\ \dot{U}_{T1H} \\ \vdots \\ \dot{U}_{TKH} \end{pmatrix}.$$

2. С учетом вектора токов I_{cH} по первому закону Кирхгофа, определяется вектор токов I_Π в продольной части МСЗ

$$\dot{I}_\Pi = \dot{I}_H - \dot{I}_{cH}.$$

3. Далее для продольной части схемы записывается по закону Ома уравнение её состояния для вектора ΔU падений напряжений от протекания токов ветвей I_Π в виде

$$\Delta \dot{U} = \underline{Z} \cdot \dot{I}_{\Pi}.$$

В матричном виде данное выражение имеет вид

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_{A1H} - \dot{U}_{A1K} \\ \vdots \\ \dot{U}_{CmH} - \dot{U}_{CmK} \\ \dot{U}_{T1H} - \dot{U}_{T1K} \\ \vdots \\ \dot{U}_{TKH} - \dot{U}_{TKK} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{Z}_{A1A1} & \cdots & \underline{Z}_{A1Cm} & \underline{Z}_{A1T1} & \cdots & \underline{Z}_{A1Tk} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{Z}_{CmA1} & \cdots & \underline{Z}_{CmCm} & \underline{Z}_{CmT1} & \cdots & \underline{Z}_{CmTk} \\ \underline{Z}_{T1A1} & \cdots & \underline{Z}_{T1Cm} & \underline{Z}_{T1T1} & \cdots & \underline{Z}_{T1Tk} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{Z}_{TKA1} & \cdots & \underline{Z}_{TkCm} & \underline{Z}_{TKT1} & \cdots & \underline{Z}_{TKTk} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I}_{A1\Pi} \\ \vdots \\ \dot{I}_{Cm\Pi} \\ \dot{I}_{T1\Pi} \\ \vdots \\ \dot{I}_{TK\Pi} \end{pmatrix}$$

Здесь диагональные $\underline{Z}_{i,i}$ и внедиагональные $\underline{Z}_{i,j}$ сопротивления квадратной матрицы $\underline{Z}$ являются собственными и взаимными элементами и носят активно-индуктивный характер.

4. Теперь можно определить вектор напряжений U_K в конце многоцепной воздушной линии

$$\dot{U}_K = \dot{U}_H - \Delta \dot{U}.$$

5. По аналогии с пунктом (1) для правой поперечной части схемы замещения определяется вектор емкостных токов I_{cK} в виде

$$\dot{I}_{cK} = j \cdot \omega \cdot B \cdot \dot{U}_K / 2.$$

6. Окончательно определяется вектор токов I_K в узле конца K многопроводной схемы

$$\dot{I}_K = \dot{I}_{\Pi} - \dot{I}_{cK}.$$

Очевидно, что для рассмотренного алгоритма направления мощности в цепи МВЛ могут быть как встречными, так и согласными и быть различны по величине за счет задания необходимым образом векторов-столбцов токов и напряжений - параметров режима U_H , I_H , U_K , I_K . При этом, в случае, если параметры режима заданы в конце цепей, необходимо выполнить незначительную коррекцию представленного выше алгоритма.

В четвертой главе разработаны методики расчёта различных параметров установившегося режима и даны практические рекомендации по повышению эффективности работы МВЛ и снижению затрат на их сооружение.

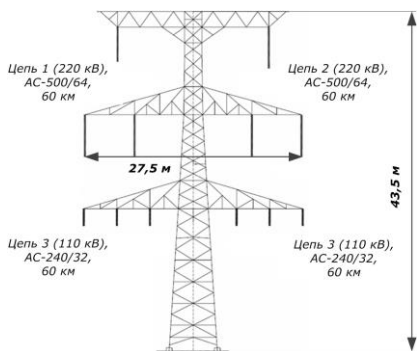


Рис. 8. К расчёту режима четырёх-цепной комбинированной линии.

На основании разработанных моделей реализованы расчетные процедуры, применение которых в существующих программных комплексах позволяет приблизительно учесть и оценить взаимовлияние цепей МВЛ и произвести необходимое сравнение с результатами традиционного расчета, когда режимы всех цепей МВЛ рассматриваются независимо друг от друга.

Для сравнения, совершенно очевидно использование программной реализации предлагаемой математической модели в виде многопроводной схемы

замещения. Ее высокая достоверность и меньший уровень погрешностей обеспечивается более полным учетом влияющих факторов, использованием корректных физико-математических описаний, хорошим совпадением результатов по отдельным позициям реализации с подобными моделями и результатами известных исследований, а также данными телеизмерений. Последние, к сожалению, не могут служить в полной мере в качестве средства контроля и оценки достоверности, особенно для разностных параметров электрических режимов (разностей напряжения, тока и мощности по границам участков цепей). Здесь среди многих факторов необходимо отметить, что по своим значениям соизмеримыми оказываются сами разности и погрешности их определения.

Очевидным является, что именно разностные параметры режимов наиболее чувствительны к погрешностям методов измерений и расчетов, поэтому, в качестве результатов компьютерного эксперимента в таблице 1 представлены расчётные значения потерь активной мощности в установившихся режимах общего участка четырёхцепной комбинированной МВЛ длиной 60 км (рис. 8). В условиях эксперимента для упрощения представления результатов рассматривались симметричные по фазам, а также равные по величине, направлению и коэффициенту мощности, равному 0,8, потоки полных мощностей нагрузок в цепях каждого класса напряжения. Они составляли 10, 60 и 110 МВА (см. последние строки таблицы 1) в каждой из двух цепей 220 кВ (цепи 1 и 2). Для этих значений, соответственно, для каждой из двух цепей 110 кВ (цепи 3 и 4) рассчитывались режимы с потоками мощности нагрузки 10, 30 и 50 МВА (см. первые строки таблицы 1).

Таблица 1

Величины потерь активной мощности (кВт) в цепях 110 ÷ 220 кВ общего участка четырёхцепной МВЛ, вычисленные по многопроводным и однопроводным моделям

	Мощность нагрузки в каждой цепи 110 кВ (цепи 3 и 4), МВА								
	10	30	50	10	30	50	10	30	50
ΔP_{MM1}	9,80	13,94	17,69	276,06	300,62	322,69	875,53	920,02	959,74
ΔP_{YOM1}	9,96	15,00	16,16	270,46	300,35	325,53	875,33	954,78	848,36
ΔP_{OM1}	4,98	4,98	4,98	243,51	243,51	243,51	847,75	847,75	847,75
ΔP_{MM2}	8,15	10,57	12,99	248,84	263,56	278,10	796,96	824,22	850,78
ΔP_{YOM2}	8,07	11,36	11,56	241,28	260,61	277,66	865,75	912,84	799,48
ΔP_{OM2}	4,98	4,98	4,98	243,51	243,51	243,51	847,75	847,75	847,75
ΔP_{MM3}	54,54	469,33	1228,76	46,45	446,55	1192,83	38,14	423,44	1156,68
ΔP_{YOM3}	52,19	460,73	1050,74	46,44	455,35	1228,14	43,37	500,28	1148,77
ΔP_{OM3}	51,96	505,75	1427,63	51,96	505,75	1427,63	51,96	505,75	1427,63
ΔP_{MM4}	55,35	477,52	1251,36	46,06	450,60	1208,14	36,59	423,54	1165,09
ΔP_{YOM4}	59,42	521,82	1165,33	47,92	478,04	1294,16	37,23	459,15	1069,12
ΔP_{OM4}	51,96	505,75	1427,63	51,96	505,75	1427,63	51,96	505,75	1427,63
	10			60			110		
	Мощность нагрузки в каждой цепи 220 кВ (цепи 1 и 2), МВА								

Расчеты потерь активной мощности ΔP проведены по трем методикам анализа установившихся режимов МВЛ. В представлении результатов по каждой из четырех цепей в таблице были приняты следующие обозначения:

$\Delta P_{\text{ММ}i}$ - по предлагаемой математической модели в виде многопроводной схемы замещения;

$\Delta P_{\text{УОМ}i}$ - по эквивалентной однолинейной схеме замещения с приближенным учетом ВСЦ (рис. 7), как иллюстрация возможности применения общепринятого программного обеспечения анализа установившихся режимов;

$\Delta P_{\text{ОМ}i}$ - по традиционной однопроводной модели (в таблице 1 результаты выделены курсивом) без учета ВСЦ.

Индексы $i = 1 \div 4$ соответствуют принятым выше номерам цепей 110 ÷ 220 кВ МВЛ. Положение внутренней ячейки в таблице 1 определяется величиной нагрузок цепей, для которых выполнен расчёт ΔP , указанных в верхней и нижней координатных строках таблицы.

По результатам, представленным в таблице 1, наблюдается переход мощности из одной цепи в другую, вызванный ВСЦ, поскольку при неизменной величине нагрузки одной из цепей величина потерь в ней зависит от режима соседних цепей. В тех случаях, когда в рассматриваемой цепи протекают сравнительно небольшие токи нагрузки, а соседняя цепь работает в режиме, близком к режиму натуральной мощности, наибольшее влияние на режим рассматриваемой цепи оказывает соседняя цепь.

Анализ и сопоставление данных таблицы 1 показывает, что разница между $\Delta P_{\text{ММ}}$ и $\Delta P_{\text{УОМ}}$ в основном находится в пределах $5 \div 10\%$, что говорит о возможности использования предлагаемой методики приближенного учета ВСЦ в расчетах при проектировании и эксплуатации МВЛ, когда эта разница соизмерима с погрешностями исходных данных.

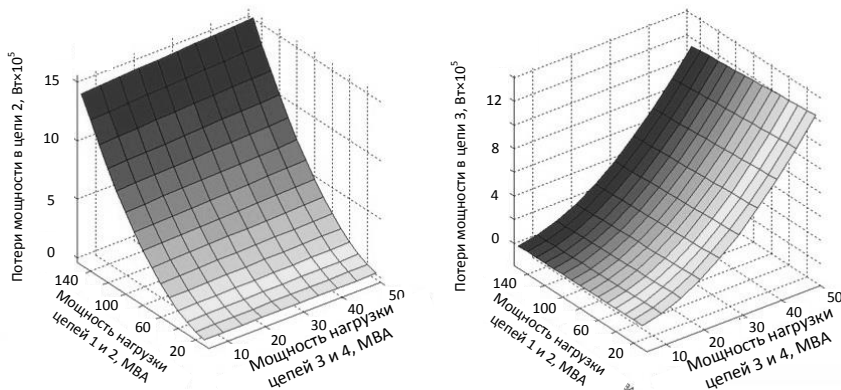


Рис. 9. Величины потерь в цепях 2 (220 кВ) и 3 (110 кВ) четырёхцепной МВЛ, полученные с использованием многопроводных моделей

Что касается разницы между $\Delta P_{\text{ММ}}$ и $\Delta P_{\text{ОМ}}$, то она в значительной мере зависит от соотношения потоков мощности цепей и изменяется от минималь-

ных значений в $1 \div 5\%$ до максимальных, в которых расхождение может достигать сотен кВт, а в относительных единицах десятки и даже сотни процентов. Это - явный результат очень жесткого допущения об отсутствии ВСЦ, в соответствие с которым исходно сформированы однопроводные симметричные модели.

На рис. 9 и в таблице 2 представлены результаты расчётов для рассматриваемого участка МВЛ для спектра его возможных установившихся режимов. Для каждой n -й цепи определена относительная погрешность вычисления потерь активной мощности $\varepsilon_{\Delta Pn}$, вызванная использованием однопроводных моделей МВЛ.

$$\varepsilon_{\Delta Pn} = \frac{\Delta P_{OM} - \Delta P_{MM}}{\Delta P_{MM}} \cdot 100\% \cdot$$

Таблица 2

Относительная погрешность расчёта потерь активной мощности $\varepsilon_{\Delta P}$ в четырёх-цепной комбинированной МВЛ при использовании однопроводных моделей

		Мощность нагрузки одной цепи 110 кВ (цепи 3 и 4), МВА										
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	
Мощность нагрузки одной цепи 220 кВ (цепи 1 и 2), МВА	10	-42,76	-49,20	-54,22	-58,24	-61,54	-64,28	-66,61	-68,61	-70,34	-71,85	$\varepsilon_{\Delta P1}$, %
		-34,01	-38,86	-43,07	-46,75	-49,99	-52,86	-55,42	-57,72	-59,79	-61,66	$\varepsilon_{\Delta P2}$, %
		-13,36	-4,73	-0,33	2,80	5,41	7,76	9,96	12,08	14,15	16,18	$\varepsilon_{\Delta P3}$, %
		-14,34	-6,12	-1,90	1,12	3,64	5,91	8,05	10,10	12,11	14,09	$\varepsilon_{\Delta P4}$, %
	50	-12,08	-14,55	-16,83	-18,94	-20,88	-22,69	-24,38	-25,95	-27,42	-28,79	$\varepsilon_{\Delta P1}$, %
		-3,14	-4,83	-6,47	-8,05	-9,58	-11,05	-12,47	-13,85	-15,18	-16,46	$\varepsilon_{\Delta P2}$, %
		14,65	8,07	8,11	9,17	10,56	12,10	13,74	15,44	17,18	18,97	$\varepsilon_{\Delta P3}$, %
		18,04	8,40	7,70	8,38	9,54	10,91	12,41	13,99	15,64	17,33	$\varepsilon_{\Delta P4}$, %
	90	-4,45	-6,02	-7,50	-8,89	-10,20	-11,44	-12,61	-13,72	-14,78	-15,78	$\varepsilon_{\Delta P1}$, %
		4,61	3,53	2,47	1,44	0,44	-0,54	-1,50	-2,43	-3,34	-4,23	$\varepsilon_{\Delta P2}$, %
		71,45	25,26	18,34	16,51	16,32	16,88	17,84	19,04	20,41	21,90	$\varepsilon_{\Delta P3}$, %
		92,28	28,64	19,54	16,86	16,19	16,43	17,16	18,18	19,40	20,75	$\varepsilon_{\Delta P4}$, %
	130	0,48	-0,70	-1,82	-2,88	-3,89	-4,85	-5,76	-6,63	-7,47	-8,26	$\varepsilon_{\Delta P1}$, %
		9,69	8,87	8,06	7,27	6,50	5,75	5,01	4,29	3,58	2,89	$\varepsilon_{\Delta P2}$, %
		245,24	49,38	30,88	25,01	22,79	22,12	22,27	22,89	23,83	24,99	$\varepsilon_{\Delta P3}$, %
		430,30	58,55	34,45	26,83	23,74	22,54	22,32	22,67	23,39	24,36	$\varepsilon_{\Delta P4}$, %

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что при расчётах электрических режимов МВЛ необходимо учитывать несимметрию её первичных параметров, поскольку она оказывает значительное влияние на

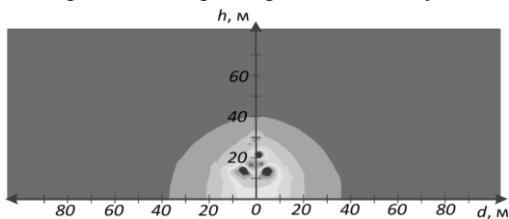


Рис. 10. Картина поля при расположении фаз по вершинам треугольника, цепь 220 кВ расположена ниже цепи 110 кВ.

разностные параметры установившегося режима линии. Это обуславливает необходимость разработки промышленных программных комплексов анализа установившихся режимов ЭЭС в фазных координатах, либо модификации существующих однолинейных расчётных моделей и алгоритмов путём введения в схему дополнительных

ветвей, приближённо учитывающих ВСЦ. Использование этих моделей в проектировании и эксплуатации МВЛ позволит в конечном итоге улучшить надёжность и снизить величину потерь мощности в ЭЭС.

Исследовано влияние взаимного расположения цепей разных классов напряжения комбинированной МВЛ. Результаты компьютерного эксперимента (рис. 10) позволяют констатировать, что наименьшая площадь санитарно-защитной зоны МВЛ достигается при расположении цепи более высокого класса напряжения под цепью более низкого при условии расположения фазных проводников по вершинам равностороннего треугольника. В частности, выигрыш в площади отчуждаемой территории по сравнению с наименее эффективным вариантом, когда проводники цепей расположены в горизонтальной плоскости, достигает не менее 40 %.

В заключении сформулированы результаты решения поставленных в исследовании научных и практических задач, на основании анализа которых сделаны выводы о достижении цели диссертационного исследования.

1. Разработана уточнённая математическая модель воздушной линии электропередачи многоцепного исполнения для применения в расчётах установившихся режимов. Данная модель учитывает электромагнитное и электростатическое взаимодействие фазных проводников и тросов воздушной линии, приводящее к несимметрии первичных параметров отдельных фаз линии.
2. Разработана методика расчёта установившегося режима МВЛ с использованием многопроводных схем замещения и обобщённых четырёхполюсников. Данная методика, в отличие от традиционных, позволяет выявить влияние внутренней несимметрии МВЛ на параметры её режима.
3. Разработана методика приближённого эквивалентирования многопроводных схем замещения МВЛ однолинейными для применения в существующих программах расчёта и анализа установившегося режима. Применение данной методики позволяет снизить погрешности расчёта отдельных параметров режима на $10\div 200$ %, а также применить промышленные программные комплексы в задачах анализа потерь и несимметрии параметров режима МВЛ.
4. Разработана методика расчёта потерь электрической мощности в установившемся режиме при передаче электрической энергии по МВЛ. Применение многопроводных математических моделей воздушных линий позволяет снизить погрешность данного расчёта в зависимости от режима и конфигурации МВЛ в $1,2\div 40$ раз в сравнении с однопроводными традиционными моделями.
5. Разработана методика расчётного определения коэффициентов несимметрии напряжения в конце МВЛ. Данная методика отличается от существующих возможностью учёта влияния на величину коэффициента несимметрии не только режимной несимметрии трёхфазной цепи, но и внутренней несимметрии первичных параметров, приводящей к увеличению коэффициента несимметрии по обратной последовательности на $0,02\div 0,4$ %.
6. Сформирован подход к коммерческому разделению потерь электрической мощности между хозяйствующими субъектами – собственниками отдельных частей и участков МВЛ. Данный подход позволяет адекватно учесть перераспределение потерь между цепями, в которых протекают отличающиеся по величине и направлению потоки мощности.

7. Даны рекомендации по оптимизации конструкции вновь сооружаемых МВЛ по условию минимума потерь активной мощности. Эффективность оптимизации зависит от класса напряжения линии, числа цепей и числа грозозащитных тросов и позволит снизить потери мощности в проектируемых МВЛ на $2\div 8\%$.
8. Даны рекомендации по оптимизации площадей санитарно-защитных зон МВЛ. Применение сложных конфигураций МВЛ с цепями различных классов напряжения позволит снизить площадь санитарно-защитной зоны вдоль трассы вновь сооружаемых МВЛ на $5\div 20\%$, а также уменьшить капитальные затраты при использовании МВЛ в качестве элементов схем глубокого ввода.

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях.

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК.

1. Шишков Е.М. Методика расчёта установившихся режимов многоцепных воздушных линий электропередачи [Текст] / Ведерников А.С., Гольдштейн В.Г., Шишков Е.М. // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – Новосибирск: НГАСУ, 2012. – №1. – С. 400-403.
2. Шишков Е.М. Влияние несимметрии параметров двухцепной воздушной линии электропередачи на установившиеся режимы [Текст] / Шишков Е.М., Ведерников А.С., Гольдштейн В.Г. // Электричество – М.: Знак, 2013. №4. С. 9-17.
3. Шишков Е.М. Определение напряжённости электрического поля вдоль трассы комбинированной многоцепной воздушной линии электропередачи [Текст] / Ведерников А.С., Гольдштейн В.Г., Шишков Е.М. // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». – Самара: СамГТУ, 2012. – №4(36). – С. 150-154.
4. Шишков Е.М. Анализ установившихся режимов двухцепных воздушных линий в фазных координатах [Текст] / Гольдштейн В.Г., Илюткин Д.В., Шишков Е.М. // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – Новочеркасск: НПИ, 2009. – Спецвыпуск «Электроснабжение». – С. 67-69.
5. Шишков Е.М. Применение теории обобщённых четырехполюсников для расчета установившихся режимов двухцепных воздушных линий электропередачи [Текст] / Ведерников А.С., Гайнуллин Р.А., Шишков Е.М. // «Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики», – Казань: КГЭУ, 2011. №5-6. С. 86-90.

В других изданиях.

6. Шишков Е.М. Уточнение моделей установившихся режимов многоцепных линий электропередачи [Текст] / Ведерников А.С., Гольдштейн В.Г., Шишков Е.М. // Электрика – М.: Наука и технологии, 2012. №4. – С. 26-31.
7. Shishkov E. A calculation of steady-state condition of compact-combined power transmission line using phase-coordinate method [Текст] / A. Vedernikov, V. Goldstein, N. Podshivalova, E. Shishkov // XIII International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems ELMA 2011. October 2011, Varna, Bulgaria. Proceedings. 346 P. pp. 215-221.
8. Шишков Е.М. Расчёт установившихся несимметричных режимов многоцепных воздушных линий электропередачи [Текст] / Ведерников А.С.,

Гольдштейн В.Г., Шишков Е.М. // Электрические аппараты и электротехнические комплексы и системы. Сборник трудов международной научно-практической конференции. В 2 т. Ульяновск: изд-во УлГТУ, 2011, Т. 1. – С. 219 – 222.

9. Шишков Е.М. Об особенностях расчёта установившихся режимов комбинированных воздушных линий электропередачи [Текст] / Ведерников А.С., Ведерникова Е.С., Шишков Е.М. // Материалы докладов VII Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» / Под общ. ред. канд. техн. наук Э.Ю. Абдуллазянова. В 4 т.; Т. 1. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2012. – 280 с. – С. 46-47.

10. Шишков Е.М. Математическая модель несимметричных режимов многоцепных воздушных линий электропередачи [Текст] / Ведерников А.С., Подшивалова Н.В., Шишков Е.М. // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тез. докл. 18-ой междунар. науч. – техн. конф. студентов и аспирантов. М.: Изд. дом МЭИ, 2012. Т. 4. – С. 342 – 343.

11. Шишков Е.М. Уточнение расчётных значений потерь электрической мощности в несимметричных воздушных линиях электропередачи [Текст] / Ведерников А.С., Подшивалова Н.В., Шишков Е.М. // Энергосбережение, электромагнитная совместимость и качество в электрических системах: сб. статей II между. Науч.-практ. конф. – Пенза: Приволжский Дом знаний, 2011. – С. 12 – 14.

12. Шишков Е.М. Уточнённое определение потерь мощности в ЛЭП 35-220 кВ [Текст] / Ведерников А.С., Шишков Е.М. // Наука. Технологии. Инновации. Материалы всероссийской науч. конф. молодых ученых в 4-х частях. Новосибирск. Изд-во НГТУ, 2010. Часть 2 – С. 139 – 141.

13. Шишков Е.М. Математическое моделирование несимметричных комбинированных многоцепных воздушных линий электропередачи в установившихся режимах [Текст] / Ведерников А.С., Гольдштейн В.Г., Колцун М., Шишков Е.М. // Электроэнергетика глазами молодёжи: научные труды III международной научно-технической конференции: сборник статей. В 2 т. Екатеринбург: УрФУ, 2012. Т.1. 732 с. – С. 162-167.

14. Шишков Е.М. Многопроводная схема замещения многоцепной воздушной линии электропередачи в установившемся режиме [Текст] / Шишков Е.М., Кривихин И.Н. // НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ // Материалы всероссийской научной конференции молодых учёных в 7-и частях. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. Часть 5 - 396 с.– С. 140-143.

15. Шишков Е.М. Уточнение параметров схемы замещения двухцепной воздушной линии [Текст] / Ведерников А.С., Шишков Е.М. // «Диспетчеризация в электроэнергетике: проблемы и перспективы»: материалы 4-ой открытой молодежной науч.-практ. конф. Казань: КГЭУ, 2011. – С. 96 – 100.

Личный вклад автора. Все основные положения диссертации разработаны автором лично. В работах [1, 6-8, 12] автору принадлежат общая постановка научных проблем, путей и методов построения основных решений; в работах [2-5, 11] – реализация математических моделей; в [9, 10] – постановка задач, выполнение расчетов и обобщение результатов расчётов и исследований; в [13-15] – формализация моделируемых технологических процессов и научное редактирование изданий полностью.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета Д 212.269.10
ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»
(протокол № 108 от «26» июня 2013 г.)

Заказ № 610. Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе.
ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет»
Отдел типографии и оперативной печати
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244