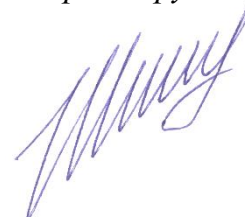


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Самарский государственный технический университет»

*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»

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель –  
кандидат технических наук  
**Ведерников А.С.**

Самара 2013

## Оглавление

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>5</b>
<b>ГЛАВА 1. СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ СЛОЖНОЙ КОНСТРУКЦИИ. ....</b>	<b>11</b>
1.1. Отечественный и зарубежный опыт сооружения многоцепных комбинированных воздушных линий электропередачи.....	11
1.2. Классификация многоцепных воздушных линий. ....	13
1.3. Электромагнитная совместимость многоцепных воздушных линий электропередачи в стационарных режимах. ....	17
1.4. Влияние особенностей конструкции многоцепной комбинированной воздушной линии электропередачи на её установившийся режим. ....	22
1.5. Выводы по главе 1 и постановка задачи диссертационного исследования. ....	27
<b>ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МНОГОПРОВОДНОЙ МНОГОЦЕПНОЙ КОМБИНИРОВАННОЙ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ В УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ. ....</b>	<b>28</b>
2.1. Уравнения состояния и определение параметров многоцепной воздушной линии на основе теории электромагнитных полей. ....	28
2.2. Определение первичных параметров многоцепной комбинированной воздушной линии. ....	37
2.3. П-образная многополюсная структура, как схема замещения многоцепной комбинированной воздушной линии в многопроводной постановке. ....	54
2.4. Применение теории четырёхполюсников к задаче моделирования многоцепной комбинированной воздушной линии электропередачи в установившемся режиме. ....	64

2.5. Приближенное эквивалентирование многопроводной многоцепной комбинированной воздушной линии однолинейной схемой замещения. ...	69
2.6. Выводы по главе 2. ....	72

### **ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

#### **УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ МНОГОПРОВОДНОЙ**

#### **МНОГОЦЕПНОЙ КОМБИНИРОВАННОЙ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ. .. 73**

3.1. Математическое моделирование установившегося режима многоцепной комбинированной воздушной линии в Z-форме, Y-форме и форме обобщённого четырёхполюсника. ....	73
3.2. Математическое моделирование установившегося режима в однолинейной постановке с учётом границ адекватности внутренней несимметрии. ....	78
3.3. Математическое моделирование установившегося режима многоцепной комбинированной воздушной линии простейшей разветвлённой топологии. ....	84
3.4. Задача определения напряжённости электрического поля вдоль трассы многоцепной комбинированной воздушной линии. ....	86
3.5. Выводы по главе 3. ....	90

### **ГЛАВА 4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ**

#### **МОДЕЛЕЙ В ЗАДАЧАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ.. 91**

4.1. Методика расчёта и коммерческого разделения потерь между собственниками отдельных частей многоцепной комбинированной воздушной линии. ....	91
4.2. Определение направления оптимизации конструкции МВЛ по критерию минимума потерь активной мощности и минимуму площади санитарно-защитных зон вдоль трассы МВЛ на стадии проектирования. ...	93

4.3. Сравнение результатов расчёта стационарных режимов на основе однолинейных моделей, на основе многопроводных схем замещения и на основе эквивалентных однопроводных схем.....	96
4.4. Расчёт несимметрии напряжения в конце многоцепной комбинированной воздушной линии в установившемся режиме. ....	107
4.5. Выводы по главе 4. ....	112
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>113</b>
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....</b>	<b>115</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ I.....</b>	<b>128</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ II .....</b>	<b>134</b>

## ВВЕДЕНИЕ

### **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.

Для решения этих проблем известен ряд эффективных способов, наиболее обеспеченных теоретическими и техническими решениями. Из них, не претендуя на исчерпывающую полноту классификации, состава достоинств и недостатков, можно выделить следующие, представленные в таблице В.1.

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.

Таблица В.1

Сравнение способов передачи и распределения  
больших электрических мощностей

№	Наименование	Достоинства	Недостатки
1.	Применение сверхвысоких напряжений (СВН) на переменном и постоянном токе	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Это – классический ступенчато-иерархический способ организации энергоснабжения. Количество ступеней от 2 в системах глубокого ввода и более в обычных СЭС.</li> <li>• Снижение потерь с ростом номинального напряжения.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Необходимость отведения большой территории под охранные зоны и снижение негативных экологических влияний.</li> <li>• Сложность и многоступенчатость распределительной сети и увеличение потерь на преобразование параметров электроэнергии на каждой ступени.</li> <li>• Затраты на сооружение подстанций (в том числе преобразовательных) распределительной сети.</li> </ul>
2.	Кабельные сети, использующие современные виды твердой и жидкой изоляции	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Отсутствие необходимости отведения большой территории для сооружения передачи.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Сложность технической диагностики (в том числе контроля параметров изоляции) и поиска мест повреждения.</li> <li>• Необходимость применения сложного диагностического оборудования, в том числе оптоволоконной диагностики.</li> <li>• Сложность осуществления ремонта.</li> <li>• Относительно высокая стоимость.</li> </ul>
3.	Кабельные сети, использующие эффект высокотемпературной сверхпроводимости	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Кардинальное снижение потерь мощности при передаче и распределении.</li> <li>• Существенное сокращение ступеней преобразования напряжений.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Высокая стоимость эксплуатации.</li> <li>• Повышенные требования к надёжности и необходимость разработки и апробации новых конструктивных элементов передачи.</li> <li>• Необходимость мероприятий по обеспечению синусоидальности токов и напряжений (на постоянном токе).</li> <li>• Целесообразность применения ограничена районами с высокой концентрацией нагрузок, в частности системами электроснабжения мегаполисов.</li> </ul>
4.	Электрические сети на основе МВЛ	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Снижение площади и затрат на сооружение электропередачи и ПС.</li> <li>• Сокращение ступеней преобразования напряжений.</li> <li>• Возможность повышения пропускной способности ВЛ за счёт реконструкции.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Необходимость совпадения трассировки линий различных классов напряжения.</li> <li>• Усложнение управления, технического обслуживания ВЛ, защиты от аномальных режимов и воздействий.</li> </ul>

Выбор оптимального способа построения конкретной системы передачи и распределения электрических мощностей производится на основе экономического сравнения вариантов с учетом данных и характеристик, приведенных в данной таблице

Намечающаяся в последнее время тенденция к увеличению плотности сооружения ВЛ повышает актуальность целого спектра проблем, связанных с проектированием и эксплуатацией комбинированных МВЛ. Среди них нужно выделить проблему учета специфики МВЛ, как многокомпонентной конструкции. Ее основные составные части: - ВЛ основной передачи на ВН или СВН (одна или несколько цепей), которая определяет в большинстве случаев общую длину МВЛ; - ВЛ распределительных сетей, которые на отдельных участках совпадают с основной трассой; - ответвления, присоединения к промежуточным ПС, отпайки и другие присоединения основной передачи и распределительной сети. Сказанное выше определяет **актуальность темы и проблемы** диссертации, а также основные направления **практического применения** её результатов.

#### **Цель и задачи исследования.**

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.

- 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.
- 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.

### **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 уточнённых моделей реальных электроэнергетических объектов. Оценка их корректности и репрезентативности проводилась путём сравнения с данными измерений в условиях эксплуатации МВЛ.

### **Достоверность полученных результатов.**

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.

### **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.

#### **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.

#### **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.

#### **Апробация работы.**

Основные положения диссертационной работы в целом и ее части представлялись и докладывались 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 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 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).

#### **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» Самарского государственного технического университета.

#### **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.

## **ГЛАВА 1. СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ СЛОЖНОЙ КОНСТРУКЦИИ.**

### **1.1. Отечественный и зарубежный опыт сооружения многоцепных комбинированных воздушных линий электропередачи.**

Передача электроэнергии по воздушным линиям (ВЛ) по сей день остается самым дешевым способом передачи электроэнергии, а в классах сверхвысокого напряжения практически единственным. Поскольку строительство новых ВЛ встречает достаточно проблем, остро встает вопрос увеличения пропускной способности существующих ВЛ.

Наиболее простым способом увеличения пропускной способности сетей электропередачи является строительство новых ВЛ, что сопряжено с огромными трудностями. Так, СНиП 2.07.01-89 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений» прямо говорит, что при реконструкции городов следует выносить за пределы селитебной территории существующие воздушные линии электропередачи напряжением 35-110 кВ или выше и заменять их на кабельные.

Таким образом, единственной возможностью увеличения пропускной способности существующих электрических сетей является увеличение пропускной способности существующих ВЛ. Один из эффективных способов реализации данной возможности – применение многоцепных воздушных линий (МВЛ). Этот способ дает возможность строить новые ВЛ путем увеличения цепности существующих и не выходя при этом, что очень важно, за границы уже существующих коридоров.

Опыт сооружения комбинированных МВЛ к настоящему времени имеется в отечественной и зарубежной электроэнергетике. Так, например, комбинированная МВЛ «Donau», эксплуатируемая в республике Словакия, включает в себя четыре цепи. Две цепи верхнего подвеса имеют класс

напряжения 400 кВ, а цепи нижнего подвеса – 110 кВ. Конструкция промежуточных опор линии «Donau» схематично представлена на рис. 1.2.

С 70-х годов прошлого века комбинированные МВЛ находят всё большее применение за рубежом. Характерным примером комбинированной МВЛ является шестицепная 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 [70]. Также известна четырёхцепная линия 230–66 кВ Таба – Шарм-Эль-Шейх [59]. В 2011 году в республике Словакия введена в эксплуатацию комбинированная четырёхцепная МВЛ 400–110 кВ «Donau».

Необходимость сооружения МВЛ в отечественных электрических сетях декларировалась неоднократно, однако до настоящего времени не получила массовой реализации. Имеются сведения всего о трёх участках МВЛ, сооружённых в странах бывшего СССР [70].

- трёхцепный участок воздушной линии 500 кВ, входящий в схему выдачи мощности Саяно-Шушенской ГЭС (~400 м, введён в эксплуатацию в 1976 г.);
- четырёхцепный заход ВЛ 150кВ на ПС «Заводская» Днепроэнерго (~600 м, введён в эксплуатацию в 1984г.);
- четырёхцепный заход ВЛ 110кВ на ПС «Барсово» ОАО «Тюменьэнерго» (~600 м, введён в эксплуатацию в 1984г.);
- четырёхцепные участки линий 220-110 кВ, проходящие по территории северо-запада Москвы и ближайшего Подмосковья (строительство ведётся с 2008 г.);
- шестицепная комбинированная МВЛ 380-220-110 кВ на территории Германии (50 км, введена в эксплуатацию в 1977г.);
- четырёхцепная комбинированная МВЛ 400-110 кВ «Donau» на территории Словакии (35 км, введена в эксплуатацию в 2011г.).

Проекты сооружения комбинированных МВЛ начали реализовываться только в 2008 году при строительстве чётрёхцепных участков линий 220-110 кВ, проходящих по территории северо-запада Москвы и ближайшего Подмосковья.

### 1.2. Классификация многоцепных воздушных линий.

Согласно действующему государственному стандарту, линия электропередачи, имеющая более двух комплектов фазных электрических проводов, называется многоцепной. Комбинированной называется линия электропередачи, на опорах которой подвешено несколько комплектов фазных или разнополярных проводов разных номинальных напряжений. Как видно из представленной на плакате диаграммы общая протяжённость воздушных линий 35-330 кВ, абсолютное большинство которых в российских электрических сетях являются одноцепными и двухцепными, составляет около 470 тысяч километров.

Таблица 1.1.

Напряжение, кВ	Наибольшая передаваемая мощность, МВт	Наибольшее расстояние передачи, км
35	5 – 10	30 – 50
110	25 – 50	50 – 150
150	40 – 70	100 – 200
220	100 – 200	150 – 250
330	200 – 300	300 – 400

Накопленный опыт проектирования и эксплуатации линий электропередачи позволяет рекомендовать некоторые целесообразные соотношения между параметрами ВЛ, которые приведены в табл. 1.1.

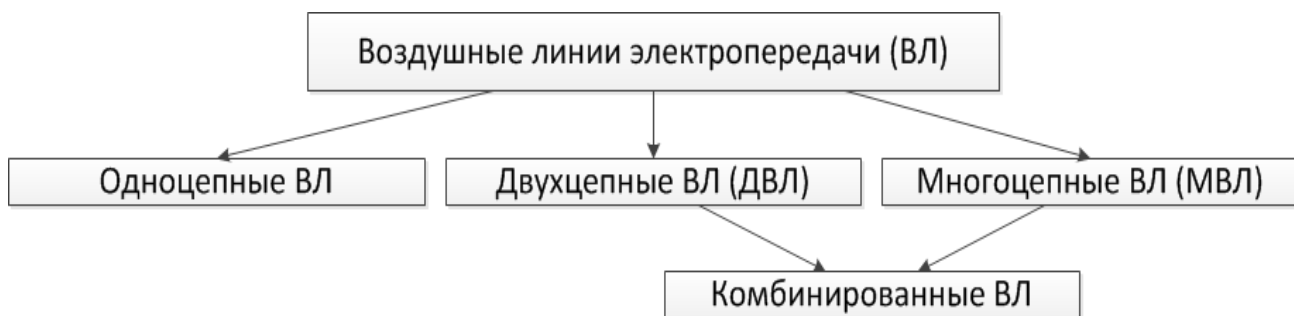


Рис 1.1. Классификация воздушных линий электропередачи.

Типы и конструкции опор многоцепных линий электропередачи разнообразны. Отличаются опоры материалом, исполнением и способом крепления, подвязки проводов.

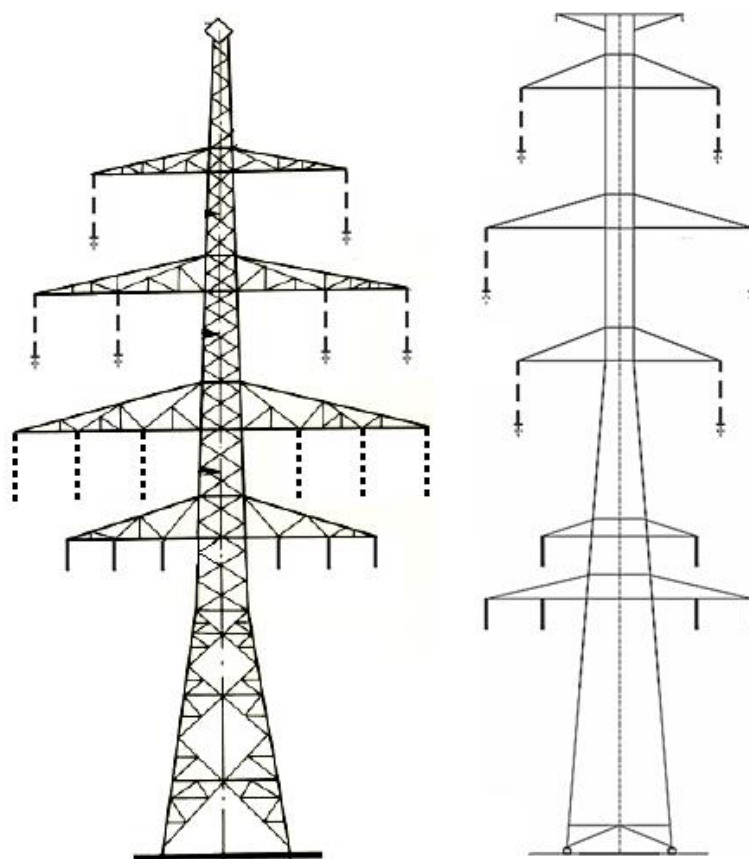


Рис. 1.2. Конструкции промежуточных опор шестицепной (а) МВЛ  $2 \times 380$  кВ (---) +  $2 \times 220$  кВ (- - -) +  $2 \times 110$  кВ (—) и четырёхцепной (б) линии «Donau»  $2 \times 400$  кВ (- - -) +  $2 \times 110$  кВ.

В последнее время сооружается всё больше комбинированных МВЛ с числом цепей, равным трём и более.

Достаточно громоздкая опора немецкой шестицепной линии (рис. 1.2, 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 четырехцепных ВЛ 220–110 кВ. Ещё одним из примеров таких линий является введённая в эксплуатацию в 2011 году четырёхцепная комбинированная МВЛ «Donau» (рис. 1.2, б). Две цепи верхнего подвеса имеют класс напряжения 400 кВ, а цепи нижнего подвеса – 110 кВ.

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 грозозащитный трос или тросы.

На рисунке 1.3 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 узлов  $i_n$  и  $i_k$  могут быть подключены 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  $S_{\text{наг}iT}$ , а цепи одного класса напряжения могут быть объединены отпайками отбора мощности  $S_{\text{наг}(i-1)(i)O}$ . Поскольку длина каждой цепи представленной на рисунке 2 МВЛ различна и определяется географическим положением потребителей, то на разных участках своей трассы количество цепей, объединённых на опорах МВЛ, может быть различным

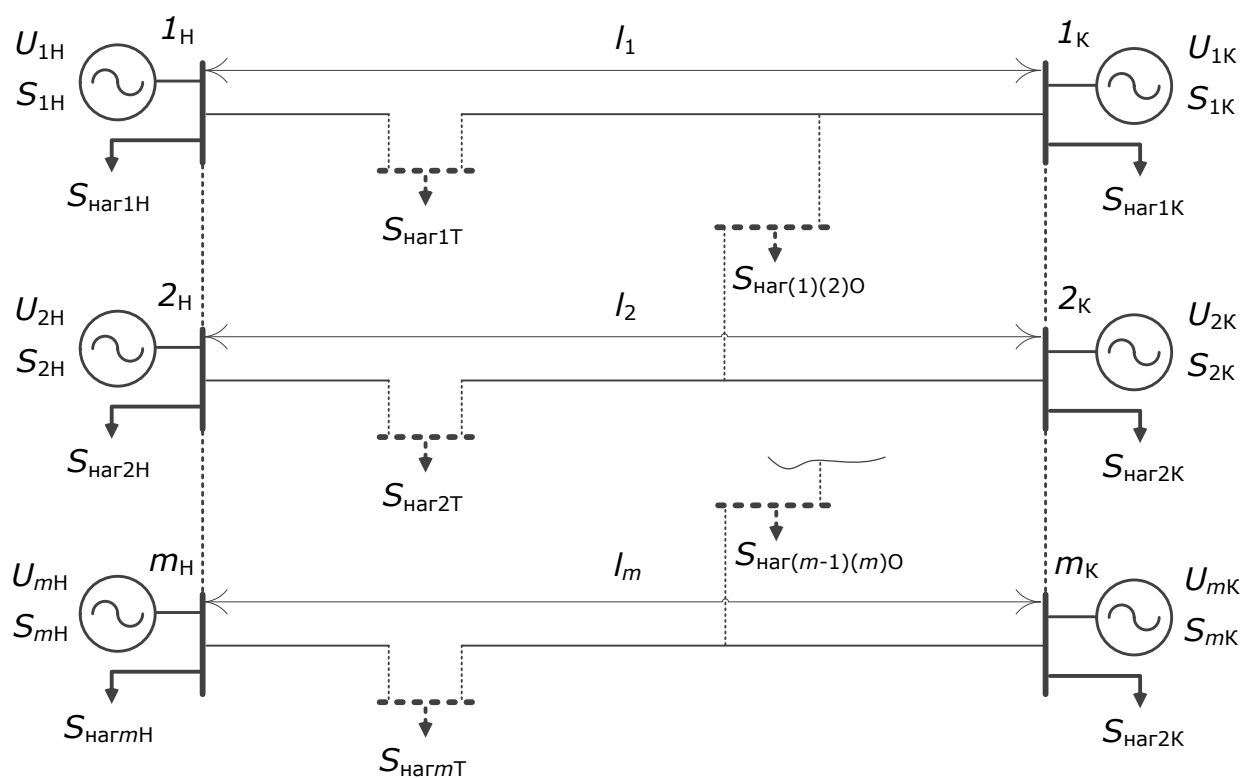


Рис. 1.3. Обобщённая схема подключения  $m$ -цепной комбинированной МВЛ.

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



### **1.3. Электромагнитная совместимость многоцепных воздушных линий электропередачи в стационарных режимах.**

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 значение 1 кВ/м. Очевидно, что тщательное моделирование возможных режимов работы МВЛ и вычисление значений напряжённости 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.

В современных условиях в электроэнергетике и электротехнике огромное внимание уделено согласованию условий безаварийной и эффективной работы объектов электрической системы, производящих, транспортирующих, преобразующих и распределяющих электрическую энергию при её высоком качестве. При работе электроустановки подвержены большому количеству

внешних и внутренних эксплуатационных физических воздействий (ЭФВ), которые по виду энергии часто являются электромагнитными возмущениями (ЭМВ). С другой стороны, электроустановки (ЭУ) сами являются источниками ЭФВ на окружающие объекты и среду.

ЭФВ и ЭМВ в соответствии с основными положениями ЭМС можно рассматривать как энергетическое проявление случайного или запланированного взаимодействия ЭУ, технических средств (ТС), биологических, экологических объектов с внешними воздействиями энергии или при изменении состояния в них её внутренних резервов.

Необходимо подчеркнуть, что ЭМС с теоретической точки зрения представляет собой специфический раздел электротехники как науки. Он самым тесным образом соприкасается и связан с важнейшими электротехническими, электроэнергетическими и электротехнологическими приложениями. Это – теория и практика электрических режимов, качество электроэнергии, техника высоких напряжений и электрической изоляции, экранирование и защита от воздействий разнообразных электромагнитных полей и др. Одними из самых близких к ЭМС направлений являются теории надёжности, ресурсов и старения ЭУ, электротехнических комплексов и систем и др.

Однако, как уже говорилось выше, несмотря на отчетливую родственную связь, например, с теорией надёжности, есть и принципиальное отличие. Оно заключается в том, что при исследовании ЭМС интерес представляет не только и не столько сам двоичный факт определения состояния отказа объекта или его работоспособного состояния. Необходимый атрибут в исследовании ЭМС – это определение и физическое описание энергетического взаимодействия, и процесса изменения свойств объектов с учётом технических и экономических последствий этих взаимодействий.

Наличие электромагнитной энергии – это неременный атрибут электроустановки, а также среды, которая её окружает. При неминуемых

переменах их состояния наблюдается её количественное и качественное изменение. При этом можно наблюдать её различные проявления и преобразования по виду и форме. Это можно определить термином электромагнитное явление (ЭМЯ).

Возникающая в процессах возникновения и развития электромагнитного явления энергия и её характеристики будут формировать ЭМВ на обозначенные объекты или окружающую среду. ЭМВ можно считать причиной и первоисточником электромагнитных возмущений, в самом деле, передающих энергию электромагнитного явления напрямую к техническим средствам, биологическим объектам и иным устройствам и их отдельным частям, для которых в названных внешних условиях нужно обеспечить безаварийную работу. Описанная передача производится по так называемым каналам, которые имеют проводящую (кондуктивную) или – полевою (индуктивную) природу. ЭМВ при этом могут изменяться по виду, форме и значениям параметров. Остаточное возмущение, распространившееся на отдельную электроустановку, называется электромагнитной помехой (ЭМП). Этот термин широко используется в ГОСТ, инструкциях и документах, научно–технических работах, монографиях и др. [28, 30, 34].

Реализация положений ЭМС в ЭЭС, обеспечивая их нормальную работу, стойкость к ЭМП (ЭМВ) и нейтральность в этом аспекте по отношению к другим объектам, ограничивает нарушения ЭМС. Иначе говоря, в работе ЭУ, прежде всего, необходимо максимально уменьшить число отказов, нарушений и снижений качества технологических и технико-экономических характеристик (в частности, нарушений качества электроэнергии, повреждений изоляции и др.) при внешних и внутренних ЭМП. Во вторых, они сами не должны создавать аварийно-опасные или вредные наводки и помехи для ближайших электроустановок, промышленных, биосферных и иных объектов.

Можно выделить два аспекта рассмотрения электромагнитной совместимости. Первый представляет из себя детерминированное или статистическое вычисление параметров надёжности работы электрической системы при различных внутренних и внешних электромагнитных помехах. С этой целью применяются статистические ретроспективные данные эксплуатации об аварийности и нарушениях работы ЭЭС. Второй направлен на прогнозирование электромагнитной совместимости для эксплуатируемых, реконструируемых и проектируемых электроустановок. При этом применяются условные уровни электромагнитной совместимости, которые обеспечивают относительную оценку собственной стойкости электроустановки по регламентированным значениям ЭМП в форме допустимых воздействий, задаваемых нормативами, руководящими и паспортными документами.

Обозначенные уровни представляют из себя базу для проведения промышленных, и приёмо-сдаточных испытаний, в процессе которых с их помощью определяются характеристики испытательных ЭМВ.

ЭМС на уровне современных требований можно надёжно обеспечить, применяя по отдельности или в комплексе следующие мероприятия.

1. Согласование уровней ЭМП со способностями конкретных объектов к их преодолению, то есть стойкостью к их воздействиям.
2. Ограничение или полное подавление ЭМП и в процессах их появления, распространения и непосредственных воздействий на ЭУ.
3. Создание условий и применение средств, обеспечивающих полный или частичный отвод энергии ЭМВ (ЭМП) мимо ТС и биологических объектов.
4. Создание условий одновременности процессов появления ЭМП и функционирования ТС и объектов в зоне их интенсивного проявления.

Одно из главных направлений – обеспечение электромагнитной совместимости для электроустановок с неодинаковой способностью

сопротивления ЭФВ в обстоятельствах разнообразия классов и режимов электроустановок, значительных отличий их режимов работы, технического состояния и производственного процесса.

Особое значение здесь имеет большое количество в ЭЭС стареющего и изношенного электрооборудования. Эта проблема занимает важное место в обеспечении электромагнитной совместимости, так как каждое ЭМВ изменяет внутреннее состояние электрооборудования.

Чаще всего, при этом ухудшается его способность преодолевать эти и другие воздействия и сохранять технологическую работоспособность. При этом нормальная работа электрооборудования нарушается одномоментно или постепенно, что приводит с течением времени к всё более частым авариям в отдельных участках и в целом в ЭЭС.

В теории электромагнитной совместимости главным положением считается условное описание и аналитическая модель качественного и количественного решения задачи её обеспечения. Эту задачу часто формулируют как анализ и синтез критериев совместного сосуществования определённых физических систем при различных эксплуатационных воздействиях и, главным образом, воздействиях, в которых каким-либо образом передаётся электрическая энергия. Анализ опыта эксплуатации электроустановок ЭЭС указывает на их большую аварийность, в которой значительная доля аварий связана с перенапряжениями.

Обеспечение ЭМС электрооборудования ЭЭС при воздействиях перенапряжений определяет круг технико-экономических задач, среди которых значительное место занимает управление параметрами перенапряжений, то есть их ограничение до величин, допустимых для электроустановок 35 – 330 кВ ЭЭС.

#### **1.4. Влияние особенностей конструкции многоцепной комбинированной воздушной линии электропередачи на её установившийся режим.**

Условиями нормального режима работы трехфазной сети переменного тока низкого, среднего и высокого напряжения являются симметрия параметров нагрузочных режимов передачи и характеристик электрических элементов системы. Однако при работе ЭЭС встречаются режимы, не удовлетворяющие представленным условиям. Примером этого может являться режим, возникающий при длительной работе линии с поврежденным или отключенным фазным проводом, при этом существенно нарушается симметрия параметров режима. Другим примером может послужить сеть, значительную часть нагрузки которой определяют выпрямительные установки, питающие тяговые подстанции электрифицированных железных дорог переменного тока. Этой проблеме посвящены труды Асанова Т.К. [13], Бардушко Д.В. [16], Висящева А.Н. [29], Карякина Р.М. [64], Закарюкина В.П. [52, 56, 84] и других.

Ещё одним случаем усложнённой несимметрии можно считать многоцепные воздушные линии, в которых 6 или несколько проводников размещены вблизи друг другу с малыми расстояниями, которые определяются длиной траверс фазных проводов. Многоцепные линии очевидно относятся к строго несимметричным электроустановкам, так как трехфазные токи и напряжения в цепях не будут создавать сбалансированные электромагнитные поля даже при симметричных значениях этих параметров режима [69]. Также необходимо отметить, что мощности в цепях могут отличаться по направлению протекания потока, так и по его модулю.

Однофазное моделирование установившихся режимов электрических систем в рассмотренных случаях может являться источником значительных погрешностей, в связи с чем становится объективной необходимостью ведение расчета несимметричных установившихся режимов электрических

сетей в многопроводной постановке с использованием метода фазных координат.

В трехфазных электрических системах общего назначения с симметричными элементами (источники мощности, воздушные линии, трансформаторные элементы, обобщённая нагрузка) существует круг задач, обусловленных учётом трёхфазной несимметрии. К подобным задачам причисляются, к примеру, анализ режимов сети при обрывах на воздушных линиях электропередачи и коротких замыканиях на землю. Обычно такие задачи решаются сложно и требуют индивидуального подхода к каждой конкретной ситуации.

Анализ режимов воздушных линий электропередачи связан с учетом взаимного влияния проводов и при данной постановке вопроса делают необходимым рассмотрение данной задачи с использованием метода фазных координат. Вычисление потерь мощности и энергии в электрических системах с режимами несимметричной нагрузки аналогично требует пофазного рассмотрения элементов. Тривиальное суммирование потерь симметричных составляющих не является допустимым из-за квадратичной зависимости величины потерь от тока. Также в трехфазных трансформаторных устройствах по причине отсутствия симметрии магнитопровода трехфазное напряжение на входе образует несимметричную систему токов на выходе.

При расчетах несимметричных установившихся режимов электроэнергетических систем обычно применяется метод симметричных составляющих с разнообразными модификациями его компонентов и процедур или метод фазных координат. Метод симметричных составляющих, разработчиками которого являются Эванс Р.Д. и Вагнер К.Ф. [23], заключается в составлении трёх однофазных моделей для прямой (нечётные гармоники с номерами, не кратными трём), обратной (чётные гармоники) и нулевой (нечётные гармоники с номерами, кратными трём) последовательностей с дальнейшим анализом режимов этих систем и алгебраическим

суммированием их решений. Данный метод требует индивидуального подхода для решения конкретной задачи и поэтому плохо поддаётся формализации для применения в программных продуктах. Более того, данный метод эффективно проявляет себя исключительно в случае простой несимметрии, а при несимметриях повышенной сложности число действий, а следовательно и время на их осуществление при расчетах многократно возрастают. Необходимо сказать, что для расчёта режимов двухцепных воздушных линий метод симметричных составляющих вовсе не применим поскольку, невозможно определить сопротивления составляющих прямой, обратной и нулевой последовательностей, и для расчёта процессов в рассматриваемой цепи необходимо использовать собственную систему координат.

Ещё одним средством расчета несимметричных режимов является метод фазных координат, являющий собой естественное математическое отражение многофазной системы. Использованию этого метода при расчетах режимов посвящены труды Бермана А.П. [19], Висящева А.Н. [28, 30], Гусейнова А.М. [44], Закарюкина В.П. [51-55], Заславской Т.Б. [58], Лосева С.Б. [72], Laughton M.A. [3].

Особенности использования метода фазных координат обусловлены необходимостью моделирования взаимных индуктивных влияний соседних обмоток в трансформаторах и фазных проводников воздушных линиях. Разработанный ранее метод развязки магнитосвязанных цепей [56] для практической реализации в расчётных программах имеет ряд осложнений, которые делают затруднительным его применение. В анализе электрических режимов достаточно часто заменяют трехфазный трансформатор группой однофазных трансформаторов, а при моделировании воздушных линий электропередачи используются  $\Pi$  – схемы замещения каждой фазы, лишь опосредованно учитывающие расщепление проводов и грозозащитные тросы. Эти схемы замещения приемлемо работают лишь при рассмотрении несложных систем с элементарной несимметрией.



По высказанным причинам задача всестороннего рассмотрения воздушных линий электропередачи в фазных координатах с учетом электромагнитных и электростатических взаимных связей проводников линии и её грозозащитных тросов весьма актуальна. По результатам такого моделирования решаются важные научные и инженерные задачи, возникающие в технологических процессах проектирования и эксплуатации электрических сетей, содержащих многоцепные воздушные линии электропередачи.

Подобной задачей можно считать расчет режимов ЭЭС, включающих в себя воздушные линии электропередачи с расщепленными фазными проводниками и грозозащитными тросами и их вариант конструкции - многоцепные линии. Изучением воздушных линий электропередачи занимались известные российские исследователи: Мисриханов М.Ш. [83-85], Евдокунин Г.А. [11], Федин В.Т. [87, 88], Астахов Ю.Н. [16], Ракушев Н.Ф. [92] и другие. К главным задачам их исследовательских работ относятся уменьшение несимметрии многоцепных линий и увеличение их пропускной способности. Необходимо добавить, что в их трудах не уделено должного внимания режимам работы электропередачи, когда по цепям МВЛ протекают разные по модулю и направлению токи.

Очевидно, что электромагнитные поля для МВЛ, возникающие в квазистационарных процессах УР, 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 УР МВЛ являются по определению 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 многочисленных исследованиях отечественных и зарубежных учёных: В.Г. Гольдштейна [105], В.П. Закарюкина [53-57], А.В. Крюкова [74], Ю.Н. Астахова, В.А. Веникова [33], Э.Я. Зуева [61], Г.А. Евдокунина [50-51], Н.И. Воропая [7], А.З. Гамма [37-41], В.И. Идельчика [63-65], а также X. Wang [6], H. Rudnick [5] и прочих.

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

### **1.5. Выводы по главе 1 и постановка задачи диссертационного исследования.**

В главе дан обзор актуального состояния проблемы применения МВЛ, а также способов анализа квазистационарных режимов электроэнергетических систем. Очевидно, что сооружение и эксплуатация МВЛ требует решения нескольких задач:

- обоснование необходимости и целесообразности применения МВЛ;
- построение математической модели МВЛ и её электрических режимов;
- разработка алгоритмов управления установившимся режимом МВЛ;
- разработка указаний по защите МВЛ от перенапряжения;
- задача обеспечения необходимых показателей надёжности и ремонтпригодности МВЛ.

В настоящей работе уделено внимание вопросам математического моделирования МВЛ и их установившихся режимов с учётом их внутренней несимметрии.

## **ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МНОГОПРОВОДНОЙ МНОГОЦЕПНОЙ КОМБИНИРОВАННОЙ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ В УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ.**

### **2.1. Уравнения состояния и определение параметров многоцепной воздушной линии на основе теории электромагнитных полей.**

Широко используемым подходом в реализации практических 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. Имеющиеся при этом методологические трудности разрешаются в соответствии с указаниями, данными в основополагающей работе Г.А. Гринберга [42].

В значительном большинстве случаев используется преобразование «полевой» постановки задачи в соответствующие эквивалентные схемы замещения, сопровождаемое определением первичных параметров этих схем с помощью эквивалентных интегральных решений части полевой задачи. Все элементы такой схемы являются отражением учета отдельных случаев существования материи электромагнитного поля. К примеру, у проводов многопроводной ВЛ электрические поля отображаются в виде емкостей и магнитные – в виде индуктивностей. В ином случае преобразование энергии поля в теплоту отображаются, как активные сопротивления.

Уравнения состояния электрических цепей, включающих в себя эти элементы, можно обозначить, как приближенное математическое описание электромагнитных процессов в объекте исследования.

Линии электропередачи, а также обмотки электрических машин, трансформаторов и реакторов и другие элементы электрических сетей включают в себя проводниковые, диэлектрические или магнитные среды, имеющие сложные поверхности раздела между ними. Ограничиваясь в данной

работе исследованиями установившихся режимов ВЛ, рассмотрим вопросы, связанные с анализом электромагнитных процессов в этих средах с помощью названных выше положений теоретической электротехники. Данный анализ проведён с использованием дифференциальных уравнений Максвелла электромагнитного поля для каждой  $i$ -й среды [67-68]:

$$\operatorname{rot} E_i = -\frac{\partial}{\partial t}(\mu_i H_i), \quad (2.1)$$

$$\operatorname{div}(\varepsilon_i E_i) = \delta_{\rho i}; \quad (2.1a)$$

$$\operatorname{rot} H_i = \frac{1}{\rho_i} E_i + \frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_i E_i) + \delta_{\rho i} v_i, \quad (2.2)$$

$$\operatorname{div}(\mu_i H_i) = 0, \quad (2.2a)$$

где

$E, H$  – напряженность электрического поля и магнитного поля;

$\delta_{\rho}$  – удельный объём заряда;

$\delta_{\rho} v$  – плотность тока переноса;

$\varepsilon, \mu$ . – диэлектрическая проницаемость и магнитная проницаемость среды;

$\rho$  – сопротивление  $i$ -й среды;

Каждое из  $\varepsilon, \mu$  и  $\rho$  зависят от времени, места и характеристик поля. В неизотропной среде они представляют собой комплексные величины.

Центральная часть данного решения – граничные условия поверхностей между соседними средами ( $k, i$ ) тангенциальных и нормальных составляющих ( $\tau, \rho$ ) электрического поля и магнитного поля:

$$H_{\tau k} = H_{\tau i},$$

$$\mu_k \cdot H_{nk} = \mu_i \cdot H_{ni},$$

$$E_{\tau k} = E_{\tau i};$$

$$\frac{1}{\rho_k} E_{nk} + \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_k \cdot E_{nk}) + \delta_{\rho k} \cdot v_{nk} = \frac{1}{\rho_i} E_{ni} + \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_i \cdot E_{ni}) + \delta_{\rho i} \cdot v_{ni}. \quad (2.3)$$

На поверхностях раздела возникают также заряды, поляризационная ЭДС и разность потенциалов. Этот факт имеет большое значение для процессов коррозии металлов и явлениях в электролитах, но в настоящей работе не учитывается.

Этот способ учёта электромагнитных процессов в передачах подробно рассмотрен в работах Б.Э. Бонштедта и Г.А. Гринберга [43] для однопроводной воздушной линии и М.В. Костенко, Л.С. Перельмана, Л.У. Ведепола, Р.Г. Уэсли и др. – для многопроводной линии. Однако, подобный способ решения рассмотренной задачи при использовании современных вычислительных средств чрезвычайно трудоемок, особенно для многопроводной конструкции ВЛ [67, 68]. Более того, возможно получение только численных решений для узко-поставленных отдельных конкретных случаев.

Отметим также, что установившиеся режимы ВЛ, которыми выше была ограничена область исследования, традиционно моделируются без учета взаимного влияния близко трассируемых проводников, грозозащитных тросов и цепей в целом (для двухцепных и многоцепных ЛЭП), а также земли и, самое главное, принципиальной несимметрии одноцепных и особенно многоцепных линий. Однако, в современных условиях требования к точности расчетов УР стали намного жестче в связи с появлением ряда практических задач, связанных с учетом электроэнергии, повышением пропускной способности за счет использования внутренних свойств многоцепных ВЛ и прогнозирования режимов их работы при значительной разнице в их загрузке и др.

В связи с этим далее примем параметры каждой среды однородными и изотропными, а также пренебрежём объемными зарядами. Многослойность

земли учитываем, введя эквивалентные сопротивления  $\rho_3 = const$ , и предположим  $\varepsilon_3 = const$ ,  $\mu = \mu_0 = const$ . 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.

Решая совместно уравнения (2.1) и (2.2), производя переход к операторным изображениям и полагая  $\mu_i = const$ ,  $\varepsilon_i = const$ ,  $\rho_i = const$ ,  $\delta_{\rho_i} \rightarrow 0$  с условием нулевых начальных условий, получаем волновые уравнения, в декартовых координатах принимающие вид [59]:

$$\nabla^2 \Psi_i = \frac{\partial^2 \Psi_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi_i}{\partial z^2} = k_i^2 \cdot \Psi_i, \quad (2.4)$$

где  $k_i = \sqrt{p \cdot \mu_i \cdot \sigma_i}$ ,  $\sigma_i = \frac{1}{\rho_i} + p \cdot \varepsilon_i$  – волновое число и электропроводность

$i$ -й среды в операторном изображении;  $\Psi_i$  – составляющие поля  $E_{xi}$ ,  $E_{yi}$ ,  $E_{zi}$ ,  $H_{xi}$ ,  $H_{yi}$ ,  $H_{zi}$ .

Как уже было сказано выше, уравнения (2.1)–(2.4) служат для построения, основания и повышения точности параметров эквивалентных схем и их структуры, вычисления погрешностей и определения границ применения рассматриваемых схем замещения [68].

Воздушные линии (ВЛ) электропередачи высокого (ВН) и сверхвысокого (СВН) напряжения имеют функцию передачи электрической энергии на большие расстояния с малыми потерями. В связи с этим они включают в себя провода и тросы большого диаметра, имеющие малые сопротивления. Дистанции между проводами и грозозащитными тросами, а также высота их подвеса над поверхностью земли гораздо больше их радиусов.

Фазные проводники достаточно хорошо изолированы от земли и друг от

друга. Они имеют минимальные стрелы провеса. Протяжённость линий значительно превышает их поперечные габариты даже при условии учета проникновения электрического и магнитного полей в землю.

Особым видом ВЛ являются МВЛ, в которых шесть и более проводов расположены вблизи друг от друга на соизмеримых дистанциях, определяемых размерами траверс. МВЛ относятся к принципиально несимметричным объектам электрической сети, так как трехфазные системы токов и напряжений создают несбалансированные электромагнитные поля в тех случаях, когда нагрузки цепей являются симметричными и равными по модулю [70].

Также необходимо учесть отличные по величине и направлению мощности, передающиеся по цепям. Это требует разработки уточненного анализа и соответствующих моделей для МВЛ, в частности, и для установившихся режимов, для которых, как в эксплуатации, так и в проектировании, общепринятым является использование симметричных и в большинстве отдельных моделей по цепям.

Аналитические и экспериментальные проверки на действительных линиях продемонстрировали, что в стационарных режимах, атмосферных разрядах и внутренних процессах в линиях возникают поперечные волны (моды типа TE). Они растекаются вдоль линии с относительно небольшими потерями и скоростями, приближающимися к скорости света. В случае этих волн характерно очень малое значение продольных составляющих  $E_x$  и  $H_x$  в воздухе по сравнению с поперечными.

Синусоидальные волны типа  $e^{j\omega t}$  затухают по экспоненциальному закону  $e^{-\gamma \cdot x}$ , значение коэффициента распространения составляет:

$$\gamma = \alpha + j\beta, \quad (2.5)$$

здесь  $\beta = \omega/c + \Delta\beta$  – коэффициент фазы;  $\alpha = f_a(\omega)$  – коэффициент



затухания. В случае воздушных линий  $\Delta\beta$  и  $\alpha$ , как правило, меньше  $\omega/c$  по крайней мере на порядок ( $\alpha \leq 0.1\omega/c, \Delta\beta \leq 0.1\omega/c$ ).

На рис. 2.1  $E_H, E_k, Z_H, Z_k$  – квадратные матрицы  $n$ -го порядка фазных и междуфазных ЭДС и сопротивлений начала и конца участка многопроводной линии;  $U(x), I(x)$  – матрицы-столбцы тока и напряжения на линии в точке  $x$ ;  $Z, Y$  – матрицы погонных сопротивлений и проводимостей линии.

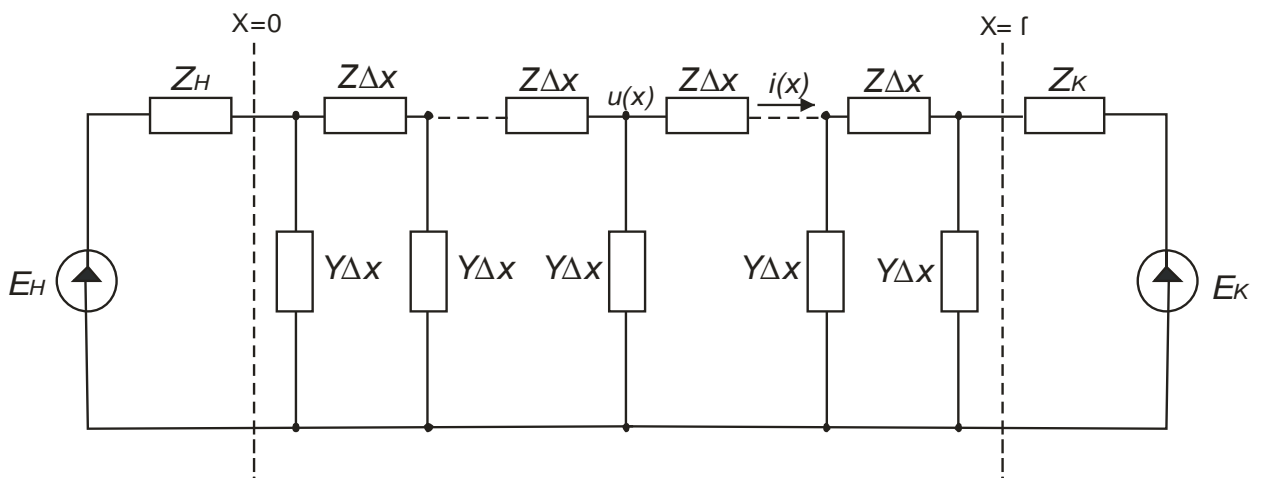


Рис. 2.1 Аналитическая схема распространения поперечных волн в многопроводной линии электропередачи.

Коэффициент распространения  $\gamma$  для аperiодических волн в операторной форме получаем переходом от  $j\omega$  к оператору  $p$ . Он является сложной функцией этого оператора. Задавая в выражениях (2.4)  $\Psi_i = F_i e^{-\gamma \cdot x}$  и

$\frac{\partial^2 \Psi_i}{\partial x^2} = \gamma^2 \Psi_i$ , имеем в прямоугольной системе координат:

$$\frac{\partial^2 F_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 F_i}{\partial z^2} = m_i^2 F_i \quad (2.6)$$

где  $F_i = E_{xi}(0), E_{yi}(0), \dots, H_{zi}(0)$  – каждая из компонент поля в произвольной точке  $x = 0$ ;  $m_i$  – волновой параметр среды, равный

$$m_i = \sqrt{k_i^2 - \gamma^2} = \sqrt{p\mu_i\sigma_i - \gamma^2}. \quad (2.7)$$

К примеру, для ВЛ с небольшим уровнем потерь для поперечных волн и магнитной проницаемостью  $\mu_i = \mu_0$  имеем:

$$\gamma \approx p^2 \mu_0 \varepsilon_0, \quad m_i \approx \sqrt{p\mu_i \left[ \frac{1}{\rho_i} + p(\varepsilon_i - \varepsilon_0) \right]}. \quad (2.8)$$

В случае линий с незначительными потерями для поперечных волн при  $\mu_i = \mu_0$  имеем:

$$\gamma \approx p^2 \mu_0 \varepsilon_0, \quad m_i \approx \sqrt{p\mu_i \left[ \frac{1}{\rho_i} + p(\varepsilon_i - \varepsilon_0) \right]}. \quad (2.8a)$$

Кроме поперечных волн на концах линии и точках поворота трассы, в местах грозового поражения, коммутации и вблизи опор возникают продольные волны более высоких порядков. Эти волны затухают достаточно быстро и играют роль концевых эффектов. Однако, для рассматриваемого диапазона частот ( $\omega < 10^7$  Гц) или длин фронта ( $\tau > 0.1$  мкс) длины волн настолько невелики, что ими пренебрегают.

Для условно поперечных волн в передачах ВН и СВН в первом рассмотрении справедлива блок-схема, изображённая на рис. 2.1.

Из-за влияния поверхностного эффекта в земле и проводах удельные комплексные сопротивления  $Z$  имеют зависимость от частоты для синусоидальных токов или от характера кривой токов для апериодических процессов. Для первого приближения можно пренебречь насыщением стальных тросов и сердечников сталеалюминиевых проводов наряду с прочими нелинейными характеристиками. Принимая нулевые начальные условия, возможно сразу произвести переход к операционным изображениям.

Система телеграфных уравнений многопроводной линии в матрично–операторной форме выражается как [59]:

$$\begin{aligned} -\frac{d\bar{U}(p, x)}{dx} &= ZI(p, x); \\ -\frac{dI(p, x)}{dx} &= Y\bar{U}(p, x), \end{aligned} \quad (2.9)$$

где  $U = [u_1, u_2, \dots, u_n]_T$  – вектор-столбцевая матрица операторных представлений напряжений  $u(x)$  на  $n$ -проводной линии над землёй;

$I = [i_1, i_2 \dots i_n]_T$  – вектор операторных представлений токов  $i(x)$  в  $n$  проводах;

$Z = pM + Z^{(\Pi)} + Z^{(3)}$  – квадратичная матрица порядка  $n$ , состоящая из собственных и взаимных погонных сопротивлений;  $M$  – квадратичная матрица индуктивностей между  $k$ -м и  $i$ -м проводами с элементами  $M_{ki}$ , индуцированными магнитными потоками в воздухе;  $Z^{(\Pi)}$  – матрица собственных сопротивлений витых проводников, учитывающая магнитные потоки, проникающие в материал проводника;  $Z^{(3)}$  – квадратичная матрица взаимных и собственных сопротивлений, обусловленных магнитными потоками, проникающими в землю;  $Y$  – квадратичная матрица погонных собственных и взаимных проводимостей [43].

Решая уравнения (2.9) поочерёдно относительно матрицы токов и напряжений, приходим к следующему результату:

$$\frac{d^2\bar{U}}{dx^2} = \Gamma^2\bar{U}; \quad \frac{d^2I}{dx^2} = (\Gamma^2)^T \bar{I} \quad (2.10)$$

где  $\Gamma^2 = ZY$ ,  $(\Gamma^2)^T = YZ$ , и  $(\Gamma^2)^T$  – транспонированная матрица  $\Gamma^2$ .

С целью разрешения уравнений (2.10) нужно привести матрицы напряжения и тока к диагональным, условясь

$$\bar{U} = \lambda\bar{U}_{(s)},$$

$$\bar{I} = \delta \bar{I}(s) \quad (2.11)$$

Умножив обе части уравнений (2.10) ) слева на  $\lambda$  и  $\delta$ , а также произведя переход к обратным матрицам  $\lambda^{-1}$  и  $\delta^{-1}$ , имеем:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \bar{U}(s)}{dx^2} &= \lambda^{-1} \Gamma^2 \lambda \bar{U}(s), \\ \frac{d^2 \bar{I}(s)}{dx^2} &= \delta^{-1} (\Gamma^2)^T \delta \bar{I}(s) \end{aligned} \quad (2.12)$$

Параметры  $\lambda$  и  $\delta$  вычисляем так, чтобы они обратили матрицы  $\Gamma^2$  и  $(\Gamma^2)^T$  в диагональные, становящиеся при этом матрицами собственных значений, причем

$$\lambda^{-1} \Gamma^2 \lambda = \delta^{-1} (\Gamma^2)^T \delta = \gamma^2 \quad (2.13)$$

где  $\gamma$  – диагональная матрица собственных значений коэффициентов распространения  $\gamma(s) (s=1,2,\dots,n)$ . Квадратичные матрицы  $\lambda$  и  $\delta$  обуславливают  $n$  соотношений между напряжениями с элементами

$$\lambda_{k(s)} = \frac{\bar{U}_{k(s)}}{\bar{U}_{1(s)}} \quad \text{и между токами с элементами} \quad \delta_{k(s)} = \frac{\bar{I}_{k(s)}}{\bar{I}_{1(s)}}, \quad \text{причем}$$

$$k = 1, 2, \dots, n; \quad s = 1, 2, \dots, n; \quad \bar{U}_{1(s)} \neq 0, \quad \bar{I}_{1(s)} \neq 0.$$

Решение уравнений в операторно-матричном виде можно представить, как следующее выражение:

$$\begin{aligned} \bar{U}(p, x) &= \bar{U}_{12}(p, x) + \bar{U}_{21}(p, l - x) = \\ &= \exp(-\gamma x) \bar{U}_{12}(p, 0) + \exp[-\gamma(l - x)] \bar{U}_{21}(p, l); \\ \bar{I}(p, x) &= \bar{I}_{12}(p, x) + \bar{I}_{21}(p, l - x) = \\ &= \exp(-\gamma x) \bar{I}_{12}(p, 0) + \exp[-\gamma(l - x)] \bar{I}_{21}(p, l). \end{aligned} \quad (2.14)$$

Здесь  $\bar{U}_{12}(p, x)$  и  $\bar{I}_{12}(p, x)$ ,  $\bar{U}_{21}(p, l - x)$  и  $\bar{I}_{21}(p, l - x)$  – квадратичные матрицы порядка  $n$  волн тока и напряжения, содержащие элементы  $\bar{U}_{12i(s)}, \dots, \bar{I}_{21i(s)}$ . Эти волны растекаются по  $i$ -му проводнику ( $i=1, 2, \dots, n$ ) с  $s$ -й

долей растекания ( $s=1,2,\dots,n$ ) в направлении увеличения (индексы 1-2) или уменьшения (индексы 2-1) координаты.  $\bar{U}_{12}(p,0)$ ,  $\bar{I}_{12}(p,0)$ ,  $\bar{U}_{21}(p,l)$ ,  $\bar{I}_{21}(p,l)$  – соответствующие постоянные интегрирования, причем

$$\bar{U}_{21}(p,0) = \exp(+\gamma l)\bar{U}_{21}(p,l),$$

$$\bar{I}_{21}(p,0) = \exp(+\gamma l)\bar{I}_{21}(p,l).$$

Данные выражения формируются граничными условиями концов каждого однородного отрезка линии и объединены диагональной матрицей волновых сопротивлений  $Z_B$ :

$$Z_B = \gamma^{-1}\lambda^{-1}Z\delta = \gamma\lambda Y^{-1}\delta \quad (2.15)$$

Диагональные матрицы  $\exp(-\gamma x)$  и  $[-\gamma(l-x)]$  имеют элементы соответственно  $\exp(-\gamma_{(s)}x)$  и  $\exp[-\gamma_{(s)}(l-x)]$ ,  $s=1,2,\dots,n$ .

Параметры волны каждого канала ( $s=1,2,\dots,n$ ) во всех проводниках, а также известные компоненты напряжённости поля  $E_{x(s)} \dots H_{z(s)}$  распространяются по однородному участку линии с коэффициентом распространения  $\gamma_{(s)}$ , а значит образуют моду электромагнитного поля, затухающую по обобщённому закону  $\exp(-\gamma_{(s)}x)$ .

## 2.2. Определение первичных параметров многоцепной комбинированной воздушной линии.

Переходим к вычислению входящих в уравнения (2.9) продольных сопротивлений  $Z$ . Элементы матрицы индуктивностей  $M$  определяются по известным формулам [42]:

$$M_{ki} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{ki}}{d_{ki}};$$

$$L_{ii} = M_{ii} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2h_i}{r_i};$$
(2.16)

где  $D_{ki}, d_{ki}, h_i, r_i$ ; – геометрические характеристики, показанные на рис. 2.2.

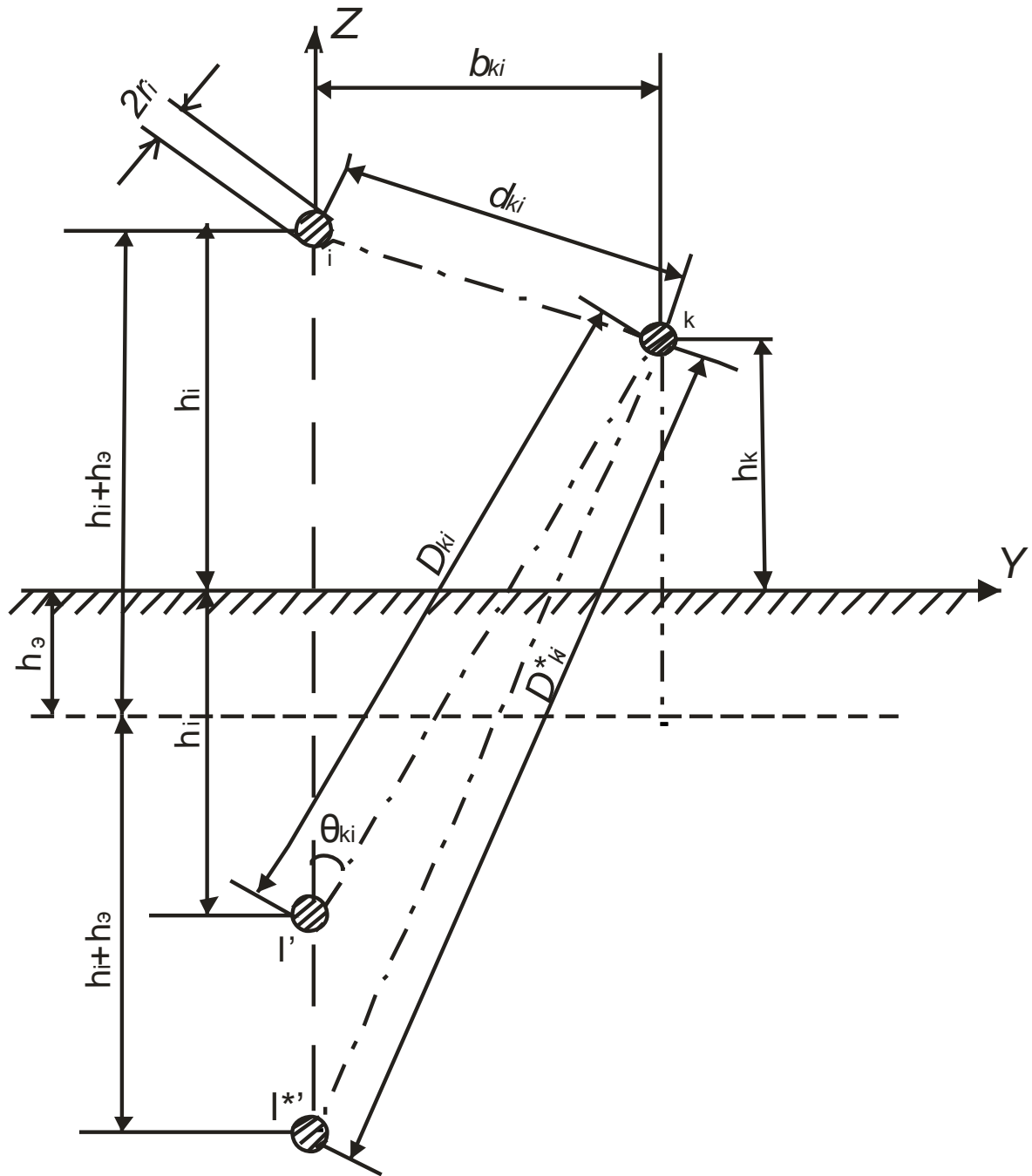


Рис. 2.2. Поперечное сечение линии с  $i$ -м и  $k$ -м проводами. Пунктиром изображены плоскости условного представления магнитного поля в грунте.

Из-за наличия стрелы провеса проводов в промежутке между последовательно расположенными опорами значения  $h_i$  и  $D_{ki}$  имеют зависимость от координаты  $x$ . В местах крепления проводов на траверсы

появляются отражения волн. В диапазонах частот, определяемых целым числом полуволн в пределах длины промежуточного пролета, имеет место повышенное затухание волн. Тем не менее, величины анкерных пролетов на действительных линиях изменяются в больших пределах. Для апериодических волн для расчета используется более широкий диапазон частот.

Произведенные исследования продемонстрировали, что влияние стрелы провеса провода можно учесть приближенно, введя в выражения (2.16) значения высоты несколько пониженным относительно средней высоты провода над поверхностью земли [68]:

$$h_i \approx h_{имму} + 0,25f_i, \quad (2.16a)$$

где  $f_i$  – средняя стрела провеса  $i$ -го провода.

В случае  $i$ -го провода ВЛ СВН, расщепленного на  $n_i$  компонентов, его эквивалентный диаметр можно найти как среднегеометрическое между радиусом компоненты  $r_{in}$  и дистанциями до других компонент  $a_{ik}$  или по выражению:

$$r_i = n_i \sqrt[n_i]{r_{in} \prod_{k=2}^{n_i} a_{ik}} = n_i \sqrt[n_i]{n_i r_{in} r_{ip}^{n_i-1}}, \quad (2.17)$$

где  $r_{ip}$  – радиус расщепления  $i$ -го провода..

Составляющие матрицы  $Z^{(11)}$  вычисляются как отношения

$$Z_{ii}^{(11)} = \frac{E_{xi}(p)}{I_i(p)}, \quad (2.18)$$

где  $E_{xi}(p)$  – операторное представление продольной составляющей вектора напряженности  $E_{xi}$  у границы  $i$ -го провода из-за протекания тока в этом проводе. Этот параметр вычисляется по формулам (2.1-1.3) при нулевых начальных условиях и  $\delta_{pi} = 0$ . Принимая во внимание малые поперечные габариты проводов в сравнении с дистанциями до поверхности грунта и между проводниками, допустимо пренебречь эффектом близости, допустить

осесимметричное распределение тока и компонентов напряжённости поля  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  внутри проводов и допустить  $E_\varphi = 0$ ,  $\partial\psi_i/\partial\varphi = 0$ . Вместе с тем в цилиндрической системе координат на основе уравнений (2.1), (2.2) для компоненты  $E_x$  получим после выполнения преобразований уравнение Бесселя

$$\frac{\partial^2 E_x(p)}{\partial(m_i r)^2} + \frac{1}{m_i r} \frac{\partial E_x(p)}{\partial(m_i r)} - E_x(p) = 0. \quad (2.19)$$

Его решение допустимо сформировать в виде [67]

$$E_{xi}(p) = B_1 I_0(m_i r) + B_2 K_0(m_i r). \quad (2.20)$$

Можно говорить о том, что на оси провода ( $r = 0$ ) напряжённость  $E_{xi}$  является конечной. Однако, при всём этом  $I_0(0) = 1$ ,  $K_0(0) \rightarrow \infty$ . Следовательно,  $B_2 = 0$ . Константу интегрирования  $B_1$  определяем

$$\oint H_{\varphi i} dl = I_i = 2\pi r_i H_{\varphi i}. \quad (2.21)$$

Учитывая, что внутри провода  $\frac{\partial H_x}{\partial\varphi} = 0$ ,  $\frac{\partial H_\varphi}{\partial x} = 0$  определяем

составляющую  $E_r$  из уравнения (2.1):

$$E_r(p) = + \frac{1}{\sigma_i} \operatorname{rot}_r H_\varphi(p) = \frac{\gamma}{\sigma_i} H_\varphi(p).$$

Затем из уравнения (2.1) для  $H_\varphi$  имеем:

$$H_\varphi(p) = - \frac{1}{\mu_i p} \operatorname{rot}_\varphi E(p) = \frac{\gamma^2}{\mu_i p \sigma_i} H_\varphi(p) + \frac{1}{\mu_i p} \frac{\partial E_x}{\partial r}.$$

Наконец, в соответствии с (2.7) находим:

$$H_\varphi(p) = \frac{\sigma_i}{m_i^2} \frac{\partial E_x}{\partial r} = \frac{\sigma_i}{m_i^2} B_1 m_i I_0'(m_i r) = \frac{\sigma_i}{m_i} B_1 I_1(m_i r).$$

Подставив обнаруженное значение  $H_\varphi$  при  $r = r_i$  в выражение (2.21), получим константу интегрирования  $B_1$  и соответствующее ей собственное сопротивление  $i$ -го провода:



$$Z_{ii}^{(1)} = \frac{m_i}{2\pi r_i \sigma_i} \frac{I_0(m_i r_i)}{I_1(m_i r_i)}, \quad (2.22)$$

где  $r_i$  – радиус  $i$ -го провода;  $I_0, I_1$  – функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка от чисто мнимого аргумента [40, 63, 67].

Значит, собственные сопротивления проводов определяются неизвестными коэффициентами распространения  $\gamma_{(s)}$ , которые определяются из решения телеграфных уравнений (2.9). Однако, для фазных проводов и тросов воздушных линий ВН и СВН, имеющих относительно небольшие потери, для поперечных волн и в рассматриваемом диапазоне частот  $314 < \omega < 10^8$  Гц приемлемо пренебречь значением  $j\omega(\varepsilon_i - \varepsilon_0)$  по сравнению с  $1/\rho_i$  в выражении (2.8) или величиной  $\gamma \approx p\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}$  при сопоставлении с  $\sqrt{\mu_i p \sigma_i}$  в формуле (2.7).

При этом  $m_i \approx k_i \approx \sqrt{\mu_i p \sigma_i}$ . Проводники линий имеют негладкую поверхность, многожильную внутреннюю структуру и скручены с несколькими повивами, в связи с этим фактическое сопротивление  $Z_{i,l}$  несколько больше, чем расчётное. Это можно учесть, вводя в выражение (2.22) поправочный коэффициент скрутки  $s_i$ .

Экспериментальные исследования подтвердили (рис. 2.3), что искомый поправочный коэффициент  $s_i$  имеет зависимость от частоты и конструкции провода. В интервале частот от 50 Гц до 1000 кГц коэффициент изменяется в значениях от 4 до 7 для проводов, имеющих два и более повивами и в интервале от 2.0 до 4.5 для проводов, имеющих один повив.

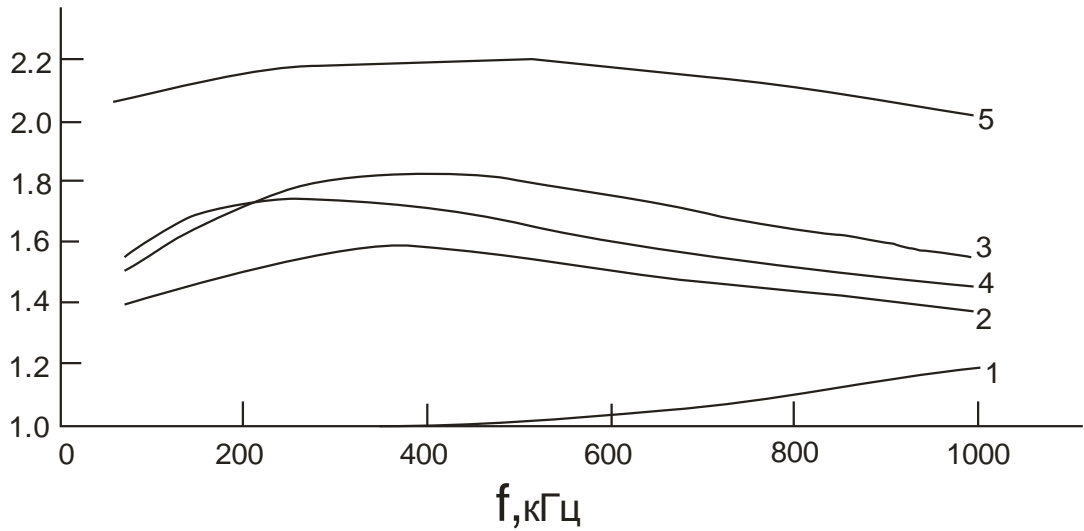


Рис. 2.3. Коэффициент  $S_i$ , для учёта увеличения активного сопротивления из-за шероховатости поверхности и повива многожильных проводов, зависящий от частоты  $f$  [38]. 1 – медный гладкий стержень  $r_i=10$  мм; 2 – провод АСО–700 с тремя повивами; 3 – провод АСО–400 с тремя повивами; 4 – провод АС–120 с двумя повивами; 5 – одноповивный провод А-120.

В случае фазного провода, разделённого на  $n_i$  компонент с радиусом расщепления  $r_{ip}$ , его собственное сопротивление, полученное с приближенным учетом эффекта близости между компонентами равно [63, 67]:

$$Z_{ii}^{(11)} \approx \frac{\sqrt{\mu_0 p \rho_i}}{2\pi r_{i11}} s_i \eta_{p\sigma} [I_0(\sqrt{\frac{\mu_0 p}{\rho_i}} r_{i11})] / [I_1(\sqrt{\frac{\mu_0 p}{\rho_i}} r_{i11})], \quad (2.23)$$

где  $\eta_{3\sigma} \approx \frac{r_{ip} + (n_i - 1)r_{i11}}{r_{ip} n_i}$  – коэффициент, вводимый для учёта

расщепления и эффекта близости компонент провода. Функции Бесселя  $I_0(\lambda)$  и  $I_1(\lambda)$  раскладываются в степенные ряды при небольших значения  $\lambda$  и в сходящиеся ряды при больших  $\lambda$  следующим образом:

$$I_0(\lambda) = 1 + \left(\frac{\lambda}{2}\right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\lambda}{2}\right)^4 + \frac{1}{36} \left(\frac{\lambda}{2}\right)^6 + \dots;$$

$$\begin{aligned}
I_0(\lambda) &\sim \frac{\exp(\lambda)}{\sqrt{2\pi\lambda}} \left[ 1 + \frac{1}{8\lambda} + \frac{9}{128\lambda^2} + \dots \right]; \\
I_1(\lambda) &= \frac{\lambda}{2} + \frac{1}{2} \left( \frac{\lambda}{2} \right)^3 + \frac{1}{12} \left( \frac{\lambda}{2} \right)^5 + \dots; \\
I_1(\lambda) &\sim \frac{\exp(\lambda)}{\sqrt{2\pi\lambda}} \left[ 1 - \frac{3}{8\lambda} - \frac{15}{128\lambda^2} - \dots \right];
\end{aligned} \tag{2.24}$$

Здесь « $\sim$ » – обозначения приближения асимптотическим рядом. Произведя преобразования и совершив переход от операторных изображений к частотным характеристикам, совершая замену  $p$  на  $j\omega$ , из (2.23), (2.24) получаем для небольших частот (при  $s_i \sim 1$ ):

$$Z_{ii}^{(11)} = R_i \left[ 1 + \frac{1}{3} \left( \frac{\omega\mu_0 r_{i11}^2}{8\rho_i} \right)^2 + \dots \right] + j\omega L_i \left[ 1 - \frac{1}{6} \left( \frac{\omega\mu_0 r_{i11}^2}{8\rho_i} \right) + \dots \right], \tag{2.25}$$

где

$$R_i = \frac{\rho_i \eta_{p\sigma}}{\pi r_{i11}} \text{ – сопротивление провода постоянному току;}$$

$$L_i = \frac{\mu_0 \eta_{p\sigma}}{8\pi} \text{ – собственная индуктивность провода на небольших}$$

частотах.

Для высоких частот получим после выполнения преобразований асимптотическое выражение:

$$Z_{ii}^{(11)} \sim \frac{s_i \eta_{p\sigma}}{2\pi r_{i11}} \sqrt{j\omega\mu_0 \rho_i} \left[ 1 + \frac{1}{2r_{i11}} \sqrt{\frac{\rho_i}{j\omega\mu_0}} + \dots \right]. \tag{2.26}$$

Для инженерных расчетов, проводимых с учётом неточности исходных данных и малой величины  $Z_{ii}^{(11)}$  в сравнении с  $Z_{ii}^{(3)}$ , необходимо применять единое приближенное выражение для собственного сопротивления проводника  $Z_{ii}^{(II)}$ , справедливое для всего диапазона частот  $0 < f < 10^7$  Гц. С

этой целью воспользуемся методом предельных точек [66]. Произведя деление рядов (2.31), получаем следующие выражения при больших и малых  $\lambda$ :

$$\frac{I_0(\lambda)}{I_1(\lambda)} = F(\lambda) = \frac{2}{\lambda} + \frac{\lambda}{4} - \frac{\lambda^3}{64} \dots\dots; \\ F(\lambda) \sim 1 + \frac{1}{2\lambda} + \frac{3}{8\lambda^2} + \dots\dots; \quad (2.27)$$

Как простейшую аппроксимирующую функцию выбираем

$$F^*(\lambda) = \sqrt{1 + \frac{4}{\lambda^2}}.$$

Разложения этой функции:

при  $\lambda < 2$

$$F^*(\lambda) \approx \frac{2}{\lambda} + \frac{\lambda}{4} - \frac{\lambda^3}{64} + \dots\dots;$$

при  $\lambda > 2$

$$F^*(\lambda) \approx 1 + \frac{2}{\lambda^2} + \frac{2}{\lambda^4} + \dots\dots; \quad (2.28)$$

Значит,  $F(\lambda)$  и  $F^*(\lambda)$  имеют аналогичные первые члены и совпадают по знаку вторых членов разложения как при больших ( $\lambda \rightarrow \infty$ ), так и при небольших ( $\lambda \rightarrow 0$ ) величинах аргумента [67]. Введя  $F^*(\lambda)$  в выражение (2.23), произведя необходимые преобразования получаем:

$$Z_{ii}^{(II)} \approx \frac{s_i \eta_{p\delta}}{2\pi r_{iII}} \sqrt{\frac{2\rho_i^2}{r_{iII}^2} + \mu_0 p \rho_i} = \sqrt{|Z_{ii}^{(II)}| p^2 \rightarrow 0} + |Z_{ii}^{(II)}| p^2 \rightarrow \infty +. \quad (2.29)$$

Значения погрешностей при переводе в частотный спектр (для  $n_i \leq 6$ ,  $r_{ip}/r_{iII} \geq 20$ ,  $f \leq 10^8$  Гц) не превышает 10% – для мнимой, 7% – для вещественной составляющей и для абсолютного значения  $|Z_{ii}^{(II)}|$ .

Состав поля наблюдается при этом гораздо более сложный, чем в рассмотренном ранее осесимметричном случае.

В воздухе, около проводников, поле остается симметричным относительно оси проводов. Однако, в решении (2.20) следует допустить  $B_1=0$ , потому как  $I_0(\lambda)|_{r \rightarrow \infty} \rightarrow \infty$ , а  $B_2$  необходимо определить, учитывая граничные условия вблизи поверхности земли. Тем не менее, даже в простейшем случае плоской поверхности однослойной земли с неизменными  $\mu_3$ ,  $\varepsilon_3$  и  $\rho_3$ , нужно совершить переход в декартову систему координат. Одно из решений уравнения (2.3) в декартовых координатах, полученное путём разделения переменных:

$$\psi_i = XYZ = (B_{x1}e^{-\lambda x} + B_{x2}e^{+\lambda x}) \cdot (B_{y1} \cos \lambda y + B_{y2} \sin \lambda y)(B_{z1}e^{-\zeta z} + B_{z2}e^{+\zeta z}), \quad (2.30)$$

здесь  $\zeta = \sqrt{\lambda^2 + m^2}$ ,  $\lambda$  – произвольное число.

Принимая условия симметрии составляющих напряжённости  $E_{xi}$ ;  $E_{zi}$ ;  $H_{yi}$  относительно плоскости  $y=0$ , пересекающей ось  $i$ -го провода, зануляем константы интегрирования  $B_{y2}$ . Тем же образом, принимая условия антисимметрии для составляющих  $E_{yi}$ ,  $H_{xi}$  и  $H_{zi}$  получаем  $B_{y1}=0$ . Условия перехода решения (2.30) в ноль при рассмотрении его в бесконечности требуют  $B_{z1}=0$  при  $z < 0$  (в почве) и  $B_{z2}=0$  при  $z > 0$  (в атмосфере). Рассматривая исключительно волны, бегущие в сторону возрастания координаты  $x$ , принимаем  $B_{x2}=0$ . Значит, обобщённое решение для компонент  $E_{xi} \dots H_{zi}$  системы «провод–земля» можно изобразить в следующем аналитическом виде:

$$F_i(x, y, z, p) = \int_0^{\infty} \theta(\lambda) e^{-\lambda x \pm \zeta z} \left\{ \frac{\cos}{\sin} \right\} (\lambda y) d\lambda, \quad (2.31)$$

здесь  $\theta(\lambda)$  – постоянные интегрирования, полученные из граничных условий (2.4) на поверхностях  $i$ -го провода и земли;  $\zeta = \zeta_3 = \sqrt{\lambda^2 + k^2 - \gamma^2}$  для воздуха (при  $z > 0$ );  $\zeta = \zeta_3 = \sqrt{\lambda^2 + k^2 - \gamma^2}$  для земли (при  $z < 0$ ).

Для обеспечения сопоставимости (2.20) и соответствующих выражений (2.31) при удовлетворении граничных условий (2.4) применим следующий интегральный вид функции Бесселя  $K_0$  [40]:

$$K_0(m\sqrt{y^2 + (z-h)^2}) = \int_0^{\infty} e^{-|z-h|\sqrt{\lambda^2+m^2}} \cos \lambda y \frac{d\lambda}{\sqrt{\lambda^2+m^2}}. \quad (2.32)$$

Если на базе формул (2.31) и (2.32) принять граничные ограничения для всех составляющих поля  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  на планарной поверхности однослойного грунта (координата  $z = 0$ ), то возможно прийти к следующим формулам для элементов квадратичной матрицы сопротивления  $Z^{(3)}$  в выражениях (2.9):

$$Z_{ki}^{(3)} = \frac{\mu_0 P}{2\pi} \int_0^{\infty} 2(\theta_1 + \theta_2) e^{-\zeta_B(h_i+h_k)} \cos \lambda b_{ki} d\lambda, \quad (2.33)$$

где

$h_i$ ,  $h_k$  и  $b_{ki}$  – геометрические характеристики, приведенные на рис. 2.2;

$$\theta_1 = \frac{1}{\zeta_a + \zeta_B}; \quad \theta_2 = \frac{\gamma^2}{k_3^2 \zeta_B + k_B^2 \zeta_3} \quad - \text{сложные функции от неизвестного}$$

коэффициента распространения  $\gamma$ .

При  $k = i$ , т. е. для диагональных элементов  $Z_{ii}^{(3)}$  матрицы  $Z^{(3)}$  в выражении (2.33), необходимо предположить  $h_k = h_i; b_{ki} = 0$ .

Во всех инженерных расчетах импульсных процессов в воздушных линиях ВЛ и СВЛ при условии, что  $|k_3| \approx \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{\rho_3}} > |\gamma| \approx \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ , допустимо пренебрегать  $\theta_2$  сравнивая с  $\theta_1$ . Более того, по формулам (2.7) и (2.8) предполагаем  $\gamma \approx \rho \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ ,

$$\zeta_B = \sqrt{\lambda^2 + k_B^2 - \gamma^2} \approx \lambda, \quad \zeta_3 = \sqrt{\lambda^2 + k_3^2 - \gamma^2} \approx \sqrt{\lambda^2 + \frac{\mu_0 P}{\rho_3}}.$$

Значит, в стационарных режимах, пренебрегая токами смещения и поперечными компонентам поля  $E_y$  и  $E_z$  в почве, получаем известные расчетные выражения Карсона [1] в операторной форме:

$$Z_{ki}^{(3)} = \frac{\mu_0 P}{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{2e^{-\lambda(h_k+h_i)} \cos \lambda b_{ki}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 + \frac{\mu_0 P}{\rho_3}}} d\lambda. \quad (2.34)$$

Для систем «провод-земля»  $Z_{ii}^{(3)}$  определяем по такому же выражению при  $b_{ki} = 0, h_k = h_i$ .

Численный анализ на примере двухпроводной линии СВН продемонстрировал, что погрешность коэффициента затухания волны  $\alpha$ , обусловленная формулой (2.34) в сравнении с итеративным расчётом по выражению (2.33), при  $f \leq 1$  МГц,  $b/h=1$  и  $\rho_3 \leq 100$  Ом·м, не более 14 % для цепи «две фазы-земля» и 8 % для цепи «фаза-фаза». Тем не менее, для большого удельного сопротивления, равно как и при  $b > h$  погрешность значительно возрастает. Например, при  $f = 1$  МГц и  $\rho_3=1000$  Ом·м погрешность коэффициента затухания волны в цепи «две фазы-земля» составляет до 30 %. В этих случаях вычисление коэффициентов распространения необходимо производить итеративным способом по выражению (2.33) совместно с диагонализацией матриц (2.13).

Частотные характеристики  $Z_{ki}^{(3)}$  по выражению (2.41) допустимо представить в виде таблиц, либо в форме рядов. При небольших величинах

параметра  $g_{ki} = D_{ki} \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{\rho_3}} < 0.25$  эти ряды следующие:

$$Z_{ki}^{(3)} \approx \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left[ \ln \frac{1.86}{g_{ki}} - j\sqrt{\frac{\pi}{4}} + (1+j)\frac{\sqrt{2}}{3} g_{ki} \cos \theta_{ki} + \dots \right], \quad (2.35)$$

а при больших значениях  $g_{ki} > 5$  имеют вид:

$$Z_{ki}^{(3)} \approx \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left[ (1-j)\sqrt{2} \frac{\cos\theta_{ki}}{g_{ki}} + 2j \frac{\cos 2\theta_{ki}}{g_{ki}^2} - (1-j)\sqrt{2} \frac{\cos 3\theta_{ki}}{g_{ki}^3} + \dots \right], \quad (2.36)$$

где  $\theta_{ki} = \arctg \frac{b_{ki}}{h_k + h_i}$  угол, согласно обозначениям рис. 2.2.

Для инженерных расчетов, при отсутствии необходимости обеспечения большой точности, можно иметь, аналогично  $Z_{ii}^{(1)}$ , упрощённое приближенное выражение для  $Z_{ki}^{(3)}$ , адекватное для всего диапазона частот. С этой целью представляем выражение (2.34) в форме:

$$Z_{ki}^{(3)} = \frac{\mu_0 P}{2\pi} \int_0^{\infty} 2F(\xi) e^{-H\xi} \cos B\xi d\xi, \quad (2.37)$$

где  $\xi = \lambda \sqrt{\frac{\rho_3}{\mu_0 P}}$ ;  $F(\xi) = \sqrt{\xi^2 + 1} - \xi$ ;

$$H = (h_1 + h_2) \sqrt{\frac{\mu_0 P}{\rho_3}}; \quad B = b_{12} \sqrt{\frac{\mu_0 P}{\rho_3}}.$$

Выражением (2.37) невозможно представить простыми функциями из-за наличия радикала в функции  $F(\xi)$ . С целью её аппроксимации необходимо использовать метод предельных точек [46]. Получаем такие разложения  $F(\xi)$

$$\text{при } \xi < 1, \quad F(\xi) \approx 1 - \xi + \frac{1}{2}\xi^2 + \dots,$$

$$\text{при } \xi > 1, \quad F(\xi) \approx \frac{1}{2\xi} - \frac{1}{8\xi^3} + \dots \quad (2.38)$$

Как простейшую аппроксимирующую функцию, обеспечивающую упрощённое вычисление выражения (2.37), рассмотрим формулу

$$F^*(\xi) \approx \frac{1}{2\xi} [1 - \exp(-2\xi)]$$

Разложив в ряд при малых и больших  $\xi$ , получим:

$$F^*(\xi) \approx 1 - \xi + \frac{2}{3}\xi^2 + \dots,$$



$$F^*(\xi) \approx \frac{1}{2} - \frac{1}{2\xi} \exp(-2\xi). \quad (2.39)$$

Значит, все функции имеют одни и те же первые члены и совпадают по знаку вторыми членами при больших и малых  $\xi$  [66, 67].

$$\int_0^{\infty} \frac{\exp(-\alpha \cdot x) - \exp(-\beta \cdot x)}{x} \cos \gamma x dx = \frac{1}{2} \ln \frac{\beta^2 + \gamma^2}{\alpha^2 + \gamma^2} \quad (2.39a)$$

Введя  $F^*(\xi)$  в выражения (2.37) и с учётом уравнения (2.39a) получаем после преобразований для частотной области:

$$Z_{ki}^{(3)} \approx \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{ki}^*}{D_{ki}}, \quad (2.40)$$

где  $D_{ki}^* = \sqrt{b_{ki}^2 + (h_i + h_k + 2h_9)^2}$  – условное расстояние от  $k$ -го провода до отображения  $i$ -го провода в земле на глубине  $-z=h$ ;  $h_9$  – условная глубина в земле изображения магнитного поля, принимаемая равной величине

$$h_9 = \sqrt{\rho_3 / j\omega\mu_0} = b_3(1-j)/2, \quad b_3 = \sqrt{2\rho_3 / \omega\mu_0}. \quad (2.41)$$

Проверочные расчёты продемонстрировали, что погрешность выражений (2.40) и (2.41) в сравнении с уравнениями (2.35) и (2.36) не превышает 6% для отдельных составляющих и 4% для абсолютного значения  $|Z_{ki}^{(3)}|$  при

$$\theta_{ki} \leq \frac{3\pi}{8}, \quad g_{ki} \leq 5.$$

Значит, для комплексного взаимного сопротивления между фазными проводниками в операторной форме, учитывающего влияние однослойной земли получаем простое наглядное выражение

$$Z_{ki}^{(3)} = pM_{ki} + Z_{ki}^{(3)} \approx \frac{p\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{ki}^*}{d_{ki}}, \quad (2.42)$$

Учтём, что земля выше  $h_9 = \sqrt{\rho_3 / (\mu_0 p)}$  по выражению (2.42) рассмотрена как атмосфера, а ниже этой глубины – как сверхпроводник.

При рассмотрении  $p \rightarrow j\omega$  и разделяя в выражении (2.42) вещественные и мнимые величины, представляем [67]:

$$Z_{ki} \approx \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \left[ \frac{\alpha_{ki} + \beta_{ki}}{2} + j \ln \frac{h_k + h_i + b_3}{d_{ki} \sqrt{\cos \alpha_{ki} \cos \beta_{ki}}} \right], \quad (2.43)$$

$$\text{Здесь} \quad d_{ki} = \sqrt{b_{ki}^2 + (h_i - h_k)^2};$$

$$b_3 = \sqrt{\frac{2\rho_3}{\omega\mu_0}};$$

$$\alpha_{ki} = \arctg \frac{b_3 + b_{ki}}{h_i + h_k + b_3};$$

$$\beta_{ki} = \arctg \frac{b_3 - b_{ki}}{h_i + h_k + b_3}.$$

В случае неоднородной двухслойной земли с глубиной залегания верхнего слоя  $h_{3B}$  выражение (2.34) в стационарном рассмотрении, но с учетом токов смещения в грунте имеет вид:

$$Z_{ki}^{(3)} = \frac{\mu_0 p}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{2 \exp[-\lambda(h_i + h_k)] \cos \lambda b_{ki} d\lambda}{\lambda + k_{3H} \eta_{3B}}, \quad (2.44)$$

$$\text{где} \quad k_{3H} = \frac{\eta_{3B} sh\varphi + \eta_{3H} ch\varphi}{\eta_{3B} ch\varphi + \eta_{3H} sh\varphi}; - \text{ коэффициент, вводимый для учёта}$$

влияния нижнего слоя с  $h_{3H} \rightarrow \infty$ , вычисляемый как

$$\varphi = \eta_{3B} h_{3B}. \quad (2.45)$$

Здесь приведенные волновые числа верхнего  $m_{3B}$  и нижнего  $m_{3H}$  слоев земли обозначены:

$$m_{3B} = \sqrt{\mu_0 p \left[ \frac{1}{\rho_{3B}} + p(\varepsilon_{3B} - \varepsilon_0) \right]},$$

$$m_{3H} = \sqrt{\mu_0 p \left[ \frac{1}{\rho_{3H}} + p(\varepsilon_{3H} - \varepsilon_0) \right]}. \quad (2.46)$$

Далее рассмотрим элементы матрицы  $Y = p\beta + G$ . Необходимо вначале подчеркнуть, что они приобретают свой смысл только в случае линейной постановки задачи.

Руководствуясь практическими задачами для соответствия граничным условиям в конечных точках и подтверждением опасности пробоя изоляции проводов над землёй, напряжение на  $i$ -м проводе  $u_i$ ; и ток в нем  $i_i$ ; произведём определение по выражениями:

$$\begin{aligned} u_i &= \int_{ri}^0 E_z dz; \\ i_i &= \oint H_{\varphi i} dl_{II}; \end{aligned} \quad (2.47)$$

где  $u_i$ ; – напряжение  $i$ -м проводе;  $i_i$  – полный ток в  $i$ -м проводе;  $l_{II}$  – элементарный участок поверхности провода.

Токи утечки возникают из-за проводимости гирлянд изоляторов и движения заряженных частиц, а также проводящих частиц под воздействием поперечной напряжённости электрического поля  $E$ , в непосредственной близости от фазных проводников. Линии высокого и сверхвысокого напряжения имеют надёжную изоляцию, и при расчёте перенапряжений является допустимым пренебрегать токами утечки по гирляндам изоляторов и в случае учета гипотетического их загрязнения проводящими материалами.

При значительных повышениях напряжения вблизи проводов возникает интенсивный коронный разряд. Вокруг коронирующего провода образуется значительный объемный заряд, что оказывает существенное влияние на искажение и затухание волн и величину перенапряжений. Процесс коронирования описывается нелинейными характеристиками, и его влияние подлежит специальному рассмотрению, а здесь будем считать напряжение ниже коронного.

Необходимо добавить, что вблизи проводника перманентно возникают электроны и ионы, обусловленные естественными причинами – ионизирующими атмосферными, излучениями, радиоактивностью пород земли, а также ультрафиолетовым и космическим излучением. Тем не менее, их интенсивность пренебрежимо мала и имеет практическое значение лишь при условии возникновения исходных лавин рассмотренного выше коронного разряда.

Заряженные частицы могут появляться в результате образования на поверхности проводника гололёдных и инеистых отложений, а также в условиях густого тумана. Такие атмосферные явления незначительно изменяют картину электрического поля проводников воздушной линии и, соответственно, влияют на параметры установившегося электрического режима (напряжения и токи). К счастью, обозначенные явления достаточно редки и их неблагоприятное влияние не учитывается.

Составляющие  $\alpha_{ki}$  квадратичной матрицы потенциальных коэффициентов  $\alpha$  определяются, принимая допущение о незначительности объёмных зарядов.

Также пренебрегаем поперечными размерами проводников, сопоставляя их с дистанциями земли и до проводов соседних фазных проводов.

В этом случае допустимо выделить  $U$  через потенциальные коэффициенты электрического поля комплекса параллельных проводников над плоской поверхностью почвы:

$$U = \alpha \cdot Q, \quad (2.48)$$

где  $\alpha$  – квадратная матрица с элементами:

$$a_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_i}{r_i}; \quad a_{ki} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{ki}}{d_{ki}}; \quad (2.49)$$

Поперечная составляющая МСЗ в виде квадратичной матрицы емкостных проводимостей  $Y$  изначально образуется из емкостей, так как в

рассматриваемых стационарных режимах по определению отсутствует явление общей короны, а значит и активная проводимость. Главным базисом для их определения можно назвать матрицу  $\alpha$  потенциальных коэффициентов [46]:

$$\beta = \alpha^{-1}. \quad (2.50)$$

где  $k$  и  $\ell$  обозначения проводов МВЛ,  $\epsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – диэлектрическая проницаемость воздуха,  $b_{k\ell}$  – расстояние по горизонтали между осями  $k$ -го и  $\ell$ -го проводов (все размеры в м). Обращая матрицу  $\alpha$  потенциальных коэффициентов, формируем таблицу  $\beta = \alpha^{-1}$  коэффициентов электростатической индукции [46]. Используя её элементы, возможно рассчитать требуемые собственные и взаимные емкостные характеристики проводов и грозозащитного троса многоцепной линии [2, 3, 20].

$$C_{kl} = \beta_{kl}, \quad C_{kk} = \beta_{kk} + \sum_{k \neq \ell} \beta_{k\ell}. \quad (2.51)$$

В узлы начала и конца проводов и тросов МВЛ по общепринятым правилам [20] в МСЗ включаются половины этих емкостей  $C_H$  и  $C_K$ .

В теоретической электротехнике [2, 3] при формировании приближённых моделей с сосредоточенными параметрами обозначенные процессы рассматриваются отдельно. Это позволяет формировать известные  $\Gamma$  и «обратно  $\Gamma$ »-образные схемы замещения, используемые для моделирования установившихся режимов трансформаторов.

### **2.3. П-образная многополюсная структура, как схема замещения многоцепной комбинированной воздушной линии в многопроводной постановке.**

В текущий момент в электросетевых предприятиях расчеты квазистационарных режимов для электрических сетей с многоцепными линиями производятся чаще всего по однолинейным схемам замещения, а взаимные связи цепей и фактическая асимметрия параметров МВЛ исходно не принимаются в расчёт. В связи с этим, принимая во внимание развивающийся интерес к данным вопросам применительно к задачам проектирования и эксплуатации электрических сетей [14, 48, 82] в настоящей работе описана созданная автором математическая модель многоцепной воздушной линии. Разработанная модель предназначена для анализа квазистационарных режимов МВЛ с использованием метода фазных координат и способна учитывать асимметрию режимных параметров цепей, а также их неравномерную загрузку. Представленная модель использует концепцию многопроводной схемы замещения (МСЗ). Порядок её формирования можно построить на основе следующих допущений.

В МВЛ, как в установке с распределенными параметрами, общий электромагнитный процесс установившегося режима включает в себя объединённые продольный электромагнитный и поперечный электростатический процессы. В общепринятых расчетных моделях они приблизительно эквивалентируются в виде общей многопроводной схемы замещения (МСЗ), имеющей сосредоточенные параметры, в форме компоновки продольных и поперечных частичных схем, построенных независимо. 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 УР.

Применяемым на практике подходом в реализации практических 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.

УР МВЛ традиционно моделируются без учета электромагнитного и электростатического влияния соседних проводников, грозозащитных 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 точности расчетов УР 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 значительной разнице в загрузке линий и др.

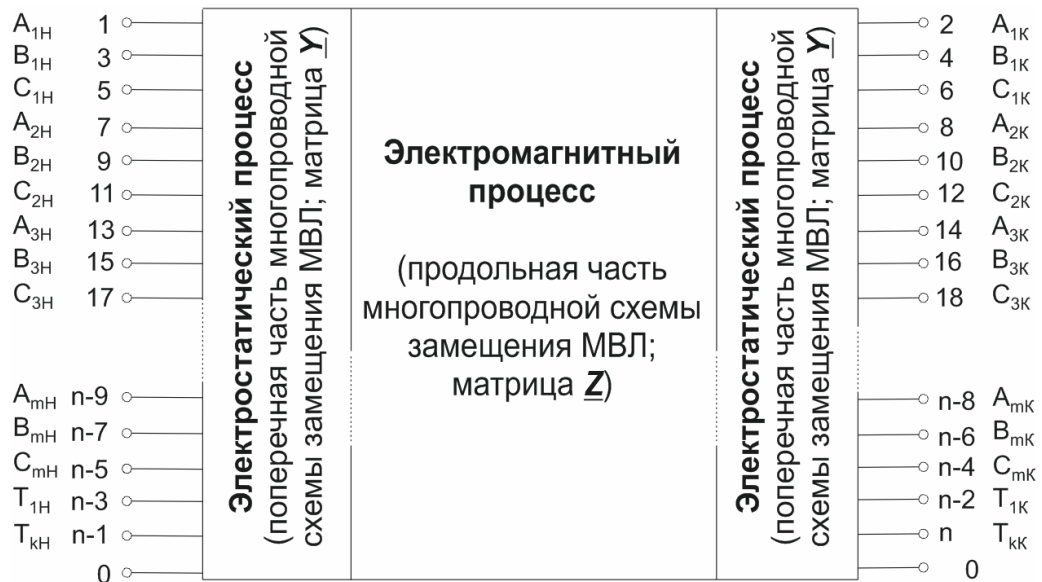


Рис. 2.4. Модель МВЛ в виде обобщённой  $n$ -полюсной многопроводной схемы замещения для  $m$ -цепной МВЛ с  $k$  грозозащитными тросами.

Для того чтобы применять МСЗ в общепринятом виде для расчета режима несимметричной МВЛ необходимо определить следующие крайне важные допущения [14, 48, 82, 94].

1. Многоцепную линия 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 рисунке 2.4.

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 УР [20, 45, 63], то есть, при формировании расчетной схемы замещения поперечные емкости задаются половинными значениями в начале и конце линии, а продольными ёмкостями 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 отдельных шинах МВЛ или в отдельности по цепям за предвключенным трехфазным реактивным сопротивлением, приближенно определенным по [41].

5. Нагрузки моделируются по известной методике [40] в виде постоянных комплексных трехфазных сопротивлений. Их приближенные значения при необходимости можно уточнить в итерационном процессе расчета параметров режима МВЛ.

Проведенный анализ продемонстрировал, что необходимо использовать теорию моделирования электрического режима МВЛ, как трёхфазного устройства электроэнергетической системы, и принять



концепцию формирования математической модели с сосредоточенными параметрами в виде « $\Pi$ » – образной многопроводной схемы замещения [20, 45]. На рис. 2.5 представлена продольная часть эквивалентной схемы  $m$ -цепной МВЛ с  $k$  грозозащитными тросами в  $Z$ –форме. Начала и концы ( $H$  -  $K$ ) проводов цепей МВЛ обозначены следующим образом: I цепи МВЛ –  $A_1, B_1, C_1$ ,  $m$ -й цепи –  $A_m, B_m, C_m$ , первого троса –  $T_1$ ,  $k$ -го троса –  $T_k$ . Взаимные индуктивные связи изображены для фазы  $A_1$  I цепи и троса  $T_k$ .

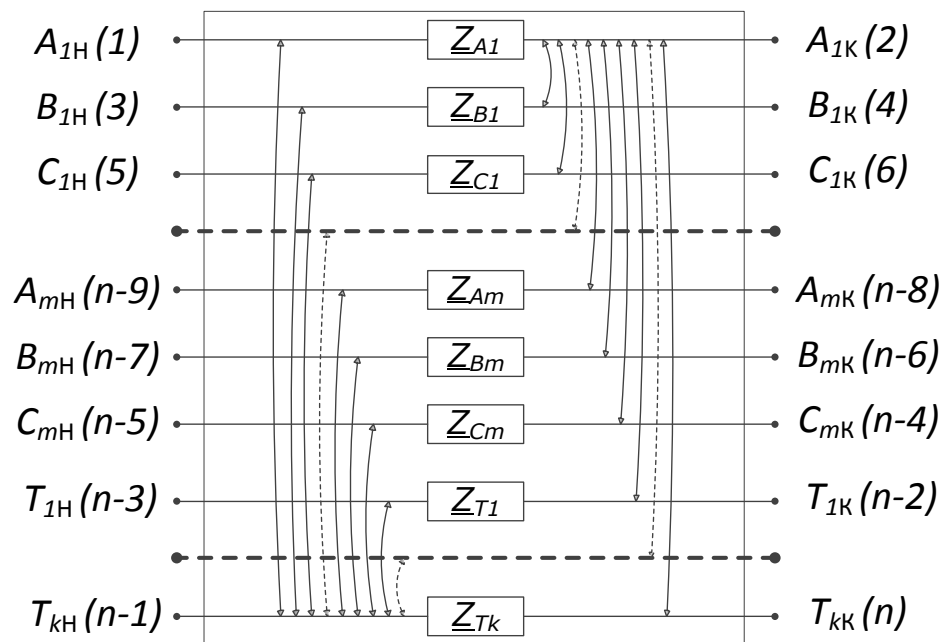


Рис. 2.5. Продольная часть эквивалентной схемы  $m$ -цепной МВЛ с  $k$  грозозащитными тросами в  $Z$ –форме, состоящая из комплексных сопротивлений с взаимными индуктивными связями фазы А и троса Т.

В соответствие с принятой концепцией раздельного моделирования продольных и поперечных процессов в МВЛ рассмотрим определение параметров МСЗ.

Продольные собственные и взаимные активно-индуктивные сопротивления исходно моделируются в эквивалентной МСЗ для расчета режима МВЛ в естественном виде комплексных сопротивлений по справочным данным и формулам, известным в теоретической электротехнике [49].

Матрицу комплексных сопротивлений  $\underline{Z}$  вычисляем как:

$$Z = Z_{\text{п}} + Z_{\text{з}} + j \cdot \omega \cdot M, \quad (2.52)$$

где

$Z_{\text{п}}$  – матрица комплексных сопротивлений, учитывающих потоки, проходящие через провода;

$Z_{\text{з}}$  – матрица взаимных и собственных сопротивлений, обусловленных проникновением поля в землю;

$M$  – матрица взаимных и собственных индуктивных элементов, моделирующих вихревые магнитные потоки в воздухе.

Вычисление значений диагональных и внедиагональных сопротивлений матрицы  $Z$  МСЗ рассмотрено в предыдущем параграфе.

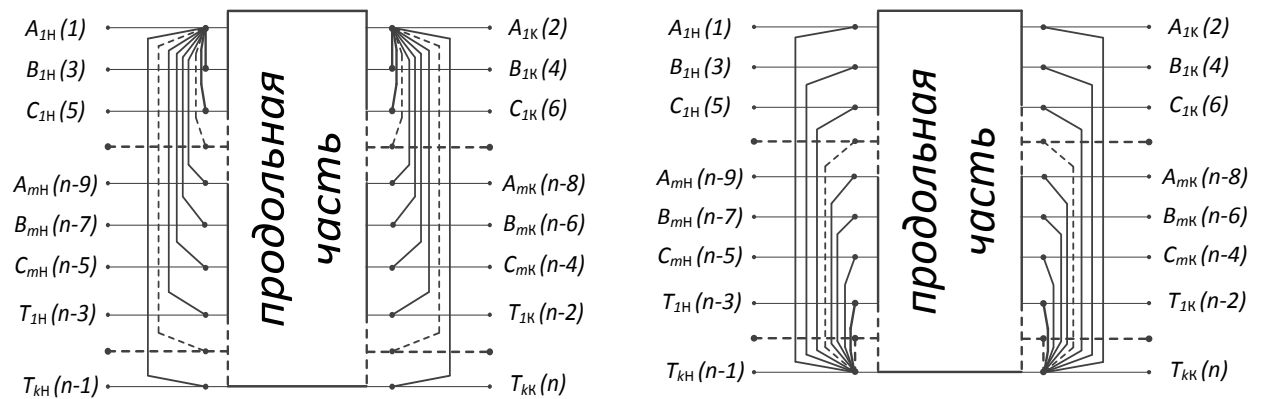


Рис. 2.6. Поперечная часть эквивалентной схемы  $m$ -цепной МВЛ с  $k$  грозозащитными тросами, состоящая из емкостных проводимостей, одинаковая в  $Z$  и  $Y$  – формах и показанная в виде условных связей фазы  $A_l$   $l$  цепи и троса  $T_k$ .

Поперечная часть МСЗ (рис.2.6) в форме квадратной матрицы, состоящей из взаимных и собственных емкостных проводимостей  $Y$  исходно формируется в соответствии с выражениями (2.51), поскольку в анализируемых стационарных режимах исходно допустимо исключить явление общей короны, а значит и не учитывать активную поперечную проводимость при построении схемы замещения. Главным базисом для их определения можно назвать матрицу  $\alpha$  потенциальных коэффициентов [20, 45, 63]. Обращая матрицу  $\alpha$  потенциальных коэффициентов, формируем

таблицу  $\beta = \alpha^{-1}$  коэффициентов электростатической индукции [146]. Используя её элементы, возможно рассчитать требуемые собственные и взаимные емкостные характеристики проводов и грозозащитного троса многоцепной линии. 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 –  $A_1, B_1, C_1$ ,  $m$ -й цепи –  $A_m, B_m, C_m$ , первого троса –  $T_1$ ,  $k$ -го троса –  $T_k$ . Продольная часть изображена фрагментами. На рис. 2.6 изображены все продольные активно-индуктивные сопротивления проводов и тросов МВЛ, а взаимные сопротивления – только для одного провода фазы  $A_1$  I цепи и троса  $T_k$ .

Продольные собственные, взаимные активно-индуктивные сопротивления и собственные и взаимные емкости исходно моделируются в эквивалентной МСЗ для расчета режима МВЛ в естественном виде комплексных сопротивлений по справочным данным и формулам, известным в теоретической электротехнике.

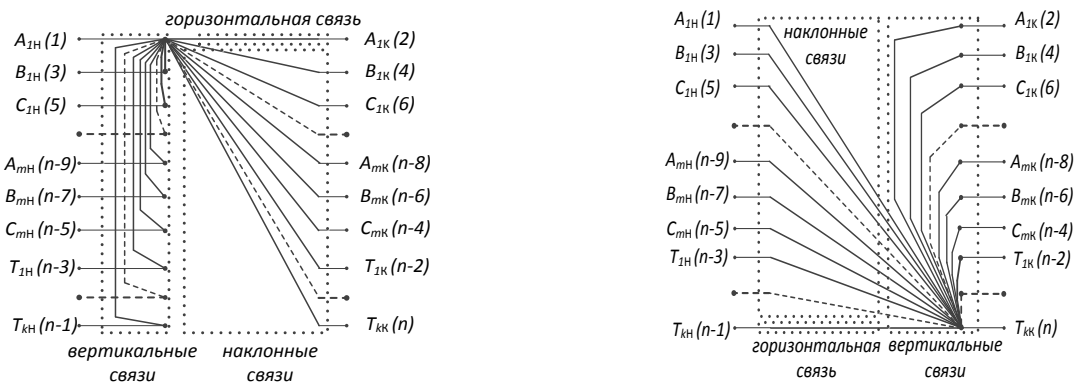


Рис. 2.7. Продольная часть эквивалентной схемы  $m$ -цепной МВЛ с  $k$  грозозащитными тросами в  $Y$  – форме, состоящая из кондуктивных комплексных сопротивлений (проводимостей) для узла начала фазы  $A_1$  I цепи и узла конца троса  $T_k$ .

Несмотря на то, что  $Z$  - форма даёт возможность в виде падений напряжения учесть взаимоиндуктивные процессы. Однако, эта форма неудобна для практического применения из-за трудности формирования

систем уравнений по II–ому закону Кирхгофа или методу контурных токов, поскольку они не применяются на практике в расчетах УР. Она плохо стыкуется с традиционными узловыми способами моделирования нагрузок, собственных и взаимных емкостей линии [49], мощностей, токов и напряжений в узлах питания.

В связи с этим за расчётную следует принять продольную часть эквивалентной схемы замещения многоцепной воздушной линии, фрагмент которой изображён рисунке 2.7 и называется  $Y$  – формой. Она заведомо эквивалентна по начальным и конечным параметрам режима в узлах с 1 по  $n$   $Z$  – форме и в ней нет взаимоиндуктивных связей, которые эквивалентированы комплексными сопротивлениями и проводимостями.

На рис. 2.7 эта продольная часть изображена по аналогии с рис. 2.6 в укороченном виде. Здесь изображены все продольные активно-индуктивные сопротивления проводов и тросов МВЛ, а взаимные сопротивления - только в узле (1) для одного провода для фазы А1 и в узле ( $n$ ) для грозозащитного троса  $T_k$ .

Можно отметить, что поперечная часть эквивалентной МСЗ в  $Y$  – форме полностью соответствует ей в  $Z$  – форме (рис. 2.5). А значит, можно констатировать, что  $Y$  – форма отвечает требованиям использования метода узловых потенциалов для анализа стационарных режимов МВЛ [20, 45].

Её параметры определяются по методике [91, 99] перехода от  $Z$  – формы к  $Y$  – форме схем замещения для  $n/2$  ветвей, имеющих взаимные индуктивные связи.

Для этого запишем для «продольной» части схемы рис. 2.5 уравнения ее состояния, которые представляет собой систему комплексных алгебраических уравнений, составленную по закону Ома для вектора-столбца  $\Delta \dot{U}$  падений напряжений от токов, протекающих в ветвях  $\dot{I}_\pi$ , руководствуясь рекомендациями [14, 99] в виде:

$$\Delta \dot{U} = \underline{Z} \dot{I}_{\Pi}. \quad (2.53)$$

Раскроем данные матричные выражения.

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_{A1H} - \dot{U}_{A1K} \\ \vdots \\ \dot{U}_{CmH} - \dot{U}_{CmK} \\ \dot{U}_{T1H} - \dot{U}_{T1K} \\ \vdots \\ \dot{U}_{TkH} - \dot{U}_{TkK} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{Z}_{A1A1} & \cdots & \underline{Z}_{A1Cm} & \underline{Z}_{A1T1} & \cdots & \underline{Z}_{A1Tk} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{Z}_{CmA1} & \cdots & \underline{Z}_{CmCm} & \underline{Z}_{CmT1} & \cdots & \underline{Z}_{CmTk} \\ \underline{Z}_{T1A1} & \cdots & \underline{Z}_{T1Cm} & \underline{Z}_{T1T1} & \cdots & \underline{Z}_{T1Tk} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{Z}_{TkA1} & \cdots & \underline{Z}_{TkCm} & \underline{Z}_{TkT1} & \cdots & \underline{Z}_{TkTk} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I}_{A1\Pi} \\ \vdots \\ \dot{I}_{Cm\Pi} \\ \dot{I}_{T1\Pi} \\ \vdots \\ \dot{I}_{Tk\Pi} \end{pmatrix}$$

Здесь диагональные  $\underline{Z}_{i,j}$  (где  $i = j$ ) и внедиагональные  $\underline{Z}_{i,j}$  (где  $i \neq j$ ) элементы матрицы комплексных сопротивлений  $\underline{Z}$  являются собственными (диагональными) и взаимными (внедиагональными) активно-индуктивные элементами многоцепной воздушной линии в соответствии рис. 2.5. Найдя обратную матрицу для  $\underline{Z}$ , имеем матрицу емкостных проводимостей ветвей  $\underline{Y}$ , а значит, и систему уравнений электрического состояния, записанную для «продольной» парциальной схемы многоцепной воздушной линии, решенную для токов, протекающих в ветвях  $\dot{I}_{\Pi}$

$$\dot{I}_{\Pi} = \underline{Y} \Delta \dot{U} \quad (2.54)$$

Выражение (2.54) представим в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} \dot{I}_{A1\Pi} \\ \vdots \\ \dot{I}_{Cm\Pi} \\ \dot{I}_{T1\Pi} \\ \vdots \\ \dot{I}_{Tk\Pi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{Y}_{A1A1} & \cdots & \underline{Y}_{A1Cm} & \underline{Y}_{A1T1} & \cdots & \underline{Y}_{A1Tk} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{Y}_{CmA1} & \cdots & \underline{Y}_{CmCm} & \underline{Y}_{CmT1} & \cdots & \underline{Y}_{CmTk} \\ \underline{Y}_{T1A1} & \cdots & \underline{Y}_{T1Cm} & \underline{Y}_{T1T1} & \cdots & \underline{Y}_{T1Tk} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{Y}_{TkA1} & \cdots & \underline{Y}_{TkCm} & \underline{Y}_{TkT1} & \cdots & \underline{Y}_{TkTk} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{U}_{A1H} - \dot{U}_{A1K} \\ \vdots \\ \dot{U}_{CmH} - \dot{U}_{CmK} \\ \dot{U}_{T1H} - \dot{U}_{T1K} \\ \vdots \\ \dot{U}_{TkH} - \dot{U}_{TkK} \end{pmatrix} \quad (2.55)$$

Данная квадратная матрица комплексных проводимостей ветвей является основой для построения эквивалентной схемы полного  $n$ -угольника со всеми диагоналями (табл. 2.1) для  $m$ -цепной ВЛ с  $k$  грозозащитными тросами. Перечень элементов – связей в этом многоугольнике можно разделить в соответствии с рис. 2.7 и рекомендациями [14] на:

- горизонтальные (1 – 2, 3 – 4 и т.д.,  $n$  связей);
- вертикальные (1 – 3, 5 – 15 и т.д.,  $n \cdot (n - 1)$  связей);

- наклонные (1 – 8, 6 – 15 и т.д.,  $n \cdot (n - 1)$  связей).

По результатам проведённого анализа можно констатироваться, для записи уравнений электрического состояния МВЛ целесообразно применить табличное описание полной многопроводной модели в  $Y$  – форме, части которой изображены на рисунке 2.7.

Таблица 2.1

Треугольная таблица связей элементов МСЗ МВЛ в виде  
полного  $n$ -угольника с диагоналями.

(1–2)	(1–3)	(1–4)	(1–5)	...	(1– $n$ )
	(2–3)	(2–4)	(2–5)	...	(2– $n$ )
		(3–4)	(3–5)	...	(3– $n$ )
			⋮	...	⋮
				([ $n-2$ ]-[ $n-1$ ])	([ $n-2$ ]- $n$ )
					([ $n-1$ ]- $n$ )

Пользуясь методикой, изложенной в [14], формируем таблицу 2.3 всех ветвей с их проводимостями для полного  $n$ -угольника со всеми связями.

Таблица 2.2

Квадратная матрица проводимостей схемы замещения МВЛ  
в виде полного  $n$ -угольника.

$$\left( \begin{array}{cccccc} \underline{Y}_{(1-1)} & \underline{Y}_{(1-2)} & \underline{Y}_{(1-3)} & \underline{Y}_{(1-4)} & \underline{Y}_{(1-5)} & \dots & \underline{Y}_{(1-n)} \\ \underline{Y}_{(2-1)} & \underline{Y}_{(2-2)} & \underline{Y}_{(2-3)} & \underline{Y}_{(2-4)} & \underline{Y}_{(2-5)} & \dots & \underline{Y}_{(2-n)} \\ \underline{Y}_{(3-1)} & \underline{Y}_{(3-2)} & \underline{Y}_{(3-3)} & \underline{Y}_{(3-4)} & \underline{Y}_{(3-5)} & \dots & \underline{Y}_{(3-n)} \\ \underline{Y}_{(4-1)} & \underline{Y}_{(4-2)} & \underline{Y}_{(4-3)} & \underline{Y}_{(4-4)} & \ddots & \dots & \vdots \\ \underline{Y}_{(5-1)} & \underline{Y}_{(5-2)} & \underline{Y}_{(5-3)} & \ddots & \ddots & \underline{Y}_{([n-2]-[n-1])} & \underline{Y}_{([n-2]-n)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \underline{Y}_{([n-1]-[n-2])} & \underline{Y}_{([n-1]-[n-1])} & \underline{Y}_{([n-1]-n)} \\ \underline{Y}_{(n-1)} & \underline{Y}_{(n-2)} & \underline{Y}_{(n-3)} & \dots & \underline{Y}_{(n-[n-2])} & \underline{Y}_{(n-[n-1])} & \underline{Y}_{(n-n)} \end{array} \right)$$

Воспользовавшись методикой, описанной в приложении I настоящей работы, кратко составим следующие расчетные выражения:

$$\underline{Y}_{ii} = \underline{Y}_{i_n, i_k}; \quad (2.56)$$

$$\underline{Y}_{ij} = \underline{Y}_{i_n, j_k} = \underline{Y}_{i_k, j_n} = - \underline{Y}_{i_n, j_n} = - \underline{Y}_{i_k, j_k} \quad (2.57)$$

где  $i_n, j_n$  и  $i_k, j_k$  – общее обозначение левых и правых выходов обобщённой эквивалентной схемы по рис. 2.4.

По формуле (2.56) вычисляются проводимости горизонтальных связей для модели полного  $n$ -угольника, а по формуле (2.57) вычисляются проводимости наклонных и вертикальных связей. Необходимо учитывать, что вертикальные связи имеют знаки, противоположные знакам проводимостей наклонных связей модели многоугольника.

Воспользовавшись схемой таблицы 2.2 и формулами (2.55-2.57), можно сформировать матрицу проводимостей схемы полного многоугольника  $Y_{14}$ , моделирующую электромагнитные процессы, возникающие при работе  $m$ -цепной ВЛ.

Сказанное выше позволяет сформировать общую эквивалентную схему замещения, включающую в себя источник питания, многоцепную воздушную линию и ее нагрузку (рис. 2.8).

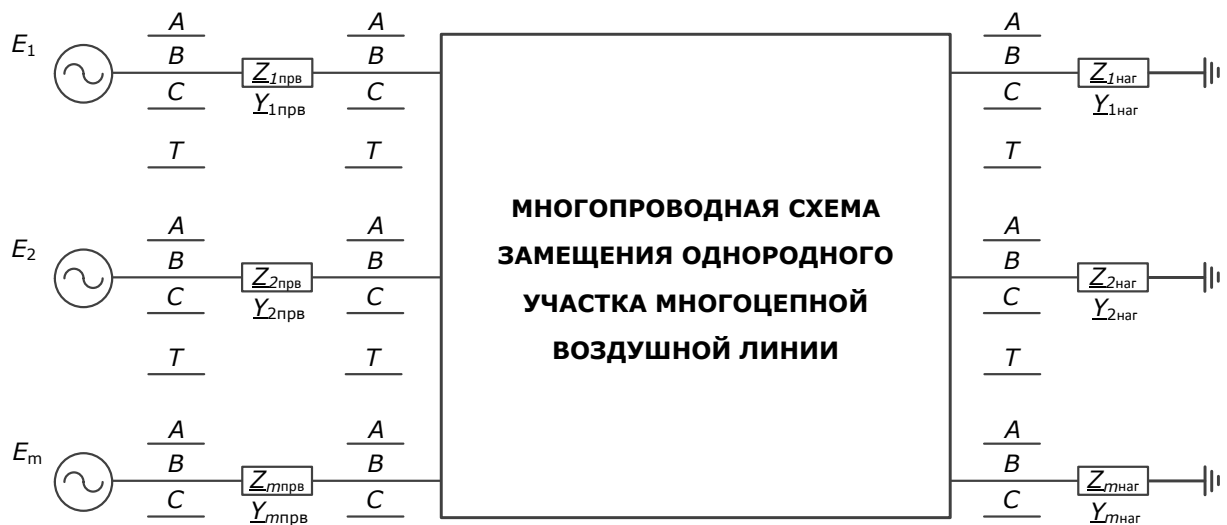


Рис. 2.8 Эквивалентная схема для расчета режима.

Эквивалентная схема (рис. 2.8) с учетом сказанного выше составляется в виде следующего комплекса моделей:

- Модель источника питания (системы) строится по общепринятой схеме в виде ЭДС с напряжением источника питания и предвключенного

сопротивления, которое приближенно определяется по мощности питающего трансформатора (автотрансформатора);

- *Модель многоцепной линии* строится для режима по схеме полного четырехугольника в узловой  $Y$ - форме (рис. 2.7) с отдельными источниками питания и приемниками;

- *Модель нагрузки*, как уже было сказано выше, определяется в виде постоянного сопротивления по приближенной величине мощности нагрузки для каждой цепи по среднему значению номинального напряжения МВЛ.

#### **2.4. Применение теории четырехполюсников к задаче моделирования многоцепной комбинированной воздушной линии электропередачи в установившемся режиме.**

На основании выполненного анализа можно утверждать, что для реализации цели данной работы целесообразно использовать теорию четырехполюсников [70]. Для этого представим МВЛ, как (рис. 2.8) обобщенный четырехполюсник (ОЧП). Приведенные на рис. 2.9 символы  $H$  и  $K$  условно обозначают вход и выход обобщенного четырехполюсника.

Уравнения состояния четырехполюсника [27] связывают параметры режима на его входных и выходных полюсах и могут быть составлены в шести видах, 3 из которых  $A$ ,  $B$  и  $Y$  наиболее удобны для решения поставленной задачи и представлены ниже (2.58-2.60).

$$\begin{pmatrix} \underline{U}_H \\ \underline{I}_H \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{A} & \underline{B} \\ \underline{C} & \underline{D} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \underline{U}_K \\ \underline{I}_K \end{pmatrix} \quad (2.58)$$

$$\begin{pmatrix} \underline{U}_K \\ \underline{I}_K \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{D} & -\underline{B} \\ -\underline{C} & \underline{A} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \underline{U}_H \\ \underline{I}_H \end{pmatrix} \quad (2.59)$$

$$\begin{pmatrix} \underline{I}_H \\ \underline{I}_K \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{Y}_{HH} & \underline{Y}_{HK} \\ \underline{Y}_{KH} & \underline{Y}_{KK} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \underline{U}_H \\ \underline{U}_K \end{pmatrix} \quad (2.60)$$

Нетрудно видеть, что уравнения (1) и (2) в виде  $A$  и  $B$  позволяют решить задачу, если параметры режима – напряжения и токи заданы, соответственно, в конце или в начале МВЛ. Обратим внимание на то, что матрица  $\underline{B}$  является



обратной  $\underline{A}$  и выражается через те же, что и в (1) коэффициенты  $\underline{A}$ ,  $\underline{B}$ ,  $\underline{C}$ ,  $\underline{D}$  в силу известного [70] соотношения, вытекающего из свойства симметрии пассивных линейных четырехполюсников  $\underline{A} \cdot \underline{B} - \underline{C} \cdot \underline{D} = 1$ .



Рис. 2.9. Модель МВЛ в виде обобщённого четырёхполюсника для  $m$ -цепной ВЛ с  $k$  грозозащитными тросами.

Кроме того, в силу того, что модель МВЛ (рис. 2.9) представляет собой ОЧП  $n$ -го порядка, можно констатировать, что коэффициенты  $\underline{A}$ ,  $\underline{B}$ ,  $\underline{C}$ ,  $\underline{D}$  являются матрицами, а параметры  $\underline{U}_1$ ,  $\underline{U}_2$ ,  $\underline{I}_1$ ,  $\underline{I}_2$ , – векторами-столбцами седьмого порядка. Уравнения (2.60) в виде  $Y$ , как будет показано ниже, наиболее удобны с точки зрения задания информации о МВЛ.

Отметим еще одно очень важное положение теории четырехполюсников. Все названные 6 видов уравнений состояния четырехполюсника по определению взаимосвязаны. Это означает, что, если известны коэффициенты одного из видов, коэффициенты всех других могут быть определены по известным для ОЧП матричным выражениям.

Это позволяет сформулировать задачу расчет режима МВЛ в виде следующей последовательности действий.

- Формирование эквивалентной МСЗ для МВЛ в  $Z$  и  $Y$  – формах.
- Определение параметров МСЗ.
- Переход от параметров МСЗ к параметрам ОЧП.
- Составление и решение уравнений электрического состояния для МВЛ.

Переход от уравнений электрического состояния для эквивалентной МСЗ к уравнениям ОЧП для МВЛ в виде (2.58, 2.69), в зависимости от того в начале или конце МВЛ необходимо определить параметры режима – напряжения, токи и мощности

Для реализации возможности дальнейшего применения уравнений ОЧП в форме  $Y$  произведем в результирующей матрице  $YB$  узловых проводимостей МСЗ МВЛ перестановки строк и столбцов таким образом, чтобы сначала последовательно располагались элементы, соответствующие узлам начала  $H$  МВЛ, а затем – узлам конца МВЛ. Это позволяет записать уравнения ОЧП в форме  $Y$  в следующем виде.

$$\underline{I}_H = \underline{Y}_{HH} \cdot \underline{U}_H + \underline{Y}_{HK} \cdot \underline{U}_K \quad (2.61)$$

$$\underline{I}_K = \underline{Y}_{KH} \cdot \underline{U}_H + \underline{Y}_{KK} \cdot \underline{U}_K \quad (2.62)$$

Нетрудно установить их идентичность уравнениям (2.60) ОЧП в виде  $\underline{Y}$  по блокам и элементам, что позволяет, как уже говорилось выше, полностью определить уравнения состояния четырехполюсника [70], связывающие параметры режима напряжения и токи на его входе и выходе в видах  $A$  и  $B$ . Для этого запишем элементы выражения (2.60) в виде (2.63) – (2.67):

$$\underline{I}_H = \begin{pmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_3 \\ \underline{I}_5 \\ \vdots \\ \underline{I}_{n-5} \\ \underline{I}_{n-3} \\ \underline{I}_{n-1} \end{pmatrix}; \underline{I}_K = \begin{pmatrix} \underline{I}_2 \\ \underline{I}_4 \\ \underline{I}_6 \\ \vdots \\ \underline{I}_{n-4} \\ \underline{I}_{n-2} \\ \underline{I}_n \end{pmatrix}; \underline{U}_H = \begin{pmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_3 \\ \underline{U}_5 \\ \vdots \\ \underline{U}_{n-5} \\ \underline{U}_{n-3} \\ \underline{U}_{n-1} \end{pmatrix}; \underline{U}_K = \begin{pmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{U}_4 \\ \underline{U}_6 \\ \vdots \\ \underline{U}_{n-4} \\ \underline{U}_{n-2} \\ \underline{U}_n \end{pmatrix}; \quad (2.63)$$

$$\underline{Y}_{HH} = \begin{pmatrix} \underline{Y}_{(1-1)} & \underline{Y}_{(1-3)} & \underline{Y}_{(1-5)} & \cdots & \underline{Y}_{(1-[n-1])} \\ \underline{Y}_{(3-1)} & \underline{Y}_{(3-3)} & \underline{Y}_{(3-5)} & \cdots & \underline{Y}_{(3-[n-1])} \\ \underline{Y}_{(5-1)} & \underline{Y}_{(5-3)} & \ddots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \underline{Y}_{([n-3]-[n-3])} & \underline{Y}_{([n-3]-[n-1])} \\ \underline{Y}_{([n-1]-1)} & \underline{Y}_{([n-1]-3)} & \cdots & \underline{Y}_{([n-1]-[n-3])} & \underline{Y}_{([n-1]-[n-1])} \end{pmatrix}; \quad (2.64)$$

$$\underline{Y}_{HK} = \begin{pmatrix} \underline{Y}_{(1-2)} & \underline{Y}_{(1-4)} & \underline{Y}_{(1-6)} & \cdots & \underline{Y}_{(1-n)} \\ \underline{Y}_{(3-2)} & \underline{Y}_{(3-4)} & \underline{Y}_{(3-6)} & \cdots & \underline{Y}_{(3-n)} \\ \underline{Y}_{(5-2)} & \underline{Y}_{(5-4)} & \ddots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \underline{Y}_{([n-3]-[n-2])} & \underline{Y}_{([n-3]-n)} \\ \underline{Y}_{([n-1]-2)} & \underline{Y}_{([n-1]-4)} & \cdots & \underline{Y}_{([n-1]-[n-2])} & \underline{Y}_{([n-1]-n)} \end{pmatrix}; \quad (2.65)$$

$$\underline{Y}_{KH} = \begin{pmatrix} \underline{Y}_{(2-1)} & \underline{Y}_{(2-3)} & \underline{Y}_{(2-5)} & \cdots & \underline{Y}_{(2-[n-1])} \\ \underline{Y}_{(4-1)} & \underline{Y}_{(4-3)} & \underline{Y}_{(4-5)} & \cdots & \underline{Y}_{(4-[n-1])} \\ \underline{Y}_{(6-1)} & \underline{Y}_{(6-3)} & \ddots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \underline{Y}_{([n-2]-[n-3])} & \underline{Y}_{([n-2]-[n-1])} \\ \underline{Y}_{(n-1)} & \underline{Y}_{(n-3)} & \cdots & \underline{Y}_{(n-[n-3])} & \underline{Y}_{(n-[n-1])} \end{pmatrix}; \quad (2.66)$$

$$\underline{Y}_{KK} = \begin{pmatrix} \underline{Y}_{(2-2)} & \underline{Y}_{(2-4)} & \underline{Y}_{(2-6)} & \cdots & \underline{Y}_{(2-n)} \\ \underline{Y}_{(4-2)} & \underline{Y}_{(4-4)} & \underline{Y}_{(4-6)} & \cdots & \underline{Y}_{(4-n)} \\ \underline{Y}_{(6-2)} & \underline{Y}_{(6-4)} & \ddots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \underline{Y}_{([n-2]-[n-2])} & \underline{Y}_{([n-2]-n)} \\ \underline{Y}_{(n-2)} & \underline{Y}_{(n-4)} & \cdots & \underline{Y}_{(n-[n-2])} & \underline{Y}_{(n-n)} \end{pmatrix}. \quad (2.67)$$

Уравнение состояния обобщённого четырёхполюсника в  $A$ -форме:

$$\begin{pmatrix} \underline{U}_H \\ \underline{I}_H \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{Y}_{KH}^{-1} \cdot \underline{Y}_{KK} & -\underline{Y}_{KH}^{-1} \\ \underline{Y}_{HH} \cdot \underline{Y}_{KH}^{-1} \cdot \underline{Y}_{KK} + \underline{Y}_{HK} & -\underline{Y}_{HH} \cdot \underline{Y}_{KH}^{-1} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \underline{U}_K \\ \underline{I}_K \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{A} & \underline{B} \\ \underline{C} & \underline{D} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \underline{U}_K \\ \underline{I}_K \end{pmatrix}. \quad (2.68)$$

Уравнение состояния обобщённого четырёхполюсника в  $B$ -форме:

$$\begin{pmatrix} \underline{U}_K \\ \underline{I}_K \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\underline{Y}_{HH} \cdot \underline{Y}_{KH}^{-1} & \underline{Y}_{KH}^{-1} \\ -\underline{Y}_{HH} \cdot \underline{Y}_{KH}^{-1} \cdot \underline{Y}_{KK} - \underline{Y}_{HK} & \underline{Y}_{KH}^{-1} \cdot \underline{Y}_{KK} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \underline{U}_H \\ \underline{I}_H \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{D} & -\underline{B} \\ -\underline{C} & \underline{A} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \underline{U}_H \\ \underline{I}_H \end{pmatrix}. \quad (2.69)$$

Уравнение состояния обобщённого четырёхполюсника в  $G$ -форме:

$$\begin{pmatrix} \underline{I}_H \\ \underline{U}_K \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{Y}_{HH} + \underline{Y}_{HK} \cdot \underline{Y}_{KH} \cdot \underline{Y}_{KK}^{-1} & -\underline{Y}_{KH} \cdot \underline{Y}_{KK}^{-1} \\ \underline{Y}_{KH} \cdot \underline{Y}_{KK}^{-1} & -\underline{Y}_{KK}^{-1} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \underline{U}_H \\ \underline{I}_K \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{C} \cdot \underline{A}^{-1} & -\underline{A}^{-1} \\ \underline{A}^{-1} & \underline{B} \cdot \underline{A}^{-1} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \underline{U}_H \\ \underline{I}_K \end{pmatrix}. \quad (2.70)$$

С точки зрения присоединения цепей МВЛ одного класса напряжения к источникам питания и нагрузкам, а также поступления в нее электрической мощности в соответствии с [45] рассматриваются четыре возможных режима ее работы.

- Общие шины в начале - общие шины в конце.

- Общие шины в начале - разные шины в конце.
- Разные шины в начале - общие шины в конце.
- Разные шины в начале - разные шины в конце.

В предшествующем изложении по умолчанию предполагалась работа МВЛ в наиболее общем четвертом режиме. Нетрудно видеть, что конкретный вид трех других и необходимые изменения в расчетных схемах можно сформировать по рис. 2.9 соответствующими очевидными изменениями в математических описаниях. При этом соответствующим образом должны быть соединены шины источников и нагрузок, а также необходимо учесть различия в исполнении цепей МВЛ и в их параметрах.

Кроме того, как уже было сказано выше, направления протекания мощности в любой из цепей могут быть отличными друг от друга, как по абсолютному значению, так и по направлению, что реализуется заданием необходимых вектором параметров электрического режима  $\underline{U}_H, \underline{I}_H, \underline{U}_K, \underline{I}_K$ .

Теперь при решении задачи УР для МВЛ в качестве исходных данных задаются параметры режима или в ее начале, или в конце и по ним с помощью матричных выражений (9, 10) определяем расчетные данные на другой стороне МВЛ. При этом чаще всего для определенности задаются в начале МВЛ симметричные трехфазные системы напряжений и токов следующими значениями  $U_A = U, U_B = U \cdot a^2, U_C = U \cdot a, U_a = U, U_b = U \cdot a^2, U_c = U \cdot a, I_A = I, I_B = I \cdot a^2, I_C = I \cdot a, I_a = I, I_b = I \cdot a^2, I_c = I$ , где  $a = e^{j120^\circ}$

Это позволяет получить с помощью матричных выражений (2.68 – 2.70) значения всех узловых напряжений, а по ним, соответственно, все параметры режима МВЛ. По ним можно приближенно оценить взаимное влияние цепей МВЛ, которая, как несимметричный пассивный объект, вносит несимметрию в расчетные параметры режима в конце МВЛ. Основа этой - сравнение результатов расчетов, полученных по представленной выше методике при принятых условиях и допущениях, с результатами расчетов, выполненных в общепринятом виде без учета этого влияния.

## 2.5. Приближенное эквивалентирование многопроводной многоцепной комбинированной воздушной линии однолинейной схемой замещения.

В настоящее время, в абсолютном большинстве программных средств, применяемых в расчетах электросетевыми предприятиями, используются методы анализа стационарных режимов электрических сетей, которые основаны на однопроводном представлении трехфазных цепей. Также в анализе режимов чаще всего не принимают во внимание взаимное влияние цепей ВЛ, что ведёт к возникновению достаточных погрешностей. 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.

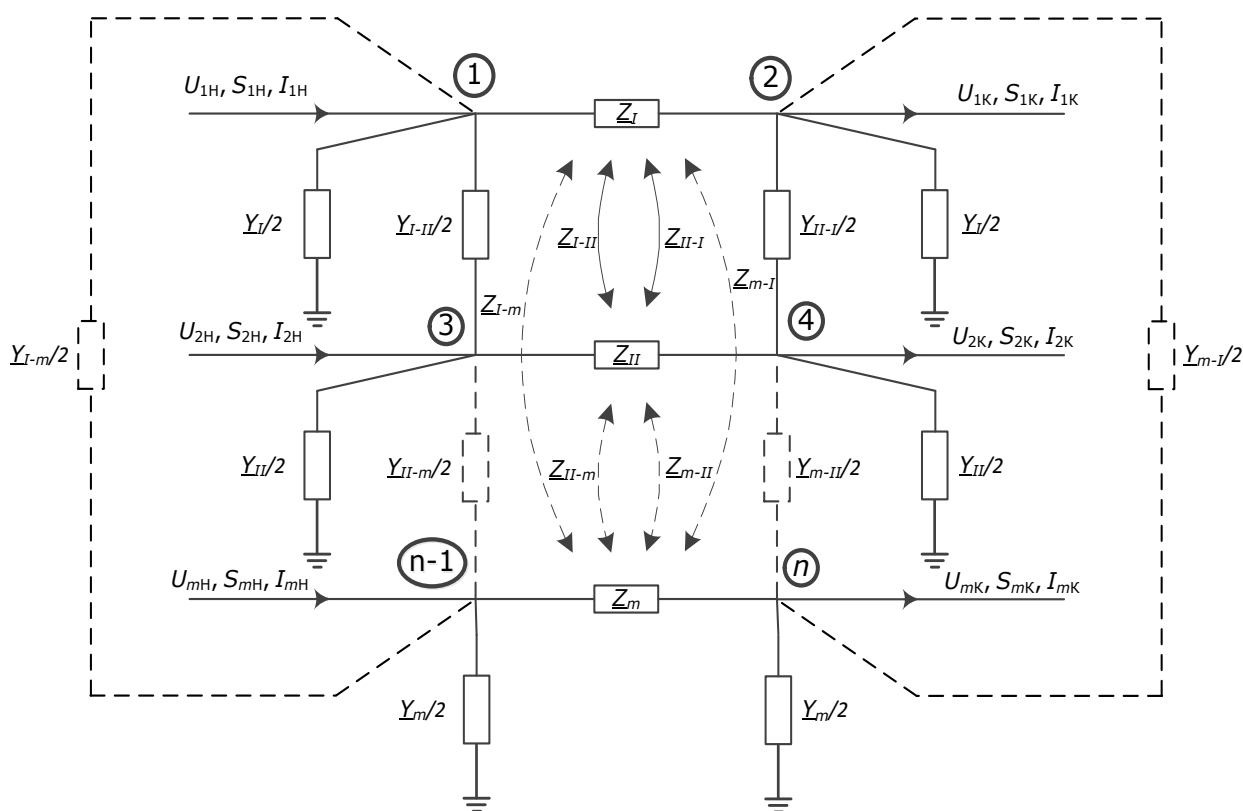


Рис. 2.10 Эквивалентная однолинейная схема замещения МВЛ.

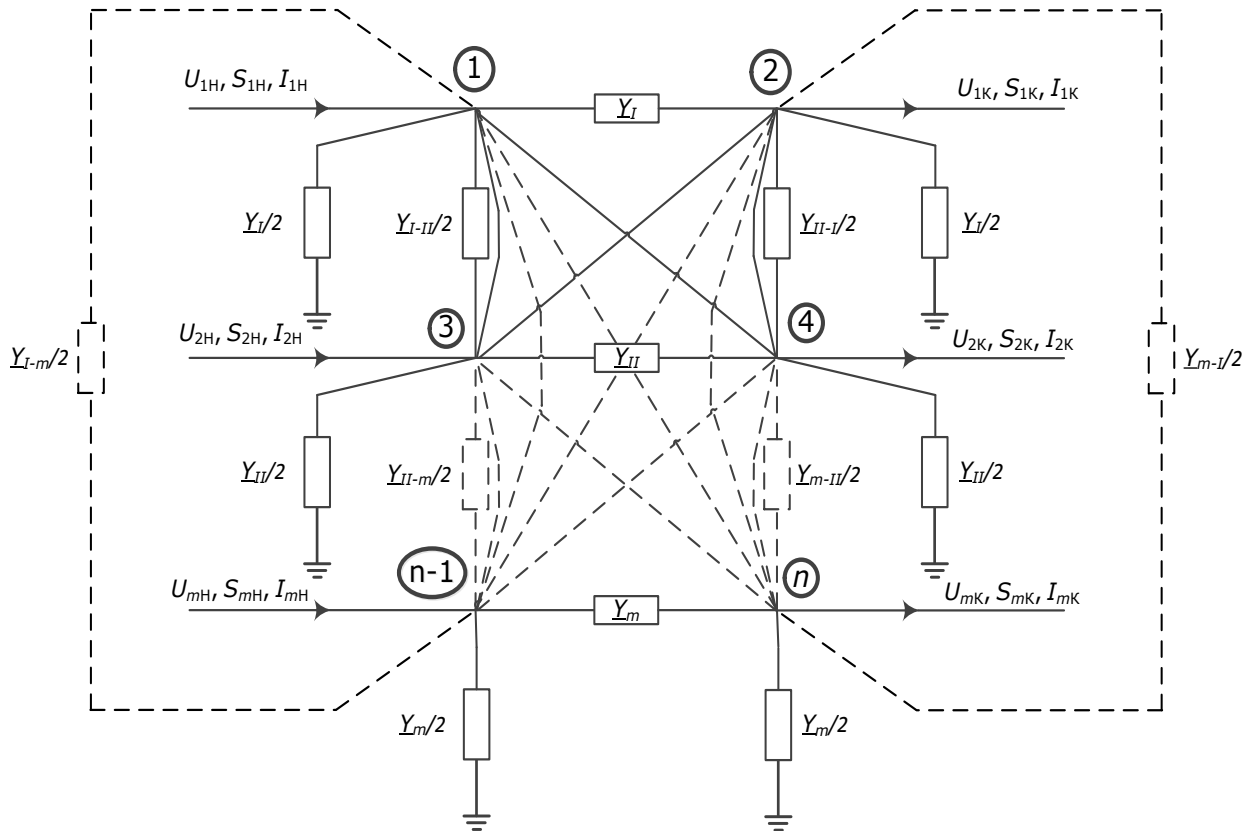


Рис. 2.11 Однолинейная схема МВЛ с продольной парциальной схемой, представленной в  $Y$  – форме.

В соответствии с данной задачей, в настоящем исследовании разработана и описана методика приближённого эквивалентирования многопроводной многоцепной комбинированной воздушной линии однолинейной схемой замещения (рис. 2.9), в которой приближённо учитываются взаимные индуктивные и емкостные связи отдельных проводников и цепей МВЛ в целом.

Однолинейная схема замещения многоцепной линии с цепями одного класса напряжения (рис. 2.10), как и многопроводная, данная схема составляется из парциальных продольной и поперечной схем. Продольная парциальная схема, как и многопроводная, может быть эквивалентно изображена в  $Y$  – форме (рис. 2.11).

Главной задачей методики является вычисление собственных и взаимных сопротивлений и проводимостей цепей МВЛ, использование которых в уже существующих программных средствах расчета установившихся режимов

позволит учесть взаимовлияние цепей.

Применение методики перехода к однофазной схеме осуществимо при следующих условиях.

1. Любая цепь МВЛ является симметричной с напряжениями и токами в фазных проводниках:

$$\dot{U}_A = a\dot{U}_B = a^2\dot{U}_C = \dot{U}_I; \quad \dot{U}_a = a\dot{U}_b = a^2\dot{U}_c = \dot{U}_{II};$$

$$\dot{I}_A = a\dot{I}_B = a^2\dot{I}_C = \dot{I}_I; \quad \dot{I}_a = a\dot{I}_b = a^2\dot{I}_c = \dot{I}_{II};$$

$$a = e^{j \cdot 120^\circ};$$

где  $\dot{U}_I, \dot{I}_I$  - параметры режима первой цепи;  $\dot{U}_{II}, \dot{I}_{II}$  - параметры режима второй цепи.

2. Грозозащитные тросы в установившемся режиме не учитываются.

3. Проводимости и сопротивления цепей в однофазной схеме линии совпадают со средними геометрическими значениями проводимостей и сопротивлений фазных проводников.

## 2.6. Выводы по главе 2.

- Разработана математическая модель МВЛ в форме условной  $\Pi$  – образной МСЗ с сосредоточенными параметрами, которая является объединением независимых продольных и поперечных частичных схем.
- Предложено использование теории четырёхполюсников для моделирования установившихся режимов МВЛ. Приведены выражения для вычисления гиперматричных коэффициентов обобщённого четырёхполюсника в  $Y$ -форме записи уравнения состояния ОЧП. Показаны возможность вычисления коэффициентов ОЧП во всех шести формах записи уравнения состояния.
- Предложена методика перехода от многопроводной к однопроводной модели МВЛ с цепями одного класса напряжения, позволяющая учитывать электромагнитное взаимодействие ее цепей.



### ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ МНОГОПРОВОДНОЙ МНОГОЦЕПНОЙ КОМБИНИРОВАННОЙ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ.

#### 3.1. Математическое моделирование установившегося режима многоцепной комбинированной воздушной линии в Z-форме, Y-форме и форме обобщённого четырёхполюсника.

Анализ показывает, что Z-форма даёт возможность в виде падений напряжения учесть взаимоиндуктивные процессы. Однако, эта форма неудобна для практического применения из-за трудности формирования систем уравнений по II-ому закону Кирхгофа или методу контурных токов, поскольку они не применяются на практике в расчетах УР. Она плохо стыкуется с традиционными узловыми способами моделирования нагрузок, собственных и взаимных емкостей линии [20, 45], мощностей, токов и напряжений в узлах питания.

Однако, в случаях, когда не требуется проводить анализ режимов в сложносвязанных сетях с сотнями и тысячами узлов и ветвей, применение Z-формы является оправданным. К примеру, это относится к расчёту режима отдельно анализируемой МВЛ.

Расчет в Z-форме установившегося режима цепей многоцепной линии проводится в следующей последовательности:

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

Будем считать, что исходно заданы матрицы сопротивлений и проводимостей МВЛ  $Z$  и  $B$ , а также имеются параметры режима в форме комплексных векторов-столбцов напряжений  $U_N$  и токов  $I_N$  в начальном узле МВЛ и стоит задача вычислить  $U_K$ ,  $I_K$  в конечном узле МВЛ. Тогда задача расчета УР для МВЛ для схемы, представленной на рисунке 2.4, реализуется следующей алгоритмической последовательностью действий.

1. По закону Ома, определяется по левой емкостной части многопроводной схемы замещения вектор-столбец емкостных токов в виде

$$\dot{I}_{cH} = j \cdot \omega \cdot B \cdot \dot{U}_H / 2, \quad (3.1)$$

где  $B$  – матрица емкостных коэффициентов МВЛ;  $\omega$  – частота.

В матричном виде данное выражение имеет следующий вид:

$$\begin{pmatrix} \dot{I}_{cA1H} \\ \vdots \\ \dot{I}_{cCmH} \\ \dot{I}_{cT1H} \\ \vdots \\ \dot{I}_{cTKH} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} j\omega \cdot \begin{pmatrix} B_{A1A1} & \cdots & B_{A1Cm} & B_{A1T1} & \cdots & B_{A1Tk} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{CmA1} & \cdots & B_{CmCm} & B_{CmT1} & \cdots & B_{CmTk} \\ B_{T1A1} & \cdots & B_{T1Cm} & B_{T1T1} & \cdots & B_{T1Tk} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{TKA1} & \cdots & B_{TKCm} & B_{TKT1} & \cdots & B_{TKTk} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{U}_{A1H} \\ \vdots \\ \dot{U}_{CmH} \\ \dot{U}_{T1H} \\ \vdots \\ \dot{U}_{TKH} \end{pmatrix}. \quad (3.2)$$

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

$$\dot{I}_{\Pi} = \dot{I}_H - \dot{I}_{cH}. \quad (3.3)$$

3. Далее для продольной части схемы записывается по закону Ома уравнение её состояния для вектора  $\Delta U$  падений напряжений от протекания токов ветвей  $I_{\Pi}$  в виде

$$\Delta \dot{U} = \underline{Z} \cdot \dot{I}_{\Pi}. \quad (3.4)$$

В матричном виде данное выражение имеет вид

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_{A1H} - \dot{U}_{A1K} \\ \vdots \\ \dot{U}_{CmH} - \dot{U}_{CmK} \\ \dot{U}_{T1H} - \dot{U}_{T1K} \\ \vdots \\ \dot{U}_{TKH} - \dot{U}_{TKK} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{Z}_{A1A1} & \cdots & \underline{Z}_{A1Cm} & \underline{Z}_{A1T1} & \cdots & \underline{Z}_{A1Tk} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{Z}_{CmA1} & \cdots & \underline{Z}_{CmCm} & \underline{Z}_{CmT1} & \cdots & \underline{Z}_{CmTk} \\ \underline{Z}_{T1A1} & \cdots & \underline{Z}_{T1Cm} & \underline{Z}_{T1T1} & \cdots & \underline{Z}_{T1Tk} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{Z}_{TKA1} & \cdots & \underline{Z}_{TKCm} & \underline{Z}_{TKT1} & \cdots & \underline{Z}_{TKTk} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{I}_{A1\Pi} \\ \vdots \\ \dot{I}_{Cm\Pi} \\ \dot{I}_{T1\Pi} \\ \vdots \\ \dot{I}_{TK\Pi} \end{pmatrix}. \quad (3.5)$$

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

$$\dot{U}_K = \dot{U}_H - \Delta \dot{U}. \quad (3.6)$$

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

$$\dot{I}_{cк} = j \cdot \omega \cdot B \cdot \dot{U}_к / 2. \quad (3.7)$$

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

$$\dot{I}_к = \dot{I}_П - \dot{I}_{cк}. \quad (3.8)$$

Заметим, 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  $U_н, I_н, U_к, I_к$ . При этом, в случае, если параметры режима заданы в конце цепей, необходимо выполнить незначительную коррекцию представленного выше алгоритма.

Чаще всего в начале многоцепной линии задаются симметричные трехфазные системы напряжений и токов. Здесь для определенности модули векторов напряжений  $U$  и токов  $I$  по цепям заданы одинаковыми. В общем виде их можно задать любым образом, в том числе и несимметричными по отдельным фазам МВЛ.

Это позволяет получить с помощью матричных выражений (3.1 – 3.8) все параметры установившегося режима многоцепной воздушной линии. По ним можно приближенно оценить взаимное влияние цепей МВЛ, которая, как несимметричный пассивный объект, вносит несимметрию в расчетные параметры режима в конце МВЛ. Это дает возможность сравнить результаты расчетов, полученных по представленной выше методике при принятых условиях и допущениях, с аналогичными результатами расчетов, выполненных без учета этого влияния.

Как было сказано выше, Z-форма даёт возможность в виде падений напряжения учесть взаимоиндуктивные процессы. Однако, эта форма неудобна для практического применения из-за из-за трудности формирования систем уравнений по II-ому закону Кирхгофа или методу

контурных токов, поскольку они не применяются на практике в расчетах УР. Она плохо стыкуется с традиционными узловыми способами моделирования нагрузок, собственных и взаимных емкостей линии [49], мощностей, токов и напряжений в узлах питания.

В связи с этим за расчетную рекомендуется принимать продольную часть эквивалентной схемы МВЛ в виде узловых проводимостей. Для поиска значений параметров режима МВЛ используем уравнение состояния многоцепной линии, записанное для метода узловых напряжений в виде

$$Y_y \cdot U = E \cdot Y_u, \quad (3.9)$$

где  $Y_y$  квадратная матрица порядка  $m/3+2k$  для  $m$ -цепной ВЛ с  $k$  грозозащитными тросами;  $Y_u$  – матрица, моделирующая источники питания в узле начала цепи МВЛ.

Величину элементов матрицы узловых проводимостей вычисляем по формуле

$$Y_y = Y_{14} + B_{14} + Y_{ин}, \quad (3.10)$$

где

$Y_{14}$  - элементы, полученные при преобразовании продольной части МСЗ;

$B_{14}$  - емкостные проводимости МСЗ;

$Y_{ин}$  - элементы, учитывающие внутренние сопротивления источников питания и нагрузку в конце цепи МВЛ.

Рассмотрим подробнее матрицы узловых проводимостей, присутствующие в выражении (3.10).

Матрица проводимостей продольной части схемы замещения:

$$\begin{pmatrix} \underline{Y}_{(1-1)} & \underline{Y}_{(1-2)} & \underline{Y}_{(1-3)} & \underline{Y}_{(1-4)} & \underline{Y}_{(1-5)} & \cdots & \underline{Y}_{(1-n)} \\ \underline{Y}_{(2-1)} & \underline{Y}_{(2-2)} & \underline{Y}_{(2-3)} & \underline{Y}_{(2-4)} & \underline{Y}_{(2-5)} & \cdots & \underline{Y}_{(2-n)} \\ \underline{Y}_{(3-1)} & \underline{Y}_{(3-2)} & \underline{Y}_{(3-3)} & \underline{Y}_{(3-4)} & \underline{Y}_{(3-5)} & \cdots & \underline{Y}_{(3-n)} \\ \underline{Y}_{(4-1)} & \underline{Y}_{(4-2)} & \underline{Y}_{(4-3)} & \underline{Y}_{(4-4)} & \ddots & \cdots & \vdots \\ \underline{Y}_{(5-1)} & \underline{Y}_{(5-2)} & \underline{Y}_{(5-3)} & \ddots & \ddots & \underline{Y}_{([n-2]-[n-1])} & \underline{Y}_{([n-2]-n)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \underline{Y}_{([n-1]-[n-2])} & \underline{Y}_{([n-1]-n)} \\ \underline{Y}_{(n-1)} & \underline{Y}_{(n-2)} & \underline{Y}_{(n-3)} & \cdots & \underline{Y}_{(n-[n-2])} & \underline{Y}_{(n-[n-1])} & \underline{Y}_{(n-n)} \end{pmatrix}$$

В данной матрице диагональные элементы моделируют проводимости горизонтальных связей, поскольку алгебраическая сумма подключенных к узлу проводимостей вертикальных и наклонных связей принимается нулевой.

Матрица зарядных поперечных емкостных проводимостей:

$$\begin{pmatrix} \underline{B}_{(1-1)} & 0 & \underline{B}_{(1-3)} & 0 & \underline{B}_{(1-5)} & \dots & 0 \\ 0 & \underline{B}_{(2-2)} & 0 & \underline{B}_{(2-4)} & 0 & \dots & \underline{B}_{(2-n)} \\ \underline{B}_{(3-1)} & 0 & \underline{B}_{(3-3)} & 0 & \underline{B}_{(3-5)} & \dots & 0 \\ 0 & \underline{B}_{(4-2)} & 0 & \underline{B}_{(4-4)} & \ddots & \dots & \vdots \\ \underline{B}_{(5-1)} & 0 & \underline{B}_{(5-3)} & \ddots & \ddots & 0 & \underline{B}_{([n-2]-n)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 & \underline{B}_{([n-1]-[n-1])} & 0 \\ 0 & \underline{B}_{(n-2)} & 0 & \dots & \underline{B}_{(n-[n-2])} & 0 & \underline{B}_{(n-n)} \end{pmatrix}$$

Матрица, учитывающая внутреннее сопротивление источников питания и моделирующая нагрузки:

$$\begin{pmatrix} \underline{Y}_{(1-1)прв} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \underline{Y}_{(2-2)нагр} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Y}_{(3-3)прв} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \underline{Y}_{(4-4)нагр} & \ddots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & \ddots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

В матрице  $\underline{Y}_{ин}$  трехфазная система предвключенных сопротивлений (обозначенных индексом «прв») обобщённых источников питания задается по общепринятым рекомендациям [99]. То есть, для определенности эти сопротивления можно определить по мощностям питающих трансформаторов (автотрансформаторов). Трехфазная система сопротивлений, имитирующих нагрузку многоцепной линии, задается в соответствии с известным способом их приближённого моделирования в виде постоянных сопротивлений.

Обратим внимание на то, что перед началом расчета режима многоцепной линии по рассмотренной выше методике эти сопротивления определяются, если нет более точной информации, по средним

номинальным значениям напряжений. Далее можно произвести уточнения их значений в итерационном процессе, используя напряжения, полученные в процессе предыдущего расчета.

В матрице  $E \cdot Y_u$  трехфазная система напряжений источников питания задается для определенности симметричной.

Матрица узловых токов:

$$\begin{pmatrix} E_{A1} \cdot \underline{Y}_{(1-1)прв} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & E_{B1} \cdot \underline{Y}_{(3-3)прв} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & \ddots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Решая уравнения (3.9), получим значения всех узловых напряжений, а по ним, соответственно, все параметры режима МВЛ.

В приведенных выше режимах потокораспределение по цепям определяется совокупностью трех факторов:

- источниками и предвключенными сопротивлениями в начале МВЛ;
- внутренними сопротивлениями МВЛ и взаимными связями цепей;
- нагрузками (сопротивлениями) в конце МВЛ.

### **3.2. Математическое моделирование установившегося режима в однолинейной постановке с учётом границ адекватности внутренней несимметрии.**

Для определения собственных и взаимных сопротивлений линий однофазной схемы замещения МВЛ составим систему уравнений для многопроводной схемы замещения в следующей форме:

$$\begin{pmatrix} \Delta \dot{U}_{A1} \\ \Delta \dot{U}_{B1} \\ \Delta \dot{U}_{C1} \\ \vdots \\ \Delta \dot{U}_{Am} \\ \Delta \dot{U}_{Bm} \\ \Delta \dot{U}_{Cm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{Z}_{A1A1} & \underline{Z}_{A1B1} & \underline{Z}_{A1C1} & \cdots & \underline{Z}_{A1Am} & \underline{Z}_{A1Bm} & \underline{Z}_{A1Cm} \\ \underline{Z}_{B1A1} & \underline{Z}_{B1B1} & \underline{Z}_{B1C1} & \cdots & \underline{Z}_{B1Am} & \underline{Z}_{B1Bm} & \underline{Z}_{B1Cm} \\ \underline{Z}_{C1A1} & \underline{Z}_{C1B1} & \underline{Z}_{C1C1} & \cdots & \underline{Z}_{C1Am} & \underline{Z}_{C1Bm} & \underline{Z}_{C1Cm} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \underline{Z}_{AmA1} & \underline{Z}_{AmB1} & \underline{Z}_{AmC1} & \cdots & \underline{Z}_{AmAm} & \underline{Z}_{AmBm} & \underline{Z}_{AmCm} \\ \underline{Z}_{BmA1} & \underline{Z}_{BmB1} & \underline{Z}_{BmC1} & \cdots & \underline{Z}_{BmAm} & \underline{Z}_{BmBm} & \underline{Z}_{BmCm} \\ \underline{Z}_{CmA1} & \underline{Z}_{CmB1} & \underline{Z}_{CmC1} & \cdots & \underline{Z}_{CmAm} & \underline{Z}_{CmBm} & \underline{Z}_{CmCm} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{I}_{A1} \\ \dot{I}_{B1} \\ \dot{I}_{C1} \\ \vdots \\ \dot{I}_{Am} \\ \dot{I}_{Bm} \\ \dot{I}_{Cm} \end{pmatrix}, \quad (3.11)$$

где  $\Delta U$ ,  $I$  - вектора падений напряжений и токи в фазах.

Допустим, что фазы  $A1$ ,  $B1$ ,  $C1$  относятся к первой цепи, а фазы  $Am$ ,  $Bm$ ,  $Cm$  – к  $m$ -й цепи. Принимая во внимание первое принятого допущения, что любая из цепей МВЛ считается симметричной, запишем выражение (3.11) в виде:

$$\begin{pmatrix} \Delta \dot{U}_{A1} \\ \Delta \dot{U}_{B1} \\ \Delta \dot{U}_{C1} \\ \vdots \\ \Delta \dot{U}_{Am} \\ \Delta \dot{U}_{Bm} \\ \Delta \dot{U}_{Cm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{Z}_{A1A1} & a^2 \underline{Z}_{A1B1} & a \underline{Z}_{A1C1} & \cdots & \underline{Z}_{A1Am} & a^2 \underline{Z}_{A1Bm} & a \underline{Z}_{A1Cm} \\ \underline{Z}_{B1A1} & a^2 \underline{Z}_{B1B1} & a \underline{Z}_{B1C1} & \cdots & \underline{Z}_{B1Am} & a^2 \underline{Z}_{B1Bm} & a \underline{Z}_{B1Cm} \\ \underline{Z}_{C1A1} & a^2 \underline{Z}_{C1B1} & a \underline{Z}_{C1C1} & \cdots & \underline{Z}_{C1Am} & a^2 \underline{Z}_{C1Bm} & a \underline{Z}_{C1Cm} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \underline{Z}_{AmA1} & a^2 \underline{Z}_{AmB1} & a \underline{Z}_{AmC1} & \cdots & \underline{Z}_{AmAm} & a^2 \underline{Z}_{AmBm} & a \underline{Z}_{AmCm} \\ \underline{Z}_{BmA1} & a^2 \underline{Z}_{BmB1} & a \underline{Z}_{BmC1} & \cdots & \underline{Z}_{BmAm} & a^2 \underline{Z}_{BmBm} & a \underline{Z}_{BmCm} \\ \underline{Z}_{CmA1} & a^2 \underline{Z}_{CmB1} & a \underline{Z}_{CmC1} & \cdots & \underline{Z}_{CmAm} & a^2 \underline{Z}_{CmBm} & a \underline{Z}_{CmCm} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{I}_I \\ \dot{I}_I \\ \dot{I}_I \\ \vdots \\ \dot{I}_m \\ \dot{I}_m \\ \dot{I}_m \end{pmatrix}. \quad (3.12)$$

Совершая переход от многопроводной схемы замещения многоцепной линии к однопроводной, имеем для продольной парциальной схемы следующее матричное выражением:

$$\begin{pmatrix} \Delta \dot{U}_I \\ \Delta \dot{U}_{II} \\ \vdots \\ \Delta \dot{U}_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{Z}_I & \underline{Z}_{I-II} & \cdots & \underline{Z}_{I-m} \\ \underline{Z}_{II-I} & \underline{Z}_{II} & \cdots & \underline{Z}_{II-m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{Z}_{m-I} & \underline{Z}_{m-II} & \cdots & \underline{Z}_m \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{I}_I \\ \dot{I}_{II} \\ \vdots \\ \dot{I}_m \end{pmatrix}, \quad (3.13)$$

где  $\Delta \dot{U}_I$ ,  $\Delta \dot{U}_{II}$ ,  $\Delta \dot{U}_m$  - падения напряжений в цепях МВЛ;  $\dot{I}_I$ ,  $\dot{I}_{II}$ ,  $\dot{I}_m$  - токи, протекающие в ветвях эквивалентной однолинейной схемы;  $\underline{Z}_I$ ,  $\underline{Z}_{II}$ ,  $\underline{Z}_m$  - эквивалентные комплексные сопротивления ветвей;  $\underline{Z}_{I-II}$ ,  $\underline{Z}_{II-I}$ ,  $\underline{Z}_{I-m}$ ,  $\underline{Z}_{m-I}$ ,  $\underline{Z}_{II-m}$ ,  $\underline{Z}_{m-II}$  - эквивалентные взаимные сопротивления ветвей.

Запишем уравнения падения напряжений для каждого фазного проводника в соответствии с выражением (3.13).

$$\begin{aligned}
\Delta \dot{U}_{A1} &= (\underline{Z}_{A1A1} + a^2 \underline{Z}_{A1B1} + a \underline{Z}_{A1C1}) \dot{I}_I + (\underline{Z}_{A1A2} + a^2 \underline{Z}_{A1B2} + a \underline{Z}_{A1C2}) \dot{I}_{II} + \dots + \\
&+ (\underline{Z}_{A1Am} + a^2 \underline{Z}_{A1Bm} + a \underline{Z}_{A1Cm}) \dot{I}_m; \\
\Delta \dot{U}_{B1} &= (\underline{Z}_{B1A1} + a^2 \underline{Z}_{B1B1} + a \underline{Z}_{A1C1}) \dot{I}_I + (\underline{Z}_{B1A2} + a^2 \underline{Z}_{B1B2} + a \underline{Z}_{A1C2}) \dot{I}_{II} + \dots + \\
&+ (\underline{Z}_{B1Am} + a^2 \underline{Z}_{B1Bm} + a \underline{Z}_{B1Cm}) \dot{I}_m; \\
\Delta \dot{U}_{C1} &= (\underline{Z}_{C1A1} + a^2 \underline{Z}_{C1B1} + a \underline{Z}_{A1C1}) \dot{I}_I + (\underline{Z}_{C1A2} + a^2 \underline{Z}_{C1B2} + a \underline{Z}_{C1C2}) \dot{I}_{II} + \dots + \\
&+ (\underline{Z}_{C1Am} + a^2 \underline{Z}_{C1Bm} + a \underline{Z}_{C1Cm}) \dot{I}_m; \\
&\qquad\qquad\qquad \vdots \\
\Delta \dot{U}_{Am} &= (\underline{Z}_{AmA1} + a^2 \underline{Z}_{AmB1} + a \underline{Z}_{AmC1}) \dot{I}_I + (\underline{Z}_{AmA2} + a^2 \underline{Z}_{AmB2} + a \underline{Z}_{AmC2}) \dot{I}_{II} + \dots + \\
&+ (\underline{Z}_{AmAm} + a^2 \underline{Z}_{AmBm} + a \underline{Z}_{AmCm}) \dot{I}_m; \\
\Delta \dot{U}_{Bm} &= (\underline{Z}_{BmA1} + a^2 \underline{Z}_{BmB1} + a \underline{Z}_{BmC1}) \dot{I}_I + (\underline{Z}_{BmA2} + a^2 \underline{Z}_{BmB2} + a \underline{Z}_{BmC2}) \dot{I}_{II} + \dots + \\
&+ (\underline{Z}_{BmAm} + a^2 \underline{Z}_{BmBm} + a \underline{Z}_{BmCm}) \dot{I}_m; \\
\Delta \dot{U}_{Cm} &= (\underline{Z}_{CmA1} + a^2 \underline{Z}_{CmB1} + a \underline{Z}_{CmC1}) \dot{I}_I + (\underline{Z}_{CmA2} + a^2 \underline{Z}_{CmB2} + a \underline{Z}_{CmC2}) \dot{I}_{II} + \dots + \\
&+ (\underline{Z}_{CmAm} + a^2 \underline{Z}_{CmBm} + a \underline{Z}_{CmCm}) \dot{I}_m.
\end{aligned} \tag{3.14}$$

В выражениях (3.14) 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. Принимая во внимание третье принятое допущение п. 2.5, получаем вторичные собственные и взаимные сопротивления многоцепной воздушной линии электропередачи представленной в однопроводной постановке для выражения (3.13):

$$\begin{aligned}
\underline{Z}_I &= \left[ (\underline{Z}_{A1A1} + a^2 \underline{Z}_{A1B1} + a \underline{Z}_{A1C1}) + (a \underline{Z}_{B1A1} + \underline{Z}_{B1B1} + a^2 \underline{Z}_{B1C1}) + (a^2 \underline{Z}_{C1A1} + a \underline{Z}_{C1B1} + \underline{Z}_{C1C1}) \right] / 3; \\
\underline{Z}_{II} &= \left[ (\underline{Z}_{A2A2} + a^2 \underline{Z}_{A2B2} + a \underline{Z}_{A2C2}) + (a \underline{Z}_{B2A2} + \underline{Z}_{B2B2} + a^2 \underline{Z}_{B2C2}) + (a^2 \underline{Z}_{C2A2} + a \underline{Z}_{C2B2} + \underline{Z}_{C2C2}) \right] / 3;
\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
\underline{Z}_m &= \left[ \left( \underline{Z}_{AmAm} + a^2 \underline{Z}_{AmBm} + a \underline{Z}_{AmCm} \right) + \left( a \underline{Z}_{BmAm} + \underline{Z}_{BmBm} + a^2 \underline{Z}_{BmCm} \right) + \left( a^2 \underline{Z}_{CmAm} + a \underline{Z}_{CmBm} + \underline{Z}_{CmCm} \right) \right] / 3; \\
\underline{Z}_{I-II} &= \left[ \left( \underline{Z}_{A1A2} + a^2 \underline{Z}_{A1B2} + a \underline{Z}_{A1C2} \right) + \left( a \underline{Z}_{B1A2} + \underline{Z}_{B1B2} + a^2 \underline{Z}_{B1C2} \right) + \left( a^2 \underline{Z}_{C1A2} + a \underline{Z}_{C1B2} + \underline{Z}_{C1C2} \right) \right] / 3; \\
\underline{Z}_{II-I} &= \left[ \left( \underline{Z}_{A2A1} + a^2 \underline{Z}_{A2B1} + a \underline{Z}_{A2C1} \right) + \left( a \underline{Z}_{B2A1} + \underline{Z}_{B2B1} + a^2 \underline{Z}_{B2C1} \right) + \left( a^2 \underline{Z}_{C2A1} + a \underline{Z}_{C2B1} + \underline{Z}_{C2C1} \right) \right] / 3; \\
&\vdots \\
\underline{Z}_{I-m} &= \left[ \left( \underline{Z}_{A1Am} + a^2 \underline{Z}_{A1Bm} + a \underline{Z}_{A1Cm} \right) + \left( a \underline{Z}_{B1Am} + \underline{Z}_{B1Bm} + a^2 \underline{Z}_{B1Cm} \right) + \left( a^2 \underline{Z}_{C1Am} + a \underline{Z}_{C1Bm} + \underline{Z}_{C1Cm} \right) \right] / 3; \\
\underline{Z}_{II-m} &= \left[ \left( \underline{Z}_{A2Am} + a^2 \underline{Z}_{A2Bm} + a \underline{Z}_{A2Cm} \right) + \left( a \underline{Z}_{B2Am} + \underline{Z}_{B2Bm} + a^2 \underline{Z}_{B2Cm} \right) + \left( a^2 \underline{Z}_{C2Am} + a \underline{Z}_{C2Bm} + \underline{Z}_{C2Cm} \right) \right] / 3; \\
\underline{Z}_{m-I} &= \left[ \left( \underline{Z}_{AmA1} + a^2 \underline{Z}_{AmB1} + a \underline{Z}_{AmC1} \right) + \left( a \underline{Z}_{BmA1} + \underline{Z}_{BmB1} + a^2 \underline{Z}_{BmC1} \right) + \left( a^2 \underline{Z}_{CmA1} + a \underline{Z}_{CmB1} + \underline{Z}_{CmC1} \right) \right] / 3; \\
\underline{Z}_{m-II} &= \left[ \left( \underline{Z}_{AmA2} + a^2 \underline{Z}_{AmB2} + a \underline{Z}_{AmC2} \right) + \left( a \underline{Z}_{BmA2} + \underline{Z}_{BmB2} + a^2 \underline{Z}_{BmC2} \right) + \left( a^2 \underline{Z}_{CmA2} + a \underline{Z}_{CmB2} + \underline{Z}_{CmC2} \right) \right] / 3.
\end{aligned} \tag{3.15}$$

Вторичные взаимные и собственные проводимости каждой из цепей МВЛ можно рассчитать аналогично. Сформируем для поперечной части МСЗ уравнения ее состояния для векторов емкостных токов  $I$  от напряжений ветвей  $U$ :

$$\begin{pmatrix} \dot{I}_{A1} \\ \dot{I}_{B1} \\ \dot{I}_{C1} \\ \vdots \\ \dot{I}_{Am} \\ \dot{I}_{Bm} \\ \dot{I}_{Cm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{Y}_{A1A1} & \underline{Y}_{A1B1} & \underline{Y}_{A1C1} & \cdots & \underline{Y}_{A1Am} & \underline{Y}_{A1Bm} & \underline{Y}_{A1Cm} \\ \underline{Y}_{B1A1} & \underline{Y}_{B1B1} & \underline{Y}_{B1C1} & \cdots & \underline{Y}_{B1Am} & \underline{Y}_{B1Bm} & \underline{Y}_{B1Cm} \\ \underline{Y}_{C1A1} & \underline{Y}_{C1B1} & \underline{Y}_{C1C1} & \cdots & \underline{Y}_{C1Am} & \underline{Y}_{C1Bm} & \underline{Y}_{C1Cm} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & & & \\ \underline{Y}_{AmA1} & \underline{Y}_{AmB1} & \underline{Y}_{AmC1} & \cdots & \underline{Y}_{AmAm} & \underline{Y}_{AmBm} & \underline{Y}_{AmCm} \\ \underline{Y}_{BmA1} & \underline{Y}_{BmB1} & \underline{Y}_{BmC1} & \cdots & \underline{Y}_{BmAm} & \underline{Y}_{BmBm} & \underline{Y}_{BmCm} \\ \underline{Y}_{CmA1} & \underline{Y}_{CmB1} & \underline{Y}_{CmC1} & \cdots & \underline{Y}_{CmAm} & \underline{Y}_{CmBm} & \underline{Y}_{CmCm} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{U}_{A1} \\ \dot{U}_{B1} \\ \dot{U}_{C1} \\ \vdots \\ \dot{U}_{Am} \\ \dot{U}_{Bm} \\ \dot{U}_{Cm} \end{pmatrix}, \tag{3.16}$$

С учетом принятых допущений о том, что каждая из цепей МВЛ считается симметричной, запишем матрицу емкостных токов в виде:

$$\begin{pmatrix} \dot{I}_I \\ \dot{I}_I \\ \dot{I}_I \\ \vdots \\ \dot{I}_m \\ \dot{I}_m \\ \dot{I}_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{Y}_{A1A1} & a^2 \underline{Y}_{A1B1} & a \underline{Y}_{A1C1} & \cdots & \underline{Y}_{A1Am} & a^2 \underline{Y}_{A1Bm} & a \underline{Y}_{A1Cm} \\ \underline{Y}_{B1A1} & a^2 \underline{Y}_{B1B1} & a \underline{Y}_{B1C1} & \cdots & \underline{Y}_{B1Am} & a^2 \underline{Y}_{B1Bm} & a \underline{Y}_{B1Cm} \\ \underline{Y}_{C1A1} & a^2 \underline{Y}_{C1B1} & a \underline{Y}_{C1C1} & \cdots & \underline{Y}_{C1Am} & a^2 \underline{Y}_{C1Bm} & a \underline{Y}_{C1Cm} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \underline{Y}_{AmA1} & a^2 \underline{Y}_{AmB1} & a \underline{Y}_{AmC1} & \cdots & \underline{Y}_{AmAm} & a^2 \underline{Y}_{AmBm} & a \underline{Y}_{AmCm} \\ \underline{Y}_{BmA1} & a^2 \underline{Y}_{BmB1} & a \underline{Y}_{BmC1} & \cdots & \underline{Y}_{BmAm} & a^2 \underline{Y}_{BmBm} & a \underline{Y}_{BmCm} \\ \underline{Y}_{CmA1} & a^2 \underline{Y}_{CmB1} & a \underline{Y}_{CmC1} & \cdots & \underline{Y}_{CmAm} & a^2 \underline{Y}_{CmBm} & a \underline{Y}_{CmCm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{U}_I \\ \dot{U}_I \\ \dot{U}_I \\ \vdots \\ \dot{U}_m \\ \dot{U}_m \\ \dot{U}_m \end{pmatrix}. \quad (3.17)$$

Переходя от многопроводной к однолинейной схеме замещения многоцепной линии получаем для поперечной части схемы систему уравнений:

$$\begin{pmatrix} \dot{I}_I \\ \dot{I}_{II} \\ \vdots \\ \dot{I}_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{Y}_I & \underline{Y}_{I-II} & \cdots & \underline{Y}_{I-m} \\ \underline{Y}_{II-I} & \underline{Y}_{II} & \cdots & \underline{Y}_{II-m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{Y}_{m-I} & \underline{Y}_{m-II} & \cdots & \underline{Y}_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{U}_I \\ \dot{U}_{II} \\ \vdots \\ \dot{U}_m \end{pmatrix}. \quad (3.18)$$

В выражении (3.18):  $\underline{Y}_I$ ,  $\underline{Y}_{II}$ ,  $\underline{Y}_m$  - эквивалентные собственные проводимости ветвей;  $\dot{U}_I$ ,  $\dot{U}_{II}$ ,  $\dot{U}_m$  - фазные напряжения в цепях МВЛ;  $\underline{Y}_{I-II}$ ,  $\underline{Y}_{II-I}$ ,  $\underline{Y}_{I-m}$ ,  $\underline{Y}_{m-I}$ ,  $\underline{Y}_{II-m}$ ,  $\underline{Y}_{m-II}$  - эквивалентные взаимные проводимости ветвей;  $\dot{I}_I$ ,  $\dot{I}_{II}$ ,  $\dot{I}_m$  - емкостные токи.

Уравнения емкостных токов для каждого фазного проводника в соответствии с выражением (3.17) принимают вид:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A1} &= (\underline{Y}_{A1A1} + a^2 \underline{Y}_{A1B1} + a \underline{Y}_{A1C1}) \dot{U}_I + (\underline{Y}_{A1A2} + a^2 \underline{Y}_{A1B2} + a \underline{Y}_{A1C2}) \dot{U}_{II} + \dots + \\ &+ (\underline{Y}_{A1Am} + a^2 \underline{Y}_{A1Bm} + a \underline{Y}_{A1Cm}) \dot{U}_m; \\ \dot{I}_{B1} &= (\underline{Y}_{B1A1} + a^2 \underline{Y}_{B1B1} + a \underline{Y}_{B1C1}) \dot{U}_I + (\underline{Y}_{B1A2} + a^2 \underline{Y}_{B1B2} + a \underline{Y}_{B1C2}) \dot{U}_{II} + \dots + \\ &+ (\underline{Y}_{B1Am} + a^2 \underline{Y}_{B1Bm} + a \underline{Y}_{B1Cm}) \dot{U}_m; \\ \dot{I}_{C1} &= (\underline{Y}_{C1A1} + a^2 \underline{Y}_{C1B1} + a \underline{Y}_{C1C1}) \dot{U}_I + (\underline{Y}_{C1A2} + a^2 \underline{Y}_{C1B2} + a \underline{Y}_{C1C2}) \dot{U}_{II} + \dots + \\ &+ (\underline{Y}_{C1Am} + a^2 \underline{Y}_{C1Bm} + a \underline{Y}_{C1Cm}) \dot{U}_m; \\ &\vdots \end{aligned} \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned}
\dot{I}_{Am} &= (\underline{Y}_{AmA1} + a^2 \underline{Y}_{AmB1} + a \underline{Y}_{AmC1}) \dot{U}_I + (\underline{Y}_{AmA2} + a^2 \underline{Y}_{AmB2} + a \underline{Y}_{AmC2}) \dot{U}_{II} + \dots + \\
&+ (\underline{Y}_{AmAm} + a^2 \underline{Y}_{AmBm} + a \underline{Y}_{AmCm}) \dot{U}_m; \\
\dot{I}_{Bm} &= (\underline{Y}_{BmA1} + a^2 \underline{Y}_{BmB1} + a \underline{Y}_{BmC1}) \dot{U}_I + (\underline{Y}_{BmA2} + a^2 \underline{Y}_{BmB2} + a \underline{Y}_{BmC2}) \dot{U}_{II} + \dots + \\
&+ (\underline{Y}_{BmAm} + a^2 \underline{Y}_{BmBm} + a \underline{Y}_{BmCm}) \dot{U}_m; \\
\dot{I}_{Cm} &= (\underline{Y}_{CmA1} + a^2 \underline{Y}_{CmB1} + a \underline{Y}_{CmC1}) \dot{U}_I + (\underline{Y}_{CmA2} + a^2 \underline{Y}_{CmB2} + a \underline{Y}_{CmC2}) \dot{U}_{II} + \dots + \\
&+ (\underline{Y}_{CmAm} + a^2 \underline{Y}_{CmBm} + a \underline{Y}_{CmCm}) \dot{U}_m.
\end{aligned}$$

В формулах (3.19) первое слагаемое моделирует емкостные токи, протекание которых вызвано напряжениями фаз первой цепи МВЛ, второе - моделирует емкостные токи, протекание которых вызвано напряжениями фаз второй цепи МВЛ и т.д. Эквивалентные взаимные и собственные проводимости МВЛ, смоделированной в однопроводной постановке, находятся по следующим расчётным формулам:

$$\begin{aligned}
\underline{Y}_I &= \left[ (\underline{Y}_{A1A1} + a^2 \underline{Y}_{A1B1} + a \underline{Y}_{A1C1}) + (a \underline{Y}_{B1A1} + \underline{Y}_{B1B1} + a^2 \underline{Y}_{B1C1}) + (a^2 \underline{Y}_{C1A1} + a \underline{Y}_{C1B1} + \underline{Y}_{C1C1}) \right] / 3; \\
\underline{Y}_{II} &= \left[ (\underline{Y}_{A2A2} + a^2 \underline{Y}_{A2B2} + a \underline{Y}_{A2C2}) + (a \underline{Y}_{B2A2} + \underline{Y}_{B2B2} + a^2 \underline{Y}_{B2C2}) + (a^2 \underline{Y}_{C2A2} + a \underline{Y}_{C2B2} + \underline{Y}_{C2C2}) \right] / 3; \\
\underline{Y}_m &= \left[ (\underline{Y}_{AmAm} + a^2 \underline{Y}_{AmBm} + a \underline{Y}_{AmCm}) + (a \underline{Y}_{BmAm} + \underline{Y}_{BmBm} + a^2 \underline{Y}_{BmCm}) + (a^2 \underline{Y}_{CmAm} + a \underline{Y}_{CmBm} + \underline{Y}_{CmCm}) \right] / 3; \\
\underline{Y}_{I-II} &= \left[ (\underline{Y}_{A1A2} + a^2 \underline{Y}_{A1B2} + a \underline{Y}_{A1C2}) + (a \underline{Y}_{B1A2} + \underline{Y}_{B1B2} + a^2 \underline{Y}_{B1C2}) + (a^2 \underline{Y}_{C1A2} + a \underline{Y}_{C1B2} + \underline{Y}_{C1C2}) \right] / 3; \\
\underline{Y}_{II-I} &= \left[ (\underline{Y}_{A2A1} + a^2 \underline{Y}_{A2B1} + a \underline{Y}_{A2C1}) + (a \underline{Y}_{B2A1} + \underline{Y}_{B2B1} + a^2 \underline{Y}_{B2C1}) + (a^2 \underline{Y}_{C2A1} + a \underline{Y}_{C2B1} + \underline{Y}_{C2C1}) \right] / 3; \\
&\vdots \\
\underline{Y}_{I-m} &= \left[ (\underline{Y}_{A1Am} + a^2 \underline{Y}_{A1Bm} + a \underline{Y}_{A1Cm}) + (a \underline{Y}_{B1Am} + \underline{Y}_{B1Bm} + a^2 \underline{Y}_{B1Cm}) + (a^2 \underline{Y}_{C1Am} + a \underline{Y}_{C1Bm} + \underline{Y}_{C1Cm}) \right] / 3; \\
\underline{Y}_{II-m} &= \left[ (\underline{Y}_{A2Am} + a^2 \underline{Y}_{A2Bm} + a \underline{Y}_{A2Cm}) + (a \underline{Y}_{B2Am} + \underline{Y}_{B2Bm} + a^2 \underline{Y}_{B2Cm}) + (a^2 \underline{Y}_{C2Am} + a \underline{Y}_{C2Bm} + \underline{Y}_{C2Cm}) \right] / 3; \\
\underline{Y}_{m-I} &= \left[ (\underline{Y}_{AmA1} + a^2 \underline{Y}_{AmB1} + a \underline{Y}_{AmC1}) + (a \underline{Y}_{BmA1} + \underline{Y}_{BmB1} + a^2 \underline{Y}_{BmC1}) + (a^2 \underline{Y}_{CmA1} + a \underline{Y}_{CmB1} + \underline{Y}_{CmC1}) \right] / 3; \\
\underline{Y}_{m-II} &= \left[ (\underline{Y}_{AmA2} + a^2 \underline{Y}_{AmB2} + a \underline{Y}_{AmC2}) + (a \underline{Y}_{BmA2} + \underline{Y}_{BmB2} + a^2 \underline{Y}_{BmC2}) + (a^2 \underline{Y}_{CmA2} + a \underline{Y}_{CmB2} + \underline{Y}_{CmC2}) \right] / 3.
\end{aligned} \tag{3.20}$$

Нужно помнить, что исходно предполагается выполнение неравенства  $\underline{Z}_{I-II} \neq \underline{Z}_{II-I}$  и  $\underline{Y}_{I-II} \neq \underline{Y}_{II-I}$ . Взаимные элементы матриц сопротивлений и проводимостей могут включать в себя также и вещественное слагаемое, что говорит о факте обмена активной мощностью между цепями МВЛ.

На базе этих выражений (3.15, 3.20) возможно составить расчётные алгоритмы, использование которых в современных расчётных программах позволит учитывать взаимное влияние цепей МВЛ.

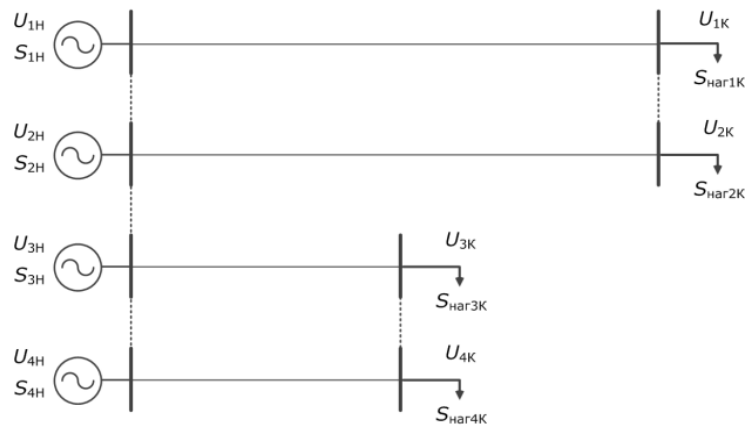
### **3.3. Математическое моделирование установившегося режима многоцепной комбинированной воздушной линии простейшей разветвлённой топологии.**

Специфика многоцепных линий практически исключает существование единой совокупности цепей следующих от узла начала к узлу конца на одних и тех же опорах. Для расчёта режима реальной неоднородной линии необходимо искусственное разделение такой линии на однородные участки с помощью вводимых в схему обобщённых фиктивных узлов, характеризующих различные виды неоднородностей в схемной структуре линии.

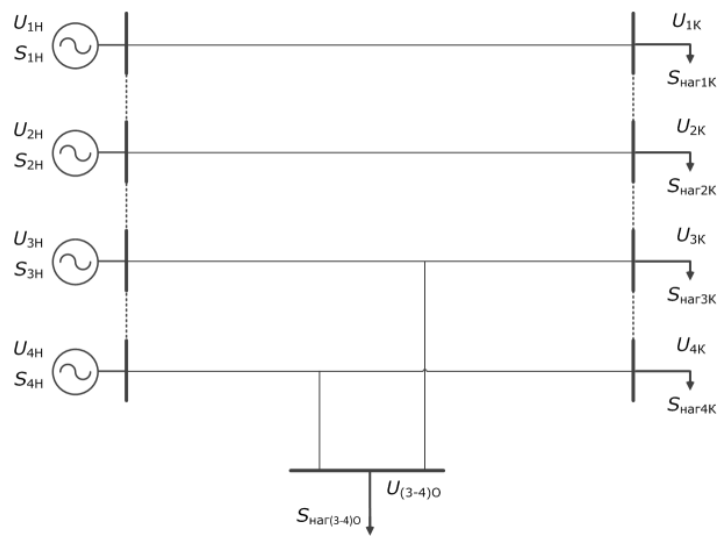
В структуре МВЛ возможны следующие виды неоднородностей.

1. Окончание одной или нескольких цепей МВЛ. Данный вид неоднородности может возникнуть в случае, если цепи МВЛ имеют различную длину, что чаще всего обусловлено различной величиной номинальных напряжений цепей (рис 3.1 а).
2. Отпайка от двух или нескольких цепей МВЛ одного напряжения. Подразумевает наличие на линии отпаечных опор с отпайками на тупиковые подстанции (рис 3.1 б).
3. Наличие на одной из цепей МВЛ транзитной подстанции. Возникает в случае, если с одной из цепей МВЛ осуществляется непосредственный отбор мощности (рис 3.1 в).

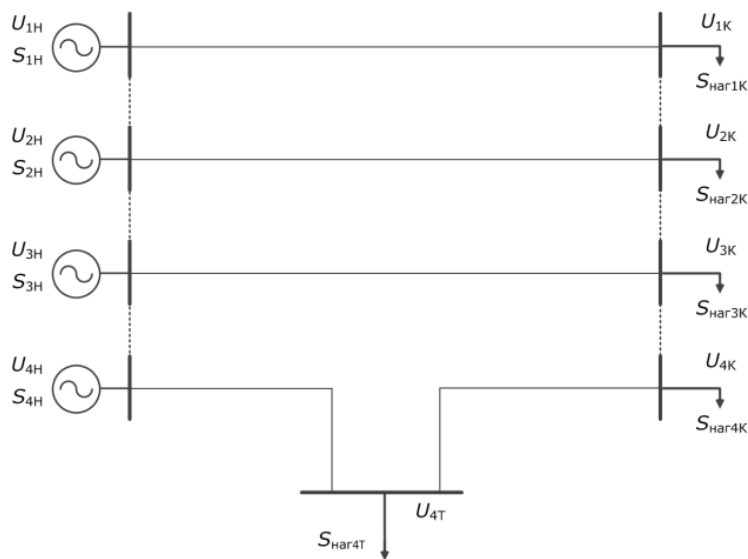
Возникающие структурные неоднородности МВЛ могут быть учтены в расчётном процессе путём представляющих из себя коммутационные обобщённые четырёхполюсники, осуществляющие соединения моделей однородных участков линии.



а)



б)



в)

Рис. 3.1. Типы неоднородностей МВЛ: а) окончание части цепей МВЛ; б) отпайка от двух или нескольких цепей МВЛ одного напряжения; в) транзитная подстанция на одной из цепей МВЛ.

Расчёт режима в общем случае ведётся в Y-форме и форме обобщённого четырёхполюсника по приведённым в главе методикам. Расчётная схема при этом модифицируется в соответствии с известными из теории четырёхполюсников выражениями, характеризующими каскадное, последовательное и параллельное соединение четырёхполюсников.

### **3.4. Задача определения напряжённости электрического поля вдоль трассы многоцепной комбинированной воздушной линии.**

Одной из проблем сооружения МВЛ является расчёт значений напряжённости электрического поля у поверхности земли для определения границ санитарно-защитной зоны вдоль её трассы. Согласно действующему СанПиН №2971-84, 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 напряжённости на стадии проектирования можно рассматривать как предпосылки для уменьшения площади санитарно-защитных зон МВЛ и, следовательно, значительной экономии средств, затраченных на строительство в условиях высокой стоимости земельных участков в городской черте.

Физический процесс распространения электромагнитных волн вдоль МВЛ включает в себя ряд явлений, учёт которых усложняет его математическое описание. Сюда следует отнести нелинейные процессы, возникающие вследствие импульсной короны и намагничивания стальной сердцевины проводов и тросов, а также процессы, связанные с проникновением поля провода в землю, имеющую конечную проводимость. Кроме того, существенное влияние оказывают также дискретно заземлённые грозозащитные тросы, провисание проводов и тросов МВЛ, неоднородность земли (например, горизонтальная многослойность, токи смещения в земле и воздухе, «концевой» эффект вдоль линии и «волновой» эффект поперёк линии,

«эффект близости», дискретность вдоль линии токов утечки и токов смещения по гирляндам изоляторов и др.

Математическое описание распространения электромагнитных волн в многокомпонентных системах и устройствах таких, как МВЛ, основано на анализе систем уравнений Максвелла, построенных для соответствующих электромагнитных полей. При этом должны быть удовлетворены граничные условия на поверхностях раздела сред с различными характеристиками (воздух, земля с неоднородной структурой, провода, грозозащитные тросы, металлические конструкции и т.д.). Точное решение этой задачи для квазистационарных процессов разработано Г.А. Гринбергом и Б.Э. Бонштедтом [47] для однопроводной линии, а затем М.В. Костенко и Л.С. Перельманом [71] для многопроводной. Сделанные при этом допущения, облегчающие инженерное решение задачи, предполагают отсутствие нелинейных процессов, связанных с импульсной короной, однородность земли и проводов МВЛ, параллельность проводов горизонтальной поверхности земли и между собой, пренебрежение «эффектом близости» и «концевым эффектом».

Предполагается, что многопроводная МВЛ состоит из  $m$  цепей, каждая из которых содержит по три фазных провода  $a_j$ ,  $b_j$  и  $c_j$ . Грозозащитные тросы  $t_{i..}t_{ik}$  изолированы от опор на всём протяжении линии. Схема МВЛ и обозначения её геометрических размеров представлены на рис. 3.2.

Таким образом, для определения электромагнитного поля в воздухе, земле и проводах необходимо составить решение системы уравнений Максвелла, удовлетворяющее граничным условиям на поверхностях раздела сред. Приняв зависимость электромагнитного поля от времени  $\tau$  и от расстояния вдоль оси координат  $x$ , параллельной проводам, в виде  $e^{j(\omega\tau - \gamma x)}$ , где  $\gamma$  – постоянная распространения, запишем уравнения Максвелла для каждой среды в виде (3.21).

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \dot{H} = j\omega \left( \varepsilon - j \frac{\sigma}{\omega} \right) \dot{E}; \\ \operatorname{rot} \dot{E} = -j\omega \mu \dot{H}. \end{cases}, \quad (3.21)$$

где  $\dot{E}$  и  $\dot{H}$  – напряжённости электрического и магнитного полей,  $\varepsilon$ ,  $\mu$  и  $\sigma$  – соответственно абсолютная диэлектрическая проницаемость, абсолютная магнитная проницаемость и проводимость среды.

Поскольку мы пренебрегаем «эффектом близости», для решения уравнений Максвелла можно воспользоваться принципом суперпозиции, приняв что общее решение для полей в воздухе и земле представляет сумму частных решений для каждого провода МВЛ над землёй, полученных в [59], а поле внутри провода описывается решением Зоммерфельда для одиночного провода.

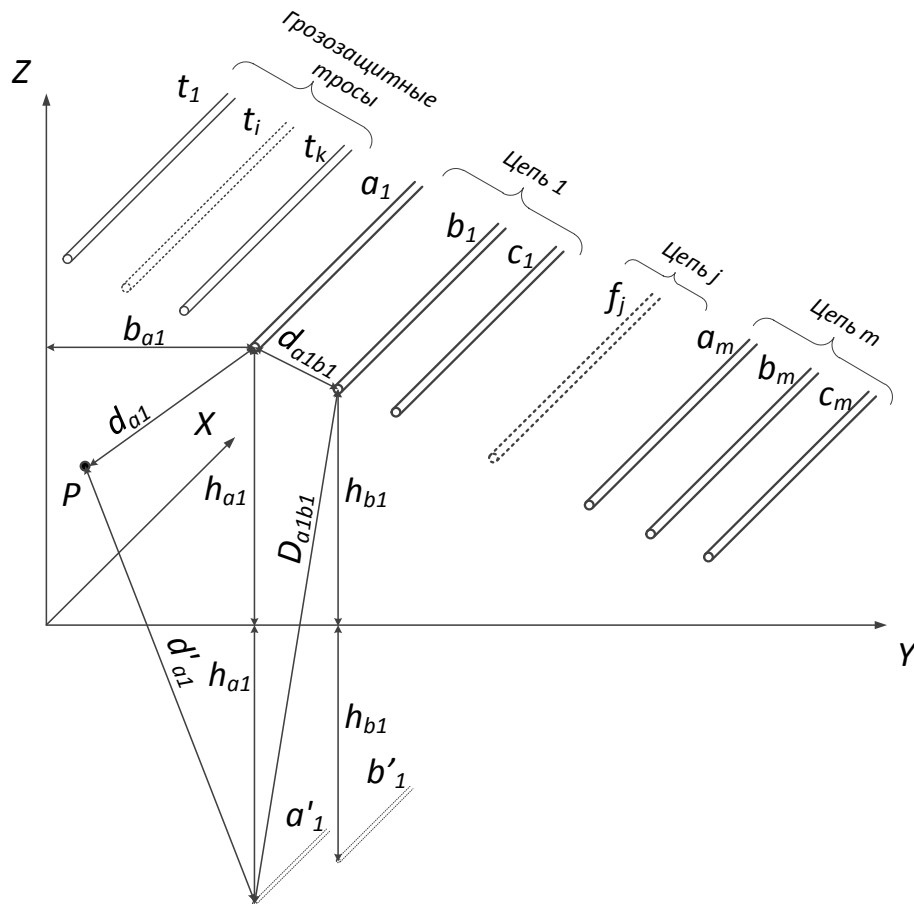


Рис. 3.2. Схема многопроводной МВЛ.



Обозначим  $\dot{E}_k^{(i)}$  и  $\dot{H}_k^{(i)}$  - напряжённости электрического и магнитного полей в среде  $i$ , созданные током  $k$ -го провода, причём в отношении сред обозначим индексом 0 – воздух, индексом  $g$  – землю, а индексами  $a_1, b_1, c_1 \dots a_m, b_m$  и  $c_m$  – провода. В собственных полярных координатах  $(x, r, \theta)$  каждого провода создаваемое внутри и вне его поле определяется по формулам (2).

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{E}_x^{(k)} = A_k J_0(m_k d_k); \\ \dot{E}_r^{(k)} = -\frac{j\gamma}{m_k} A_k J'_0(m_k d_k); \\ \dot{H}_\theta^{(k)} = -\frac{j\omega \left( \varepsilon - j \frac{\sigma_k}{\omega} \right)}{m_k} A_k J'_0(m_k d_k); \\ \dot{E}_\theta^{(k)} = \dot{H}_x^{(k)} = \dot{H}_r^{(k)} = 0. \end{array} \right. , \left\{ \begin{array}{l} \dot{E}_{xk}^{(0)} = C_k H_0(m_0 d_k); \\ \dot{E}_{rk}^{(0)} = -\frac{j\gamma}{m_0} C_k H'_0(m_0 d_k); \\ \dot{H}_{\theta k}^{(0)} = -\frac{j\omega \varepsilon_0}{m_0} C_k H'_0(m_0 d_k); \\ \dot{E}_{\theta k}^{(0)} = \dot{H}_{xk}^{(0)} = \dot{H}_{rk}^{(0)} = 0. \end{array} \right. \quad (3.22)$$

где  $m_i = \sqrt{k_i^2 - \gamma^2}$ ,  $k_i = \omega \sqrt{\mu_i \left( \varepsilon - j \frac{\sigma_i}{\omega} \right)}$ ,  $d_k$  – расстояние, определяемое в соответствии с рис. 3.2,  $A_k$  и  $C_k$  – постоянные интегрирования,  $J_0$  и  $J'_0$  – функция и производная функции Бесселя 1-го рода нулевого порядка,  $H_0$  и  $H'_0$  – функция и производная функции Ханкеля 1-го рода нулевого порядка.

Суммарная продольная составляющая напряжённости электрического поля в воздухе в произвольной точке  $P$  в соответствии с принципом суперпозиции имеет вид (3).

$$\dot{E}_x^{(0)} = \sum_{k=1}^n C_k \left[ H_0(m_0 d_k) - H_0(m_0 d'_k) + \frac{2jk_0^2}{\pi m_0^2} F_{kp} \right], \quad (3.23)$$

где  $F_{kp} = 2 \int_0^\infty \frac{\eta_0 \eta_g - v^2}{k_g^2 \eta_0 + k_0^2 \eta_g} e^{-\eta_0(z_p + h_k)} \cos v(y_p - b_k) dv$ ,  $b_k, h_k$  и  $d'_k$  – расстояния,

определяемые в соответствии с рис. 3.2,  $z_p$  и  $y_p$  – координаты точки  $P$ ,

$$\eta_0 = \sqrt{v^2 - m_0^2}, \quad \eta_g = \sqrt{v^2 - m_g^2}.$$

При выводе выражения (3.23) положено  $\mu_g = \mu_0$ .

Таким образом, выражение (3.23) определяет величину напряжённости

электрического поля в произвольной точке вдоль трассы МВЛ. Результаты данных вычислений могут быть использованы в процессе проектирования для поиска области, в которой величина напряжённости электрического поля имеет значение более 1 кВ/м, что определяет границы санитарно-защитной зоны МВЛ в соответствии с действующим СанПиН.

### 3.5. Выводы по главе 3.

- Предложена методика расчета стационарных режимов многоцепной ВЛ, для реализации которой необходимо продольную парциальную схему представить в  $Z$  – форме, а поперечную - в  $Y$  – форме. В результате этого можно учесть взаимоиндуктивные и взаимоемкостные связи цепей МВЛ и её отдельных проводников. Разработанная методика применима при анализе режимов отдельно взятых МВЛ на стадии их проектирования и реконструкции.
- Получено аналитическое выражение для определения величин напряжённости результирующего электрического поля вблизи проводов МВЛ при распространении по ним электромагнитных волн без учёта влияния земли. Найденное точное решение может быть использовано в проектировании МВЛ для определения границ санитарно-защитных зон вдоль трасс линий.
- Разработана методика расчета стационарных электрических режимов МВЛ, для реализации которой необходимо продольную парциальную схему представить в  $Y$  – форме. Разработанная методика применима при анализе режимов электрических сетей, содержащих МВЛ на стадии их эксплуатации.
- Предложен способ эквивалентирования многопроводных схем замещения однопроводными, приближённо учитывающими несимметрию цепей МВЛ.

## ГЛАВА 4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ МОДЕЛЕЙ В ЗАДАЧАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ.

### 4.1. Методика расчёта и коммерческого разделения потерь между собственниками отдельных частей многоцепной комбинированной воздушной линии.

Разработанные методики расчёта режима могут быть применены для решения задач, решение которых принципиально невозможно в однопроводной постановке. Одной из таких задач является разделение потерь электрической мощности в цепях МВЛ, которые могут быть вызваны протеканием тока как в самой рассматриваемой цепи, так и в соседней.

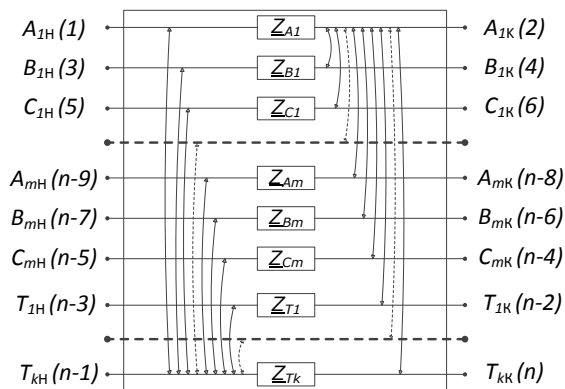


Рис. 4.1

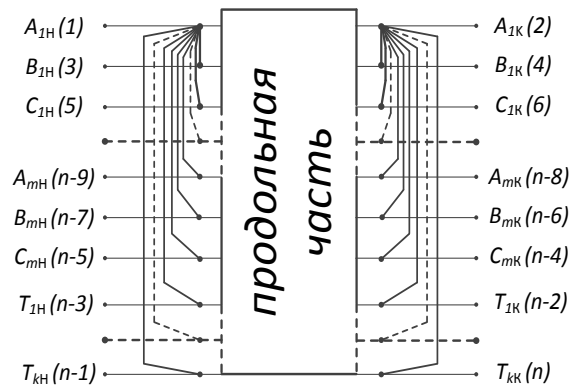


Рис. 4.2

Предположим, что для  $m$ -цепного участка МВЛ с  $k$  грозозащитными тросами сформирована  $(3m+k)$ -проводная  $n$ -узловая схема замещения в  $Z$ -форме, продольная часть (рис. 4.1) которой характеризуется матрицей собственных и взаимных активно-индуктивных сопротивлений  $Z$ , а поперечная (рис. 4.2) – матрицей емкостных проводимостей  $B$ . Предположим также, что параметры режима рассматриваемого участка МВЛ в виде векторов фазных токов и напряжений  $I_N$  и  $U_N$  в узлах начала участка с нечётными номерами  $1..n-1$ , а также векторов фазных токов и напряжений  $I_K$  и  $U_K$  в узлах

конца участка с чётными номерами  $2..n$  известны из исходных данных и результатов предварительно произведённого расчёта установившегося режима рассматриваемого участка МВЛ.

Для анализа потерь в элементах схемы замещения запишем уравнение её состояния для вектора токов  $I_{\Pi}$  ветвей и вектора падений напряжений  $\Delta U$  в виде (4.1)

$$\dot{I}_{\Pi} = \underline{Y} \Delta \dot{U}, \quad (4.1)$$

где  $\underline{Y} = \underline{Z}^{-1}$ .

В матричной форме данное выражение имеет вид

$$\begin{pmatrix} \dot{I}_{A1\Pi} \\ \vdots \\ \dot{I}_{Cm\Pi} \\ \dot{I}_{T1\Pi} \\ \vdots \\ \dot{I}_{Tk\Pi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{Y}_{A1A1} & \cdots & \underline{Y}_{A1Cm} & \underline{Y}_{A1T1} & \cdots & \underline{Y}_{A1Tk} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{Y}_{CmA1} & \cdots & \underline{Y}_{CmCm} & \underline{Y}_{CmT1} & \cdots & \underline{Y}_{CmTk} \\ \underline{Y}_{T1A1} & \cdots & \underline{Y}_{T1Cm} & \underline{Y}_{T1T1} & \cdots & \underline{Y}_{T1Tk} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{Y}_{TkA1} & \cdots & \underline{Y}_{TkCm} & \underline{Y}_{TkT1} & \cdots & \underline{Y}_{TkTk} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{U}_{A1H} - \dot{U}_{A1K} \\ \vdots \\ \dot{U}_{CmH} - \dot{U}_{CmK} \\ \dot{U}_{T1H} - \dot{U}_{T1K} \\ \vdots \\ \dot{U}_{TkH} - \dot{U}_{TkK} \end{pmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} \underline{Y}_{A1A1} \cdot (\dot{U}_{A1H} - \dot{U}_{A1K}) + \cdots + \underline{Y}_{A1Cm} \cdot (\dot{U}_{CmH} - \dot{U}_{CmK}) + \underline{Y}_{A1T1} \cdot (\dot{U}_{T1H} - \dot{U}_{T1K}) + \cdots + \underline{Y}_{A1Tk} \cdot (\dot{U}_{TkH} - \dot{U}_{TkK}) \\ \vdots \\ \underline{Y}_{CmA1} \cdot (\dot{U}_{A1H} - \dot{U}_{A1K}) + \cdots + \underline{Y}_{CmCm} \cdot (\dot{U}_{CmH} - \dot{U}_{CmK}) + \underline{Y}_{CmT1} \cdot (\dot{U}_{T1H} - \dot{U}_{T1K}) + \cdots + \underline{Y}_{CmTk} \cdot (\dot{U}_{TkH} - \dot{U}_{TkK}) \\ \underline{Y}_{T1A1} \cdot (\dot{U}_{A1H} - \dot{U}_{A1K}) + \cdots + \underline{Y}_{T1Cm} \cdot (\dot{U}_{CmH} - \dot{U}_{CmK}) + \underline{Y}_{T1T1} \cdot (\dot{U}_{T1H} - \dot{U}_{T1K}) + \cdots + \underline{Y}_{T1Tk} \cdot (\dot{U}_{TkH} - \dot{U}_{TkK}) \\ \vdots \\ \underline{Y}_{TkA1} \cdot (\dot{U}_{A1H} - \dot{U}_{A1K}) + \cdots + \underline{Y}_{TkCm} \cdot (\dot{U}_{CmH} - \dot{U}_{CmK}) + \underline{Y}_{TkT1} \cdot (\dot{U}_{T1H} - \dot{U}_{T1K}) + \cdots + \underline{Y}_{TkTk} \cdot (\dot{U}_{TkH} - \dot{U}_{TkK}) \end{pmatrix}$$

Сгруппировав элементы предыдущего выражения, соответствующие цепям участка МВЛ от 1 до  $m$ , сформируем  $m$ -мерный вектор потерь активной

$$\text{мощности } \Delta P = \text{Re} \left[ \Delta \dot{U} \cdot \dot{I}_{\Pi}^* \right].$$

$$\begin{pmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{Re} \left[ (\dot{U}_{A1H} - \dot{U}_{A1K})^* \dot{I}_{A1\Pi} + (\dot{U}_{B1H} - \dot{U}_{B1K})^* \dot{I}_{B1\Pi} + (\dot{U}_{C1H} - \dot{U}_{C1K})^* \dot{I}_{C1\Pi} \right] \\ \text{Re} \left[ (\dot{U}_{A2H} - \dot{U}_{A2K})^* \dot{I}_{A2\Pi} + (\dot{U}_{B2H} - \dot{U}_{B2K})^* \dot{I}_{B2\Pi} + (\dot{U}_{C2H} - \dot{U}_{C2K})^* \dot{I}_{C2\Pi} \right] \\ \vdots \\ \text{Re} \left[ (\dot{U}_{AmH} - \dot{U}_{AmK})^* \dot{I}_{Am\Pi} + (\dot{U}_{BmH} - \dot{U}_{BmK})^* \dot{I}_{Bm\Pi} + (\dot{U}_{CmH} - \dot{U}_{CmK})^* \dot{I}_{Cm\Pi} \right] \end{pmatrix}.$$

Аналогичным образом сформирует вектор  $\Delta P_T$  потерь в грозозащитных тросах.

$$\begin{pmatrix} \Delta P_{T1} \\ \Delta P_{T2} \\ \vdots \\ \Delta P_{Tk} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \operatorname{Re} \left[ (\dot{U}_{T1H} - \dot{U}_{T1K})^* I_{T1П} \right] \\ \operatorname{Re} \left[ (\dot{U}_{T2H} - \dot{U}_{T2K})^* I_{T2П} \right] \\ \vdots \\ \operatorname{Re} \left[ (\dot{U}_{TkH} - \dot{U}_{TkK})^* I_{TkП} \right] \end{pmatrix}.$$

Таким образом, величины электрической мощности, теряемые при её передаче по каждой из цепей рассматриваемого участка МВЛ однозначно определяются по приведённым выше выражениям.

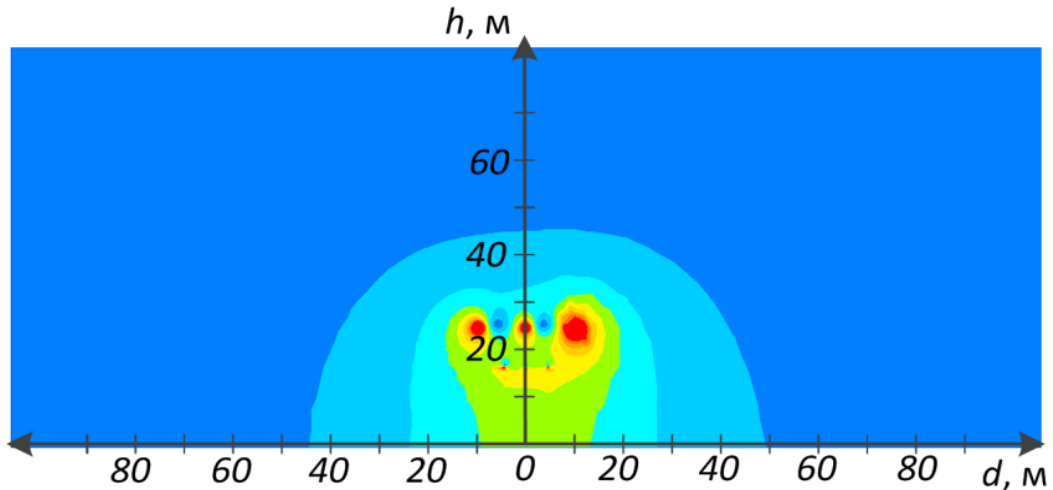
#### **4.2. Определение направления оптимизации конструкции МВЛ по критерию минимума потерь активной мощности и минимуму площади санитарно-защитных зон вдоль трассы МВЛ на стадии проектирования.**

Предложенные расчётные методики могут являться основой при определении оптимальной конструкции проектируемых и реконструируемых многоцепных линий. В целях энергосбережения при проектировании МВЛ предлагается выполнять подбор следующих оптимальных параметров посредством поиска такого их сочетания, при котором потери активной мощности при передаче были бы минимальны.

- Изменение порядка чередования на опоре цепей различного напряжения
- Изменение высоты подвеса нижних фаз.
- Расположение проводников цепей горизонтально или по вершинам треугольника.
- Перестановка фазных проводов.

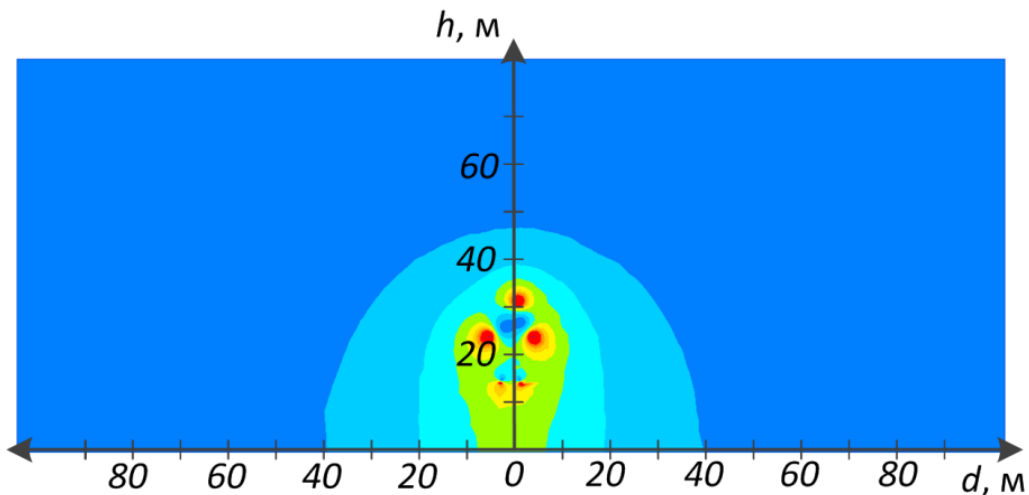
Одной из проблем сооружения многоцепной линий, можно отметить определение границ санитарно-защитной зоны вдоль её трассы. Согласно действующему СанПиН, санитарно-защитная зона ВЛ определяется, как территория вдоль трассы линии, в которой напряженность электрического поля превышает 1 кВ/м.

Предлагается оптимизация конструкции многоцепной воздушной линии по критерию минимума площади её санитарно-защитной зоны. Так, произведённый расчёт напряжённости электрического поля для различных вариантов расположения двух цепей 220 и 110 кВ, оптимальным будет вариант, когда проводники цепей расположены по вершинам треугольника, а цепь 220 кВ расположена ниже цепи 110 (рис. 4.3 – 4.6).



*Ширина санитарно-защитной зоны – не менее 94 м*

Рис. 4.3 Картина поля при горизонтальном расположении фаз, цепь 220 кВ расположена выше цепи 110 кВ.



*Ширина санитарно-защитной зоны – не менее 80 м*

Рис. 4.4 Картина поля при расположении фаз по вершинам треугольника, цепь 220 кВ расположена выше цепи 110 кВ

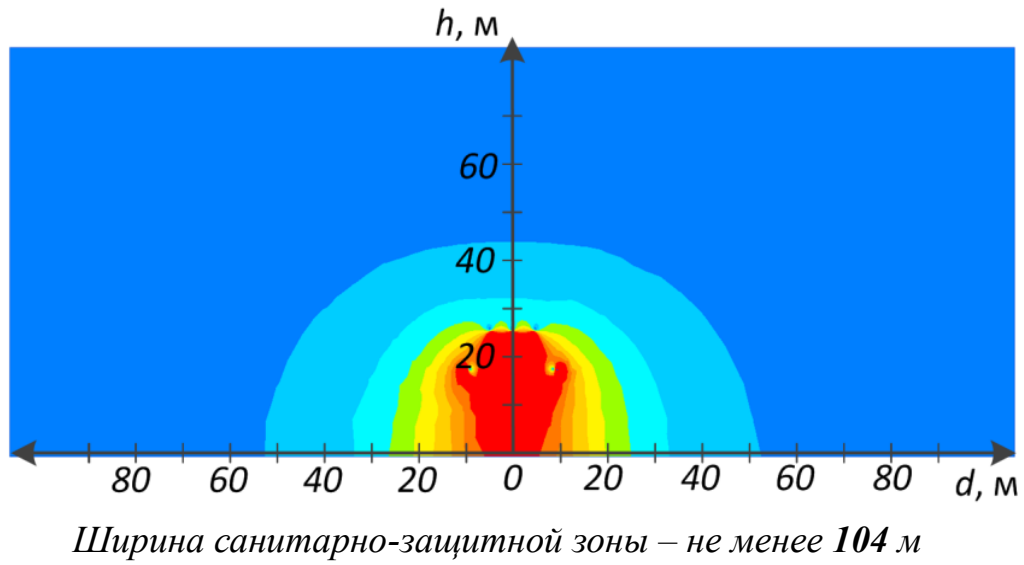


Рис. 4.5 Картина поля при горизонтальном расположении фаз, цепь 220 кВ расположена ниже цепи 110 кВ

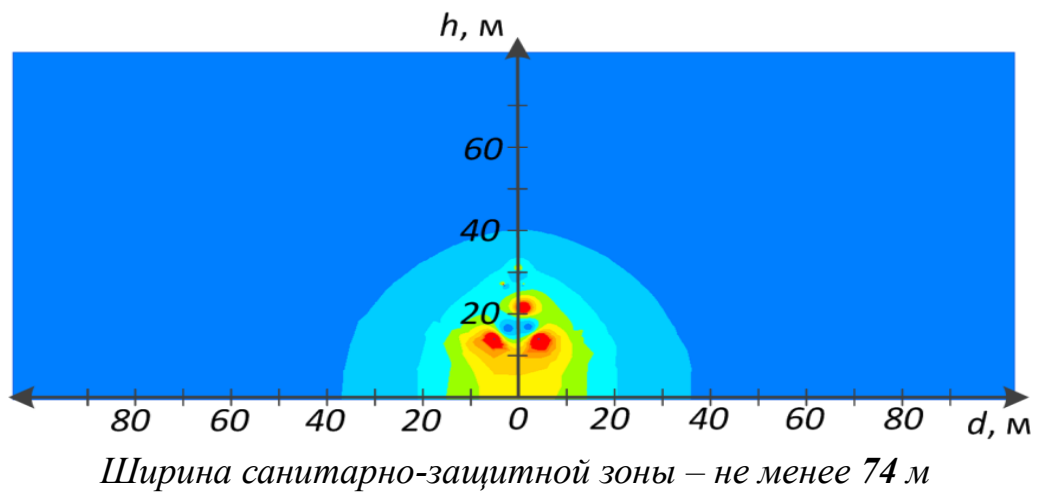


Рис. 4.6 Картина поля при расположении фаз по вершинам треугольника, цепь 220 кВ расположена ниже цепи 110 кВ.

### 4.3. Сравнение результатов расчёта стационарных режимов на основе однолинейных моделей, на основе многопроводных схем замещения и на основе эквивалентных однопроводных схем.

Для разработанной математической модели МВЛ в виде многопроводной схемы замещения произведена серия расчётов УР многоцепной комбинированной линии 35-110 кВ длиной 35 км с целью определения величин потерь активной мощности  $\Delta P$ , соответствующих различным значениям мощности нагрузки цепи  $S_n$ . Для обеспечения сопоставимости результатов принято неизменное значение коэффициента активной мощности, равное 0,91. Полученные результаты сравнивались с результатами расчёта аналогичных режимов рассматриваемой линии посредством традиционной однолинейной схемы замещения, не учитывающей ВСЦ (рисунок 4.7).

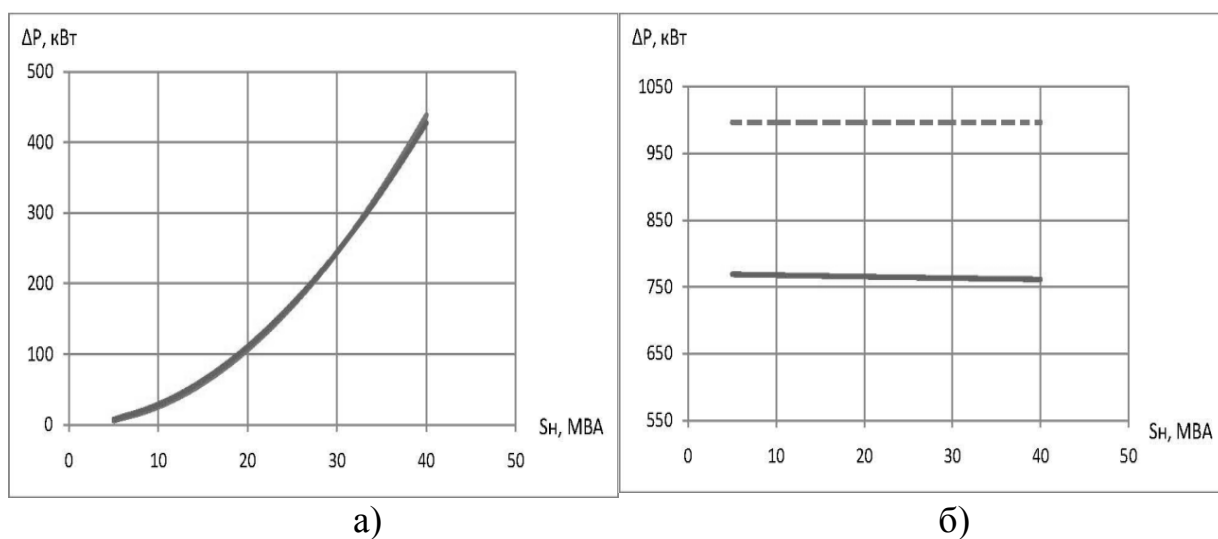


Рис. 4.7. Результаты расчёта потерь активной мощности в цепи 110 кВ (а) и 35 кВ (б), выполненного с использованием однопроводной (- - -) и многопроводной (—) схем замещения.



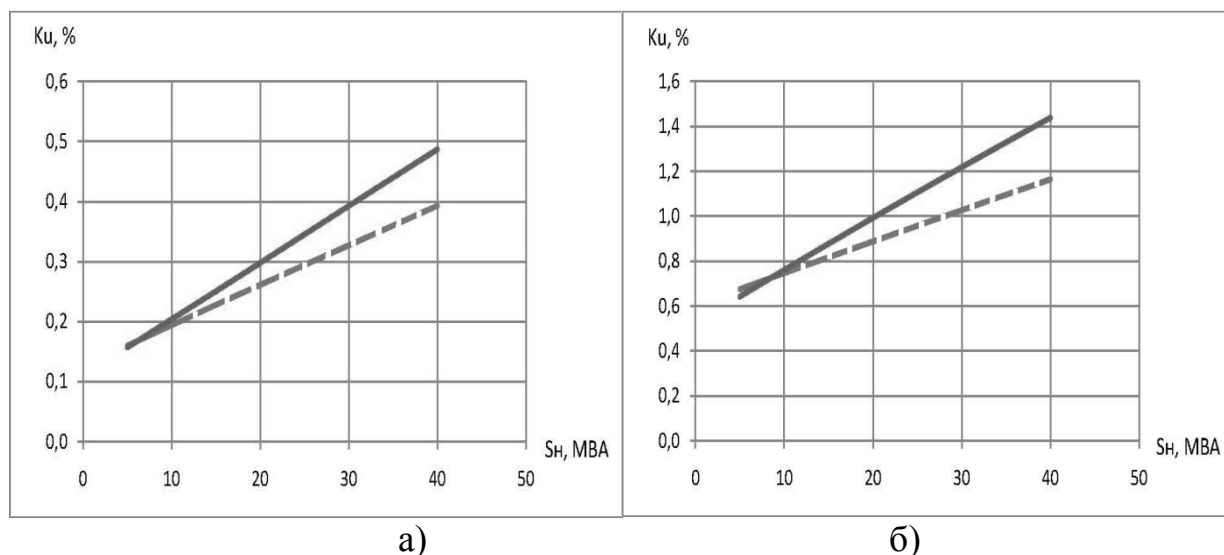
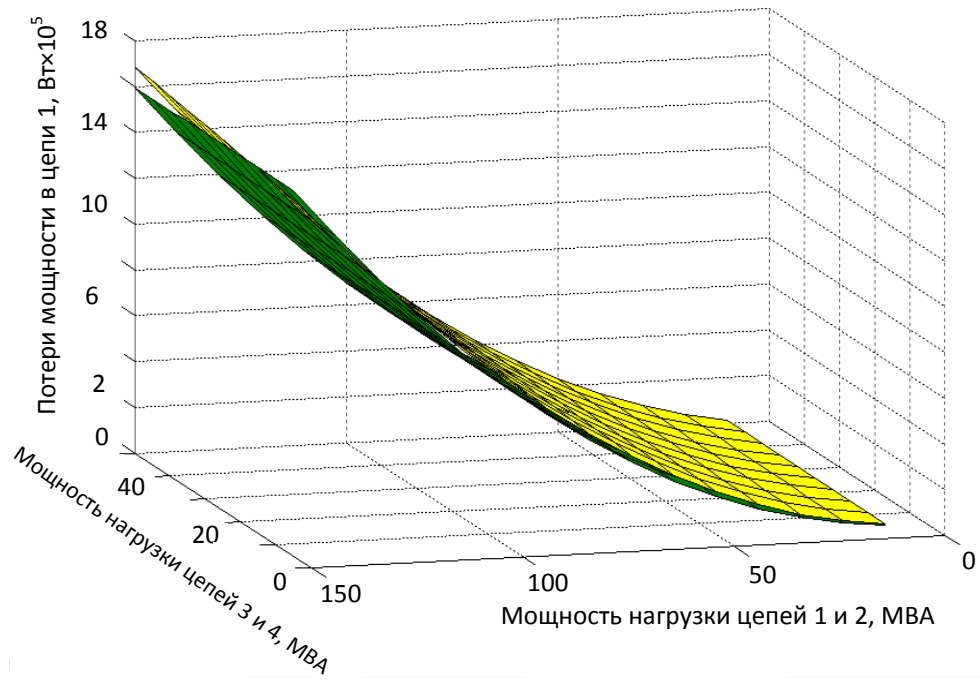


Рис. 4.8. Результаты расчёта коэффициентов несимметрии напряжения в цепи 110 кВ (а) и 35 кВ (б) по обратной (- - -) и нулевой (—) последовательностям.

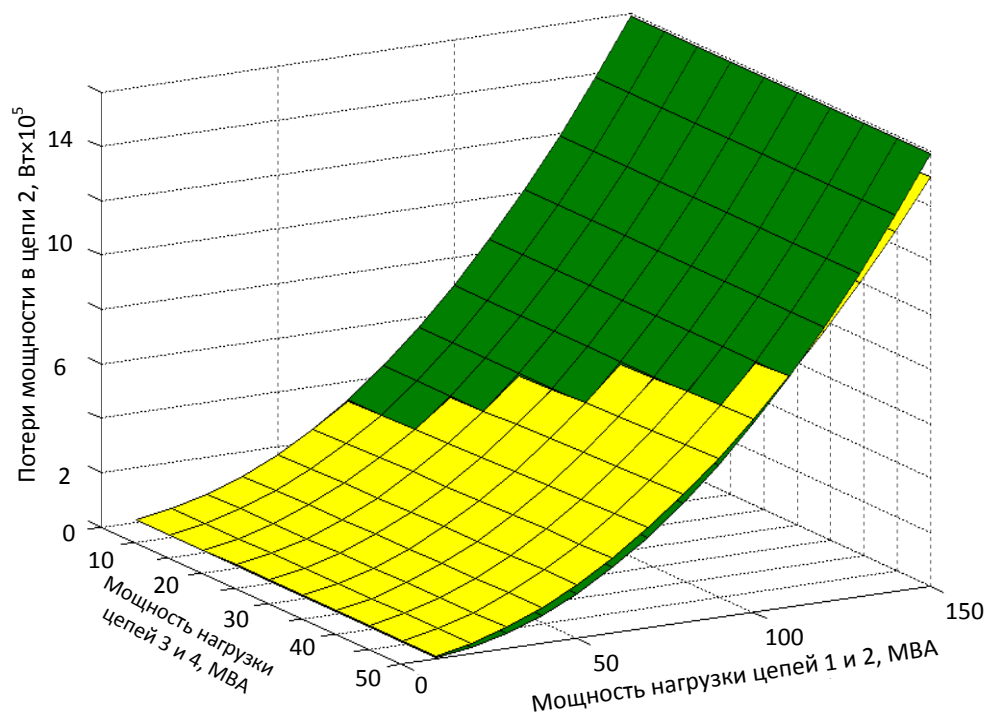
При сравнении полученных результатов с результатами расчёта по традиционной однолинейной схеме замещения можно заметить, что относительная погрешность, возникающая при использовании однолинейных схем, достигает десятков процентов.

Для оценки несимметрии напряжения в тех же режимах можно воспользоваться показателями коэффициентов несимметрии по напряжению по обратной ( $K_{2u}$ ) и нулевой ( $K_{0u}$ ) последовательности (рисунок 4.8), определёнными ГОСТ 13109-97.

Необходимо отметить, что величина  $K_{0u}$  не нормируется для рассматриваемых классов напряжения, а значения  $K_{2u}$  в большинстве рассмотренных случаев не превышают допустимых, однако они накладывают ограничения на несимметричность нагрузки МВЛ. Кроме того, наличие фазной несимметрии напряжения при абсолютно симметричной нагрузке ещё раз подтверждает значительность параметрической несимметрии МВЛ.

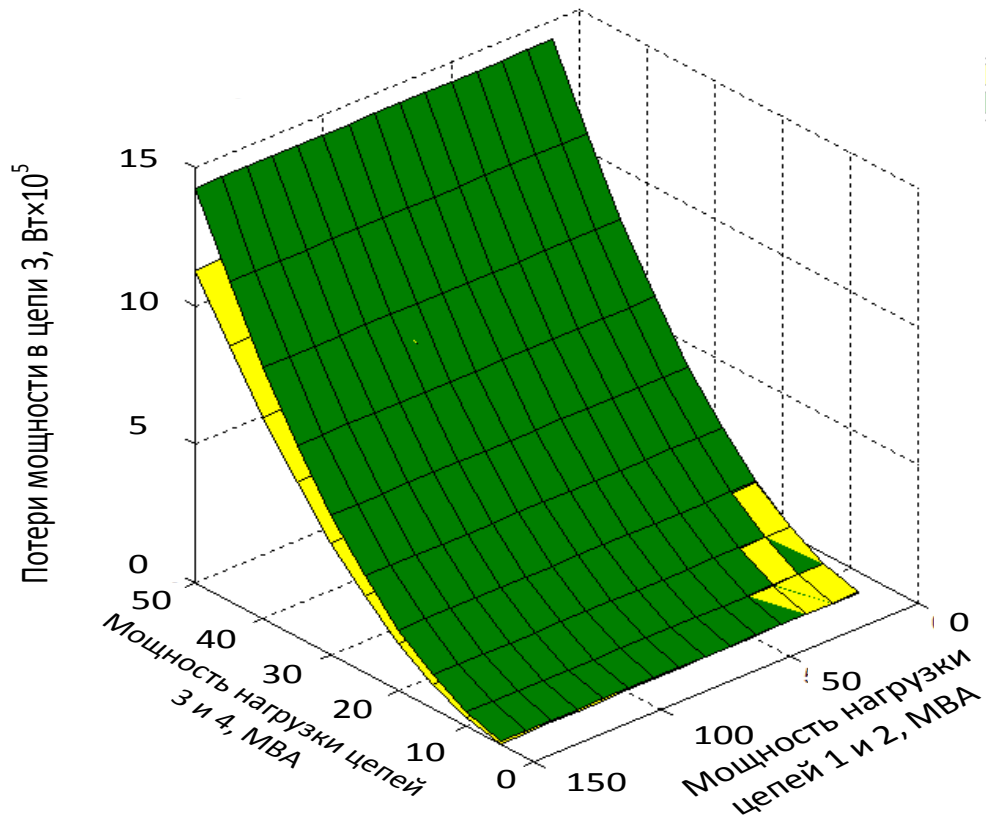


а)

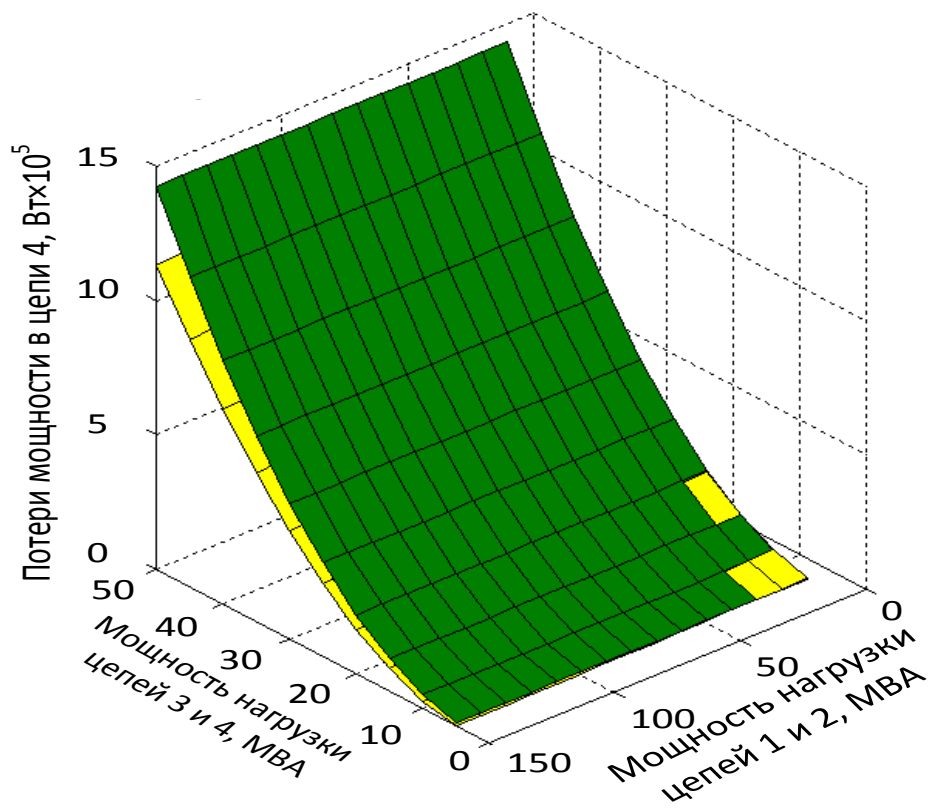


б)

Рис. 4.9. Величины потерь в цепях четырёхцепной МВЛ, полученные с использованием однопроводных и многопроводных моделей.



в)



г)

Рис. 4.9. Величины потерь в цепях четырёхцепной МВЛ, полученные с использованием однопроводных и многопроводных моделей.

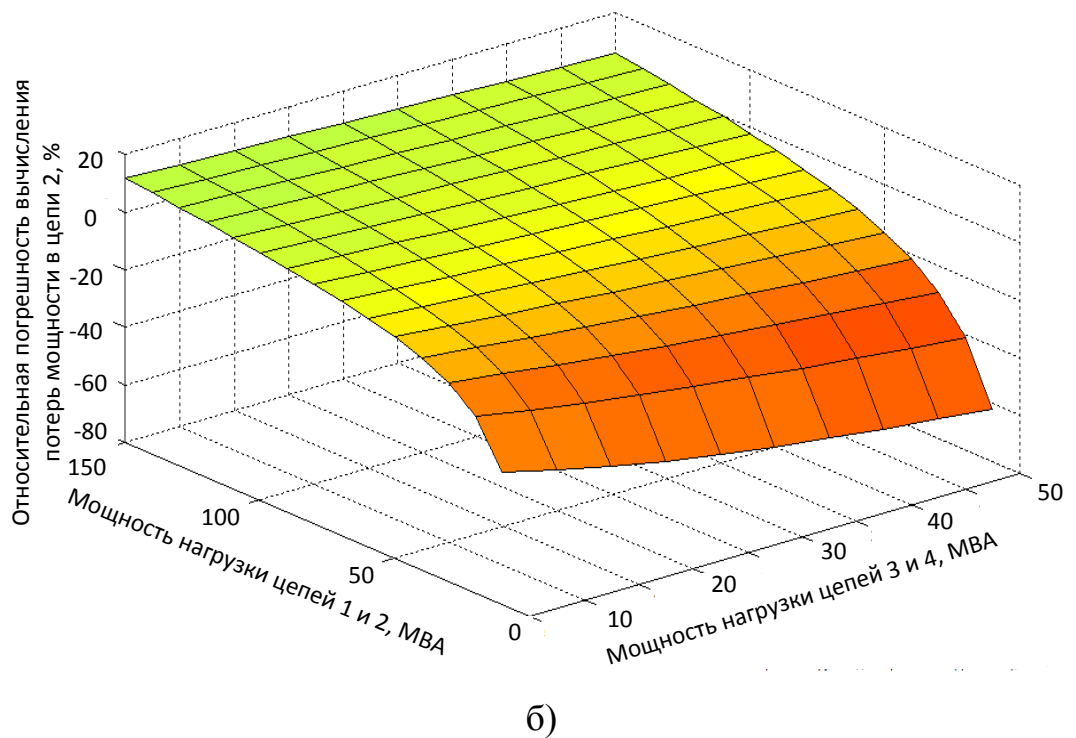
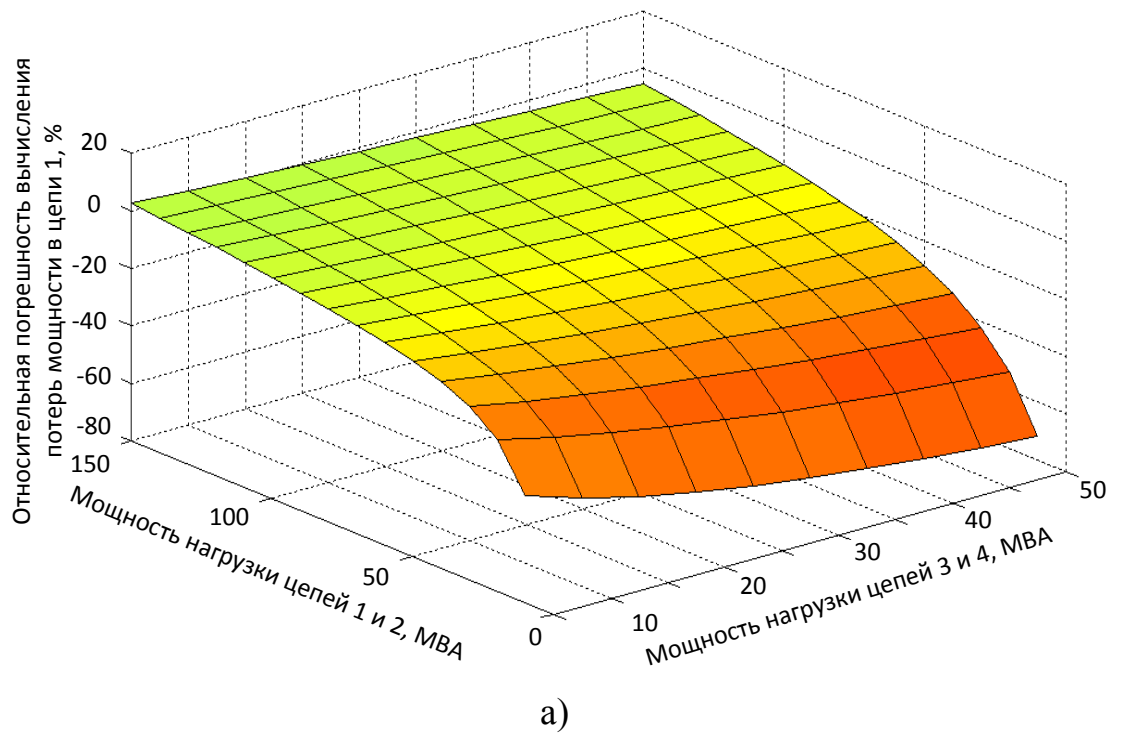


Рис. 4.10. Погрешности однопроводных моделей при определении величины потерь в цепях четырёхцепной МВЛ.

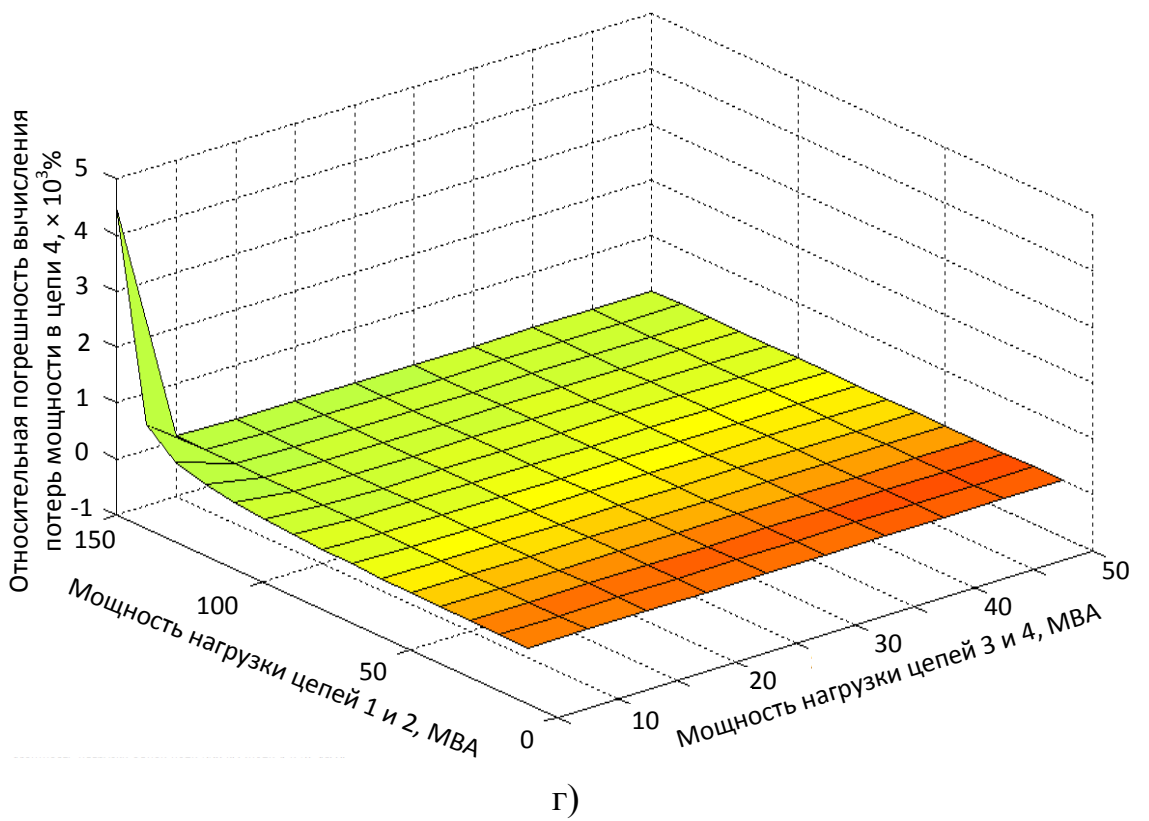
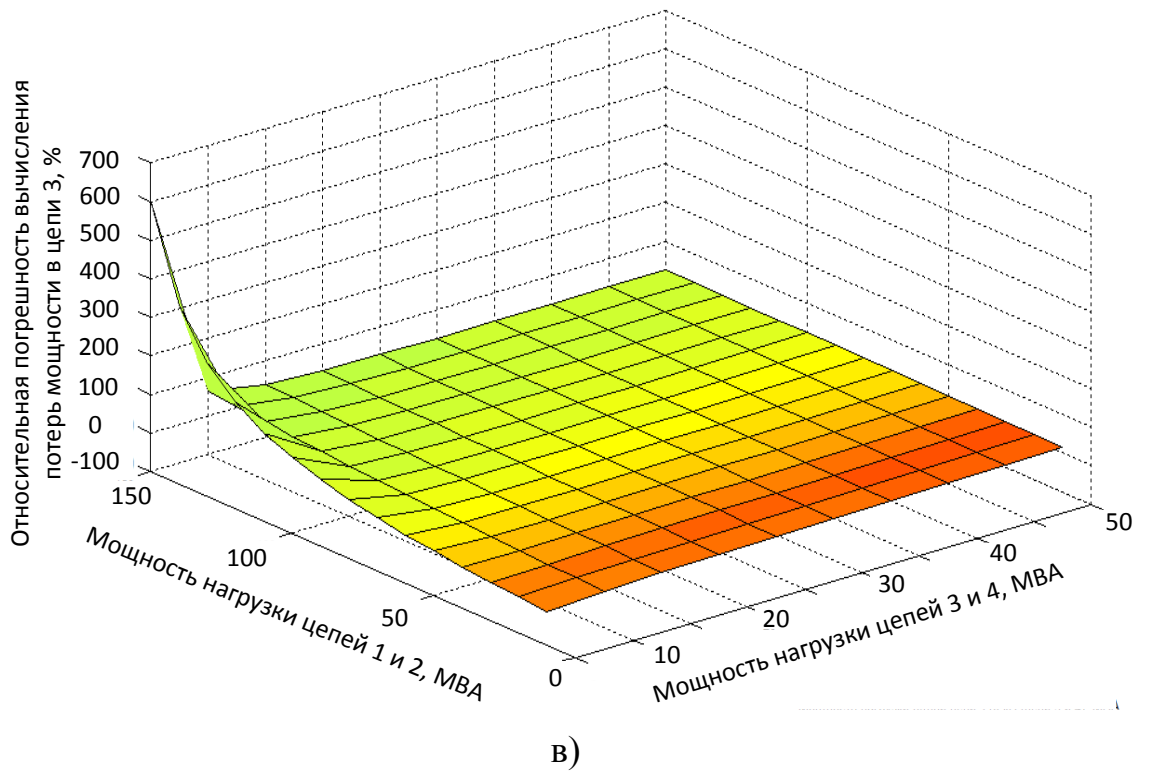


Рис. 4.10. Погрешности однопроводных моделей при определении величины потерь в цепях четырёхцепной МВЛ.

Для разработанной математической модели МВЛ в виде многопроводной схемы замещения произведена серия расчётов УР четырёхцепной комбинированной линии (рис. 4.11) длиной 60 км, с симметричной нагрузкой в цепях одного класса напряжения с коэффициентом активной мощности, равным 0,8. В результате расчёта определялась величина потерь активной мощности в проводниках каждой цепи  $\Delta P_{\text{ММ}}$ . Аналогичные расчёты проведены с помощью традиционных однопроводных моделей. В их результаты определены величины потерь активной мощности в каждой цепи  $\Delta P_{\text{ОМ}}$ . Затем для каждой  $n$ -й цепи определена относительная погрешность вычисления потерь активной мощности  $\varepsilon_{\Delta P_n}$ , вызванная использованием однопроводных моделей МВЛ.

$$\varepsilon_{\Delta P_n} = \frac{\Delta P_{\text{ОМ}} - \Delta P_{\text{ММ}}}{\Delta P_{\text{ММ}}} \cdot 100\% .$$

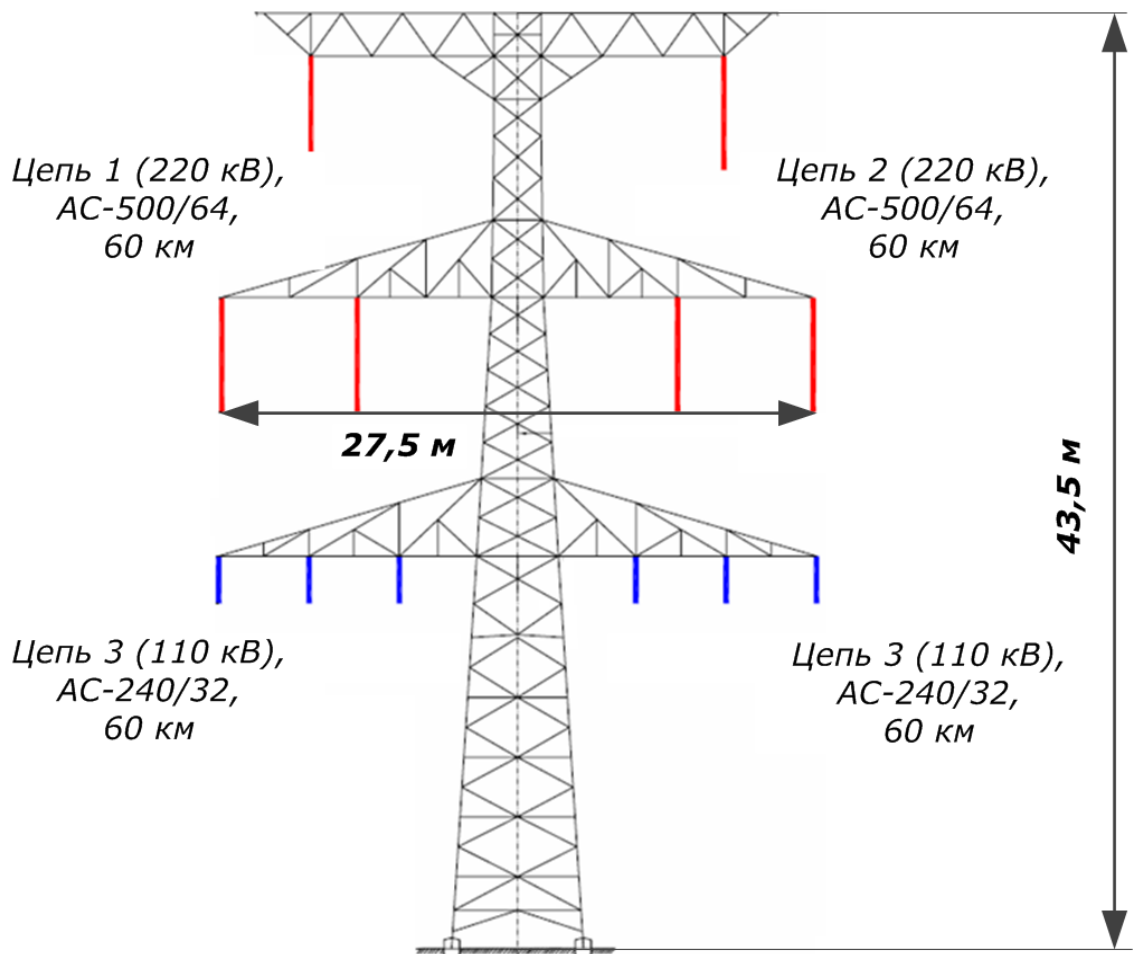


Рис. 4.11. К расчёту режима четырёхцепной комбинированной линии

Таблица 4.1

Относительная погрешность расчёта потерь активной мощности  $\epsilon_{\Delta P}$  в четырёхцепной комбинированной МВЛ (рис. 4.11) 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	$\epsilon_{\Delta P1}, \%$
		-34,01	-38,86	-43,07	-46,75	-49,99	-52,86	-55,42	-57,72	-59,79	-61,66	$\epsilon_{\Delta P2}, \%$
		-13,36	-4,73	-0,33	2,80	5,41	7,76	9,96	12,08	14,15	16,18	$\epsilon_{\Delta P3}, \%$
		-14,34	-6,12	-1,90	1,12	3,64	5,91	8,05	10,10	12,11	14,09	$\epsilon_{\Delta P4}, \%$
	30	-19,88	-23,46	-26,66	-29,52	-32,10	-34,44	-36,58	-38,52	-40,31	-41,96	$\epsilon_{\Delta P1}, \%$
		-10,99	-13,47	-15,82	-18,04	-20,16	-22,17	-24,08	-25,89	-27,62	-29,26	$\epsilon_{\Delta P2}, \%$
		-1,41	1,22	3,69	5,87	7,91	9,88	11,81	13,73	15,64	17,56	$\epsilon_{\Delta P3}, \%$
		-0,82	0,58	2,66	4,61	6,50	8,35	10,18	12,01	13,84	15,69	$\epsilon_{\Delta P4}, \%$
	50	-12,08	-14,55	-16,83	-18,94	-20,88	-22,69	-24,38	-25,95	-27,42	-28,79	$\epsilon_{\Delta P1}, \%$
		-3,14	-4,83	-6,47	-8,05	-9,58	-11,05	-12,47	-13,85	-15,18	-16,46	$\epsilon_{\Delta P2}, \%$
		14,65	8,07	8,11	9,17	10,56	12,10	13,74	15,44	17,18	18,97	$\epsilon_{\Delta P3}, \%$
		18,04	8,40	7,70	8,38	9,54	10,91	12,41	13,99	15,64	17,33	$\epsilon_{\Delta P4}, \%$
	70	-7,65	-9,56	-11,34	-13,01	-14,57	-16,04	-17,42	-18,72	-19,95	-21,11	$\epsilon_{\Delta P1}, \%$
		1,35	0,04	-1,24	-2,47	-3,68	-4,85	-5,99	-7,10	-8,17	-9,22	$\epsilon_{\Delta P2}, \%$
		37,28	15,99	12,98	12,71	13,36	14,44	15,75	17,21	18,77	20,41	$\epsilon_{\Delta P3}, \%$
		46,13	17,62	13,30	12,45	12,76	13,60	14,73	16,05	17,49	19,02	$\epsilon_{\Delta P4}, \%$
	90	-4,45	-6,02	-7,50	-8,89	-10,20	-11,44	-12,61	-13,72	-14,78	-15,78	$\epsilon_{\Delta P1}, \%$
		4,61	3,53	2,47	1,44	0,44	-0,54	-1,50	-2,43	-3,34	-4,23	$\epsilon_{\Delta P2}, \%$
		71,45	25,26	18,34	16,51	16,32	16,88	17,84	19,04	20,41	21,90	$\epsilon_{\Delta P3}, \%$
		92,28	28,64	19,54	16,86	16,19	16,43	17,16	18,18	19,40	20,75	$\epsilon_{\Delta P4}, \%$
	110	-1,83	-3,17	-4,44	-5,64	-6,78	-7,86	-8,88	-9,85	-10,78	-11,67	$\epsilon_{\Delta P1}, \%$
		7,30	6,37	5,46	4,57	3,70	2,86	2,02	1,21	0,42	-0,36	$\epsilon_{\Delta P2}, \%$
		128,87	36,23	24,28	20,60	19,46	19,44	20,01	20,94	22,10	23,43	$\epsilon_{\Delta P3}, \%$
		181,90	42,01	26,55	21,63	19,85	19,41	19,68	20,38	21,36	22,53	$\epsilon_{\Delta P4}, \%$
	130	0,48	-0,70	-1,82	-2,88	-3,89	-4,85	-5,76	-6,63	-7,47	-8,26	$\epsilon_{\Delta P1}, \%$
		9,69	8,87	8,06	7,27	6,50	5,75	5,01	4,29	3,58	2,89	$\epsilon_{\Delta P2}, \%$
		245,24	49,38	30,88	25,01	22,79	22,12	22,27	22,89	23,83	24,99	$\epsilon_{\Delta P3}, \%$
		430,30	58,55	34,45	26,83	23,74	22,54	22,32	22,67	23,39	24,36	$\epsilon_{\Delta P4}, \%$
	150	2,61	1,55	0,54	-0,42	-1,33	-2,19	-3,02	-3,81	-4,57	-5,30	$\epsilon_{\Delta P1}, \%$
		11,90	11,16	10,43	9,72	9,02	8,34	7,67	7,01	6,37	5,74	$\epsilon_{\Delta P2}, \%$
		605,79	65,41	38,24	29,76	26,31	24,93	24,61	24,92	25,62	26,59	$\epsilon_{\Delta P3}, \%$
		4488,21	79,50	43,42	32,49	27,89	25,84	25,07	25,04	25,48	26,24	$\epsilon_{\Delta P4}, \%$

По результатам данного расчёта, представленным в таблице 4.1, наблюдается вызванный ВСЦ переход мощности из одной цепи в другую, поскольку при неизменной величине нагрузки одной из цепей величина потерь в ней  $\Delta P_{\text{ММ}}$  зависит от режима соседних цепей, что проиллюстрировано на рис. 4.9, 4.10.

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

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 снизить величину потерь мощности в ЭЭС.

Для этого 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 математических описаний, хорошим совпадением результатов по отдельным позициям реализации с подобными моделями и результатами известных исследований [88-92], а также данными телеизмерений. Последние, к сожалению, пока 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.

Однако, именно эти разностные параметры режимов наиболее чувствительны к погрешностям методов измерений и расчетов, поэтому, в качестве результатов компьютерного эксперимента в таблице 2 представлены расчётные значения потерь активной мощности в установившихся режимах общего участка четырёхцепной комбинированной МВЛ длиной 60 км (рис. 4.11). 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 2) 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 4.2).

Таблица 4.2

Величины потерь активной мощности (кВт) в цепях 110 ÷ 220 кВ общего участка четырёхцепной МВЛ (рис. 4.11), вычисленные с использованием многопроводных и однопроводных моделей

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

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

$\Delta P_{YOMi}$  - по эквивалентной однолинейной схеме замещения с приближенным учетом ВСЦ, как иллюстрация возможности применения общепринятого программного обеспечения анализа установившихся режимов;

$\Delta P_{OMi}$  - по традиционной однопроводной модели (в таблице 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 4.2 определяется величиной нагрузок цепей, для которых выполнен расчёт  $\Delta P$ , указанных в верхней и нижней координатных строках таблицы.

По результатам, представленным в таблице 4.2, 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 4.2 показывает, что разница между  $\Delta P_{\text{ММ}}$ , и  $\Delta P_{\text{УОМ}}$  в основном находится в пределах 5 ÷ 10%, что говорит о возможности использования предлагаемой методики приближённого учета ВСЦ в расчетах при проектировании и эксплуатации МВЛ, когда эта разница соизмерима с погрешностями исходных данных.

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 минимальных значений в 1 ÷ 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.

Говоря подробнее о применении дополненных (уточнённых) однопроводных моделей, с помощью которых определены значения  $\Delta P_{\text{УОМ}i}$ , построенных на основе выражений, приближённо учитывающих ВСЦ в однопроводных моделях сети, можно утверждать, что они в большинстве случаев ориентированы на определение параметров режима МВЛ с помощью

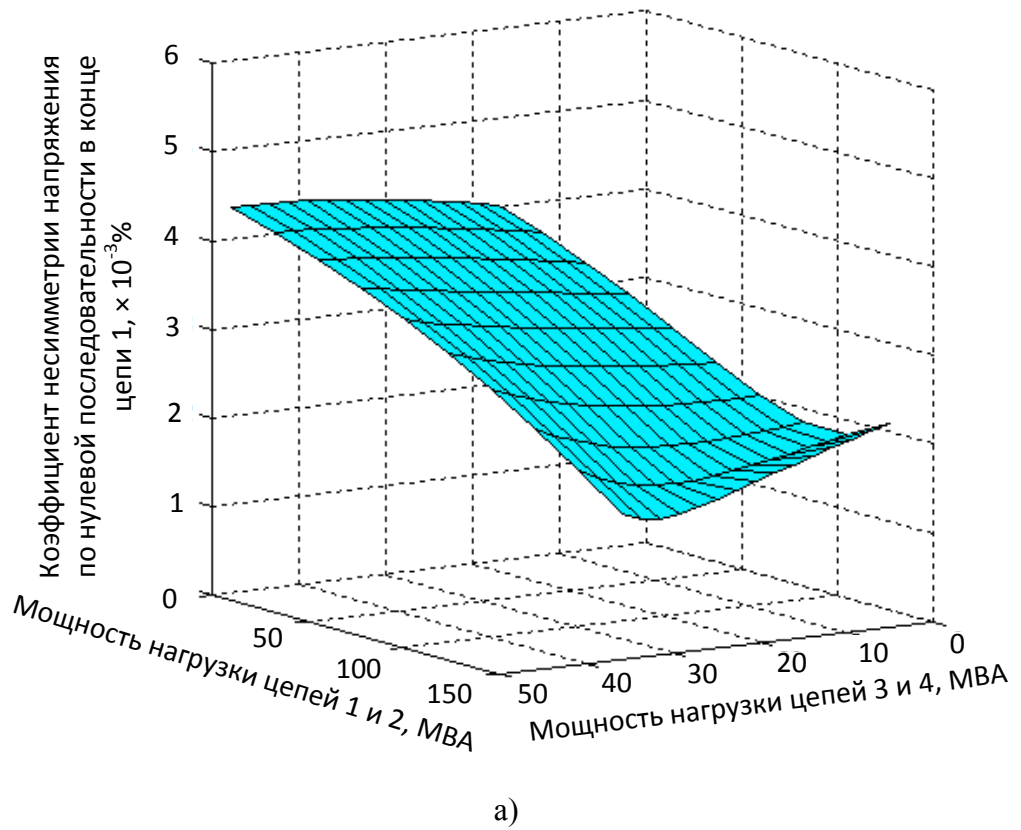
программных комплексов, широко распространенных в проектировании и эксплуатации.

Однако, при этом, как было показано выше, в состав расчетной схемы замещения необходимо вводить дополнительные пассивные блоки, приближенно учитывающие ВСЦ. Их построение целью снижения названных погрешностей будет уточнено авторами в продолжении работ в данном направлении.

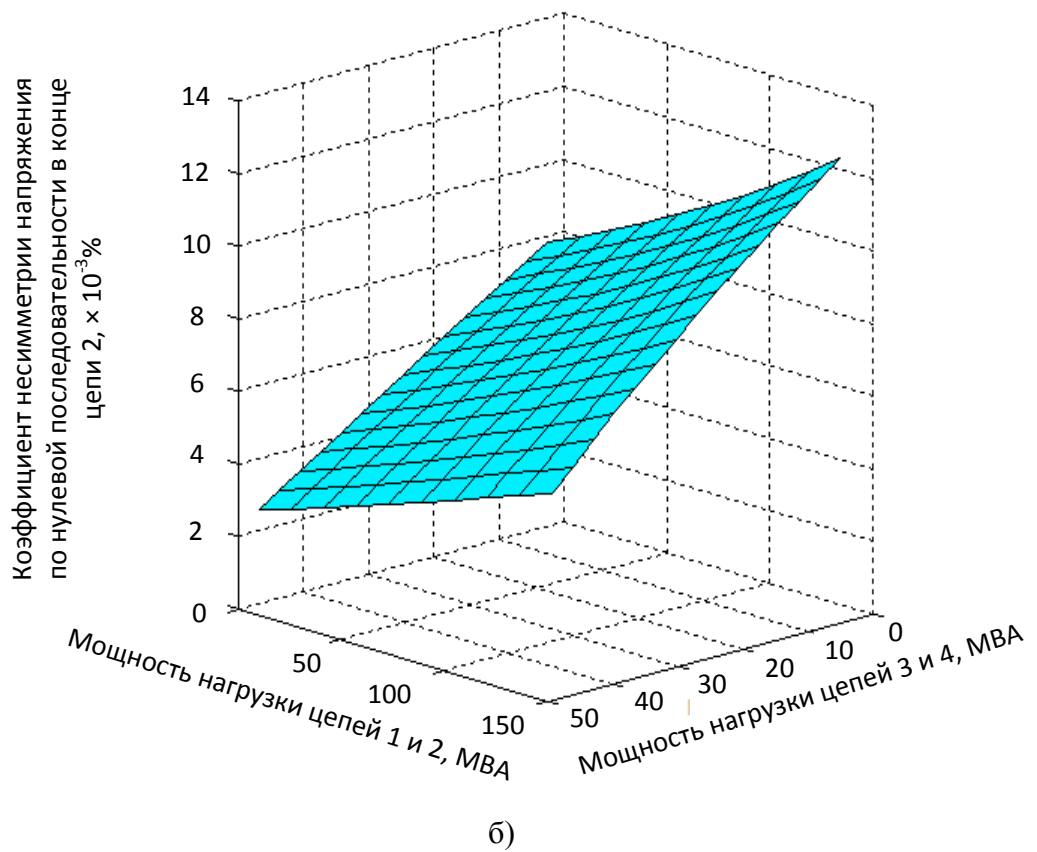
Можно предположить, что в недалеком будущем названные выше программные комплексы будут работать с трехпроводными схемами электрических сетей, поскольку уже есть сведения об их разработке и даже эксплуатации. Однако по МВЛ это потребует соответствующей стыковки многоцепных участков с трехпроводной схемой замещения сети, основные принципы которой приведены выше.

#### **4.4. Расчёт несимметрии напряжения в конце многоцепной комбинированной воздушной линии в установившемся режиме.**

Поскольку параметры режима, полученные по приведённой выше методике, могут быть определены пофазно, результаты этого расчёта могут быть использованы для вычисления коэффициентов несимметрии напряжения в конце каждой цепи по обратной и нулевой последовательности. Результаты данного расчёта для линии, рассмотренной в предыдущем параграфе представлены на рис. 4.12 и в таблицах 4.3, 4.4.



а)



б)

Рис. 4.12. Коэффициент несимметрии напряжения по нулевой последовательности в цепях четырёхцепной МВЛ.

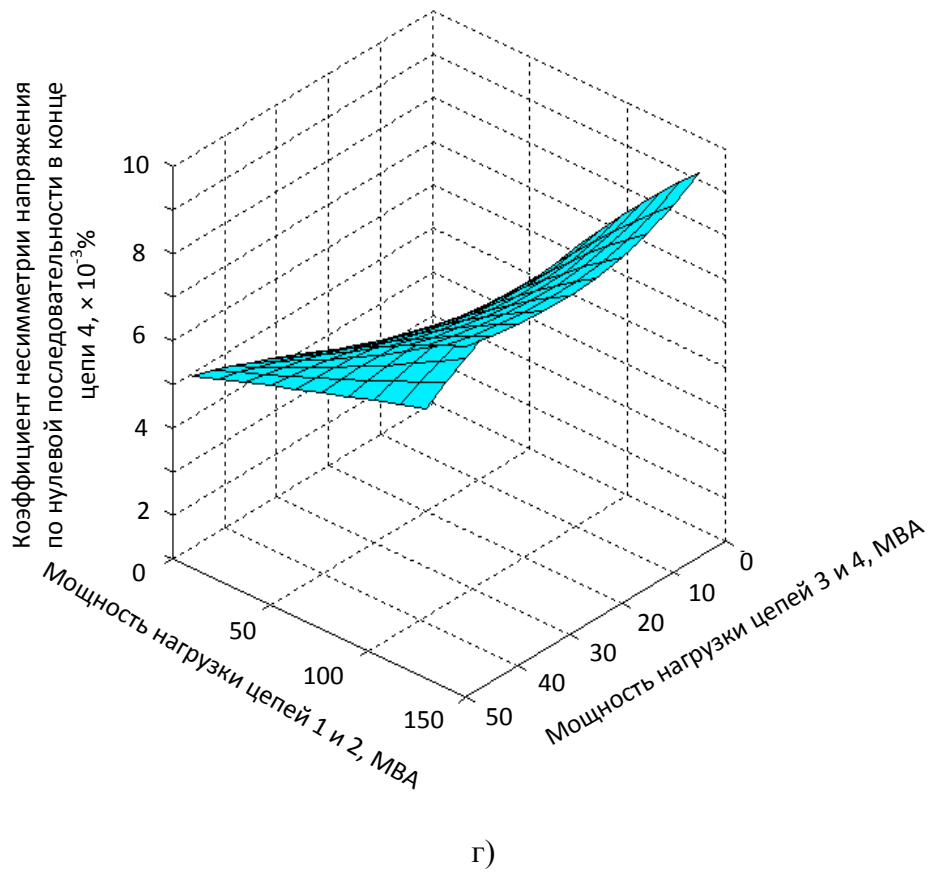
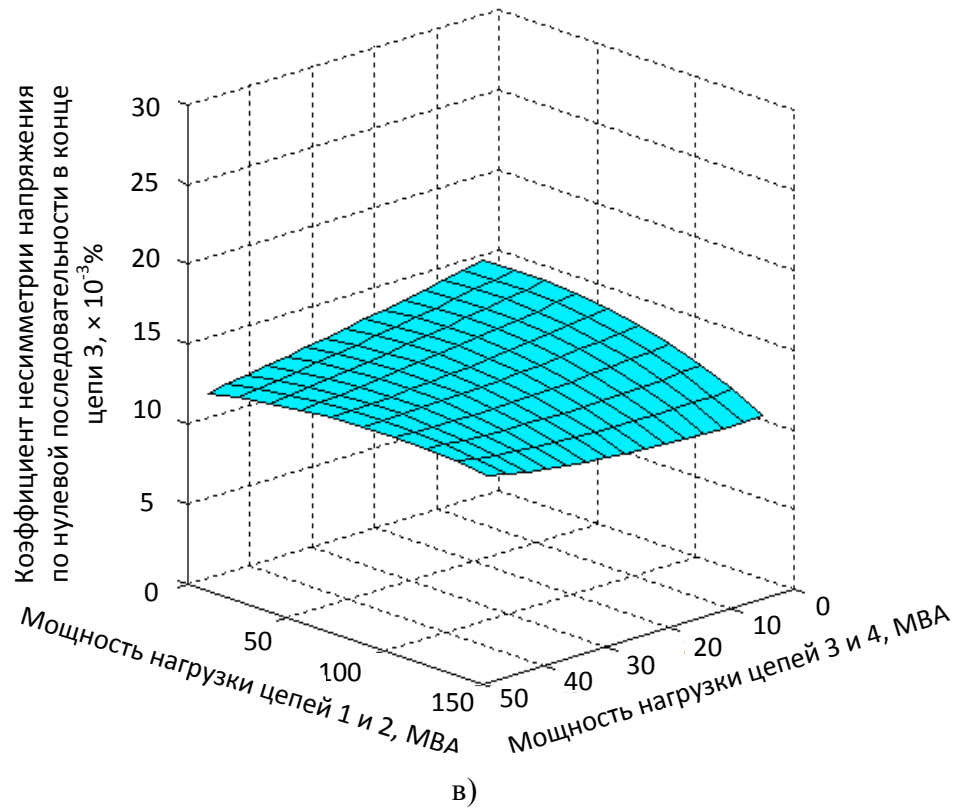


Рис. 4.12. Коэффициент несимметрии напряжения по нулевой последовательности в цепях четырёхцепной МВЛ.

Таблица 4.3

Относительная погрешность расчёта потерь активной мощности  $K_{2U}$  в четырёхцепной 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	0,0912	0,0911	0,0911	0,0911	0,0911	0,0911	0,0911	0,0910	0,0910	0,0910	$K_{2U}(1)$
		0,0910	0,0910	0,0909	0,0908	0,0907	0,0906	0,0906	0,0905	0,0904	0,0910	$K_{2U}(2)$
		0,0905	0,0899	0,0893	0,0887	0,0882	0,0876	0,0870	0,0865	0,0860	0,0905	$K_{2U}(3)$
		0,0906	0,0900	0,0894	0,0889	0,0883	0,0878	0,0872	0,0867	0,0862	0,0906	$K_{2U}(4)$
	30	0,0909	0,0909	0,0909	0,0909	0,0909	0,0908	0,0908	0,0908	0,0908	0,0908	$K_{2U}(1)$
		0,0907	0,0906	0,0905	0,0905	0,0904	0,0903	0,0902	0,0902	0,0901	0,0907	$K_{2U}(2)$
		0,0903	0,0897	0,0891	0,0885	0,0879	0,0874	0,0868	0,0862	0,0857	0,0903	$K_{2U}(3)$
		0,0905	0,0899	0,0893	0,0887	0,0882	0,0876	0,0871	0,0866	0,0860	0,0905	$K_{2U}(4)$
	50	0,0907	0,0907	0,0907	0,0907	0,0906	0,0906	0,0906	0,0906	0,0906	0,0907	$K_{2U}(1)$
		0,0904	0,0903	0,0902	0,0902	0,0901	0,0900	0,0899	0,0899	0,0898	0,0904	$K_{2U}(2)$
		0,0900	0,0894	0,0888	0,0882	0,0877	0,0871	0,0865	0,0860	0,0855	0,0900	$K_{2U}(3)$
		0,0904	0,0898	0,0892	0,0886	0,0881	0,0875	0,0870	0,0864	0,0859	0,0904	$K_{2U}(4)$
	70	0,0905	0,0905	0,0905	0,0905	0,0904	0,0904	0,0904	0,0904	0,0904	0,0905	$K_{2U}(1)$
		0,0901	0,0900	0,0899	0,0899	0,0898	0,0897	0,0896	0,0896	0,0895	0,0901	$K_{2U}(2)$
		0,0898	0,0892	0,0886	0,0880	0,0874	0,0869	0,0863	0,0857	0,0852	0,0898	$K_{2U}(3)$
		0,0903	0,0897	0,0891	0,0885	0,0879	0,0874	0,0868	0,0863	0,0858	0,0903	$K_{2U}(4)$
	90	0,0903	0,0903	0,0903	0,0903	0,0903	0,0902	0,0902	0,0902	0,0902	0,0902	$K_{2U}(1)$
		0,0898	0,0897	0,0897	0,0896	0,0895	0,0894	0,0894	0,0893	0,0892	0,0898	$K_{2U}(2)$
		0,0895	0,0889	0,0883	0,0877	0,0872	0,0866	0,0860	0,0855	0,0850	0,0895	$K_{2U}(3)$
		0,0902	0,0895	0,0890	0,0884	0,0878	0,0873	0,0867	0,0862	0,0856	0,0902	$K_{2U}(4)$
	110	0,0901	0,0901	0,0901	0,0901	0,0901	0,0901	0,0901	0,0900	0,0900	0,0901	$K_{2U}(1)$
		0,0896	0,0895	0,0894	0,0893	0,0893	0,0892	0,0891	0,0891	0,0890	0,0896	$K_{2U}(2)$
		0,0893	0,0887	0,0881	0,0875	0,0869	0,0864	0,0858	0,0853	0,0847	0,0893	$K_{2U}(3)$
		0,0900	0,0894	0,0888	0,0883	0,0877	0,0871	0,0866	0,0860	0,0855	0,0900	$K_{2U}(4)$
	130	0,0900	0,0900	0,0900	0,0900	0,0899	0,0899	0,0899	0,0899	0,0899	0,0900	$K_{2U}(1)$
		0,0893	0,0893	0,0892	0,0891	0,0890	0,0890	0,0889	0,0888	0,0887	0,0893	$K_{2U}(2)$
		0,0890	0,0884	0,0878	0,0872	0,0867	0,0861	0,0856	0,0850	0,0845	0,0890	$K_{2U}(3)$
		0,0899	0,0893	0,0887	0,0881	0,0876	0,0870	0,0864	0,0859	0,0854	0,0899	$K_{2U}(4)$
	150	0,0898	0,0898	0,0898	0,0898	0,0898	0,0898	0,0898	0,0898	0,0897	0,0898	$K_{2U}(1)$
		0,0891	0,0890	0,0890	0,0889	0,0888	0,0887	0,0887	0,0886	0,0885	0,0891	$K_{2U}(2)$
		0,0888	0,0882	0,0876	0,0870	0,0864	0,0859	0,0853	0,0848	0,0842	0,0888	$K_{2U}(3)$
		0,0898	0,0892	0,0886	0,0880	0,0874	0,0869	0,0863	0,0858	0,0853	0,0898	$K_{2U}(4)$

Таблица 4.4

Относительная погрешность расчёта потерь активной мощности  $K_{OU}$  в четырёхцепной комбинированной МВЛ (рис. 4.11) 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	0,0005	0,0010	0,0015	0,0020	0,0025	0,0029	0,0033	0,0037	0,0041	0,0044	$K_{OU(1)}$
		0,0012	0,0014	0,0015	0,0017	0,0019	0,0021	0,0023	0,0025	0,0027	0,0012	$K_{OU(2)}$
		0,0019	0,0034	0,0048	0,0061	0,0073	0,0085	0,0096	0,0106	0,0115	0,0019	$K_{OU(3)}$
		0,0014	0,0019	0,0023	0,0028	0,0032	0,0037	0,0041	0,0046	0,0050	0,0014	$K_{OU(4)}$
	30	0,0005	0,0010	0,0015	0,0020	0,0025	0,0030	0,0034	0,0039	0,0042	0,0005	$K_{OU(1)}$
		0,0030	0,0031	0,0032	0,0034	0,0035	0,0036	0,0038	0,0040	0,0041	0,0030	$K_{OU(2)}$
		0,0030	0,0046	0,0061	0,0076	0,0089	0,0102	0,0113	0,0124	0,0134	0,0030	$K_{OU(3)}$
		0,0030	0,0033	0,0036	0,0039	0,0043	0,0046	0,0050	0,0053	0,0057	0,0030	$K_{OU(4)}$
	50	0,0008	0,0011	0,0016	0,0021	0,0026	0,0031	0,0036	0,0040	0,0044	0,0008	$K_{OU(1)}$
		0,0048	0,0048	0,0049	0,0050	0,0051	0,0052	0,0053	0,0054	0,0056	0,0048	$K_{OU(2)}$
		0,0042	0,0059	0,0076	0,0091	0,0106	0,0119	0,0131	0,0143	0,0154	0,0163	$K_{OU(3)}$
		0,0045	0,0046	0,0048	0,0050	0,0052	0,0055	0,0057	0,0060	0,0063	0,0045	$K_{OU(4)}$
	70	0,0011	0,0012	0,0017	0,0022	0,0027	0,0032	0,0037	0,0041	0,0045	0,0011	$K_{OU(1)}$
		0,0065	0,0065	0,0065	0,0065	0,0066	0,0067	0,0068	0,0069	0,0070	0,0065	$K_{OU(2)}$
		0,0055	0,0074	0,0091	0,0108	0,0123	0,0137	0,0150	0,0162	0,0173	0,0055	$K_{OU(3)}$
		0,0058	0,0058	0,0058	0,0059	0,0061	0,0062	0,0065	0,0067	0,0069	0,0058	$K_{OU(4)}$
	90	0,0014	0,0015	0,0018	0,0023	0,0028	0,0033	0,0038	0,0042	0,0046	0,0014	$K_{OU(1)}$
		0,0081	0,0081	0,0080	0,0080	0,0081	0,0081	0,0082	0,0083	0,0084	0,0081	$K_{OU(2)}$
		0,0069	0,0089	0,0107	0,0124	0,0140	0,0155	0,0169	0,0181	0,0193	0,0069	$K_{OU(3)}$
		0,0069	0,0068	0,0068	0,0068	0,0069	0,0070	0,0071	0,0073	0,0075	0,0069	$K_{OU(4)}$
	110	0,0017	0,0017	0,0020	0,0025	0,0029	0,0034	0,0039	0,0043	0,0047	0,0017	$K_{OU(1)}$
		0,0097	0,0096	0,0096	0,0095	0,0096	0,0096	0,0096	0,0097	0,0098	0,0097	$K_{OU(2)}$
		0,0083	0,0104	0,0124	0,0142	0,0158	0,0174	0,0188	0,0201	0,0213	0,0083	$K_{OU(3)}$
		0,0080	0,0078	0,0076	0,0076	0,0076	0,0076	0,0077	0,0079	0,0080	0,0080	$K_{OU(4)}$
	130	0,0020	0,0020	0,0022	0,0026	0,0031	0,0035	0,0040	0,0044	0,0048	0,0020	$K_{OU(1)}$
		0,0113	0,0112	0,0111	0,0110	0,0110	0,0110	0,0111	0,0111	0,0112	0,0113	$K_{OU(2)}$
		0,0099	0,0120	0,0140	0,0159	0,0176	0,0192	0,0207	0,0220	0,0233	0,0099	$K_{OU(3)}$
		0,0089	0,0086	0,0084	0,0083	0,0082	0,0082	0,0083	0,0084	0,0085	0,0089	$K_{OU(4)}$
	150	0,0023	0,0022	0,0024	0,0028	0,0032	0,0037	0,0041	0,0045	0,0049	0,0023	$K_{OU(1)}$
		0,0128	0,0127	0,0125	0,0125	0,0124	0,0124	0,0125	0,0125	0,0126	0,0128	$K_{OU(2)}$
		0,0114	0,0137	0,0158	0,0177	0,0195	0,0211	0,0226	0,0240	0,0253	0,0114	$K_{OU(3)}$
		0,0098	0,0094	0,0091	0,0090	0,0088	0,0088	0,0088	0,0088	0,0089	0,0098	$K_{OU(4)}$

#### 4.5. Выводы по главе 4.

- Произведённый расчёт стационарных режимов многоцепных ВЛ в  $Y$  – форме подтверждает, что по параметрам режима в начале и конце цепей достигается совпадение с  $Z$  – формой. При этом можно констатировать отсутствие взаимоиндуктивных связей в расчётной модели.
- Даны рекомендации по оптимизации конструкции вновь сооружаемых МВЛ по условию минимума потерь активной мощности и минимума площади санитарно-защитной зоны.
- Для получения при моделировании установившихся режимов в цепях МВЛ результатов, адекватных действительным значениям параметров, необходимо использовать многопроводные математические модели и методику расчёта режима в фазных координатах. При этом появляется возможность не только учета взаимных несимметричных связей и параметров режимов, но и специфики МВЛ, связанной с различными направлениями передачи по участкам цепей разных напряжений.
- Традиционные математические модели в виде однопроводных схем замещения, как видно из таблицы 4.2, в большинстве случаев при определении таких разностных параметров режимов МВЛ, как потери мощности и падения напряжений, дают значительные погрешности. Очевидно, что величины этих погрешностей превосходят допустимые границы для задач эксплуатации и экономических оценок в проектировании. В отдельных случаях относительная погрешность в определении потерь активной мощности в МВЛ, обусловленная использованием симметричных моделей, достигает значений в сотни процентов.
- Методы расчёта установившихся режимов МВЛ с использованием многопроводных математических моделей могут быть использованы для оптимизации системы электроснабжения по критерию минимума затрат, а также конструкции ВЛ по критерию минимума потерь мощности в фазных проводниках и грозозащитных тросах. Применение таких алгоритмов на стадии проектирования позволит повысить энергоэффективность сетевого комплекса за счет сокращения величины потерь электрической энергии при её передаче.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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÷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÷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.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Carson J. R. LIV. Wave propagation over parallel wires: The proximity effect //The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. – 1921. – Т. 41. – №. 244. – С. 607-633.
2. Berman A., Xu W. Analysis of faulted power systems by phase coordinates //Power Delivery, IEEE Transactions on. – 1998. – Т. 13. – №. 2. – С. 587-595.
3. E. Shishkov, A. Vedernikov, V. Goldstein, N. Podshivalova A calculation of steady-state condition of compact-combined power transmission line using phase-coordinate method. // XIII International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems ELMA 2011. October 2011, Varna, Bulgaria. Proceedings. 346 P. pp. 215-221.
4. Laughton M. A., Adams R. N. Optimal planning of power networks using mixed-integer programming. Part 1: Static and time-phased network synthesis //Electrical Engineers, Proceedings of the Institution of. – 1974. – Т. 121. – №. 2. – С. 139-147.
5. Rudnick H., Munoz M. Influence of modeling in load flow analysis of three phase distribution systems //Colloquium in South America, 1990., Proceedings of the 1990 IEEE. – IEEE, 1990. – С. 173-176.
6. Wang X. et al. A real-time transmission line model for a digital TNA //Power Delivery, IEEE Transactions on. – 1996. – Т. 11. – №. 2. – С. 1092-1097.
7. Абраменкова Н.А., Воропай Н.И., Заславская Т.Б. Структурный анализ электроэнергетических систем в задачах моделирования и синтеза. – Новосибирск: Наука, 1990. – 125 с.
8. Агарков О. А., Кычаков В. П., Тирская В. И. Специализированная программа расчета электромеханических переходных процессов с целью выбора, настройки и моделирования противоаварийного управления электроэнергетических систем //Средства и системы управления в энергетике. М.: Информэнерго. – 1984. – №. 6. – С. 17-20.

9. Александров Г. Н. Воздушные линии электропередачи увеличенной пропускной способности //Электричество. – 1981. – №. 7. – С. 1-6.
10. Александров Г. Н., Бак Л. Т. Уменьшение потерь мощности в дальних линиях электропередачи с управляемыми реакторами //Электричество. – 2007. – №. 3. – С. 8-15.
11. Александров Г. Н., Евдокунин Г. А., Подпоркин Г. В. Параметры воздушных линий электропередачи компактной конструкции //Электричество. – 1982. – №. 4. – С. 10-17.
12. Алексеев Б. А. Повышение пропускной способности воздушных линий электропередачи и применение проводов новых марок //Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2009. – №. 3.
13. Альмендеев А. А., Косорлуков И. А., Шишков Е. М. Математическая модель для расчета установившихся режимов двухцепных воздушных линий //Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2009. – №. 2. – С. 212-214..
14. Альмендеев А.А. Повышение эффективности функционирования двухцепных воздушных линий электропередачи // Диссертация на соискание учёной степени канд. техн. наук/ Самара. – 2009.
15. Асанов Т. К. Об усилении системы тягового электроснабжения переменного тока //Развитие систем тягового электроснабжения.–М.: МИИТ, 1991.-С 112. – 1991. – Т. 115.
16. Астахов Ю. Н., Веников В. А., Зуев Э. Н. Увеличение пропускной способности двухцепных линий электропередачи-Известия АН СССР //Изв. АН СССР, Энергетика и транспорт. – 1965. – Т. 4965.
17. Бардушко В. Д. Анализ и параметрический синтез систем тягового электроснабжения // Диссертация на соискание учёной степени докт. техн. наук/ Иркутск. – 2001.

- 18.Баринов В. А., Мамиконянц Л. Г., Строев В. А. Развитие математических моделей и методов для решения задач управления режимами работы и развития энергосистем //Электричество. – 2005. – №. 7. – С. 8-21.
- 19.Беляков Ю. С. К вопросу идентификации параметров воздушных линий электропередачи //Электричество. – 2008. – №. 6. – С. 18-23.
- 20.Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник. –М.: Гардарики, 2006.
- 21.Брычков Ю. А., Маричев О. И., Прудников А. П. Таблицы неопределенных интегралов. – М.: ФИЗМАТЛИТ – 2003 – 200с.
- 22.Ведерников А.С., Гольдштейн В.Г., Халилов Ф.Х. Повышение надежности и энергоэффективности двухцепных линий электропередачи. // М.: Энергоатомиздат, 2010. – 272 с.
- 23.Ведерников А.С., Гольдштейн В.Г., Шишков Е.М. Анализ и определение направлений оптимизации режимов работы двухцепных воздушных ЛЭП 35–220 кВ с использованием многопроводных схем замещения. // Оперативное управление в электроэнергетике. Подготовка персонала и поддержание его квалификации. - 2011. - № 2. - С. 31-36.
- 24.Ведерников А.С., Гольдштейн В.Г., Шишков Е.М. Коммутационные перенапряжения на двухцепных воздушных линиях 35-330 кВ.//Автоматизация и ИТ в энергетике. №3(32), М., 2012. – С. 31-35.
- 25.Ведерников А.С., Гольдштейн В.Г., Шишков М.А., Шишков Е.М. Анализ эффективности грозозащиты двухцепных воздушных линий электропередачи. // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – М. – 2012. - №4. – С. 45-49.
- 26.Ведерников А.С., Гольдштейн В.Г., Халилов Ф.Х.К вопросу о моделировании систем грозозащиты двухцепных ЛЭП 35 ÷ 220 кВ. // Изв. вузов. Электромеханика. – 2011. - №3. – С. 38-40.
- 27.Vedernikov A.S. Increase of Power Efficiency of Electric Networks with Two-Chain Transmission Lines [Текст] / A.S. Vedernikov, V.G. Goldshtein

- //Proceedings of the 6th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering ELEKTROENERGETIKA 2011, 21.-23. 9. 2011, Stará Lesná, Slovak Republic. 418 P. pp. 231-233
28. Вагнер К. Ф., Эванс Р. Д. Метод симметричных составляющих. В применении к анализу несимметричных электрических цепей //Л.-М.: Главная редакция энергетической литературы. – 1936.
29. Вайнштейн Л.М., Мельников Н. А. Матричные методы расчета режимов работы электрических сетей //Изд. Всесоюзн. заочн. энерг. ин-та. – 1964.
30. Васин В.П. Расчеты режимов электрических систем: Проблемы существования решения. – М.: Московский энергетический ин-т, 1981.
31. Васюра Ю. Ф. и др. Защита от перенапряжений в сетях 6-10 кВ //М.: Электротехника. – 1994. – №. 5/6..
32. Веников В. А. Электромеханические переходные процессы в электрических системах. –М.: – Госэнергоиздат, 1958. – 622 с.
33. Веников В. А., Астахов Ю. Н., Постолатий В. М. Управляемые электропередачи переменного тока повышенной пропускной способности //Электричество. – 1969. – №. 12. – С. 7-11.
34. Висящев А. Н., Тигунцев С. Г., Луцкий И. И. Влияние потребителей на искажение напряжения //Электрические станции. – 2002. – №. 7. – С. 26-31.
35. Висящев А.Н. и др. О безопасности производства работ на вл, находящихся под наведённым напряжением //Энергетик. – 2010. – №. 2. – с. 18-22.
36. Висящев А. Н. Электромагнитная совместимость в электроэнергетических системах //Иркутск: ИрГТУ. – 2006.
37. Гамм А. З. Методы расчета нормальных режимов электроэнергетических систем на ЭВМ //Иркутск: ИПИ-СЭИ, 1972.–186 с. – 1972.

38. Гамм А. З., Воропай Н. И. Вероятностные модели режимов электроэнергетических систем. – ВО "Наука", 1993.
39. Гамм А. З., Голуб И. И., Руденко Ю. Н. Наблюдаемость электроэнергетических систем. – Новосибирск: Наука, 1990. – 199 с.
40. Гамм А. З., Колосок И. Н. Усовершенствованные алгоритмы оценивания состояния электроэнергетических систем // Электричество. – 1987. – №. 11. – С. 25-29.
41. Гамм А. З., Крумм Л. А., Шер И. А. Общие принципы расчета стационарного режима электрических систем с разбивкой на подсистемы // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1965. – №. 6. – С. 7-15.
42. Герман Л. А. Матричный метод расчета системы тягового электроснабжения пе, ременного тока с учетом системы внешнего электроснабжения // Наука и техника транспорта. – 2004. – №. 4.
43. Гершенгорн А.И. Многофазные линии электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения // Энергохозяйство за рубежом. 1985. №5.
44. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
45. ГОСТ Р 54149-2010. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
46. Гринберг Г. А. Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений // М.: Изд-во АН СССР. – 1948. – Т. 8. – С. 727.
47. Гринберг Г. А., Бонштедт Б. Э. Основы точной теории волнового поля линии передачи // Ж. ТФ. – 1954. – Т. 24. – №. 1. – С. 62-69.

48. Данилин А. Н. и др. Повышение безопасности работ на линиях под наведенным напряжением // Труды КНЦ РАН. Энергетика.– Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН. – 2010. – С. 91-102.
49. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В. и др. Теоретические основы электротехники. Изд. 4 доп. Т. 2. Изд. Питер. – Спб. 2006. – 575 с.
50. Евдокунин Г. А., Гудилин С. В., Корепанов А. А. Выбор способа заземления нейтрали в сетях 6-10 кВ // Электричество. – 1998. – №. 12. – С. 8-22..
51. Евдокунин Г.А., Чуйков Ю.В., Щербачев О.В. О целесообразном расположении фаз двухцепных воздушных линий для снижения пофазной несимметрии. – Электрические станции, 1980, № 3.
52. Жидких И. М., Лосев С. Б. Метод расчета на ЭЦВМ токов короткого замыкания, эффективно использующий матрицу узловых проводимостей // Электричество. – 1968. – №. 11.
53. Закарюки, В. П. Методы и алгоритмы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока // Автореферат диссертации на соискание ученой степени д-ра техн. наук. – Иркутск. – 2009.
54. Закарюкин В. П., Крюков А. В. Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока/под ред // Иркутск: Ир-ГУПС. – 2010. – 160 с.
55. Закарюкин В. П., Крюков А. В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем // Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та. – 2005. – 273 с.
56. Закарюкин В. П., Крюков А. В. Токораспределение в проводах высоковольтных линий электропередачи // Системы. Методы. Технологии. – 2010. – №. 3. – С. 68-74.
57. Закарюкин В. П., Крюков А. В., Абрамов Н. А. Определение потерь мощности на основе эквивалентных моделей систем тягового



- электроснабжения //Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2008. – №. 3. – С. 13.
- 58.Закарюкин В. П., Крюков А. В., Кобычев Д. С. Моделирование электромагнитных влияний контактной сети железных дорог на смежные линии электропередачи //Электротехнические комплексы и системы управления. – 2009. – №. 1. – С. 2-7.
- 59.Закарюкин В. П., Новиков А. С. Расчеты режимов систем тягового электроснабжения переменного тока–модели ЛЭП и тяговой сети в фазовых координатах //Известия АН СССР «Энергетика и транспорт». – 1991. – №. 5. – С. 99-101..
- 60.Заславская Т. Б., Ирлахман М. Я., Ловячин В. Ф. Предметы вариаций электрических параметров симметричной линии электропередачи //Труды СибНИИЭ. – 1970. – Вып. 17.
- 61.Зуев Э.Н. К вопросу о выборе числа цепей воздушных линий электропередачи 110-200 кВ // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2004. №3. С. 38-43.
- 62.Иванов В. С., Соколов В. И. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий. – Энергоатомиздат, 1987.
- 63.Идельчик В. И. Погрешности расчетов на ЦВМ при управлении режимами электрических систем //Изд. ИПИ. Иркутск. – 1971.
- 64.Идельчик В. И., Веников В. А. Методы оптимизации управления планированием больших систем энергетики //М.: ВИНТИ. – 1974. – 208 С.
- 65.Идельчик В.И. Расчеты установившихся режимов электрических систем. – М.: Энергия, 1977. – 189 с.

- 66.Кадомская К.П., Лавров Ю.А., Рейхердт А.А. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них: Учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004, 2004. – 368 с..
- 67.Карякин Р. Н. Методика расчета сопротивлений тяговых сетей переменного тока //М.: Трансжелдориздат. – 1962..
- 68.Конторович А. М. и др. Эквивалентирование сложных энергосистем для целей оперативного управления //Улан-Удэ: Вост.-Сиб. технол. ин-т, 1989.–84 с..
- 69.Костенко М.В. Построение приближенных формул для решения электротехнических задач по способу «предельных точек»// Электричество. –1982.–№9.–с.72–77.
- 70.Костенко М.В., Кадомская К.П., Левинштейн М.Л. и др. Перенапряжения и защита от них в воздушных и кабельных электропередачах высокого напряжения. –Л.: Наука, 1988. –302 с.
- 71.Костенко М.В., Перельман Л.С., Шкарин Ю.П. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения. –М.: Энергия, 1973. –270 с.
- 72.Костенко М.В., Техника высоких напряжений. – М.: Высшая школа, 1973. – 528 с.
- 73.Костиков В.И., Семенко О.В. Идеология проектирования воздушных линий в стеснённых условиях. Критерии применимости опор на МГС // Воздушные линии. 2010. №1. С. 3-13.
- 74.Крюков А. В., Закарюкин В. П., Асташин С. М. Управление режимами систем тягового электроснабжения/Под ред. АВ Крюкова //Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та путей сообщения. – 2009.
- 75.Левченко И. И. и др. Диагностика, реконструкция и эксплуатация воздушных линий электропередачи в гололедных районах //М.: Издательский дом МЭИ. – 2007.

76. Лизунов С. Д., Лоханин А. К. Проблемы современного трансформаторостроения в России // *Электричество*. – 2000. – № 8. – С. 9.
77. Макаров В. М. и др. Удельные параметры линий электропередачи высокого и сверхвысокого напряжений // М.: Информэнерго, 1987. – 48 с.
78. Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок. ПОТРМ-016-2001. РД 153-34.0-03.150-00. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003.
79. Мельников Н. А. Расчеты режимов работы сетей электрических систем. – Госэнергоиздат, 1950. – 230 с.
80. Мельников Н.А. Электрические системы и сети. – М.: Энергия, 1975. – 462 с.
81. Мельников Н.А., Рокотян С.С., Шеренцис А.Н. Проектирование электрической части воздушных линий электропередачи 330-500 кВ. – М.: Энергия, 1974. – 472 с.
82. Методические указания по измерению наведенных напряжений на отключенных ВЛ, проходящих вблизи действующих ВЛ напряжением 35 кВ и выше и контактной сети электрифицированной железной дороги переменного тока. М.: ОРГРЭС, 1993.
83. Мисриханов М.Ш., Попов В.А., Медов Р.В. Моделирование воздушных линий электропередачи для расчета наведенных напряжений. – *Электрические станции*, 2003, № 1.
84. Мисриханов М.Ш., Попов В.А., Якимчук Н.Н. и др. Взаимовлияние двухцепных воздушных линий и их воздействие на режим электрических систем // *Электрические станции*, 2001, № 2.
85. Мисриханов М.Ш., Попов В.А., Якимчук Н.Н. и др. К расчету наведенного напряжения на ремонтируемых линиях электропередачи / – *Электрические станции*, 2000, № 2.

86. Невретдинов Ю. М., Фастий Г. П., Ярошевич В. В. Анализ регистрации показателей качества электроэнергии на шинах питающих подстанций // Вестник МГТУ. – 2009. – Т. 12. – №. 1. – С. 58-64.
87. Поспелов Г. Е., Федин В. Т. Проектирование электрических сетей и систем: Учеб. пособие для вузов. – Высшая школа, 1978. – 224 с.
88. Поспелов Г. Е., Федин В. Т., Лычев П. В. Электрические системы и сети // Минск: Технопринт. – 2004.
89. Постолатий В. М., Быкова Е. В. Эффективность применения управляемых самокомпенсирующихся высоковольтных линий электропередачи и фазорегулирующих устройств трансформаторного типа // Электричество. – 2010. – №. 2. – С. 7-14.
90. Правила устройства электроустановок / Минэнерго СССР. – 6-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 640 с.
91. Проектирование линий электропередачи сверхвысокого напряжения / Под ред. Г.Н. Александрова и Л.Л. Петерсона. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 368 с.
92. Ракушев Н.Ф. Электрический расчёт дальних линий электропередачи. // Куйбышев.: Куйбышевский индустриальный институт им. В.В. Куйбышева, 1961. – 79 с.
93. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 11. Расчет токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110-750 кВ. -М.: Изд-во Энергия, 1979. -152 с.
94. Семен Х. Б., Гершенгорн А. И., Семен Б. Л. Специальные расчеты электропередач сверхвысокого напряжения. – Энергоатомиздат, 1985.
95. Солдатов В.А., Попов Н.М. Моделирование сложных видов несимметрии в распределительных сетях 10 кВ методом фазных координат // Электротехника. – 2003. - № 10. – С. 35-39.
96. Стратан И. П., Неретин В. И., Спивак В. Л. Расчет и анализ режимов электроэнергетических систем. – М.: Штиинца, 1990.

97. Тарасов В. И. Теоретические основы анализа установившихся режимов электроэнергетических систем. – Новосибирск : Наука, 2002. – 168 с.
98. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. М.-Л. изд. «Энергия».1964. - 704 с.
99. Шакиров М. А. Системные схемы замещения трехфазных машин и их применение для расчета несимметричных режимов электрических систем //Электротехника. – 2003. – №. 10. – С. 26-35.
100. Ведерников А.С., Шишков Е.М. Уточнение параметров схемы замещения двухцепной воздушной линии. // «Диспетчеризация в электроэнергетике: проблемы и перспективы»: материалы 4-ой открытой молодежной науч.-практ. конф. Казань: КГЭУ, 2011. – С. 96 – 100.
101. Ведерников А.С., Шишков Е.М. Уточнённое определение потерь мощности в ЛЭП 35-220 кВ. // Наука. Технологии. Инновации. Материалы всероссийской науч. конф. молодых ученых в 4-х частях. Новосибирск. Изд-во НГТУ, 2010. Часть 2 – С. 139 – 141.
102. Ведерников А.С., Ведерникова Е.С., Шишков Е.М. Об особенностях расчёта установившихся режимов комбинированных воздушных линий электропередачи. // 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.
103. Ведерников А.С., Гайнуллин Р.А., Шишков Е.М. Применение теории обобщённых четырехполюсников для расчета установившихся режимов двухцепных воздушных линий электропередачи. //«Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики», – Казань: КГЭУ, 2011. №5-6. С. 86-90.
104. Ведерников А.С., Гольдштейн В.Г., Шишков Е.М. Методика расчёта установившихся режимов многоцепных воздушных линий

- электропередачи. // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – Новосибирск: НГАВТ, 2012. – №1. – С. 400-403.
105. Ведерников А.С., Гольдштейн В.Г., Шишков Е.М. Уточнение моделей установившихся режимов многоцепных линий электропередачи. // Электрика. №4, Москва – 2012. – С. 26-31.
106. Ведерников А.С., Гольдштейн В.Г., Шишков Е.М., Подшивалова Н.В. Расчёт установившихся несимметричных режимов многоцепных воздушных линий электропередачи. // 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.
107. Ведерников А.С., Подшивалова Н.В., Шишков Е.М. Математическая модель несимметричных режимов многоцепных воздушных линий электропередачи. // 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.
108. Ведерников А.С., Степанов В.П., Подшивалова Н.В., Шишков Е.М. Уточнение расчётных значений потерь электрической мощности в несимметричных воздушных линиях электропередачи. // Энергосбережение, электромагнитная совместимость и качество в электрических системах: сб. статей II между. Науч.-практ. конф. – Пенза: Приволжский Дом знаний, 2011. – С. 12 – 14.
109. Шнелль Р. В., Китушин В. Г., Киселев А. П. Целесообразность применения деревянных опор на линиях электропередачи //Электричество. – 1975. – №. 3. – С. 73-76.
110. Шнелль Р. В., Ловягин В. Ф. Оптимизация трасс линий электропередачи (метод иерархических структур). М //Изв. АН СССР, сер.«Энергетика и транспорт. – 1973. – №. 5. – С. 60-67.

111. Шнелль Р.В. Вершинин Ю. Н. и др. Создание устройств, управляющих режимами электроэнергетических систем на основе явления перехода веществ из одного состояния в другое //Электричество. – 1978. – №. 12. – С. 1-5..
112. Электротехнический справочник, т. 4 // Под общ. ред. В.Г. Герасимова, А.Ф. Дьякова, Н.Ф. Ильинского, В.А. Лабунцова, В.П. Морозкина. –М.: МЭИ, 2004.

**ПРИЛОЖЕНИЕ I**

Вычисление элементов продольной парциальной схемы замещения  
полного многоугольника со всеми диагоналями



Метод вычисления параметров математической модели в виде полного  $n$ -угольника со всеми диагоналями рассмотрен для случая трёх проводников, связанных взаимдуктивной связью (рис. П.1, *a*). Закон Ома в  $Z$  – форме для рассматриваемого примера может быть сформулирован в матричном виде, как:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 - \dot{U}_{1'} \\ \dot{U}_2 - \dot{U}_{2'} \\ \dot{U}_3 - \dot{U}_{3'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{11} & \underline{Z}_{12} & \underline{Z}_{13} \\ \underline{Z}_{11} & \underline{Z}_{12} & \underline{Z}_{13} \\ \underline{Z}_{11} & \underline{Z}_{12} & \underline{Z}_{13} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_3 \end{bmatrix}. \quad (\text{П.1})$$

Преобразовывая запись (П.1), получаем:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12} & \underline{Y}_{13} \\ \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12} & \underline{Y}_{13} \\ \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12} & \underline{Y}_{13} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_1 - \dot{U}_{1'} \\ \dot{U}_2 - \dot{U}_{2'} \\ \dot{U}_3 - \dot{U}_{3'} \end{bmatrix}. \quad (\text{П.2})$$

Выражениям (П.2) ставится в соответствие схема замещения в форме шестиугольника, изображённая на рисунке П.1, *б*; поперечные параметры схемы обозначены индексами со штрихами, указывающими на узлы, с которыми соединены рассматриваемые ветви. При подаче напряжения  $\dot{U}_1$  на вход первой схемы (рис. П.1, *a*) токи текут как в первом проводнике, так и во втором и третьем проводниках, взаимодействующих с первым проводом посредством индуктивной связи. Выражения (П.2) вследствие этого принимают вид:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \underline{Y}_{11} \dot{U}_1; \\ \dot{I}_2 &= \underline{Y}_{21} \dot{U}_1 = \underline{Y}_{12} \dot{U}_1; \\ \dot{I}_3 &= \underline{Y}_{31} \dot{U}_1 = \underline{Y}_{13} \dot{U}_1. \end{aligned} \quad (\text{П.3})$$

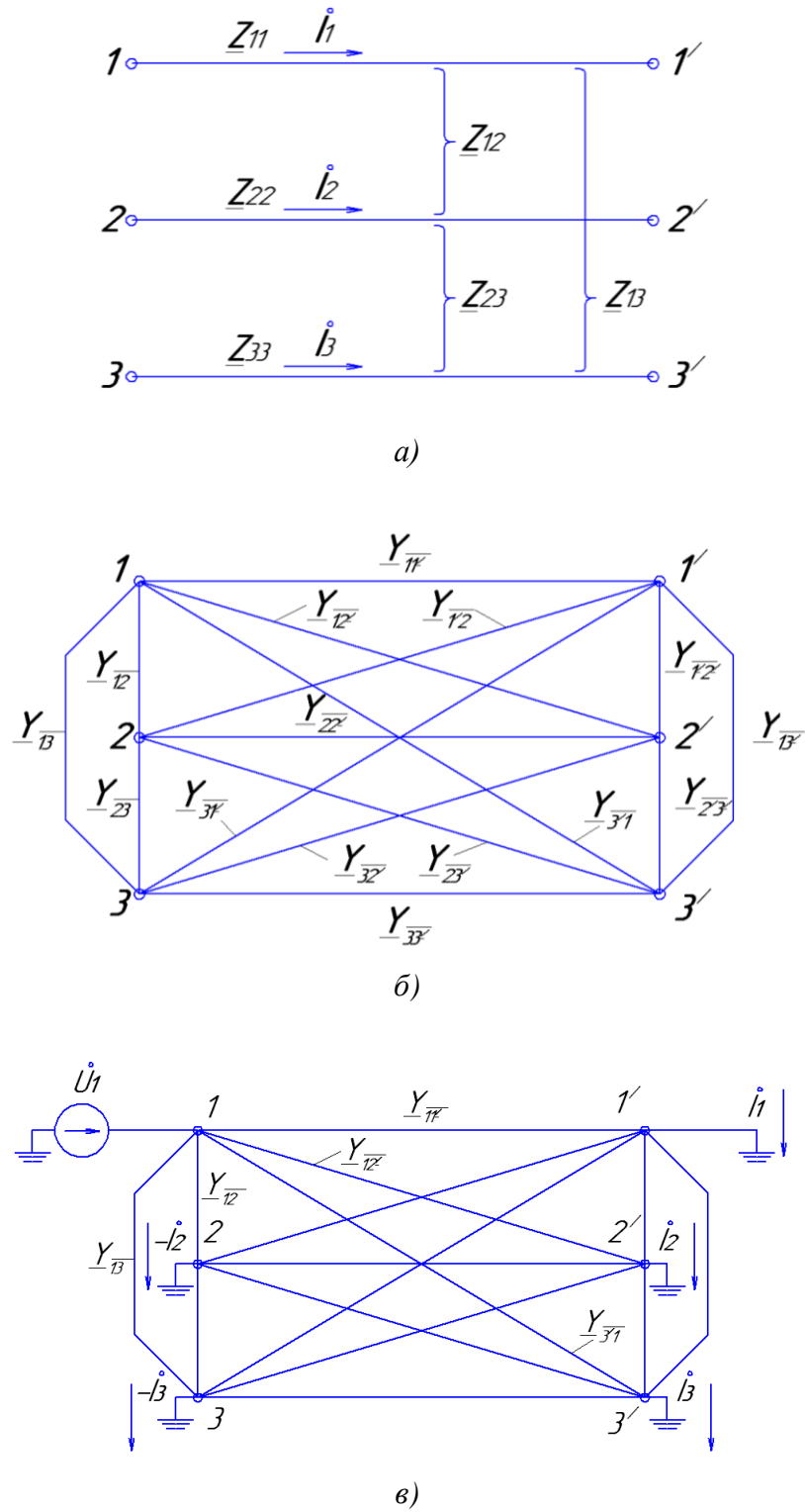


Рис. П.1. Модель в виде полного шестиугольника для трех проводников, связанных взаимной индукцией: *a* – изначальная схема; *b* – модель в виде полного шестиугольника; *v* – модель в виде полного шестиугольника при подаче напряжения  $\dot{U}_1$  на первый вход и соединении с землёй других входов.

Обозначенный режим в однопроводной модели модели (рис. П.1, а) необходимо отразить в модели полного многоугольника (рис. П.1, б). Для моделируемого режима подачи напряжения на первый вход распределение токов по ветвям представлено на рисунке П. 1, в. Кроме того, проводимости в данной модели дополнительно обозначены индексами со штрихом, показывающими узлы, на которые замыкаются рассматриваемые ветви. Можно заметить, что токи текут исключительно между первым входом, на который подано напряжение, и входами соединёнными с землёй и имеющими условно нулевой потенциал. Это вполне объяснимо, так как в модели с гальваническими связями между двумя соединёнными с землёй точками отсутствует ток. Учитывая особенности распределения токов в модели (рис. П.1, в), запишем для модели (рис. П.1, б) следующие выражения:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \underline{Y}_{11'} \dot{U}_1; \\ \dot{I}_2 &= \underline{Y}_{12'} \dot{U}_1 = -\underline{Y}_{12} \dot{U}_1; \\ \dot{I}_3 &= \underline{Y}_{13'} \dot{U}_1 = -\underline{Y}_{13} \dot{U}_1. \end{aligned} \quad (\text{П.3а})$$

Здесь  $\underline{Y}_{11'}$ ,  $\underline{Y}_{12'}$ ,  $\underline{Y}_{12}$ ,  $\underline{Y}_{13'}$ ,  $\underline{Y}_{13}$  - проводимости, обозначенные на изображении модели (рис. 1, б).

Сравнивая уравнения (П.3 и П.3а), запишем:

$$\begin{aligned} \underline{Y}_{11} &= \underline{Y}_{11'}; \\ \underline{Y}_{12} &= \underline{Y}_{12'} = -\underline{Y}_{12}; \\ \underline{Y}_{13} &= \underline{Y}_{13'} = -\underline{Y}_{13}. \end{aligned} \quad (\text{П.4})$$

Затем, подав напряжение  $\dot{U}_2$  на второй вход и подключив к земле все другие входы модели (рис. П.1, а), запишем из уравнений (П.2):

$$\begin{aligned}
 \dot{I}_1 &= \underline{Y}_{12} \dot{U}_2; \\
 \dot{I}_2 &= \underline{Y}_{22} \dot{U}_2; \\
 \dot{I}_3 &= \underline{Y}_{32} \dot{U}_2.
 \end{aligned}
 \tag{П.5}$$

Аналогичные соотношения для модели (рис. П.1, б):

$$\begin{aligned}
 \dot{I}_1 &= \underline{Y}_{1'2} \dot{U}_2 = -\underline{Y}_{12} \dot{U}_2; \\
 \dot{I}_2 &= \underline{Y}_{22'} \dot{U}_2; \\
 \dot{I}_3 &= \underline{Y}_{23'} \dot{U}_2 = -\underline{Y}_{23} \dot{U}_2;
 \end{aligned}
 \tag{П.5а}$$

Сравнивая выражения (П.3 и П.3а), запишем:

$$\begin{aligned}
 \underline{Y}_{12} &= \underline{Y}_{1'2} = -\underline{Y}_{12}; \\
 \underline{Y}_{22} &= \underline{Y}_{22'}; \\
 \underline{Y}_{23} &= \underline{Y}_{23'} = -\underline{Y}_{23}.
 \end{aligned}
 \tag{П.6}$$

Подавая аналогичным образом напряжение на третий вход при условии подключения всех остальных входов в модели (рис. 1, а) к земле и принимая во внимание симметричность модели (рис. 1, б), наконец записываем:

$$\begin{aligned}
 \underline{Y}_{11} &= \underline{Y}_{11'}; \quad \underline{Y}_{22} = \underline{Y}_{22'}; \quad \underline{Y}_{33} = \underline{Y}_{33'}; \\
 \underline{Y}_{12} &= \underline{Y}_{12'} = -\underline{Y}_{1'2} = \underline{Y}_{12} = -\underline{Y}_{1'2'}; \\
 \underline{Y}_{13} &= \underline{Y}_{13'} = -\underline{Y}_{1'3} = \underline{Y}_{13} = -\underline{Y}_{1'3'}; \\
 \underline{Y}_{23} &= \underline{Y}_{23'} = -\underline{Y}_{2'3} = \underline{Y}_{23} = -\underline{Y}_{2'3'}.
 \end{aligned}
 \tag{П.7}$$

Распространяя выражения (П.7) на другие узлы, для модели в форме полного  $n$ -угольника, моделирующей  $n$  связанных взаимоиндукцией проводников, выразим краткие расчетные выражения:

$$\underline{Y}_{xx} = \underline{Y}_{xx'}; \tag{П.8а}$$

$$\underline{Y}_{xy} = \underline{Y}_{xy'} = -\underline{Y}_{x'y} = \underline{Y}_{xy} = -\underline{Y}_{x'y'}; \quad (\text{П.8б})$$

где  $x, y$  и  $x', y'$  - условные обозначения соответственно начальных и конечных входов модели (рис. П.1, б).

По формуле (П.8а) рассчитываются величины проводимостей горизонтальных связей (количеством  $n$  связей), а по формуле (П.8б) - величины проводимостей наклонных и вертикальных связей (количеством  $n(n-1)$  связей). С учётом сказанного, вертикальные связи имеют знаки, противоположные знакам наклонных связей.

Необходимо заметить, что также возможно применение сопротивлений отдельных связей полного  $n$ -угольника, величины которых находятся, как обратные проводимостям.

Совокупное число внутренних связей при  $n=6$  составляет:

$$q = n \cdot (2 \cdot n - 1) = 6 \cdot 11 = 66.$$

## **ПРИЛОЖЕНИЕ II**

Акты внедрения результатов диссертационного исследования в  
производственный и учебный процессы

«УТВЕРЖДАЮ»  
Генеральный директор  
ЗАО «РОСПРОЕКТ»



Ю.В. Маневич

2013 г.

**АКТ**

о внедрении результатов диссертационной работы Шишкова Евгения Михайловича на тему «Анализ установившихся режимов многоцепных воздушных линий электропередачи на основе метода фазных координат» в ЗАО «РОСПРОЕКТ», г. Санкт-Петербург

Комиссия в составе: генерального директора ЗАО «РОСПРОЕКТ» Маневича Ю.В., и.о.технического директора ЗАО «РОСПРОЕКТ» Кудишкина О.В., главного инженера проекта ЗАО «РОСПРОЕКТ» Кузнецова Д.В. провела анализ диссертационной работы Шишкова Е.М. на предмет внедрения результатов работы в ЗАО «РОСПРОЕКТ» (г. Санкт-Петербург) и утвердила следующее заключение.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В практику проектирования ЗАО «РОСПРОЕКТ» внедрены разработанные Шишковым Е.М. методики и рекомендации по оптимизации конструкции многоцепных воздушных линий электропередачи. Указанные методики и рекомендации используются при решении следующих практических задач.

1. Выбор оптимального взаимного расположения фаз цепей многоцепной воздушной линии электропередачи.
2. Выбор площади санитарно-защитной зоны многоцепной воздушной линии электропередачи.

Использование указанных результатов позволяет оптимизировать конструкцию воздушных линий по условию минимума потерь мощности и снизить капитальные затраты на сооружение линии за счёт сокращения площади санитарно-защитной зоны.

И.о. Технического директора  
ЗАО «РОСПРОЕКТ»

Кудишкин О.В.

Главный инженер проекта  
ЗАО «РОСПРОЕКТ»

Кузнецов Д.В.

**«УТВЕРЖДАЮ»**

Генеральный директор филиала ОАО  
«Системный оператор Единой  
энергетической системы» -

«Объединенное диспетчерское управление  
энергосистемами Средней Волги»



О.А. Громов

2012 г.

**АКТ**

о внедрении результатов диссертационной работы Шишкова Евгения Михайловича на тему «Анализ установившихся режимов многоцепных воздушных линий электропередачи на основе метода фазных координат» в филиале ОАО «СО ЕЭС» ОДУ Средней Волги г. Самара

Комиссия филиала ОАО «СО ЕЭС» ОДУ Средней Волги в составе: заместителя генерального директора Крицкого В.А., директора по управлению режимами – главного диспетчера Гребенникова Д.В., директора по техническому контроллингу Танаева А.К. провела анализ диссертационной работы Шишкова Е.М. на предмет внедрения результатов работы в филиале ОАО «СО ЕЭС» ОДУ Средней Волги и утвердила следующее заключение.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В филиале ОАО «СО ЕЭС» ОДУ Средней Волги внедрены разработанные Шишковым Е.М. рекомендации по моделированию установившихся режимов электромагнитосвязанных воздушных линий электропередачи. Указанные рекомендации используются при решении следующих производственных задач:

1. Анализ потерь мощности в электромагнитосвязанных многоцепных воздушных линиях 110-220 кВ;
2. Оценка несимметрии режимных параметров цепей электромагнитосвязанных многоцепных воздушных линий 110-220 кВ.

Использование указанных результатов позволяет повысить достоверность результатов структурного анализа потерь мощности в сетях 110-220 кВ.

Заместитель генерального директора

В.А. Крицкий

Директор по управлению режимами  
–главный диспетчер

Д.В.Гребенников

Директор по техническому контроллингу  
к.т.н.

А.К. Танаев



«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе  
ФГБОУ ВПО

«Самарский государственный  
технический университет»,

д.х.н., профессор

Пимерзин А.А.

2012 г.



### АКТ

о внедрении в учебный процесс ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет» результатов диссертационной работы аспиранта кафедры «Электрические станции» Шишкова Евгения Михайловича на тему: «Анализ установившихся режимов многоцепных воздушных линий электропередачи на основе метода фазных координат», представленной по специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы»

Мы, нижеподписавшиеся, начальник управления высшего и послевузовского профессионального образования федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный технический университет», к.х.н., доцент Костылева И.Б., исполняющий обязанности декана электротехнического факультета, к.т.н. Инаходова Л.М., заведующий кафедрой «АЭЭС», д.т.н., профессор Степанов В.П., заместитель заведующего кафедрой «АЭЭС», к.т.н., доцент Кротков Е.А., заместитель заведующего кафедрой «ЭС» Гнеушев А.С. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Шишкова Е.М. – методика расчёта установившегося режима многоцепной комбинированной воздушной линии электропередачи в фазных координатах с учётом внутренней несимметрии – внедрены в учебный процесс на кафедрах «Автоматизированные электроэнергетические системы» и «Электрические станции» ФГБОУ ВПО «СамГТУ» при чтении курсов «Электроэнергетические системы и сети» и «Физико-математические основы производства и передаче электрической энергии».

Начальник УВиППО,  
к.х.н., доцент

Костылева И.Б.

И.о. декана ЭТФ,  
к.т.н.

Инаходова Л.М.

Зав. кафедрой «АЭЭС»,  
д.т.н., профессор

Степанов В.П.

Зам. зав. кафедрой «АЭЭС»,  
к.т.н., доцент

Кротков Е.А.

Зам. зав. кафедрой «ЭС»

Гнеушев А.С.