

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

На правах рукописи



Плотников Михаил Павлович

**Моделирование несинусоидальных режимов двухцепных воздушных
линий электропередачи**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические
системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук,
доцент Большанин Г.А.

Братск – 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Глава 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСИНУСОИДАЛЬНОГО РЕЖИМА В ДВУХЦЕПНОЙ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ	10
1.1. Аналитический обзор по проблеме распределения токов и напряжений в двухцепной воздушной линии	10
1.2. Распределение электрической энергии по воздушной линии	14
1.3. Методики анализа распределения электрической энергии в двухцепной воздушной линии	18
1.4. Выводы по главе 1	21
ГЛАВА 2. УСТАНОВИВШИЙСЯ РЕЖИМ ПЕРЕДАЧИ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ ПО ДВУХЦЕПНОЙ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ	22
2.1. Электрическая схема замещения двухцепной воздушной линии	22
2.2. Методика определения первичных параметров двухцепной воздушной линии	26
2.3. Выводы по главе 2	34
ГЛАВА 3. РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ В ДВУХЦЕПНОЙ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ	35
3.1. Расчет напряжений и токов на однородном участке двухцепной воздушной линии	35
3.2. Расчет напряжений и токов в неоднородном участке двухцепной воздушной линии	57
3.3. Выводы по главе 3	75
4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ	77
4.1. Установившийся режим передачи электрической энергии в двухцепной воздушной линии	77
4.2. Спектральный состав напряжений в двухцепной воздушной линии	80

4.3. Экспериментальные исследования передачи электрической энергии в двухцепной воздушной линии	86
4.4. Влияние первичных параметров двухцепной воздушной линии на уровень напряжений и токов	92
4.5. Передаточная функция двухцепной воздушной линии	97
4.6. Частотные характеристики двухцепной воздушной линии	104
4.7. Выводы по главе 4	107
Заключение	109
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	110
ПРИЛОЖЕНИЕ А	122
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	138
ПРИЛОЖЕНИЕ В	141
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	143
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	145

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Электроэнергетические системы представляют собой совокупность устройств для генерации, передачи, преобразования и потребления электрической энергии. В качестве устройств, генерирующих электрическую энергию, могут выступать, например, гидравлические и тепловые электростанции; в качестве устройств для передачи электрической энергии – воздушные линии (ВЛ) для ее преобразования — трансформаторы, а для потребления – электрические двигатели и другие электрические нагрузки. И все эти процессы связаны с преобразованием энергии.

Задача электроэнергетических систем заключается в бесперебойном снабжении качественной электрической энергией промышленных и иных объектов.

Интенсивное развитие электротехнологий сопровождается изменением условий потребления электрической энергии. Растет число используемых при генерации, преобразовании и потреблении электрической энергии электронных технологий, что в значительной мере увеличивает эффективность и степень надежности электроснабжения.

Однако, кроме позитивных аспектов, характеризующих изменившиеся условия потребления электрической энергии, имеет место и ряд негативных. И в первую очередь – это понижение качества электрической энергии.

ГОСТ Р 54149 - 2010 [27] устанавливает показатели качества электрической энергии и их нормативные величины и позволяет оценить отклонения, колебания, синусоидальность напряжения, а также отклонения частоты.

Электрическая энергия, транспортируемая по современным двухцепным ВЛ, часто характеризуется показателями напряжения и тока с заметными уровнями несинусоидальности особенно в промышленных регионах. Такую энергию вполне можно характеризовать как электрическую энергию пониженного качества.

Методы расчета распределения электрической энергии достаточно хорошо разработаны и успешно применяются в инженерной практике. Однако, понижение качества электрической энергии заставляет вносить в них коррективы, игнорирование которых увеличивает различие между расчетными фактическим распределением этой энергии по участкам двухцепной ВЛ.

Таким образом, проблема расчета режимных параметров в двухцепной ВЛ при несинусоидальных режимах является **актуальной**.

В диссертационной работе разработан метод расчета режимных параметров двухцепной ВЛ при несинусоидальных режимах. В диссертации рассмотрен установившийся режим работы двухцепных ВЛ и не учтены неизбежные динамические процессы в них.

Метод исследования, результаты которого представлены в диссертации, заключается в математическом моделировании. Задача построения и последующей оптимизации математической модели состоит в формировании инженерной методики решения рассматриваемой проблемы.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Братский государственный университет».

Целью работы является разработка метода расчета несинусоидальных режимов двухцепных ВЛ напряжением 110 – 220 кВ.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Разработка полнофазной схемы замещения и математической модели, учитывающей электромагнитные связи между конструктивными элементами двухцепной ВЛ.
2. Разработка алгоритма расчета режимных параметров двухцепных воздушных линий на базе предложенной модели.
3. Разработка программного обеспечения, реализующего предложенную модель.

4. Выполнение экспериментальных исследований для проверки достоверности предлагаемой модели и работоспособности алгоритма на примере двухцепных ВЛ предприятия «Северные электрические сети» ОАО «Иркутская электросетевая компания».

Объект исследования: двухцепные ВЛ напряжением 110 – 220 кВ.

Предмет исследования: распределение тока и напряжения при полигармоническом характере режимов.

Методы исследований, использованные в работе, основаны на применении математического моделирования, теории матриц, теории электрических цепей, теории передачи и распределения электрической энергии.

Достоверность полученных результатов подтверждается незначительным расхождением результатов расчетов с экспериментальными данными.

Достоверность обеспечена: использованием сертифицированного оборудования и современного измерительно-вычислительного комплекса (ИВК) «Ресурс-UF2» №2859.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана полнофазная схема замещения и математическая модель, учитывающая скин-эффект и электромагнитные связи между конструктивными элементами двухцепной ВЛ.

2. Предложен метод расчета режимных параметров двухцепной воздушной линии на основе метода фазных координат и теории четырнадцати-полюсников, учитывающий поверхностный эффект, взаимные электромаг-

нитные связи между проводами, проводами и заземленными конструктивными элементами при несинусоидальных режимах.

3. Разработан алгоритм расчета режимных параметров двухцепных воздушных линий на основе разработанной модели.

Практическая ценность результатов работы:

1. Разработан метод расчета несинусоидальных режимов двухцепных воздушных линий.

2. Создан программный комплекс, позволяющий во время эксплуатации двухцепных воздушных линий рассчитывать гармонические составляющие по току и напряжению.

3. Полученные на основе разработанного метода результаты используются при расчете режимов на предприятиях электрических сетей ОАО «Иркутская электросетевая компания», что подтверждено соответствующим актом внедрения.

Положения, выносимые на защиту:

1. При анализе несинусоидальных режимов двухцепных воздушных линий необходимо учитывать скин-эффект и взаимные электромагнитные связи между проводами, проводами и заземленными конструктивными элементами.

2. Адекватное моделирование несинусоидальных режимов двухцепных воздушных линий возможно при их многопроводном представлении в виде каскадного соединения четырнадцатиполюсников.

Соответствие специальности.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 05.14.02 - электрические станции и электроэнергетические системы по следующим пунктам:

1. Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике.

2. Разработка методов расчета установившихся режимов электроэнергетических систем.

3. Теоретический анализ и расчётные исследования по транспорту электроэнергии переменных током.

4. Разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике.

Реализация и внедрение результатов работы. Основные результаты работы используются при расчете режимных параметров двухцепных ВЛ на предприятиях электрических сетей ОАО «Иркутская электросетевая компания» и внедрены в учебный процесс по курсу «Теоретические основы электротехники» Братского государственного университета (г. Братск).

Личный вклад автора.

Вклад автора заключается в постановке и решении задач теоретического и экспериментального характера. Автором выполнены эксперименты и проведены промышленные испытания.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы обсуждались и были одобрены на конференциях различного уровня:

- зарубежных: Международной научно-практической конференции «Научные исследования современности» (Киев 2011); Международной научно-практической конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании» (Одесса 2011); Международной научно-практической конференции «Достижения в науке. Новые взгляды: проблемы, инновации» (Польша, г.Лодзь 2012); Международной научно-практической конференции «Теоретические и практические научные инновации» (Польша, г.Краков 2013); Международной научно-практической

конференции «Перспективы развития научных исследований в 21 веке» (Польша, г.Щэцин 2013);

- международных: Международной научно-практической конференции «Наука и техника в современном мире» (Новосибирск 2011);

- всероссийских: VII, X – XIII Всероссийских научно-технических конференциях «Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири» (Братск, 2008, 2011-2014).

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 19 печатных работ, из них 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, опубликованных автором лично и в соавторстве. Зарегистрирована программа для ЭВМ (свидетельство № 2014615987 от 06.06.2014). Получен патент РФ на изобретение (№ 2529640 от 05.08.2014г.).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы из 107 наименований, 5 приложений. Основной текст диссертации изложен на 121 странице, в том числе: 28 иллюстраций и 6 таблиц.

Глава 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСИНУСОИДАЛЬНОГО РЕЖИМА В ДВУХЦЕПНОЙ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ

1.1. Аналитический обзор по проблеме распределения токов и напряжений в двухцепной воздушной линии

Обязательное требование к надежному функционированию системы электроснабжения является снабжение качественной электрической энергией (КЭ) потребителей. Показатели КЭ регулируются ГОСТом Р 54149 -2010 [27]. В ГОСТ входят суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U и коэффициенты n -х гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$. В таблице 1.1 показаны нормально допустимые и предельно допустимые значения K_U . В таблице 1.2 показаны нормально допустимые значения $K_{U(n)}$.

Диссертация посвящена совершенствованию методики расчета токов и напряжений в двухцепной ВЛ при несинусоидальных режимах.

Несинусоидальные режимы отличаются непостоянством гармонических спектров [38, 53].

Таблица 1.1 - Значение суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения (в процентах)

Нормально допустимое значение при $U_{НОМ}$, кВ				Предельно допустимое значение при $U_{НОМ}$, кВ			
0,38	6-25	35	110-330	0,38	6-25	35	110-220
8,0	5,0	4,0	2,0	12,0	8,0	6,0	3,0

В качестве минимального интервала времени измерения качества приняты одни сутки. В течение 95% времени измерения величины K_U и $K_{U(n)}$ не должны превышать нормально допустимых значений, а максимальные значения должны быть меньше предельно допустимых значений [27].

Таблица 1.2 -Значение коэффициентов n -ой гармонической составляющей напряжения (в процентах)

Нечетные гармоники, не кратные 3, при $U_{НОМ}$,кВ					Нечетные гармоники, кратные 3, при $U_{НОМ}$,кВ					Четные гармоники, при $U_{НОМ}$,кВ				
n	0,38	6-25	35	110-220	n	0,38	6-25	35	110-220	n	0,38	6-25	35	110-220
5	6,0	4,0	3,0	1,5	3	5,0	3,0	3,0	1,5	2	2,0	1,5	1,0	0,5
7	5,0	3,0	2,5	1,0	9	1,5	1,0	1,0	0,4	4	1,0	0,7	0,5	0,3
11	3,5	2,0	2,0	1,0	15	0,3	0,3	0,3	0,2	6	0,5	0,3	0,3	0,2
13	3,0	2,0	1,5	0,7	21	0,2	0,2	0,2	0,2	8	0,5	0,3	0,3	0,2
17	2,0	1,5	1,0	0,5	>21	0,2	0,2	0,2	0,2	10	0,5	0,3	0,3	0,2
19	1,5	1,0	1,0	0,4						12	0,2	0,2	0,2	0,2
23	1,5	1,0	1,0	0,4						>12	0,2	0,2	0,2	—
25	1,5	1,0	1,0	0,4										
>25	—	—	—	—										

где n -номер гармонической составляющей

Потребители с нелинейной вольтамперной характеристикой являются основной причиной несинусоидальности напряжений и токов. От сетей высокого напряжения берут свое энергопотребление нелинейные потребители такие, как металлургические заводы, железнодорожный транспорт и др. Электропотребление данными потребителями приводит к искажению синусоидальной формы напряжений и токов [34, 37].

Особенно остро проблема несинусоидальности наблюдается в регионах, имеющих мощную металлургическую, химическую промышленность (Иркутская область, Красноярский край, Кемеровская область).

Повышенные уровни ВГ создают много отрицательных последствий: потери электроэнергии. Повреждается и сокращается срок службы оборудования, нарушается функционирование релейной защиты и автоматики и т.д.[35, 89].

Вследствие этого внимание ученых многих стран мира приковано к проблеме ВГ.

Большое число докладов на международных конференциях, посвящено электрическим системам [90, 92, 96, 97, 98, 101, 103, 104, 107], проводимых по программе IEEE с периодичностью 2 года.

Расчеты режимов электрических сетей являются определяющими при рассмотрении огромного количества задач, относящихся к проектированию, эксплуатации и защиты СЭС [42, 64]. Итоги расчетов применяются при оперативном управлении, планировании режимов, электроснабжении промышленных и иных объектов, вдобавок являются основой для оптимизации, оценки устойчивости и надежности СЭС. Решениям указанных задач посвящено большое количество работ, авторами которых являются: Альмендеев А.А., Берман А.П., Большанин Г.А., Ведерников А.С., Гамм А.З., Гераскин О.Т., Жежеленко И.В., Железко Ю.С., Карташев И.И., Крайчик Ю.С., Курбацкий В.Г., Лаутон М.А., Лосев С.Б., Липский А.М., Мисриханов М.Ш., Насыров Р.Р., Никифорова Е.В., Попов Н.М., Розенов В.И., Саенко Ю.Л., Сол-

датов В.А., Тимофеев Д.В., Трофимов Г.Г., Хрущев Ю.В., Черепанов В.В., Чернин А.Б., Аррилага Дж., Брэдли Д., Боджер П. и др.

Наиболее полно весь спектр вопросов, связанных с анализом ВГ напряжений и токов, разобран в монографии Аррилага Д., Брэдли Д. и Боджер П. [5]. Для промышленных предприятий – монографии Жежеленко И.А, Железко Ю.С., Саенко Ю.Л. [34-36]. Применительно к сетям электроснабжения железных дорог вопросы анализа ВГ напряжений и токов подробно рассмотрены в научной работе Тимофеева Д.В. «Режимы в электрических системах с тяговыми нагрузками» [84]. Подробно рассмотрено распределение тока и напряжения пониженного качества по трехпроводным и четырехпроводным линиям в монографии Большанина Г.А. [16]. Костенко, М.В., Перельман Л.С., Шкарин Ю.П. первыми определили, что число проводов соответствует числу пар волн в линии [51].

Трехфазные воздушные и кабельные линии 6-35кВ в расчетах допускается учитывать как линии с сосредоточенными параметрами [51]. При анализе процессов ВГ в линиях 220 кВ и выше при длинах больше 100км, появляется необходимость учета волновых процессов [5, 36].

Исследовать особенности систем электроснабжения и произвести оценку предполагаемых резонансных частот, способствуют частотные характеристики (ЧХ), отражающие амплитудные и фазовые зависимости входных сопротивлений относительно любой части сети от частоты.

В стандартной ситуации стараются снизить коэффициент гармонических искажений. [90].

Разработкой методик расчета режимных параметров в двухцепных ВЛ занимались Альмендеев А.А., Ведерников А.С., Мисриханов М.Ш.. В представленных работах [4, 16, 22, 62] рассматривается распределение электрической энергии по двухцепной ВЛ с сосредоточенными параметрами, удовлетворяющей требованиям ГОСТ Р 54149 - 2010. При наличии несинусоидальности напряжений и токов, результаты этих исследований могут давать существенную ошибку.

Поэтому проблема совершенствования методов расчета режимных параметров при несинусоидальных режимах является вполне своевременной и актуальной.

1.2. Распределение электрической энергии по воздушной линии

При решении задач анализа режимов работы ВЛ применяются выражения Максвелла [18,52].

Теория Максвелла выражена в виде системы уравнений, показывающих все признаки электромагнитных полей, используя две физические величины – напряженность магнитного поля \vec{H} и напряженность электрического поля \vec{E} . Использование уравнений Максвелла при исследовании передачи электроэнергии по ВЛ позволяют создать систему выражений с минимум потерь.

Фундамент теории Максвелла представляет собой четыре выражения.

1. Теорема о движении вектора напряженности магнитного поля \vec{H} имеет вид:

$$\oint_L \vec{H} dl = \int_S (j + \partial \vec{D} / \partial t) d\vec{S}.$$

где \vec{D} - электрическая индукция.

Это выражение указывает, что магнитные поля могут возбуждаться переменными электрическими полями или движущимися зарядами (электрический ток).

2. Электрическое поле может быть как вихревым (\vec{E}_B), так и потенциальным (\vec{E}_Q). Следовательно напряженность результирующего поля $\vec{E} = \vec{E}_Q + \vec{E}_B$. Поскольку движение вектора \vec{E}_Q равна нулю, а движение вектора \vec{E}_B формируется выражением:

$$\oint_L \vec{E}_B dl = - \oint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S},$$

где \vec{B} - магнитная индукция, \vec{S} - замкнутая двумерная поверхность, то движение вектора напряженности суммарного поля:

$$\oint_L \vec{E} dl = - \oint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}.$$

Данное выражение указывает, что причиной электрического поля могут быть меняющиеся во времени магнитные поля и электрические заряды.

3. Теорема Гаусса для электростатического поля в диэлектрике имеет вид:

$$\oint_L \vec{D} d\vec{S} = Q. \quad (1.1)$$

где Q – электрический заряд.

Из формулы (1.1) видно, что электрический заряд является источником электрической индукции.

В случае если внутри замкнутой поверхности с постоянной объемной плотностью c находится заряд, следовательно формула (1.1) предстанет в следующем виде:

$$\oint_L \vec{D} d\vec{S} = \int_V c d\vec{V}.$$

4. Теорема Гаусса для магнитного поля:

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0.$$

Полная система выражений Максвелла в интегральной форме:

$$\left. \begin{aligned} \oint_L \vec{E} dl &= - \oint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S} \\ \oint_L \vec{D} d\vec{S} &= \int_V c d\vec{V} \\ \oint_L \vec{H} dl &= \int_S (j + \partial \vec{D} / \partial t) d\vec{S} \\ \oint_S \vec{B} d\vec{S} &= 0 \end{aligned} \right\}.$$

Параметры, присутствующие в выражениях Максвелла, не представляются самостоятельными и между ними действует следующая связь:

$$\left. \begin{aligned} \vec{D} &= \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot \vec{E} \\ \vec{B} &= \mu_0 \cdot \mu \cdot \vec{H} \\ \vec{j} &= \gamma \cdot \vec{E} \end{aligned} \right\};$$

где μ_0 и ε_0 – соответственно магнитные и электрические постоянные, μ и ε – соответственно магнитные и диэлектрические и проницаемости среды, γ – удельная проводимость вещества, из которого изготовлен провод.

Для неизменных полей ($B = const$ и $E = const$) выражения Максвелла имеют следующую форму:

$$\left. \begin{aligned} \oint_L \vec{E} dl &= 0 \\ \oint_S \vec{D} d\vec{S} &= Q \\ \oint_L \vec{H} dl &= I \\ \oint_S \vec{B} d\vec{S} &= 0 \end{aligned} \right\}.$$

В этом деле магнитные и электрические поля независимы друг от друга, что разрешает изучать постоянные магнитные и электрические поля отдельно.

Используя известные из векторного анализа теоремы Гаусса и Стокса,

$$\left. \begin{aligned} \oint_L \vec{A} dl &= \int_S rot \vec{A} \cdot d\vec{S} \\ \oint_S \vec{A} d\vec{S} &= \int_V div \vec{A} \cdot d\vec{V} \end{aligned} \right\}.$$

можно показать итоговые выражения Максвелла в дифференциальной форме:

$$rot \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t; \quad (1.2)$$

$$div \vec{D} = c; \quad (1.3)$$

$$rot \vec{H} = \vec{j} + \partial \vec{D} / \partial t; \quad (1.4)$$

$$div \vec{B} = 0. \quad (1.5)$$

Когда токи и заряды распределены в пространстве постоянно, то оба вида выражений Максвелла – интегральная и дифференциальная – тождественны. При наличии поверхностей разрыва – поверхности, где свойства полей или среды изменяются неравномерно, то интегральная форма выражений оказывается обобщенной.

Выражения Максвелла – обобщенные выражения для магнитных и электрических полей в покоящихся средах. Из выражений Максвелла видно, что переменное магнитное поле связано с формируемым им электрическим полем, а переменное электрическое поле связано с формируемым им магнитным, т. е. магнитные и электрические поля неразделимо соединены друг с другом – они создают общее электромагнитное поле.

Эти уравнения иллюстрируют волновой характер распространения электромагнитного поля. В линейной среде электромагнитное поле распространяется по гармоническим законам. Таким образом, процесс распространения электрической энергии по ВЛ можно определить как колебательный.

При анализе двухцепных ВЛ, использование выражений (1.2 – 1.5) для расчета установившегося режима, при применении вычислительных средств, становится трудоемким.

Электрическая энергия в инженерной практике часто оценивается по своим основным характеристикам: напряжению и току. В линейной среде эти характеристики тоже распространяются по гармоническим законам. Их распространение также представляет собой колебательный процесс. Частота колебаний в российских ЭЭС составляет 50 Гц. Можно сказать, что частота колебаний электромагнитного поля в ВЛ равна 50 Гц. Длина волны электромагнитного поля в вакууме определяется по формуле:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

где c – скорость распространения электромагнитного поля. В инженерной практике принимают $c \approx 3 \cdot 10^5$ км/с [79].

Тогда при частоте изменения напряжения и тока, равной 50 Гц, длина волны электромагнитного поля в вакууме будет равна:

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^5}{50} = 6000 \text{ км.}$$

Расстояние 200-400 км ориентировочно соответствует двадцатой части длины волны электромагнитного поля, частота колебаний которого равна 50 Гц. Однако учет волнового характера распределения электрической энергии представляет собой своеобразную и относительно громоздкую операцию. Так как протяженность участков линий, заключенных между двумя соседними переключательными пунктами, как правило, меньше 1/20 длины электромагнитной волны на частоте основной гармонической составляющей, то соответствующие ВЛ нет необходимости считать дальними, которые обычно представляются как линии с распределенными параметрами.

Однако, в настоящее время достаточно остро встала проблема качества электрической энергии, которая в сложившейся ситуации представляет собой количественную характеристику электромагнитного поля. Присутствию в электрической энергии высших гармоник, когда 5-процентная длина электромагнитной волны меньше протяженности ВЛ, то данную ВЛ необходимо анализировать как линию с распределенными параметрами [66]. В связи с этим в обстановке пониженного качества электрической энергии однородный участок двухцепной ВЛ необходимо анализировать в виде линии с распределенными параметрами.

1.3 Методики анализа распределения электрической энергии в двухцепной воздушной линии

Методика анализа несинусоидальных режимов электрических систем базируется на методе симметричных составляющих. Данный метод используется для линейных систем. Метод симметричных составляющих представляется в виде трех однолинейных схем замещения [42].

Наиболее просто метод симметричных составляющих выполняется для симметричных систем при несимметричных возмущениях. В данной ситуации матрица сопротивлений в симметричных координатах оказывается диагональной, и любое из уравнений становится независимым от других, точнее сказать расчеты режимов прямой, обратной, нулевой последовательностей можно проводить обособлено [42]. Симметричные составляющие ограничено используются для расчета несимметричных систем. Увеличение количества несимметрий в электрической системе приводит к сдерживанию применению симметричных составляющих. Из-за этого применение метода симметричных составляющих затруднено.

Особенно продуктивно задачу расчета сложно-несимметричных режимов можно решить на основе применения метода фазных координат. При его применении электрическую систему можно описывать трехлинейной схемой [42]. Данная методика может рассматривать различные типы трехфазных линий (короткие замыкания, разрывы проводов), присутствие расщепленных линейных проводов и грозозащитных тросов.

Решающим достоинством метода фазных координат является получение точных моделей элементов электроэнергетических систем таких, как кабельные и воздушные линии, однофазные и трехфазные трансформаторы различных модификаций, синхронные и асинхронные машины [42]. Все же два условия препятствуют применению симметричных составляющих наравне с фазными координатами. Первое – формулировка матрицы сопротивлений берет свое начало в фазных координатах, где необходима точная исходная модель. Второе – соединение схем замещения различных последовательностей сравнительно сложны.

Регулярное использование фазных координат для анализа режимов электрических сетей получило распространение в работах М.А. Лаутона, М.В. Костенко [51, 102], С.Б. Лосева, А.Б. Чернина [56, 57], А.П. Бермана [11]. ВЛ заменяются решетчатыми схемами или многополюсниками. Н.М.

Поповым и В.А. Солдатовым предлагается создание макета линий многополюсником, но только для трехфазной трехпроводной линии [42, 80, 81].

Достоинство симметричных составляющих в сравнении с методом фазных координат оказывается меньший объем информации, необходимый для создания схемы замещения, уменьшенный размер оперативной памяти при проведении расчетов, уменьшенное число расчетов и времени проведения операции. Изображение трехфазной системы в симметричных составляющих уравнивает параметры фаз и пропадет пофазное различие, что при наличии ВГ напряжений и токов может привести к существенным различиям расчета и фактического распределения токов и напряжений по ВЛ. При данной ситуации он не обладает преимуществом перед методом фазных координат.

Прогресс вычислительной техники в данное время предоставляет возможность убрать ограничения на применение метода фазных координат в энергетических расчетах, заключавшихся в небольших вычислительных способностях ЭВМ. В ПК последних модификациях присутствует достаточно большая скорость расчетов для работы с трехфазной системой энергоснабжения. Следовательно оказалось осуществимо. Поэтому стало реально выполнять расчет режимов достаточно больших участков энергосистемы, учитывая пофазное различие элементов [80].

По изложенным выше факторам проблема моделирования ВЛ в фазных координатах с использованием взаимных электромагнитных связей фазных проводов является актуальной. Однако, все выше перечисленные методики реализуются для качества электроэнергии, удовлетворяющих требованиям ГОСТ Р 54149 — 2010. Поэтому разработка и совершенствование методов расчета установившихся режимов двухцепных ВЛ в условиях пониженного качества электроэнергии представляет собой актуальную и важную с практической точки зрения задачу. Исследования, проведенные автором в направлении решения этой проблемы, легли в основу диссертационной работы.

1.4. Выводы по главе 1

1. Проведенный анализ литературных источников показал, что большинство современных СЭС характеризуются наличием потребителей с нелинейной вольтамперной характеристикой, что приводит к существенному искажению форм кривых токов и напряжений. Большие мощности нелинейных нагрузок приводят к возникновению резонансных процессов с соответствующим ростом токов и напряжений ВГ.

2. Показатели качества электроэнергии в современных электрических сетях 110-220 кВ часто не соответствуют стандарту ГОСТ Р 54149 — 2010, что значительно снижает надежность электрооборудования и приводит к увеличению погрешности при расчетах.

3. Ограниченная результативность методов расчета режимных параметров в двухцепной ВЛ в условиях пониженного качества электрической энергии существенно затрудняет реализацию мероприятий по повышению качества электроэнергии. В результате проведенного анализа существующих методов расчета токов и напряжений в двухцепной ВЛ наиболее перспективным был определен метод фазных координат.

ГЛАВА 2. УСТАНОВИВШИЙСЯ РЕЖИМ ПЕРЕДАЧИ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ ПО ДВУХЦЕПНОЙ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ

2.2 Электрическая схема замещения двухцепной воздушной линии

Результат транспортировки электрической энергии по двухцепным ВЛ в инженерной практике обычно определяется так: определяется результат передачи энергии по однопроводной однофазной ВЛ, а затем полученный результат расчета распространяется на все линии двухцепной ВЛ [66]. Это верно только при условии качества электрической энергии, совпадающей с требованиями ГОСТ Р 54149 – 2010 [27]. Если требования ГОСТ не выполняются и электрическая энергия имеет завышенные показатели несинусоидальности, следовательно разговор нужно вести об энергии пониженного качества [66].

Электрические цепи ВЛ принято рассматривать либо как цепи с распределенными, либо с сосредоточенными параметрами. Линию с распределенными параметрами называют однородной, если равны между собой все продольные сопротивления участков линии и если равны все поперечные сопротивления участков линии.

Исследование распределения электрической энергии пониженного качества вдоль неперегруженной ВЛ следует проводить на каждой частоте гармонической составляющей тока и напряжения [66].

Для вычисления распределения токов и напряжений в двухцепной ВЛ в обстановке пониженного качества электроэнергии создается расчетная схема замещения, при создании которой следует учитывать некоторые особенности [62, 66, 69]:

1. Схему замещения следует составлять для каждой гармонической составляющей.

2. ВЛ необходимо представлять в виде схемы с распределенными параметрами.

3. При рассмотрении ВЛ рекомендуется разбивать ее на однородные участки, границами однородности которых могут служить изменение рельефа местности, взаимного расположения проводов (транспозиция) и т.д.

4. Схема замещения каждого однородного участка ВЛ должна быть полнофазной.

5. Электромагнитная связь между проводами однородного участка двухцепной воздушной линии учитывается взаимными индуктивностями, емкостями и активными проводимостями.

Границы однородности:

1. Узлы двухцепной воздушной ЛЭП.
2. Изменение марки провода.
3. Изменение взаимного расположения проводов.
4. Резкое изменение рельефа местности.
5. Деление двухцепной ЛЭП на одноцепную и вновь схождение в двухцепную.

С учетом выше сказанных особенностей на рисунке 2.1 представлена расчетная электрическая схема замещения элементарного однородного участка двухцепной ВЛ на частоте n -ой гармонической составляющей.

В схеме находятся продольные параметры линейных проводов $R_{0A'n}$, $L_{0A'n}$, $C_{0A'n}$, $R_{0B'n}$, $L_{0B'n}$, $C_{0B'n}$, $R_{0C'n}$, $L_{0C'n}$, $C_{0C'n}$, $R_{0A''n}$, $L_{0A''n}$, $C_{0A''n}$, $R_{0B''n}$, $L_{0B''n}$, $C_{0B''n}$, $R_{0C''n}$, $L_{0C''n}$, $C_{0C''n}$; поперечные параметры определяются электромагнитными связями между линейными проводами: $G_{0A'B'n}$, $C_{0A'B'n}$, $G_{0A'A''n}$, $C_{0A'A''n}$, $G_{0A'B''n}$, $C_{0A'B''n}$, $G_{0B'A''n}$, $C_{0B'A''n}$, $G_{0B'C'n}$, $C_{0B'C'n}$, $G_{0B'B''n}$, $C_{0B'B''n}$, $G_{0B'C''n}$, $C_{0B'C''n}$, $G_{0C'A'n}$, $C_{0C'A'n}$, $G_{0C'A''n}$, $C_{0C'A''n}$, $G_{0A'B''n}$, $C_{0A'B''n}$, $G_{0B'C'n}$, $C_{0B'C'n}$, $G_{0B'C''n}$, $C_{0B'C''n}$, $G_{0C'A'n}$, $C_{0C'A'n}$, $G_{0C'A''n}$, $C_{0C'A''n}$ и электромагнитными связями между линейными проводами и поверхностью

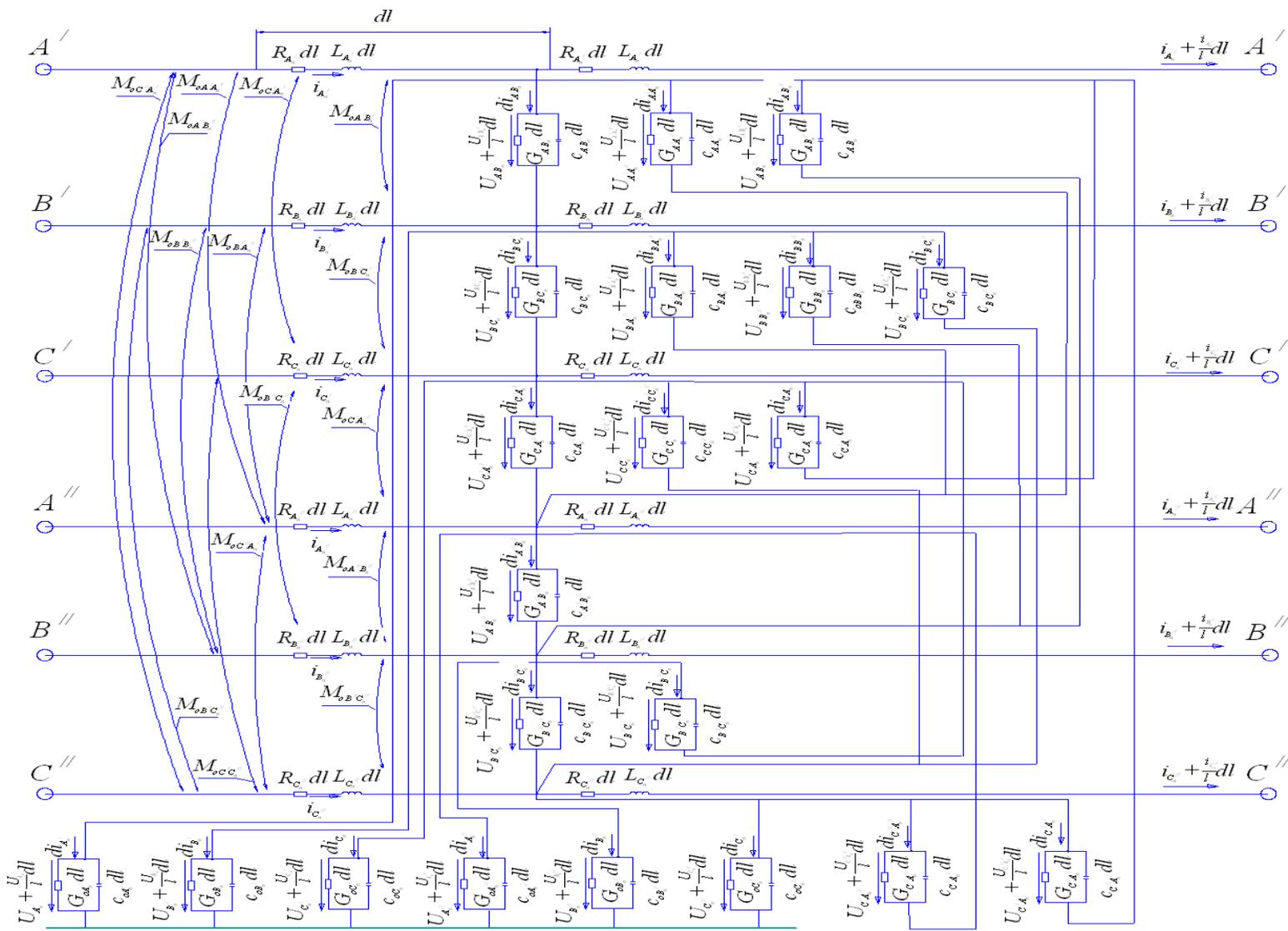


Рисунок 2.1 - Расчетная электрическая схема замещения однородного участка двухцепной ВЛ на частоте n -ой гармонической составляющей

земли: $G_{0A'0n}$, $C_{0A'0n}$, $G_{0B'0n}$, $C_{0B'0n}$, $G_{0C'0n}$, $C_{0C'0n}$, $G_{0A''0n}$, $C_{0A''0n}$, $G_{0B''0n}$, $C_{0B''0n}$, $G_{0C''0n}$, $C_{0C''0n}$, $di_{A'B''n}$; $di_{A'A''n}$, $di_{A'B'n}$, $di_{A'n}$, $di_{B'A''n}$, $di_{B'C'n}$, $di_{B'B''n}$, $di_{B'C'n}$, $di_{B'n}$, $di_{C'C''n}$, $di_{C'A'n}$, $di_{C'A''n}$, $di_{C'n}$, $di_{A''B''n}$, $di_{A''n}$, $di_{B''C''n}$, $di_{B''C'n}$, $di_{B''n}$, $di_{C''A''n}$, $di_{C''B'n}$, $di_{C''n}$ – токи утечки по соответствующим электромагнитным связям; $M_{0A'B'n}$, $M_{0A'A''n}$, $M_{0A'B''n}$, $M_{0B'C'n}$, $M_{0B'A''n}$, $M_{0B'B''n}$, $M_{0B'C''n}$, $M_{0C'A'n}$, $M_{0C'A''n}$, $M_{0C'C''n}$, $M_{0A''B''n}$, $M_{0B''C''n}$, $M_{0C''A''n}$, $M_{0C''B'n}$ – взаимные индуктивности [65].

Поперечные параметры двухцепной ВЛ характеризуют электромагнитную связь между проводами ВЛ и поверхностью земли или заземленными конструктивными элементами.

Между проводами двухцепной ВЛ и поверхностью земли существует электрическое поле, о чем обычно свидетельствует разность потенциалов между указанными объектами. Этот факт в электрических схемах замещения ВЛ обычно иллюстрируется емкостной проводимостью, то есть емкостным элементом, входящим в состав поперечных параметров ВЛ.

Известно, что Земля обладает мощным магнитным полем, ВЛ тоже является его источником. Ионизация пространства, окружающего провода ВЛ, в электрических схемах замещения иллюстрируется активной проводимостью электрической энергии к поверхности земли, то есть резистивным элементом соответствующих поперечных параметров. Резистивный элемент здесь иллюстрирует не только процесс ионизации окружающего пространства провода двухцепной ВЛ, но и перенос на поверхность земли элементарных носителей электрической энергии, например, электронов.

Процессы образования магнитного поля на электрических схемах замещения иллюстрируются индуктивными элементами. Если несколько индуктивных элементов имеют пересекающиеся магнитные поля, то говорят,

что эти элементы магнитно-связанные. Такую магнитную связь обычно иллюстрируют взаимной индуктивностью M_{0n} .

Взаимная индуктивность между проводом и землей компенсируется при равномерном растекании тока по грунту. Кроме того, магнитное поле ВЛ поглощается магнитным полем земли. Поэтому, количественный учет из взаимосвязи практически невозможен.

2.2. Методика определения первичных параметров двухцепной воздушной линии

Каждый провод двухцепной ВЛ обладает продольными параметрами, имеющими признаки резистивных и индуктивных составляющих, а также поперечными параметрами, которые имеют признаки резистивных и емкостных составляющих и иллюстрируют электромагнитные связи между проводами, а также между каждым проводом и землей. Кроме того, следует учитывать явление взаимной индукции между проводами ВЛ. Именно поэтому электрическая схема замещения элементарного участка однородной двухцепной ВЛ на частоте n -ой гармонической составляющей будет выглядеть так, как показано на рисунке 2.1.

Поскольку протяженность однородных участков ВЛ различна, вводятся обозначение погонных параметров, т.е. параметров, приведенных к единице длины ВЛ, к примеру, в один километр. Погонные параметры ВЛ различной конструкции, с различными сечениями проводников фаз и различных напряжений можно посмотреть в справочной литературе [3, 32, 43, 44].

Продольные параметры: $R_{0A'n}$ и $L_{0A'n}$ - это активное сопротивление и собственная индуктивность одного линейного провода. Поперечные параметры: $G_{0A'B'n}$ и $C_{0A'B'n}$ - это активная проводимость и емкость между проводами A' и B' , $M_{0A'B'n}$ - взаимная индуктивность между проводами A' и B' ,

$G_{0A'0n}$ и $C_{0A'0n}$ – активная проводимость и емкость между линейным проводом и поверхностью земли.

Активное сопротивление линии электропередачи. Проводниковые материалы (медь, алюминий, сталь, сплавы на их основе), применяемые для проводов ВЛ, обладают электрическим сопротивлением. При протекании тока i по продольной ветви схемы замещения выделенного участка в этом сопротивлении теряется активная мощность, в виде тепловой энергии.

Разделяют два класса электрического сопротивления. Омическое сопротивление меньше активного из-за выталкивания тока к внешней поверхности проводника. На промышленной частоте 50 Гц данное свойство незаметно, отличие омического и активного сопротивлений не превышает 0,5%, и его обычно игнорируют [44].

При отсутствии перегрузки в реально существующем диапазоне изменения температуры проводника его сопротивление изменяется незаметно. Следовательно, при проведении инженерных расчетов температурным изменением сопротивлений проводников, обычно, пренебрегают [44].

Для ВЛ используются, в основном, сталеалюминиевые и алюминиевые провода [44]. В результате поверхностного эффекта переменный ток по сечению провода распределяется неравномерно, вытесняясь к его наружному слою. Чем выше частота тока, тем в большей степени происходит вытеснение тока к поверхности провода. Сопротивление провода электрическому сигналу возрастает, электромагнитная волна затухает. Сечение провода используется не полностью. Таким образом, активное сопротивление сталеалюминиевого и алюминиевого проводов при равных сечениях алюминиевой части примерно равны. При оценке значений активного сопротивления от ВГ принято полагать, что имеет место резкое проявление поверхностного эффекта и значение активного сопротивления возрастает пропорционально \sqrt{n} [36]. Но и это весьма ориентировочно.

Продольное активное сопротивление с учетом поверхностного эффекта будет определяться так:

$$R_{on} = r_0 \cdot l \cdot \sqrt{n},$$

где l – протяженность ВЛ, км, r_0 – погонное активное сопротивление, Ом/км; n – порядковый номер ВГ.

Величину погонного активного сопротивления r_0 для проводов ВЛ из различных проводниковых материалов можно взять в справочной литературе [44, 82].

Индуктивное сопротивление ВЛ. Из теории электротехники известно, что индуктивное сопротивление одиночного проводника формируется ЭДС самоиндукции, наводимой в данном проводнике переменным магнитным полем, появляющимся внутри и снаружи проводника при растекании переменного тока i по продольной ветви схемы замещения выделенного участка [12, 44].

Индуктивное сопротивление линии электропередачи – определяется:

$$X_{on} = \omega \cdot L_{on}$$

где ω – циклическая круговая частота, равная $2 \cdot \pi \cdot f$.

Собственная индуктивность провода L_{on} с учетом поверхностного эффекта рассчитывается по формуле:

$$L_{on} = \frac{0,8225 \cdot K_{\hat{N}\hat{E}\hat{D}}}{\pi \cdot r \cdot p \cdot \sqrt{n \cdot f}},$$

где r – радиус провода, p – математический коэффициент, равный $0,27 \cdot 10^{-7} \hat{h} \cdot \hat{i}$, $K_{\hat{N}\hat{E}\hat{D}}$ – коэффициент скрутки проводов, который определяется как [16]:

$$K_{\hat{N}\hat{E}\hat{D}} = \frac{4,5}{\pi} \cdot \frac{n + \pi}{n + 2}, \quad (2.1)$$

где n – число проволок во внешнем повиве.

Число проволок во внешнем повиве провода ВЛ колеблется от 8 до 24. Из формулы (2.1) видно, что коэффициент скрутки изменяется от 1,65 до 1,50. Однако, результаты проведенных экспериментальных исследований внесли некоторые коррективы в методику определения его количественной

оценки [61]. Они показали, что коэффициенты скрутки сталеалюминиевых проводов при числе повивов алюминиевых проволок, равном двум или больше, практически не зависят от марки провода и частоты и составляют 1,6 – 1,8. Коэффициенты скрутки сталеалюминиевых проводов с одним повивом алюминиевых проволок колеблются от 2,6 до 4,5.

Разброс количественных оценок коэффициентов скрутки зависит от шага повива. Чем меньше шаг повива, тем больше численное значение коэффициента скрутки.

Для алюминиевых и сталеалюминиевых проводов ВЛ с двумя и более повивами алюминиевых проволок при расчетах коэффициент скрутки чаще всего принимают равным 1,8.

Активная проводимость ВЛ. Помимо потерь активной мощности, используемой на нагревание проводника, в ВЛ присутствуют потери активной мощности, образованные:

- ионизацией воздуха около провода (явление общей короны);
- токами утечки поверх изоляции из-за ее несовершенства.

Эти факторы определяют активную проводимость ВЛ [44].

В соответствии с «Инструкцией по выбору изоляции электроустановок» [45] минимальная длина пути тока утечки по изоляторам нормируется в зависимости от степени загрязненности атмосферы (СЗА).

Установлено семь уровней СЗА: к районам с первым уровнем СЗА отнесены леса, тундра, болота, луга с не засоленными почвами, не попадающие в зону влияния промышленных и природных источников загрязнения; к районам со вторым уровнем СЗА – районы со слабозасоленными почвами и сельскохозяйственные районы, в которых применяют химические удобрения и химическую обработку посевов; к районам с третьим – седьмым уровнями СЗА – районы с промышленными источниками загрязнения различной интенсивности, зависящей от расстояния от источника, характера и объемов производства.

Соотношение уровней СЗА может быть охарактеризовано относительными значениями минимальной длины пути утечки тока по гирлянде изоляторов, приведенными в таблице 2.1 (за единицу приняты значения для первого уровня СЗА).

В соответствии с данными таблицы 2.1 при увеличении уровня СЗА должно быть соответственно увеличено число изоляторов в гирлянде. Их отношение для различных уровней СЗА (таблица 2.2) приблизительно соответствует отношениям таблицы 2.1 – для линий напряжением 110 кВ и выше число изоляторов в гирлянде в районе с седьмым уровнем СЗА больше, чем в первом в 2,5 раза, а для линий напряжением 6 – 35 кВ – в 2 раза. Значения напряжения, приходящегося на один изолятор линий, приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.1 - Относительные значения минимальной длины пути утечки тока для различных уровней СЗА

Уровень СЗА	Минимальная длина пути утечки, отн. ед., для линий напряжением, кВ		
	6-35	110-220	330-750
1	1,00	1,00	1,00
2	1,00	1,14	1,07
3	1,18	1,36	1,29
4	1,37	1,61	1,61
5	1,63	1,86	1,86
6	1,84	2,21	2,21
7	2,20	2,64	2,64

Таблица 2.2 - Среднее число изоляторов на опорах ВЛ при различных уровнях СЗА

Уровень СЗА	Среднее число изоляторов в гирлянде на линиях напряжением, кВ								
	6	10	20	35	110	220	330	500	750
1	1	1	2	3	6	12	18	25	39
2	1	1	2	3	7	15	19	27	42
3	1	1	2	3	8	16	20	30	48
4	1	1	3	4	10	20	25	35	60
5	2	2	3	4	10	20	28	40	60
6	2	2	4	5	12	24	34	49	72
7	2	2	4	6	15	29	40	59	87

Мощность, выделяющуюся на одном изоляторе, определяют по формуле, кВт:

$$P_{\dot{E}\zeta} = \frac{U_{\dot{E}\zeta}^2}{R_{\dot{E}\zeta}}, \quad (2.2)$$

где $U_{\dot{E}\zeta}$ – напряжение, приходящееся на изолятор, кВ; $R_{\dot{E}\zeta}$ – его сопротивление, кОм.

Для расчетов по формуле (2.2) необходимо знать сопротивления изоляторов при различных уровнях СЗА.

Таблица 2.3 - Значения напряжения, приходящегося на один изолятор

Уровень СЗА	Напряжение, кВ, приходящееся на один изолятор на линиях номинального напряжения, кВ								
	6	10	20	35	110	220	330	500	750
1	3,5	5,8	5,8	6,7	10,6	10,6	10,6	11,6	11,2
2	3,5	5,8	5,8	6,7	9,1	8,5	10,0	10,7	10,4
3	3,5	5,8	5,8	6,7	7,9	7,9	9,5	9,6	9,0
4	3,5	5,8	3,8	5,1	6,4	6,4	7,6	8,2	7,2
5	1,8	2,9	3,8	5,1	6,4	6,4	6,8	7,2	7,2
6	1,8	2,9	2,9	4,0	5,3	5,3	5,6	5,9	6,0
7	1,8	2,9	2,9	3,4	4,2	4,4	4,8	4,9	5,0

При определении числа гирлянд изоляторов следует исходить из того, что на каждой обычной промежуточной опоре находятся три гирлянды изоляторов. На опорах, установленных на переходах рек, автомобильных и железнодорожных трасс, применяются сдвоенные гирлянды. На анкерной опоре со сдвоенными натяжными гирляндами находится 12 гирлянд изоляторов, а на анкерной опоре 500 кВ - 18 гирлянд (в каждой фазе с расщепленными проводами по три гирлянды).

В оценочных расчетах при определении числа гирлянд можно использовать средние значения числа опор на 1 км ВЛ различных классов напряжения, которые рассчитаны, исходя из средних длин пролетов и приблизительной доли анкерных опор 10 %, представлены в таблице 2.4.

Таблицы 2.4 - Зависимость напряжения ВЛ от количества гирлянд

Напряжение ВЛ, кВ	220	110	35	20-6
$n_{\bar{A}E\bar{D}}$, шт/км	9,8	12,9	23,4	46,8

Распределение участков ВЛ по СЗА определяется на стадии проектирования. Действительные условия могут отличаться от проектных. Для уточнения данных необходимо провести районирование трасс ВЛ по СЗА с учетом реально действующих источников загрязнения. При этом следует руководствоваться «Инструкцией по выбору изоляции электроустановок» [46]. В первом приближении уровень СЗА в конкретном районе можно определить по близости фактического числа изоляторов в гирлянде по данным таблицы 2.2.

Значения потерь активной мощности на корону для ВЛ с различными сечениями проводов и различного напряжения определяются, чаще всего, экспериментально. Имеются и эмпирические зависимости с целью примерной оценки потерь на корону [44]. Погонные значения активной мощности потерь на корону ΔP_0 , кВт/км, приводятся в справочных материалах [17]. Активная проводимость, См/км:

$$G_0 = \Delta P_0 \cdot 10^{-3} / U_{\text{нн}}^2$$

и активная проводимость линии:

$$G = G_0 \cdot l.$$

Иногда на высоких частотах активную составляющую поперечных параметров учитывают еще более упрощено, а именно, в виде активной проводимости изоляции [61]. Грубо активную проводимость одного подвесного изолятора керамического или стеклянного исполнения оценивают так:

$$G_{on} \approx \frac{n \cdot f}{k \cdot 10^{11}},$$

где k – число изоляторов в гирлянде, соединяющих проводящие и заземленные части конструкции двухцепной ВЛ.

Емкость ВЛ. Под воздействием электростатического поля между проводами и землей, а также между проводами возникают токи смещения. Значения этих токов формируются емкостями между каждой линией и землей и между линиями. Значения данных емкостей, зависящих от взаимного размещения проводников, геометрических размеров, диэлектрических свойств изоляции линий, обуславливают емкостную проводимость ВЛ [44].

Погонная емкостная проводимость ВЛ b_0 , См/км, рассчитывается по формуле [2]:

$$b_0 = \omega \cdot c_0 = 7.58 \cdot 10^{-6} / \lg(D_{CP} / R_{iD}),$$

Емкость между проводом и землей можно определить следующим образом [16, 59]:

$$C_0 = \frac{1}{c \cdot \lg \frac{H}{r}},$$

где H – расстояние между проводом и его зеркальным отражением относительно поверхности земли; c – постоянный коэффициент, равный $41,4 \cdot 10^6$ км/Ф.

С учетом провеса провода ВЛ расстояние между проводом и его зеркальным отражением обычно определяют по формуле [11, 47]:

$$H = 2 \left(h + \frac{\delta}{3} \right),$$

где h – расстояние между проводом и землей; δ – стрела провеса провода.

Емкостная связь между двумя проводами с погрешностью до 5% можно определить [59]:

$$C_{12} = \frac{1}{c \cdot \lg \frac{H_{ij}}{d}};$$

или так [47]:

$$C_{12} = \left(\ln \frac{d^2}{r_1 \cdot r_2} \right)^{-1},$$

где H_{ij} – расстояние между первым проводом и зеркальным отражением второго; d – расстояние между проводами; r_1 и r_2 – радиусы первого и второго провода.

После определения количественных характеристик элементной базы схемы замещения однородного участка двухцепной ВЛ можно определить количественные характеристики продольных и поперечных параметров по формулам:

$$Z_{0n} = R_{0n} + jn \cdot \omega \cdot L_{0n};$$

$$Y_{0n} = G_{0n} + jn\omega \cdot C_{0n}.$$

В многофазной системе переменного тока в каждом линейном проводе добавочно наводятся ЭДС взаимной индукции от проводов других фаз [44].

Взаимная индуктивность между проводами определяется по следующей формуле [19, 48]:

$$M_{jkimn} = \frac{\mu_0 \cdot l}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\ln \left(\frac{l + \sqrt{l^2 + d^2}}{d} - \frac{\sqrt{l^2 + d^2}}{d} + \frac{d}{l} \right) \right),$$

где l – протяженность линии, равная 1 км; d – расстояние между проводами.

2.3. Выводы по главе 2

1. Представлена полнофазная схема замещения передачи электрической энергии в двухцепной ВЛ, учитывающая электромагнитные связи между конструктивными элементами этой ВЛ.

2. Сформулирована методика определения первичных параметров двухцепной ВЛ с учетом несинусоидального режима.

ГЛАВА 3. РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ В ДВУХЦЕПНОЙ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ

3.1 Расчет напряжений и токов на однородном участке двухцепной воздушной линии

На основании схемы замещения двухцепной ВЛ (рисунок 2.1) можно разработать математическую модель распределения режимных параметров по длине рассматриваемого участка двухцепной ВЛ.

Расчеты токов и напряжений ВЛ являются неотъемлемым элементом решения задач, связанных с проектированием, наладкой и эксплуатацией ВЛ [69]. Результаты данных расчетов применяются при анализе режимов, потерь мощности и напряжения ВЛ.

Так как ток и напряжение есть функции времени и длины ВЛ, то в модели следует применять частные производные [16, 66].

Рассмотрим однородный участок двухцепной ВЛ элементарной протяженностью dl .

В начале рассматриваемого участка двухцепной ВЛ присутствуют:

1. напряжения между линейными проводами и поверхностью земли

$$u_{A'n}, u_{B'n}, u_{C'n}, u_{A''n}, u_{B''n}, u_{C''n};$$

2. напряжения между линейными проводами $u_{A'B'n}, u_{A'A''n}, u_{A'B''n},$

$$u_{B'A''n}, u_{B'C'n}, u_{B'B''n}, u_{B'C'n}, u_{C'C'n}, u_{C'A'n}, u_{C'A''n}, u_{A'B''n}, u_{B'C'n}, u_{B'C'n}, u_{C'A'n},$$

$$u_{C'A''n};$$

3. линейные токи $i_{A'n}, i_{B'n}, i_{C'n}, i_{A''n}, i_{B''n}, i_{C''n}.$

Выходные характеристики электрической энергии на частоте n -ой гармонической составляющей примут следующий вид:

$$\begin{aligned}
& u_{A'B'n} + \frac{\partial u_{A'B'n}}{\partial l} \cdot dl; \quad u_{A'A''n} + \frac{\partial u_{A'A''n}}{\partial l} \cdot dl; \quad u_{A'B''n} + \frac{\partial u_{A'B''n}}{\partial l} \cdot dl; \quad u_{B'A''n} + \frac{\partial u_{B'A''n}}{\partial l} \cdot dl; \\
& u_{B'C''n} + \frac{\partial u_{B'C''n}}{\partial l} \cdot dl; \quad u_{B'B''n} + \frac{\partial u_{B'B''n}}{\partial l} \cdot dl; \quad u_{B'C'n} + \frac{\partial u_{B'C'n}}{\partial l} \cdot dl; \quad u_{C'C''n} + \frac{\partial u_{C'C''n}}{\partial l} \cdot dl; \\
& u_{C'A'n} + \frac{\partial u_{C'A'n}}{\partial l} \cdot dl; \quad u_{C'A''n} + \frac{\partial u_{C'A''n}}{\partial l} \cdot dl; \quad u_{A''B''n} + \frac{\partial u_{A''B''n}}{\partial l} \cdot dl; \quad u_{B''C''n} + \frac{\partial u_{B''C''n}}{\partial l} \cdot dl; \\
& u_{B''C'n} + \frac{\partial u_{B''C'n}}{\partial l} \cdot dl; \quad u_{C''A''n} + \frac{\partial u_{C''A''n}}{\partial l} \cdot dl; \quad u_{C''A'n} + \frac{\partial u_{C''A'n}}{\partial l} \cdot dl; \quad u_{A'n} + \frac{\partial u_{A'n}}{\partial l} \cdot dl; \\
& u_{B'n} + \frac{\partial u_{B'n}}{\partial l} \cdot dl; \quad u_{C'n} + \frac{\partial u_{C'n}}{\partial l} \cdot dl; \quad u_{A''n} + \frac{\partial u_{A''n}}{\partial l} \cdot dl; \quad u_{B''n} + \frac{\partial u_{B''n}}{\partial l} \cdot dl; \\
& u_{C''n} + \frac{\partial u_{C''n}}{\partial l} \cdot dl; \quad i_{A'n} + \frac{\partial i_{A'n}}{\partial l} \cdot dl; \quad i_{B'n} + \frac{\partial i_{B'n}}{\partial l} \cdot dl; \quad i_{C'n} + \frac{\partial i_{C'n}}{\partial l} \cdot dl; \quad i_{A''n} + \frac{\partial i_{A''n}}{\partial l} \cdot dl; \\
& i_{B''n} + \frac{\partial i_{B''n}}{\partial l} \cdot dl; \quad i_{C''n} + \frac{\partial i_{C''n}}{\partial l} \cdot dl.
\end{aligned}$$

Математическая модель анализируемого участка двухцепной ВЛ содержит двадцать одно уравнение напряжения и шесть уравнений тока, то есть двадцать семь уравнений.

В случае когда в выбранный участок ВЛ протяженностью dl входит ток линии A' $i_{A'n}$, то на выходе данного участка по той же линии преобразившийся по величине ток $i_{A'n} + \frac{\partial i_{A'n}}{\partial l} \cdot dl$; если в начале выделенного участка напряжение фазы A' формируется величиной $u_{A'n}$, то в конце на этой же фазе устанавливается напряжение величиной $u_{A'n} + \frac{\partial u_{A'n}}{\partial l} \cdot dl$ [16, 65].

Математическая модель составляется, опираясь на законы Кирхгофа.

Уравнению тока в линии A' справедлив 1-ый закон Кирхгофа:

$$i_{A'n} = di_{A'n} + di_{A'B'n} + di_{A'A''n} + di_{A'B''n} - di_{C'A'n} - di_{C''A'n} + i_{A'n} + \frac{\partial i_{A'n}}{\partial l} \cdot dl. \quad (3.1)$$

Уравнению напряжения фазы A' справедлив 2-ой закон Кирхгофа:

$$u_{A'n} = i_{A'n} \cdot R_{0A'n} \cdot dl + L_{0A'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{A'n}}{\partial t} + M_{0A'B'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{B'n}}{\partial t} + M_{0C'A'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{C'n}}{\partial t} + M_{0A'A''n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{A''n}}{\partial t} + M_{0A'B''n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{B''n}}{\partial t} + M_{0C''A'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{C''n}}{\partial t} + u_{A'n} + \frac{\partial u_{A'n}}{\partial l} \cdot dl. \quad (3.2)$$

Линейные напряжения между линиями A' и B' :

$$u_{A'B'n} = i_{A'n} \cdot R_{0A'n} \cdot dl + L_{0A'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{A'n}}{\partial t} + M_{0A'B'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{B'n}}{\partial t} + M_{0C'A'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{C'n}}{\partial t} + M_{0A'A''n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{A''n}}{\partial t} + M_{0A'B''n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{B''n}}{\partial t} + M_{0C''A'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{C''n}}{\partial t} - i_{B'n} \cdot R_{0B'n} \cdot dl - L_{0B'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{B'n}}{\partial t} - M_{0A'B'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{A'n}}{\partial t} - M_{0B'C'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{C'n}}{\partial t} - M_{0B'A''n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{A''n}}{\partial t} - M_{0B'B''n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{B''n}}{\partial t} - M_{0B'C''n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{C''n}}{\partial t} + u_{A'B'n} + \frac{\partial u_{A'B'n}}{\partial l} \cdot dl. \quad (3.3)$$

Напряжения между линейными проводниками A' и A'' :

$$u_{A'A''n} = i_{A'n} \cdot R_{0A'n} \cdot dl + L_{0A'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{A'n}}{\partial t} + M_{0A'B'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{B'n}}{\partial t} + M_{0C'A'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{C'n}}{\partial t} + M_{0A'A''n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{A''n}}{\partial t} + M_{0A'B''n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{B''n}}{\partial t} + M_{0C''A'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{C''n}}{\partial t} - i_{A''n} \cdot R_{0A''n} \cdot dl - L_{0A''n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{A''n}}{\partial t} - M_{0A'A''n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{A'n}}{\partial t} - M_{0B'A''n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{B'n}}{\partial t} - M_{0C'A''n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{C'n}}{\partial t} - M_{0A'B''n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{B''n}}{\partial t} - M_{0C''A''n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{C''n}}{\partial t} + u_{A'A''n} + \frac{\partial u_{A'A''n}}{\partial l} \cdot dl. \quad (3.4)$$

Уравнения для других линий составляются аналогично.

Из схемы замещения на рисунке 2.1 можно определить «токи утечки», характеризующиеся элементарными величинами, которые входят в уравнение (3.1):

$$\begin{aligned}
di_{A'n} &= \left(u_{A'n} + \frac{\partial u_{A'n}}{\partial l} \cdot dl \right) \cdot G_{0A'0n} \cdot dl + \frac{\partial}{\partial t} \cdot C_{0A'0n} \cdot dl \cdot \left(u_{A'n} + \frac{\partial u_{A'n}}{\partial l} \cdot dl \right); \\
di_{A'B'n} &= \left(u_{A'B'n} + \frac{\partial u_{A'B'n}}{\partial l} \cdot dl \right) \cdot G_{0A'B'n} \cdot dl + \frac{\partial}{\partial t} \cdot C_{0A'B'n} \cdot dl \cdot \left(u_{A'B'n} + \frac{\partial u_{A'B'n}}{\partial l} \cdot dl \right); \\
di_{A'A'n} &= \left(u_{A'A'n} + \frac{\partial u_{A'A'n}}{\partial l} \cdot dl \right) \cdot G_{0A'A'n} \cdot dl + \frac{\partial}{\partial t} \cdot C_{0A'A'n} \cdot dl \cdot \left(u_{A'A'n} + \frac{\partial u_{A'A'n}}{\partial l} \cdot dl \right); \\
di_{A'B''n} &= \left(u_{A'B''n} + \frac{\partial u_{A'B''n}}{\partial l} \cdot dl \right) \cdot G_{0A'B''n} \cdot dl + \frac{\partial}{\partial t} \cdot C_{0A'B''n} \cdot dl \cdot \left(u_{A'B''n} + \frac{\partial u_{A'B''n}}{\partial l} \cdot dl \right); \\
di_{C'A'n} &= \left(u_{C'A'n} + \frac{\partial u_{C'A'n}}{\partial l} \cdot dl \right) \cdot G_{0C'A'n} \cdot dl + \frac{\partial}{\partial t} \cdot C_{0C'A'n} \cdot dl \cdot \left(u_{C'A'n} + \frac{\partial u_{C'A'n}}{\partial l} \cdot dl \right); \\
di_{C''A'n} &= \left(u_{C''A'n} + \frac{\partial u_{C''A'n}}{\partial l} \cdot dl \right) \cdot G_{0C''A'n} \cdot dl + \frac{\partial}{\partial t} \cdot C_{0C''A'n} \cdot dl \cdot \left(u_{C''A'n} + \frac{\partial u_{C''A'n}}{\partial l} \cdot dl \right).
\end{aligned}$$

Элементарный отрезок длины dl характеризуется бесконечно малой величиной, поэтому величиной dl^2 , которая получается после преобразования токов утечки, можно пренебречь. Отсюда получаем:

$$\begin{aligned}
di_{A'n} &= u_{A'n} \cdot G_{0A'0n} \cdot dl + C_{0A'0n} \cdot dl \cdot \frac{\partial u_{A'n}}{\partial t}; \\
di_{A'B'n} &= u_{A'B'n} \cdot G_{0A'B'n} \cdot dl + C_{0A'B'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial u_{A'B'n}}{\partial t}; \\
di_{A'A'n} &= u_{A'A'n} \cdot G_{0A'A'n} \cdot dl + C_{0A'A'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial u_{A'A'n}}{\partial t}; \\
di_{A'B''n} &= u_{A'B''n} \cdot G_{0A'B''n} \cdot dl + C_{0A'B''n} \cdot dl \cdot \frac{\partial u_{A'B''n}}{\partial t}; \\
di_{C'A'n} &= u_{C'A'n} \cdot G_{0C'A'n} \cdot dl + C_{0C'A'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial u_{C'A'n}}{\partial t};
\end{aligned}$$

$$di_{C^{II}A'n} = u_{C^{II}A'n} \cdot G_{0C^{II}A'n} \cdot dl + C_{0C^{II}A'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial u_{C^{II}A'n}}{\partial t}.$$

Подставим, полученные в результате преобразования «токи утечки» в уравнения тока и напряжения (3.1) – (3.4) и получим другую интерпретацию этих уравнений, которые описывают рассматриваемый участок двухцепной ВЛ

$$\begin{aligned} & u_{A'n} \cdot G_{0A'0n} \cdot dl + C_{0A'0n} \cdot dl \cdot \frac{\partial u_{A'n}}{\partial t} + u_{A'B'n} \cdot G_{0A'B'n} \cdot dl + C_{0A'B'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial u_{A'B'n}}{\partial t} + \\ & + u_{A'A''n} \cdot G_{0A'A''n} \cdot dl + C_{0A'A''n} \cdot dl \cdot \frac{\partial u_{A'A''n}}{\partial t} + u_{A'B''n} \cdot G_{0A'B''n} \cdot dl + C_{0A'B''n} \cdot dl \cdot \frac{\partial u_{A'B''n}}{\partial t} - \\ & - u_{C^IA'n} \cdot G_{0C^IA'n} \cdot dl - C_{0C^IA'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial u_{C^IA'n}}{\partial t} - u_{C^{II}A'n} \cdot G_{0C^{II}A'n} \cdot dl - C_{0C^{II}A'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial u_{C^{II}A'n}}{\partial t} + \\ & + \frac{\partial i_{A'n}}{\partial l} \cdot dl = 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & i_{A'n} \cdot R_{0A'n} \cdot dl + L_{0A'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{A'n}}{\partial t} + M_{0A'B'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{B'n}}{\partial t} + M_{0C^IA'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{C'n}}{\partial t} + \\ & + M_{0A'A''n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{A''n}}{\partial t} + M_{0A'B''n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{B''n}}{\partial t} + M_{0C^{II}A'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{C^{II}n}}{\partial t} + \frac{\partial u_{A'n}}{\partial l} \cdot dl = 0; \\ & i_{A'n} \cdot R_{0A'n} \cdot dl + L_{0A'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{A'n}}{\partial t} + M_{0A'B'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{B'n}}{\partial t} + M_{0C^IA'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{C'n}}{\partial t} + \\ & + M_{0A'A''n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{A''n}}{\partial t} + M_{0A'B''n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{B''n}}{\partial t} + M_{0C^{II}A'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{C^{II}n}}{\partial t} - i_{B'n} \cdot R_{0B'n} \cdot dl - \\ & - L_{0B'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{B'n}}{\partial t} - M_{0A'B'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{A'n}}{\partial t} - M_{0B'C'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{C'n}}{\partial t} - M_{0B'A''n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{A''n}}{\partial t} - \\ & - M_{0B'B''n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{B''n}}{\partial t} - M_{0B'C^{II}n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{C^{II}n}}{\partial t} + \frac{\partial u_{A'B'n}}{\partial l} \cdot dl = 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & i_{A'n} \cdot R_{0A'n} \cdot dl + L_{0A'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{A'n}}{\partial t} + M_{0A'B'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{B'n}}{\partial t} + M_{0C^IA'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{C'n}}{\partial t} + \\ & + M_{0A'A''n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{A''n}}{\partial t} + M_{0A'B''n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{B''n}}{\partial t} + M_{0C^{II}A'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{C^{II}n}}{\partial t} - i_{A''n} \cdot R_{0A''n} \cdot dl - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -L_{0A''n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{A''n}}{\partial t} - M_{0A'A''n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{A'n}}{\partial t} - M_{0B'A''n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{B'n}}{\partial t} - M_{0C'A''n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{C'n}}{\partial t} - \\
& - M_{0A'B''n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{B''n}}{\partial t} - M_{0C'A''n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{C''n}}{\partial t} + \frac{\partial u_{A'A''n}}{\partial l} \cdot dl = 0;
\end{aligned}$$

Уравнения для других линий составляются аналогично.

Дальнейшее преобразование математической модели показано в приложении А «Оптимизация математической модели».

Результатом оптимизации математической модели является уравнение (3.5):

$$\begin{aligned}
\frac{d^2 \dot{U}_{A'n}}{dl^2} = & [Z_{0A'n} (\underline{Y}_{0A'0n} + \underline{Y}_{0A'B'n} + \underline{Y}_{0A'A''n} + \underline{Y}_{0A'B''n} + \underline{Y}_{0C'A'n} + \underline{Y}_{0C''A'n}) - \underline{Y}_{0A'B'n} Z_{0A'B'n} - \\
& - \underline{Y}_{0A'A''n} Z_{0A'A''n} - \underline{Y}_{0C'A'n} Z_{0C'A'n} - \underline{Y}_{0A'B''n} Z_{0A'B''n} - \underline{Y}_{0C''A'n} Z_{0C''A'n}] \dot{U}_{A'n} + [Z_{0A'B'n} (\underline{Y}_{0B'0n} + \\
& + \underline{Y}_{0B'A''n} + \underline{Y}_{0A'B'n}) - \underline{Y}_{0A'B'n} Z_{0A'n} - \underline{Y}_{0B'C'n} Z_{0C'A'n} - \underline{Y}_{0B'A''n} Z_{0A'A''n} - \underline{Y}_{0B'B''n} Z_{0A'B''n} - \\
& - \underline{Y}_{0B'C''n} Z_{0C''A'n}] \dot{U}_{B'n} + [Z_{0C'A'n} (\underline{Y}_{0C'0n} + \underline{Y}_{0C'A''n} + \underline{Y}_{0C'A'n} + \underline{Y}_{0C'C'n} + \underline{Y}_{0B'C'n} + \underline{Y}_{0B''C'n}) - \\
& - \underline{Y}_{0C'A'n} Z_{0A'n} - \underline{Y}_{0B'C'n} Z_{0A'B'n} - \underline{Y}_{0C'A''n} Z_{0A'A''n} - \underline{Y}_{0B''C'n} Z_{0A'B''n} - \underline{Y}_{0C'C'n} Z_{0C''A'n}] \dot{U}_{C'n} + \\
& + [Z_{0A'A''n} (\underline{Y}_{0A''0n} + \underline{Y}_{0A''B'n} + \underline{Y}_{0A'A''n} + \underline{Y}_{0C''A'n} \underline{Y}_{0B'A''n} + \underline{Y}_{0C'A''n}) - \underline{Y}_{0A''B'n} Z_{0A'B''n} - \\
& \underline{Y}_{0C''A'n} Z_{0C''A'n} - \underline{Y}_{0A'A''n} Z_{0A'n} - \underline{Y}_{0B'A''n} Z_{0A'B'n} - \underline{Y}_{0C'A''n} Z_{0C'A'n}] \dot{U}_{A''n} + \\
& + [Z_{0A'B''n} (\underline{Y}_{0B''C'n} + \underline{Y}_{0B''0n} + \underline{Y}_{0B''C'n} + \underline{Y}_{0A'B''n} + \underline{Y}_{0B'B''n} + \underline{Y}_{0A''B'n}) - \underline{Y}_{0B''C'n} Z_{0C''A'n} - \\
& - \underline{Y}_{0A'B''n} Z_{0A'n} - \underline{Y}_{0B'B''n} Z_{0A'B'n} - \underline{Y}_{0B''C'n} Z_{0C'A'n} - \underline{Y}_{0A''B'n} Z_{0A'A''n}] \dot{U}_{B''n} + [Z_{0C''A'n} (\underline{Y}_{0C''0n} + \\
& + \underline{Y}_{0C''A'n} + \underline{Y}_{0C''A''n} + \underline{Y}_{0B''C'n} + \underline{Y}_{0C''C'n} + \underline{Y}_{0B''C''n}) - \underline{Y}_{0C''A'n} Z_{0A'n} - \underline{Y}_{0B''C'n} Z_{0A'B'n} - \\
& - \underline{Y}_{0C''A''n} Z_{0C''A'n} - \underline{Y}_{0C''A''n} Z_{0A'A''n} - \underline{Y}_{0B''C''n} Z_{0A'B''n}] \dot{U}_{C''n}; \quad (3.5)
\end{aligned}$$

Уравнения для других линий составляются аналогично.

Теперь необходимо их совместное решение. Характеристическое уравнение системы, образованной равенствами (3.5) выглядит так:

$$x^6 + a \cdot x^5 + b \cdot x^4 + c \cdot x^3 + d \cdot x^2 + e \cdot x + f = 0,$$

где a, b, c, d, e, f – коэффициенты полиномиального ряда.

Итогом решения характеристического уравнения оказываются шесть корней $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$.

Постоянные распространения электромагнитной волны для однородного участка двухцепной ВЛ на частоте n -ой гармонической составляющей определяются так [66]:

$$\underline{\gamma}_{1n} = \pm\sqrt{x_1}, \underline{\gamma}_{2n} = \pm\sqrt{x_2}, \underline{\gamma}_{3n} = \pm\sqrt{x_3}, \underline{\gamma}_{4n} = \pm\sqrt{x_4}, \underline{\gamma}_{5n} = \pm\sqrt{x_5}, \underline{\gamma}_{6n} = \pm\sqrt{x_6}.$$

Из исследований А. М. Ляпунова, опубликованных в его монографии «Общая задача об устойчивости движения» [58], вытекает теорема, дающая необходимые и достаточные условия для того, чтобы все корни характеристического уравнения вещественной матрицы имели отрицательные вещественные части. Поскольку любой многочлен может быть представлен в виде характеристического определителя, то теорема Ляпунова носит общий характер и относится к любому алгебраическому уравнению.

Однако, если вещественная часть характеристического уравнения будет отрицательная, то она не стыкуется с уравнениями (3.6) – (3.8), (3.10).

Судя по уравнениям (3.6) – (3.8), (3.10) $\dot{A}_{A'1n} \cdot e^{\underline{\gamma}_{1n} \cdot l}$ – отраженная волна, $\dot{A}_{A'2n} \cdot e^{-\underline{\gamma}_{1n} \cdot l}$ – падающая волна электромагнитной волны. Поэтому вещественная часть характеристического уравнения в данном случае должна быть положительной.

Общее решение уравнения (3.5) для линии A' будет выглядеть так:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A'n} = \frac{1}{6} & \left(\dot{A}_{A'1n} \cdot e^{\underline{\gamma}_{1n} \cdot l} + \dot{A}_{A'2n} \cdot e^{-\underline{\gamma}_{1n} \cdot l} + \dot{A}_{A'3n} \cdot e^{\underline{\gamma}_{2n} \cdot l} + \dot{A}_{A'4n} \cdot e^{-\underline{\gamma}_{2n} \cdot l} + \dot{A}_{A'5n} \cdot e^{\underline{\gamma}_{3n} \cdot l} + \right. \\ & + \dot{A}_{A'6n} \cdot e^{-\underline{\gamma}_{3n} \cdot l} + \dot{A}_{A'7n} \cdot e^{\underline{\gamma}_{4n} \cdot l} + \dot{A}_{A'8n} \cdot e^{-\underline{\gamma}_{4n} \cdot l} + \dot{A}_{A'9n} \cdot e^{\underline{\gamma}_{5n} \cdot l} + \dot{A}_{A'10n} \cdot e^{-\underline{\gamma}_{5n} \cdot l} + \\ & \left. + \dot{A}_{A'11n} \cdot e^{\underline{\gamma}_{6n} \cdot l} + \dot{A}_{A'12n} \cdot e^{-\underline{\gamma}_{6n} \cdot l} \right); \end{aligned} \quad (3.6)$$

где $\dot{A}_{A'1n}, \dot{A}_{A'2n}, \dot{A}_{A'3n}, \dot{A}_{A'4}, \dot{A}_{A'5n}, \dot{A}_{A'6n}, \dot{A}_{A'7n}, \dot{A}_{A'8n}, \dot{A}_{A'9n}, \dot{A}_{A'10n}, \dot{A}_{A'11n}, \dot{A}_{A'12n}$ – комплексные значения постоянных интегрирования на частоте n -ой гармонической составляющей.

Уравнения для других линий составляются аналогично.

Линейные напряжения исследуемого участка двухцепной ВЛ можно определить из формул (25), (26) приложения А с учетом формулы (3.6):

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A'B'n} = \frac{1}{6} & \left((\dot{A}_{A'1n} - \dot{A}_{B'1n}) \cdot e^{\gamma_{1n}l} + (\dot{A}_{A'2n} - \dot{A}_{B'2n}) \cdot e^{-\gamma_{1n}l} + (\dot{A}_{A'3n} - \dot{A}_{B'3n}) \cdot e^{\gamma_{2n}l} + \right. \\ & + (\dot{A}_{A'4n} - \dot{A}_{B'4n}) \cdot e^{-\gamma_{2n}l} + (\dot{A}_{A'5n} - \dot{A}_{B'5n}) \cdot e^{\gamma_{3n}l} + (\dot{A}_{A'6n} - \dot{A}_{B'6n}) \cdot e^{-\gamma_{3n}l} + \\ & + (\dot{A}_{A'7n} - \dot{A}_{B'7n}) \cdot e^{\gamma_{4n}l} + (\dot{A}_{A'8n} - \dot{A}_{B'8n}) \cdot e^{-\gamma_{4n}l} + (\dot{A}_{A'9n} - \dot{A}_{B'9n}) \cdot e^{\gamma_{5n}l} + \\ & \left. + (\dot{A}_{A'10n} - \dot{A}_{B'10n}) \cdot e^{-\gamma_{5n}l} + (\dot{A}_{A'11n} - \dot{A}_{B'11n}) \cdot e^{\gamma_{6n}l} + (\dot{A}_{A'12n} - \dot{A}_{B'12n}) \cdot e^{-\gamma_{6n}l} \right); \quad (3.7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A'A''n} = \frac{1}{6} & \left((\dot{A}_{A'1n} - \dot{A}_{A''1n}) \cdot e^{\gamma_{1n}l} + (\dot{A}_{A'2n} - \dot{A}_{A''2n}) \cdot e^{-\gamma_{1n}l} + (\dot{A}_{A'3n} - \dot{A}_{A''3n}) \cdot e^{\gamma_{2n}l} + \right. \\ & + (\dot{A}_{A'4n} - \dot{A}_{A''4n}) \cdot e^{-\gamma_{2n}l} + (\dot{A}_{A'5n} - \dot{A}_{A''5n}) \cdot e^{\gamma_{3n}l} + (\dot{A}_{A'6n} - \dot{A}_{A''6n}) \cdot e^{-\gamma_{3n}l} + \\ & + (\dot{A}_{A'7n} - \dot{A}_{A''7n}) \cdot e^{\gamma_{4n}l} + (\dot{A}_{A'8n} - \dot{A}_{A''8n}) \cdot e^{-\gamma_{4n}l} + (\dot{A}_{A'9n} - \dot{A}_{A''9n}) \cdot e^{\gamma_{5n}l} + \\ & \left. + (\dot{A}_{A'10n} - \dot{A}_{A''10n}) \cdot e^{-\gamma_{5n}l} + (\dot{A}_{A'11n} - \dot{A}_{A''11n}) \cdot e^{\gamma_{6n}l} + (\dot{A}_{A'12n} - \dot{A}_{A''12n}) \cdot e^{-\gamma_{6n}l} \right); \quad (3.8) \end{aligned}$$

Величины фазных токов удобно определять из уравнений (14) приложения А. Для линии A' будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} i_{A'n} = \frac{1}{6} & \left(-\frac{\Delta_{1A'}}{\Delta} \cdot \frac{d\dot{U}_{A'n}}{dl} - \frac{\Delta_{1B'}}{\Delta} \cdot \frac{d\dot{U}_{B'n}}{dl} - \frac{\Delta_{1C'}}{\Delta} \cdot \frac{d\dot{U}_{C'n}}{dl} - \frac{\Delta_{1A''}}{\Delta} \cdot \frac{d\dot{U}_{A''n}}{dl} - \frac{\Delta_{1B''}}{\Delta} \cdot \frac{d\dot{U}_{B''n}}{dl} - \right. \\ & \left. - \frac{\Delta_{1C''}}{\Delta} \cdot \frac{d\dot{U}_{C''n}}{dl} \right); \quad (3.9) \end{aligned}$$

где $\Delta_{1A'}$, $\Delta_{1B'}$, $\Delta_{1C'}$, $\Delta_{1A''}$, $\Delta_{1B''}$, $\Delta_{1C''}$ и Δ - определители, полученные при решении уравнений (14) приложения А методом Крамера.

С учетом равенства напряжения (3.6), уравнение (3.9) предстанет в следующем выражении:

$$\begin{aligned}
& + \underline{\gamma}_{3n} \left(\dot{A}_{C^{II} 6n} \cdot e^{-\underline{\gamma}_{3n} \cdot l} - \dot{A}_{C^{II} 5n} \cdot e^{\underline{\gamma}_{3n} \cdot l} \right) + \underline{\gamma}_{4n} \left(\dot{A}_{C^{II} 8n} \cdot e^{-\underline{\gamma}_{4n} \cdot l} - \dot{A}_{C^{II} 7n} \cdot e^{\underline{\gamma}_{4n} \cdot l} \right) + \\
& + \underline{\gamma}_{5n} \left(\dot{A}_{C^{II} 10n} \cdot e^{-\underline{\gamma}_{5n} \cdot l} - \dot{A}_{C^{II} 9n} \cdot e^{\underline{\gamma}_{5n} \cdot l} \right) + \underline{\gamma}_{6n} \left(\dot{A}_{C^{II} 12n} \cdot e^{-\underline{\gamma}_{6n} \cdot l} - \dot{A}_{C^{II} 11n} \cdot e^{\underline{\gamma}_{6n} \cdot l} \right) \Bigg). \quad (3.10)
\end{aligned}$$

Из выражений (3.6) и (3.10) видно, что в каждом проводе двухцепной ВЛ присутствуют шесть пар волн электромагнитного поля – шесть падающих и шесть отраженных. Этот факт обусловлен электромагнитными связями между фазными проводами ВЛ. Судя по выражениям (3.6) и (3.10) напряжение и ток имеют две составляющие. Причем одна из них по мере увеличения расстояния убывает, а другая – возрастает.

Из уравнения (3.6) и (3.10) видно, что передача электрической энергии по двухцепной ВЛ носит колебательный характер.

Убывающую составляющую, количественно характеризующуюся коэффициентом \dot{A}_{2n} , называют падающей волной электромагнитной энергии на частоте n -ой гармонической составляющей.

Возрастающую же составляющую, количественно характеризующуюся коэффициентом \dot{A}_{1n} , называют отраженной волной электромагнитной энергии на этой же частоте.

Таким образом, основные характеристики энергии электромагнитного поля представляют собой результат наложения шести колебаний. Деление электромагнитной волны на падающую и отраженную условно и вызвано лишь математической формулировкой общего решения однородных дифференциальных уравнений шестого порядка.

В качестве гипотезы такое деление вполне допустимо, поскольку изначально анализируемая однородная часть двухцепной ВЛ принята абсолютно линейной.

В этом случае можно выстроить достаточно стройную картину искажения качества электрической энергии в действующей двухцепной ВЛ. Она выглядит следующим образом.

Мощные источники электрической энергии, каковыми считают генераторы гидроэлектростанций, теплоэнергоцентралей, атомных электростанций и т. п., генерируют во внешнюю электрическую сеть электрическую энергию, в основном удовлетворительного качества. Эта энергия здесь представлена падающей волной энергии электромагнитного поля. Часть ее неизбежно утилизируется в электрической сети, в частности в двухцепных ВЛ. Этот вывод можно сделать, если принять во внимание убывающий характер второго члена правой части формулы (3.6) и первого члена формулы (3.10).

Падающая волна электромагнитной энергии уже с сокращенной амплитудой доставляет электрическую энергию до потребителя. Однако полностью вся энергия здесь не потребляется. Часть ее возвращается (отражается) обратно в двухцепную воздушную ВЛ. Причем характер отраженной энергии может быть самый разнообразный. В случае двухцепной ВЛ отраженная энергия, обладающая, как уже сказано, различными характеристиками, распределяется по фазам в зависимости от своеобразия характеристик и параметров электрической нагрузки.

Из данных рассуждений следует, что за качество электрической энергии несет ответственность лишь отраженная волна электромагнитного поля, распространяющегося по двухцепной ВЛ. Но это заключение можно считать справедливым только тогда, когда принято положение о том, что причиной низкого качества электрической энергии является нелинейность, неуравновешенность и своеобразие параметров лишь тех электрических нагрузок, которые образуют узлы электроэнергетических систем.

Кроме того, на качество электрической энергии отрицательное воздействие оказывает нелинейный характер конструктивных элементов станций, подстанций и ВЛ, своеобразие их исполнения и другие факторы. Все это должно учитываться при моделировании падающей и отраженной волн электромагнитного поля.

Так как в каждом линейном проводе присутствуют шесть пар электромагнитных волн, то вполне уместно будет определить математические фор-

мулировки для определения волновых сопротивлений каждой паре электромагнитных волн. Однако процедура определения осложняется присутствием магнитных связей между проводами. Следует помнить, что на распределение электрической энергии в каждом проводе оказывает влияние электрическая энергия, распространяемая по соседним проводам.

Волновое сопротивление есть отношение напряжения к току в любой точке провода ВЛ по которой распространяются волны электромагнитного поля. Эта величина представляет собой сопротивление провода ВЛ бегущей волне электрической энергии.

В данном случае присутствуют шесть проводов, а значит, имеются шесть пар электромагнитных волн, которые действуют в каждом проводе [51].

В связи с проявлением магнитных связей между проводами в каждом проводе, кроме шести собственных пар электромагнитных волн, присутствуют еще пятнадцать пар электромагнитных волн от других проводов ВЛ. Таким образом, в каждом проводе двухцепной ВЛ присутствует двадцать одна пара электромагнитных волн. Это следует из равенств (3.12).

Собственные волновые сопротивления в линии A' выглядят следующим образом:

$$\underline{Z}_{cA'1n} = \frac{\Delta}{\underline{\gamma}_{1n} \cdot \Delta_{1A'}}; \quad \underline{Z}_{cA'2n} = \frac{\Delta}{\underline{\gamma}_{2n} \cdot \Delta_{1A'}}; \quad \underline{Z}_{cA'3n} = \frac{\Delta}{\underline{\gamma}_{3n} \cdot \Delta_{1A'}};$$

$$\underline{Z}_{cA'4n} = \frac{\Delta}{\underline{\gamma}_{4n} \cdot \Delta_{1A'}}; \quad \underline{Z}_{cA'5n} = \frac{\Delta}{\underline{\gamma}_{5n} \cdot \Delta_{1A'}}; \quad \underline{Z}_{cA'6n} = \frac{\Delta}{\underline{\gamma}_{6n} \cdot \Delta_{1A'}}.$$

Взаимные волновые сопротивления для этой же линии нужно находить следующим образом:

$$\underline{Z}_{cA'B'1n} = \frac{\Delta}{\underline{\gamma}_{1n} \cdot \Delta_{2A'}}; \quad \underline{Z}_{cA'B'2n} = \frac{\Delta}{\underline{\gamma}_{2n} \cdot \Delta_{2A'}}; \quad \underline{Z}_{cA'B'3n} = \frac{\Delta}{\underline{\gamma}_{3n} \cdot \Delta_{2A'}}; \quad \underline{Z}_{cA'B'4n} = \frac{\Delta}{\underline{\gamma}_{4n} \cdot \Delta_{2A'}};$$

$$\underline{Z}_{cA'B'5n} = \frac{\Delta}{\underline{\gamma}_{5n} \cdot \Delta_{2A'}}; \quad \underline{Z}_{cA'B'6n} = \frac{\Delta}{\underline{\gamma}_{6n} \cdot \Delta_{2A'}}; \quad \underline{Z}_{cA'A''1n} = \frac{\Delta}{\underline{\gamma}_{1n} \cdot \Delta_{4A'}}; \quad \underline{Z}_{cA'A''2n} = \frac{\Delta}{\underline{\gamma}_{2n} \cdot \Delta_{4A'}};$$

$$\underline{Z}_{cA'A''3n} = \frac{\Delta}{\underline{\gamma}_{3n} \cdot \Delta_{4A'}}; \quad \underline{Z}_{cA'A''4n} = \frac{\Delta}{\underline{\gamma}_{4n} \cdot \Delta_{4A'}}; \quad \underline{Z}_{cA'A''5n} = \frac{\Delta}{\underline{\gamma}_{5n} \cdot \Delta_{4A'}}; \quad \underline{Z}_{cA'A''6n} = \frac{\Delta}{\underline{\gamma}_{6n} \cdot \Delta_{4A'}};$$

$$\underline{Z}_{cA'B''1n} = \frac{\Delta}{\gamma_{1n} \cdot \Delta_{5A'}}; \underline{Z}_{cA'B''2n} = \frac{\Delta}{\gamma_{2n} \cdot \Delta_{5A'}}; \underline{Z}_{cA'B''3n} = \frac{\Delta}{\gamma_{3n} \cdot \Delta_{5A'}}; \underline{Z}_{cA'B''4n} = \frac{\Delta}{\gamma_{4n} \cdot \Delta_{5A'}};$$

где $\Delta_{2A'}$, $\Delta_{3A'}$, $\Delta_{4A'}$, $\Delta_{5A'}$, $\Delta_{6A'}$, - определители полученные при решении уравнений аналогичных (14) в приложении А для линий B' , C' , A'' , B'' , C'' методом Крамера.

Уравнения для остальных линий составляются аналогично.

Уравнение (3.10) может быть использовано для определения тока в проводах однородного участка двухцепной ВЛ, с учетом вновь введенных равенств волновых сопротивлений следует переписать так (для линии A'):

$$\begin{aligned} \dot{i}_{A'n} = & \frac{1}{6} \left(\frac{\dot{A}_{A'2n} \cdot e^{-\gamma_{1n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA'1n}} - \frac{\dot{A}_{A'1n} \cdot e^{\gamma_{1n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA'1n}} + \frac{\dot{A}_{A'4n} \cdot e^{-\gamma_{2n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA'2n}} - \frac{\dot{A}_{A'3n} \cdot e^{\gamma_{2n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA'2n}} + \frac{\dot{A}_{A'6n} \cdot e^{-\gamma_{3n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA'3n}} - \right. \\ & - \frac{\dot{A}_{A'5n} \cdot e^{\gamma_{3n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA'3n}} + \frac{\dot{A}_{A'8n} \cdot e^{-\gamma_{4n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA'4n}} - \frac{\dot{A}_{A'7n} \cdot e^{\gamma_{4n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA'4n}} + \frac{\dot{A}_{A'10n} \cdot e^{-\gamma_{5n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA'5n}} - \frac{\dot{A}_{A'9n} \cdot e^{\gamma_{5n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA'5n}} + \\ & + \frac{\dot{A}_{A'12n} \cdot e^{-\gamma_{6n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA'6n}} - \frac{\dot{A}_{A'11n} \cdot e^{\gamma_{6n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA'6n}} + \frac{\dot{A}_{B'2n} \cdot e^{-\gamma_{1n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA'B'1n}} - \frac{\dot{A}_{B'1n} \cdot e^{\gamma_{1n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA'B'1n}} + \frac{\dot{A}_{B'4n} \cdot e^{-\gamma_{2n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA'B'2n}} - \\ & - \frac{\dot{A}_{B'3n} \cdot e^{\gamma_{2n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA'B'2n}} + \frac{\dot{A}_{B'6n} \cdot e^{-\gamma_{3n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA'B'3n}} - \frac{\dot{A}_{B'5n} \cdot e^{\gamma_{3n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA'B'3n}} + \frac{\dot{A}_{B'8n} \cdot e^{-\gamma_{4n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA'B'4n}} - \frac{\dot{A}_{B'7n} \cdot e^{\gamma_{4n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA'B'4n}} + \\ & + \frac{\dot{A}_{B'10n} \cdot e^{-\gamma_{5n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA'B'5n}} - \frac{\dot{A}_{B'9n} \cdot e^{\gamma_{5n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA'B'5n}} + \frac{\dot{A}_{B'12n} \cdot e^{-\gamma_{6n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA'B'6n}} - \frac{\dot{A}_{B'11n} \cdot e^{\gamma_{6n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA'B'6n}} + \frac{\dot{A}_{C'2n} \cdot e^{-\gamma_{1n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA'C'1n}} - \\ & - \frac{\dot{A}_{C'1n} \cdot e^{\gamma_{1n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA'C'1n}} + \frac{\dot{A}_{C'4n} \cdot e^{-\gamma_{2n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA'C'2n}} - \frac{\dot{A}_{C'3n} \cdot e^{\gamma_{2n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA'C'2n}} + \frac{\dot{A}_{C'6n} \cdot e^{-\gamma_{3n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA'C'3n}} - \frac{\dot{A}_{C'5n} \cdot e^{\gamma_{3n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA'C'3n}} + \\ & + \frac{\dot{A}_{C'8n} \cdot e^{-\gamma_{4n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA'C'4n}} - \frac{\dot{A}_{C'7n} \cdot e^{\gamma_{4n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA'C'4n}} + \frac{\dot{A}_{C'10n} \cdot e^{-\gamma_{5n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA'C'5n}} - \frac{\dot{A}_{C'9n} \cdot e^{\gamma_{5n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA'C'5n}} + \frac{\dot{A}_{C'12n} \cdot e^{-\gamma_{6n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA'C'6n}} - \\ & - \frac{\dot{A}_{C'11n} \cdot e^{\gamma_{6n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA'C'6n}} + \frac{\dot{A}_{A''2n} \cdot e^{-\gamma_{1n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA'A''1n}} - \frac{\dot{A}_{A''1n} \cdot e^{\gamma_{1n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA'A''1n}} + \frac{\dot{A}_{A''4n} \cdot e^{-\gamma_{2n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA'A''2n}} - \frac{\dot{A}_{A''3n} \cdot e^{\gamma_{2n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA'A''2n}} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{\dot{A}_{A'' 6n} \cdot e^{-\gamma_{3n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA' A'' 3n}} - \frac{\dot{A}_{A'' 5n} \cdot e^{\gamma_{3n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA' A'' 3n}} + \frac{\dot{A}_{A'' 8n} \cdot e^{-\gamma_{4n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA' A'' 4n}} - \frac{\dot{A}_{A'' 7n} \cdot e^{\gamma_{4n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA' A'' 4n}} + \frac{\dot{A}_{A'' 10n} \cdot e^{-\gamma_{5n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA' A'' 5n}} - \\
& - \frac{\dot{A}_{A'' 9n} \cdot e^{\gamma_{5n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA' A'' 5n}} - \frac{\dot{A}_{A'' 12n} \cdot e^{-\gamma_{6n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA' A'' 6n}} - \frac{\dot{A}_{A'' 11n} \cdot e^{\gamma_{6n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA' A'' 6n}} + \frac{\dot{A}_{B'' 2n} \cdot e^{-\gamma_{1n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA' B'' 1n}} - \frac{\dot{A}_{B'' 1n} \cdot e^{\gamma_{1n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA' B'' 1n}} + \\
& + \frac{\dot{A}_{B'' 4n} \cdot e^{-\gamma_{2n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA' B'' 2n}} - \frac{\dot{A}_{B'' 3n} \cdot e^{\gamma_{2n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA' B'' 2n}} + \frac{\dot{A}_{B'' 6n} \cdot e^{-\gamma_{3n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA' B'' 3n}} - \frac{\dot{A}_{B'' 5n} \cdot e^{\gamma_{3n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA' B'' 3n}} + \frac{\dot{A}_{B'' 8n} \cdot e^{-\gamma_{4n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA' B'' 4n}} - \\
& - \frac{\dot{A}_{B'' 7n} \cdot e^{\gamma_{4n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA' B'' 4n}} + \frac{\dot{A}_{B'' 10n} \cdot e^{-\gamma_{5n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA' B'' 5n}} - \frac{\dot{A}_{B'' 9n} \cdot e^{\gamma_{5n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA' B'' 5n}} + \frac{\dot{A}_{B'' 12n} \cdot e^{-\gamma_{6n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA' B'' 6n}} - \frac{\dot{A}_{B'' 11n} \cdot e^{\gamma_{6n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA' B'' 6n}} + \\
& + \frac{\dot{A}_{C'' 2n} \cdot e^{-\gamma_{1n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA' C'' 1n}} - \frac{\dot{A}_{C'' 1n} \cdot e^{\gamma_{1n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA' C'' 1n}} + \frac{\dot{A}_{C'' 4n} \cdot e^{-\gamma_{2n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA' C'' 2n}} - \frac{\dot{A}_{C'' 3n} \cdot e^{\gamma_{2n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA' C'' 2n}} + \frac{\dot{A}_{C'' 6n} \cdot e^{-\gamma_{3n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA' C'' 3n}} - \\
& - \frac{\dot{A}_{C'' 5n} \cdot e^{\gamma_{3n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA' C'' 3n}} + \frac{\dot{A}_{C'' 8n} \cdot e^{-\gamma_{4n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA' C'' 4n}} - \frac{\dot{A}_{C'' 7n} \cdot e^{\gamma_{4n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA' C'' 4n}} + \frac{\dot{A}_{C'' 10n} \cdot e^{-\gamma_{5n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA' C'' 5n}} - \frac{\dot{A}_{C'' 9n} \cdot e^{\gamma_{5n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA' C'' 5n}} + \\
& + \frac{\dot{A}_{C'' 12n} \cdot e^{-\gamma_{6n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA' C'' 6n}} - \frac{\dot{A}_{C'' 11n} \cdot e^{\gamma_{6n} \cdot l}}{\underline{Z}_{cA' C'' 6n}} \Bigg). \tag{3.11}
\end{aligned}$$

Уравнения для других линий составляются аналогично.

Математические формулировки (3.6) – (3.8), (3.10), (3.11) позволяют определить действующие величины напряжений и токов в однородном участке двухцепной ВЛ на частоте n -ой гармонической составляющей. Но такой анализ характеристик электрической энергии, распространяющихся по рассматриваемому здесь участку двухцепной ВЛ был бы неполным, если бы не была предоставлена возможность определить законы изменения указанных характеристик во времени, которые представлены в приложении А (34)-(37).

Для практической реализации математических формулировок (3.6) – (3.8), (3.10) и формул (34) – (37) приложения А необходимо знать количественные значения постоянных интегрирования. Предположим, что к моменту анализа однородного участка двухцепной ВЛ известны спектральные составы фазных и линейных напряжений и токов в начале данного участка. На

частоте n -ой гармонической составляющей количественные значения напряжений и токов в начале рассматриваемого участка определяются величинами

$$\begin{aligned} & \dot{U}_{1A'n}, \dot{U}_{1B'n}, \dot{U}_{1C'n}, \dot{U}_{1A''n}, \dot{U}_{1B''n}, \dot{U}_{1C''n}, \dot{U}_{1A'B'n}, \dot{U}_{1A'A''n}, \dot{U}_{1A'B''n}, \dot{U}_{1B'C'n}, \dot{U}_{1B'B''n}, \\ & \dot{U}_{1B'C''n}, \dot{U}_{1B'A''n}, \dot{U}_{1C'A''n}, \dot{U}_{1C'A'n}, \dot{U}_{1C'C''n}, \dot{U}_{1A''B'n}, \dot{U}_{1B''C'n}, \dot{U}_{1B''C''n}, \dot{U}_{1C''A'n}, \\ & \dot{U}_{1C''A''n}, \dot{I}_{1A'n}, \dot{I}_{1B'n}, \dot{I}_{1C'n}, \dot{I}_{1A''n}, \dot{I}_{1B''n}, \dot{I}_{1C''n}. \end{aligned}$$

В самом начале линии, когда еще неявно проявляются связи между отдельными проводами ВЛ, указанные провода вполне можно считать отдельными каналами электрического поля, характеризующегося шестью парами волн электромагнитной энергии. Причем структуру этих каналов будем считать линейной, а потому, согласно принципу суперпозиций, действие каждой пары волн электромагнитной энергии можно рассматривать обособленно, игнорируя взаимные волновые сопротивления (это допущение).

Если воздействие каждой пары электромагнитной волны рассматривать как действие каждой ЭДС двухцепной ВЛ в том, или ином фазном проводе, то используя принцип суперпозиции, получим следующее:

$$\dot{A}_{A'1n} = \frac{\dot{U}_{1A'n} - \dot{I}_{1A'n} \cdot \underline{Z}_{cA'1n}}{2}; \quad (3.12)$$

$$\dot{A}_{A'2n} = \frac{\dot{U}_{1A'n} + \dot{I}_{1A'n} \cdot \underline{Z}_{cA'1n}}{2}; \quad (3.13)$$

$$\dot{A}_{A'3n} = \frac{\dot{U}_{1A'n} - \dot{I}_{1A'n} \cdot \underline{Z}_{cA'2n}}{2}; \quad (3.14)$$

$$\dot{A}_{A'4n} = \frac{\dot{U}_{1A'n} + \dot{I}_{1A'n} \cdot \underline{Z}_{cA'2n}}{2}; \quad (3.15)$$

$$\dot{A}_{A'5n} = \frac{\dot{U}_{1A'n} - \dot{I}_{1A'n} \cdot \underline{Z}_{cA'3n}}{2}; \quad (3.16)$$

$$\dot{A}_{A'6n} = \frac{\dot{U}_{1A'n} + \dot{I}_{1A'n} \cdot \underline{Z}_{cA'3n}}{2}; \quad (3.17)$$

$$\dot{A}_{A'7n} = \frac{\dot{U}_{1A'n} - \dot{I}_{1A'n} \cdot \underline{Z}_{cA'4n}}{2}; \quad (3.18)$$

$$\dot{A}_{A'8n} = \frac{\dot{U}_{1A'n} + \dot{I}_{1A'n} \cdot \underline{Z}_{cA'4n}}{2}; \quad (3.19)$$

$$\dot{A}_{A'9n} = \frac{\dot{U}_{1A'n} - \dot{I}_{1A'n} \cdot \underline{Z}_{cA'5n}}{2}; \quad (3.20)$$

$$\dot{A}_{A'10n} = \frac{\dot{U}_{1A'n} + \dot{I}_{1A'n} \cdot \underline{Z}_{cA'5n}}{2}; \quad (3.21)$$

$$\dot{A}_{A'11n} = \frac{\dot{U}_{1A'n} - \dot{I}_{1A'n} \cdot \underline{Z}_{cA'6n}}{2}; \quad (3.22)$$

$$\dot{A}_{A'12n} = \frac{\dot{U}_{1A'n} + \dot{I}_{1A'n} \cdot \underline{Z}_{cA'6n}}{2}. \quad (3.23)$$

Уравнения для постоянных интегрирования других линий составляются аналогично.

При подстановке формул (3.12) – (3.23) в уравнения (3.6) – (3.8), (3.10) получим:

$$\dot{U}_{A'n} = \frac{1}{6} \left(\sum_{i=1}^6 \frac{\dot{U}_{1A'n} - \dot{I}_{1A'n} \cdot \underline{Z}_{cA'1n}}{2} \cdot e^{\underline{Z}_{in}^l} + \frac{\dot{U}_{1A'n} + \dot{I}_{1A'n} \cdot \underline{Z}_{cA'1n}}{2} \cdot e^{-\underline{Z}_{in}^l} \right); \quad (3.24)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A'B'n} = \frac{1}{6} & \left(\sum_{i=1}^6 \frac{\dot{U}_{1A'n} - \dot{U}_{1B'n} - \dot{I}_{1A'n} \cdot \underline{Z}_{cA'1n} + \dot{I}_{1B'n} \cdot \underline{Z}_{cB'1n}}{2} \cdot e^{\underline{Z}_{in}^l} + \right. \\ & \left. + \frac{\dot{U}_{1A'n} - \dot{U}_{1B'n} + \dot{I}_{1A'n} \cdot \underline{Z}_{cA'1n} - \dot{I}_{1B'n} \cdot \underline{Z}_{cB'1n}}{2} \cdot e^{-\underline{Z}_{in}^l} \right); \end{aligned} \quad (3.25)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A'A''n} = \frac{1}{6} & \left(\sum_{i=1}^6 \frac{\dot{U}_{1A'n} - \dot{U}_{1A''n} - \dot{I}_{1A'n} \cdot \underline{Z}_{cA'1n} + \dot{I}_{1A''n} \cdot \underline{Z}_{cA''1n}}{2} \cdot e^{\underline{Z}_{in}^l} + \right. \\ & \left. + \frac{\dot{U}_{1A'n} - \dot{U}_{1A''n} + \dot{I}_{1A'n} \cdot \underline{Z}_{cA'1n} - \dot{I}_{1A''n} \cdot \underline{Z}_{cA''1n}}{2} \cdot e^{-\underline{Z}_{in}^l} \right); \end{aligned} \quad (3.26)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A'B''n} = \frac{1}{6} & \left(\sum_{i=1}^6 \frac{\dot{U}_{1A'n} - \dot{U}_{1B''n} - \dot{I}_{1A'n} \cdot \underline{Z}_{cA'1n} + \dot{I}_{1B''n} \cdot \underline{Z}_{cB''1n}}{2} \cdot e^{\underline{Z}_{in}^l} + \right. \\ & \left. + \frac{\dot{U}_{1A'n} - \dot{U}_{1B''n} + \dot{I}_{1A'n} \cdot \underline{Z}_{cA'1n} - \dot{I}_{1B''n} \cdot \underline{Z}_{cB''1n}}{2} \cdot e^{-\underline{Z}_{in}^l} \right); \end{aligned} \quad (3.27)$$

$$\begin{aligned}
\dot{i}_{A'n} = & \frac{1}{6} \left(\sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{U}_{1A'n} + \dot{i}_{1A'n} \cdot \underline{Z}_{cA'1n}}{2 \cdot \underline{Z}_{cA'1n}} \cdot e^{-\underline{\gamma}_{in}l} - \frac{\dot{U}_{1A'n} - \dot{i}_{1A'n} \cdot \underline{Z}_{cA'1n}}{2 \cdot \underline{Z}_{cA'1n}} \cdot e^{\underline{\gamma}_{in}l} \right) + \right. \\
& + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{U}_{1B'n} + \dot{i}_{1B'n} \cdot \underline{Z}_{cB'1n}}{2 \cdot \underline{Z}_{cA'B'1n}} \cdot e^{-\underline{\gamma}_{in}l} - \frac{\dot{U}_{1B'n} - \dot{i}_{1B'n} \cdot \underline{Z}_{cB'1n}}{2 \cdot \underline{Z}_{cA'B'1n}} \cdot e^{\underline{\gamma}_{in}l} \right) + \\
& + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{U}_{1C'n} + \dot{i}_{1C'n} \cdot \underline{Z}_{cC'1n}}{2 \cdot \underline{Z}_{cC'A'1n}} \cdot e^{-\underline{\gamma}_{in}l} - \frac{\dot{U}_{1C'n} - \dot{i}_{1C'n} \cdot \underline{Z}_{cC'1n}}{2 \cdot \underline{Z}_{cC'A'1n}} \cdot e^{\underline{\gamma}_{in}l} \right) + \\
& + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{U}_{1A''n} + \dot{i}_{1A''n} \cdot \underline{Z}_{cA''1n}}{2 \cdot \underline{Z}_{cA'A''1n}} \cdot e^{-\underline{\gamma}_{in}l} - \frac{\dot{U}_{1A''n} - \dot{i}_{1A''n} \cdot \underline{Z}_{cA''1n}}{2 \cdot \underline{Z}_{cA'A''1n}} \cdot e^{\underline{\gamma}_{in}l} \right) + \\
& + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{U}_{1B''n} + \dot{i}_{1B''n} \cdot \underline{Z}_{cB''1n}}{2 \cdot \underline{Z}_{cA'B''1n}} \cdot e^{-\underline{\gamma}_{in}l} - \frac{\dot{U}_{1B''n} - \dot{i}_{1B''n} \cdot \underline{Z}_{cB''1n}}{2 \cdot \underline{Z}_{cA'B''1n}} \cdot e^{\underline{\gamma}_{in}l} \right) + \\
& \left. + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{U}_{1C''n} + \dot{i}_{1C''n} \cdot \underline{Z}_{cC''1n}}{2 \cdot \underline{Z}_{cC'A''1n}} \cdot e^{-\underline{\gamma}_{in}l} - \frac{\dot{U}_{1C''n} - \dot{i}_{1C''n} \cdot \underline{Z}_{cC''1n}}{2 \cdot \underline{Z}_{cC'A''1n}} \cdot e^{\underline{\gamma}_{in}l} \right) \right). \quad (3.28)
\end{aligned}$$

Из курса математики известно [76]:

$$\frac{e^x + e^{-x}}{2} = chx \text{ - гиперболический косинус;}$$

$$\frac{e^x - e^{-x}}{2} = shx \text{ - гиперболический синус.}$$

Иначе уравнения (3.24)-(3.28) можно представить следующим образом:

$$\dot{U}_{A'n} = \frac{1}{6} \left(\sum_{i=1}^6 \left(\dot{U}_{1A'n} \cdot ch\underline{\gamma}_{in}l - \dot{i}_{1A'n} \cdot \underline{Z}_{cA'in} \cdot sh\underline{\gamma}_{in}l \right) \right); \quad (3.29)$$

$$\dot{U}_{A'B'n} = \frac{1}{6} \left(\sum_{i=1}^6 \left((\dot{U}_{1A'n} - \dot{U}_{1B'n}) \cdot ch\underline{\gamma}_{in}l - (\dot{i}_{1A'n} \cdot \underline{Z}_{cA'in} \cdot sh\underline{\gamma}_{in}l - \dot{i}_{1B'n} \cdot \underline{Z}_{cB'in} \cdot sh\underline{\gamma}_{in}l) \right) \right); \quad (3.30)$$

$$\dot{U}_{A'A''n} = \frac{1}{6} \left(\sum_{i=1}^6 \left((\dot{U}_{1A'n} - \dot{U}_{1A''n}) \cdot ch\underline{\gamma}_{in}l - (\dot{i}_{1A'n} \cdot \underline{Z}_{cA'in} \cdot sh\underline{\gamma}_{in}l - \dot{i}_{1A''n} \cdot \underline{Z}_{cA''in} \cdot sh\underline{\gamma}_{in}l) \right) \right); \quad (3.31)$$

$$\dot{i}_{A'n} = \frac{1}{6} \left(\sum_{i=1}^6 \left(\dot{i}_{1A'n} \cdot ch\underline{\gamma}_{in}l - \frac{\dot{U}_{1A'n}}{\underline{Z}_{cA'in}} \cdot sh\underline{\gamma}_{in}l \right) + \right.$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{I}_{1B'n} \cdot \underline{Z}_{cB'in}}{\underline{Z}_{cA'B'in}} \cdot ch\gamma_{in} l - \frac{\dot{U}_{1B'n}}{\underline{Z}_{cA'B'in}} \cdot sh\gamma_{in} l \right) + \\
& + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{I}_{1C'n} \cdot \underline{Z}_{cC'in}}{\underline{Z}_{cC'A'in}} \cdot ch\gamma_{in} l - \frac{\dot{U}_{1C'n}}{\underline{Z}_{cC'A'in}} \cdot sh\gamma_{in} l \right) + \\
& + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{I}_{1A''n} \cdot \underline{Z}_{cA''in}}{\underline{Z}_{cA'A''in}} \cdot ch\gamma_{in} l - \frac{\dot{U}_{1A''n}}{\underline{Z}_{cA'A''in}} \cdot sh\gamma_{in} l \right) + \\
& + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{I}_{1B''n} \cdot \underline{Z}_{cB''in}}{\underline{Z}_{cA'B''in}} \cdot ch\gamma_{in} l - \frac{\dot{U}_{1B''n}}{\underline{Z}_{cA'B''in}} \cdot sh\gamma_{in} l \right) + \\
& + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{I}_{1C''n} \cdot \underline{Z}_{cC''in}}{\underline{Z}_{cC'A''in}} \cdot ch\gamma_{in} l - \frac{\dot{U}_{1C''n}}{\underline{Z}_{cC'A''in}} \cdot sh\gamma_{in} l \right) \Bigg); \tag{3.32}
\end{aligned}$$

Использование математических формулировок (3.29)-(3.32) возможно лишь при известных спектральных составах фазных и линейных напряжений и токов в начале рассматриваемого участка двухцепной ВЛ. Однако, в реальных ситуациях часто появляется возможность определить указанные спектральные составы лишь в конце рассматриваемого участка. Есть смысл рассмотреть и этот случай.

Пусть протяженность от конца однородного участка двухцепной ВЛ до места, где необходимо определить основные характеристики электрической энергии на частоте n -ой гармонической составляющей, будет обозначена символом l_1 . Спектральный состав основных характеристик электрической энергии в конце рассматриваемого участка пусть определяется величинами $\dot{U}_{2A'n}, \dot{U}_{2B'n}, \dot{U}_{2C'n}, \dot{U}_{2A''n}, \dot{U}_{2B''n}, \dot{U}_{2C''n}$ и $\dot{I}_{2A'n}, \dot{I}_{2B'n}, \dot{I}_{2C'n}, \dot{I}_{2A''n}, \dot{I}_{2B''n}, \dot{I}_{2C''n}$. Длина всей однородной ВЛ определится величиной p . Тогда для выходных характеристик электрической энергии:

$$\dot{U}_{2A'n} = \frac{1}{6} \left(\dot{A}_{A'1n} \cdot e^{\underline{\gamma}_{1n} \cdot p} + \dot{A}_{A'2n} \cdot e^{-\underline{\gamma}_{1n} \cdot p} + \dot{A}_{A'3n} \cdot e^{\underline{\gamma}_{2n} \cdot p} + \dot{A}_{A'4n} \cdot e^{-\underline{\gamma}_{2n} \cdot p} + \dot{A}_{A'5n} \cdot e^{\underline{\gamma}_{3n} \cdot p} + \right.$$

$$\begin{aligned}
& + \dot{A}'_{A'6n} \cdot e^{-\gamma_{3n} \cdot p} + \dot{A}'_{A'7n} \cdot e^{\gamma_{4n} \cdot p} + \dot{A}'_{A'8n} \cdot e^{-\gamma_{4n} \cdot p} + \dot{A}'_{A'9n} \cdot e^{\gamma_{5n} \cdot p} + \dot{A}'_{A'10n} \cdot e^{-\gamma_{5n} \cdot p} + \\
& \quad + \dot{A}'_{A'11n} \cdot e^{\gamma_{6n} \cdot p} + \dot{A}'_{A'12n} \cdot e^{-\gamma_{6n} \cdot p} \Big); \tag{3.33}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
i_{A'n} = & \frac{1}{6} \left(\frac{\Delta_{1A'}}{\Delta} \cdot \left[\gamma_{1n} \left(\dot{A}'_{A'2n} \cdot e^{-\gamma_{1n} \cdot p} - \dot{A}'_{A'1n} \cdot e^{\gamma_{1n} \cdot p} \right) + \gamma_{2n} \left(\dot{A}'_{A'4n} \cdot e^{-\gamma_{2n} \cdot p} - \dot{A}'_{A'3n} \cdot e^{\gamma_{2n} \cdot p} \right) + \right. \right. \\
& + \gamma_{3n} \left(\dot{A}'_{A'6n} \cdot e^{-\gamma_{3n} \cdot p} + \dot{A}'_{A'5n} \cdot e^{\gamma_{3n} \cdot p} \right) + \gamma_{4n} \left(\dot{A}'_{A'8n} \cdot e^{-\gamma_{4n} \cdot p} - \dot{A}'_{A'7n} \cdot e^{\gamma_{4n} \cdot p} \right) + \\
& \left. + \gamma_{5n} \left(\dot{A}'_{A'10n} \cdot e^{-\gamma_{5n} \cdot p} - \dot{A}'_{A'9n} \cdot e^{\gamma_{5n} \cdot p} \right) + \gamma_{6n} \left(\dot{A}'_{A'12n} \cdot e^{-\gamma_{6n} \cdot p} - \dot{A}'_{A'11n} \cdot e^{\gamma_{6n} \cdot p} \right) \right] + \\
& + \frac{\Delta_{1B'}}{\Delta} \cdot \left[\gamma_{1n} \left(\dot{A}'_{B'2n} \cdot e^{-\gamma_{1n} \cdot p} - \dot{A}'_{B'1n} \cdot e^{\gamma_{1n} \cdot p} \right) + \gamma_{2n} \left(\dot{A}'_{B'4n} \cdot e^{-\gamma_{2n} \cdot p} - \dot{A}'_{B'3n} \cdot e^{\gamma_{2n} \cdot p} \right) + \right. \\
& + \gamma_{3n} \left(\dot{A}'_{B'6n} \cdot e^{-\gamma_{3n} \cdot p} - \dot{A}'_{B'5n} \cdot e^{\gamma_{3n} \cdot p} \right) + \gamma_{4n} \left(\dot{A}'_{B'8n} \cdot e^{-\gamma_{4n} \cdot p} - \dot{A}'_{B'7n} \cdot e^{\gamma_{4n} \cdot p} \right) + \\
& \left. + \gamma_{5n} \left(\dot{A}'_{B'10n} \cdot e^{-\gamma_{5n} \cdot p} - \dot{A}'_{B'9n} \cdot e^{\gamma_{5n} \cdot p} \right) + \gamma_{6n} \left(\dot{A}'_{B'12n} \cdot e^{-\gamma_{6n} \cdot p} - \dot{A}'_{B'11n} \cdot e^{\gamma_{6n} \cdot p} \right) \right] + \\
& + \frac{\Delta_{1C'}}{\Delta} \cdot \left[\gamma_{1n} \left(\dot{A}'_{C'2n} \cdot e^{-\gamma_{1n} \cdot p} - \dot{A}'_{C'1n} \cdot e^{\gamma_{1n} \cdot p} \right) + \gamma_{2n} \left(\dot{A}'_{C'4n} \cdot e^{-\gamma_{2n} \cdot p} - \dot{A}'_{C'3n} \cdot e^{\gamma_{2n} \cdot p} \right) + \right. \\
& + \gamma_{3n} \left(\dot{A}'_{C'6n} \cdot e^{-\gamma_{3n} \cdot p} - \dot{A}'_{C'5n} \cdot e^{\gamma_{3n} \cdot p} \right) + \gamma_{4n} \left(\dot{A}'_{C'8n} \cdot e^{-\gamma_{4n} \cdot p} - \dot{A}'_{C'7n} \cdot e^{\gamma_{4n} \cdot p} \right) + \\
& \left. + \gamma_{5n} \left(\dot{A}'_{C'10n} \cdot e^{-\gamma_{5n} \cdot p} - \dot{A}'_{C'9n} \cdot e^{\gamma_{5n} \cdot p} \right) + \gamma_{6n} \left(\dot{A}'_{C'12n} \cdot e^{-\gamma_{6n} \cdot p} - \dot{A}'_{C'11n} \cdot e^{\gamma_{6n} \cdot p} \right) \right] + \\
& + \frac{\Delta_{1A''}}{\Delta} \cdot \left[\gamma_{1n} \left(\dot{A}''_{A''2n} \cdot e^{-\gamma_{1n} \cdot p} - \dot{A}''_{A''1n} \cdot e^{\gamma_{1n} \cdot p} \right) + \gamma_{2n} \left(\dot{A}''_{A''4n} \cdot e^{-\gamma_{2n} \cdot p} - \dot{A}''_{A''3n} \cdot e^{\gamma_{2n} \cdot p} \right) + \right. \\
& + \gamma_{3n} \left(\dot{A}''_{A''6n} \cdot e^{-\gamma_{3n} \cdot p} - \dot{A}''_{A''5n} \cdot e^{\gamma_{3n} \cdot p} \right) + \gamma_{4n} \left(\dot{A}''_{A''8n} \cdot e^{-\gamma_{4n} \cdot p} - \dot{A}''_{A''7n} \cdot e^{\gamma_{4n} \cdot p} \right) + \\
& \left. + \gamma_{5n} \left(\dot{A}''_{A''10n} \cdot e^{-\gamma_{5n} \cdot p} - \dot{A}''_{A''9n} \cdot e^{\gamma_{5n} \cdot p} \right) + \gamma_{6n} \left(\dot{A}''_{A''12n} \cdot e^{-\gamma_{6n} \cdot p} - \dot{A}''_{A''11n} \cdot e^{\gamma_{6n} \cdot p} \right) \right] + \\
& + \frac{\Delta_{1B''}}{\Delta} \cdot \left[\gamma_{1n} \left(\dot{A}''_{B''2n} \cdot e^{-\gamma_{1n} \cdot p} - \dot{A}''_{B''1n} \cdot e^{\gamma_{1n} \cdot p} \right) + \gamma_{2n} \left(\dot{A}''_{B''4n} \cdot e^{-\gamma_{2n} \cdot p} - \dot{A}''_{B''3n} \cdot e^{\gamma_{2n} \cdot p} \right) + \right. \\
& + \gamma_{3n} \left(\dot{A}''_{B''6n} \cdot e^{-\gamma_{3n} \cdot p} - \dot{A}''_{B''5n} \cdot e^{\gamma_{3n} \cdot p} \right) + \gamma_{4n} \left(\dot{A}''_{B''8n} \cdot e^{-\gamma_{4n} \cdot p} - \dot{A}''_{B''7n} \cdot e^{\gamma_{4n} \cdot p} \right) + \\
& \left. + \gamma_{5n} \left(\dot{A}''_{B''10n} \cdot e^{-\gamma_{5n} \cdot p} - \dot{A}''_{B''9n} \cdot e^{\gamma_{5n} \cdot p} \right) + \gamma_{6n} \left(\dot{A}''_{B''12n} \cdot e^{-\gamma_{6n} \cdot p} - \dot{A}''_{B''11n} \cdot e^{\gamma_{6n} \cdot p} \right) \right] + \\
& + \frac{\Delta_{1C''}}{\Delta} \cdot \left[\gamma_{1n} \left(\dot{A}''_{C''2n} \cdot e^{-\gamma_{1n} \cdot p} - \dot{A}''_{C''1n} \cdot e^{\gamma_{1n} \cdot p} \right) + \gamma_{2n} \left(\dot{A}''_{C''4n} \cdot e^{-\gamma_{2n} \cdot p} - \dot{A}''_{C''3n} \cdot e^{\gamma_{2n} \cdot p} \right) + \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \gamma_{3n} \left(\dot{A}_{C''6n} \cdot e^{-\gamma_{3n} \cdot P} - \dot{A}_{C''5n} \cdot e^{\gamma_{3n} \cdot P} \right) + \gamma_{4n} \left(\dot{A}_{C''8n} \cdot e^{-\gamma_{4n} \cdot P} - \dot{A}_{C''7n} \cdot e^{\gamma_{4n} \cdot P} \right) + \\
& + \gamma_{5n} \left(\dot{A}_{C''10n} \cdot e^{-\gamma_{5n} \cdot P} - \dot{A}_{C''9n} \cdot e^{\gamma_{5n} \cdot P} \right) + \gamma_{6n} \left(\dot{A}_{C''12n} \cdot e^{-\gamma_{6n} \cdot P} - \dot{A}_{C''11n} \cdot e^{\gamma_{6n} \cdot P} \right) \Big] \Big] . (3.34)
\end{aligned}$$

Уравнения для других линий составляются аналогично.

Коэффициенты \dot{A}_{1n} и \dot{A}_{2n} вполне можно вычислить в результате совместного решения уравнений (3.33) и (3.34):

$$\dot{A}_{A'1n} = \frac{\dot{U}_{2A'n} - \dot{I}_{2A'n} \cdot Z_{cA'1n}}{2} e^{-\gamma_{1n} P}; \quad (3.35)$$

$$\dot{A}_{A'2n} = \frac{\dot{U}_{2A'n} + \dot{I}_{2A'n} \cdot Z_{cA'1n}}{2} e^{\gamma_{1n} P}; \quad (3.36)$$

$$\dot{A}_{A'3n} = \frac{\dot{U}_{2A'n} - \dot{I}_{2A'n} \cdot Z_{cA'2n}}{2} e^{-\gamma_{2n} P}; \quad (3.37)$$

$$\dot{A}_{A'4n} = \frac{\dot{U}_{2A'n} + \dot{I}_{2A'n} \cdot Z_{cA'2n}}{2} e^{\gamma_{2n} P}; \quad (3.38)$$

$$\dot{A}_{A'5n} = \frac{\dot{U}_{2A'n} - \dot{I}_{2A'n} \cdot Z_{cA'3n}}{2} e^{-\gamma_{3n} P}; \quad (3.39)$$

$$\dot{A}_{A'6n} = \frac{\dot{U}_{2A'n} + \dot{I}_{2A'n} \cdot Z_{cA'3n}}{2} e^{\gamma_{3n} P}; \quad (3.40)$$

$$\dot{A}_{A'7n} = \frac{\dot{U}_{2A'n} - \dot{I}_{2A'n} \cdot Z_{cA'4n}}{2} e^{-\gamma_{4n} P}; \quad (3.41)$$

$$\dot{A}_{A'8n} = \frac{\dot{U}_{2A'n} + \dot{I}_{2A'n} \cdot Z_{cA'4n}}{2} e^{\gamma_{4n} P}; \quad (3.42)$$

$$\dot{A}_{A'9n} = \frac{\dot{U}_{2A'n} - \dot{I}_{2A'n} \cdot Z_{cA'5n}}{2} e^{-\gamma_{5n} P}; \quad (3.43)$$

$$\dot{A}_{A'10n} = \frac{\dot{U}_{2A'n} + \dot{I}_{2A'n} \cdot Z_{cA'5n}}{2} e^{\gamma_{5n} P}; \quad (3.44)$$

$$\dot{A}_{A'11n} = \frac{\dot{U}_{2A'n} - \dot{I}_{2A'n} \cdot Z_{cA'6n}}{2} e^{-\gamma_{6n} P}; \quad (3.45)$$

$$\dot{A}_{A'12n} = \frac{\dot{U}_{2A'n} + \dot{I}_{2A'n} \cdot \underline{Z}_{cA'6n}}{2} e^{\gamma_{6n} p}. \quad (3.46)$$

При подстановке уравнений (3.35 - 3.46) в равенства (3.6) и (3.10) можно получить математические формулировки, позволяющие определять изображение на комплексной плоскости действующих значений тока и напряжения на частоте n -ой гармонической составляющей [66]:

$$\dot{U}_{A'n} = \frac{1}{6} \left(\sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{U}_{2A'n} - \dot{I}_{2A'n} \cdot \underline{Z}_{cA'in}}{2} \cdot e^{-\gamma_{in}(l-p)} + \frac{\dot{U}_{2A'n} + \dot{I}_{2A'n} \cdot \underline{Z}_{cA'in}}{2} \cdot e^{\gamma_{in}(p-l)} \right) \right); \quad (3.47)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A'n} = & \frac{1}{6} \left(\sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{U}_{2A'n} + \dot{I}_{2A'n} \cdot \underline{Z}_{cA'in}}{2 \cdot \underline{Z}_{cA'in}} \cdot e^{-\gamma_{in}(l-p)} - \frac{\dot{U}_{2A'n} - \dot{I}_{2A'n} \cdot \underline{Z}_{cA'in}}{2 \cdot \underline{Z}_{cA'in}} \cdot e^{\gamma_{in}(p-l)} \right) + \right. \\ & + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{U}_{2B'n} + \dot{I}_{2B'n} \cdot \underline{Z}_{cB'in}}{2 \cdot \underline{Z}_{cA'B'in}} \cdot e^{-\gamma_{in}(l-p)} - \frac{\dot{U}_{2B'n} - \dot{I}_{2B'n} \cdot \underline{Z}_{cB'in}}{2 \cdot \underline{Z}_{cA'B'in}} \cdot e^{\gamma_{in}(p-l)} \right) + \\ & + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{U}_{2C'n} + \dot{I}_{2C'n} \cdot \underline{Z}_{cC'in}}{2 \cdot \underline{Z}_{cC'A'in}} \cdot e^{-\gamma_{in}(l-p)} - \frac{\dot{U}_{2C'n} - \dot{I}_{2C'n} \cdot \underline{Z}_{cC'in}}{2 \cdot \underline{Z}_{cC'A'in}} \cdot e^{\gamma_{in}(p-l)} \right) + \\ & + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{U}_{2A''n} + \dot{I}_{2A''n} \cdot \underline{Z}_{cA''in}}{2 \cdot \underline{Z}_{cA'A''in}} \cdot e^{-\gamma_{in}(l-p)} - \frac{\dot{U}_{2A''n} - \dot{I}_{2A''n} \cdot \underline{Z}_{cA''in}}{2 \cdot \underline{Z}_{cA'A''in}} \cdot e^{\gamma_{in}(p-l)} \right) + \\ & + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{U}_{2B''n} + \dot{I}_{2B''n} \cdot \underline{Z}_{cB''in}}{2 \cdot \underline{Z}_{cA'B''in}} \cdot e^{-\gamma_{in}(l-p)} - \frac{\dot{U}_{2B''n} - \dot{I}_{2B''n} \cdot \underline{Z}_{cB''in}}{2 \cdot \underline{Z}_{cA'B''in}} \cdot e^{\gamma_{in}(p-l)} \right) + \\ & \left. + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{U}_{2C''n} + \dot{I}_{2C''n} \cdot \underline{Z}_{cC''in}}{2 \cdot \underline{Z}_{cC'A''in}} \cdot e^{-\gamma_{in}(l-p)} - \frac{\dot{U}_{2C''n} - \dot{I}_{2C''n} \cdot \underline{Z}_{cC''in}}{2 \cdot \underline{Z}_{cC'A''in}} \cdot e^{\gamma_{in}(p-l)} \right) \right). \quad (3.48) \end{aligned}$$

Зная, что l – это расстояние от начала ВЛ до какого-либо интересующего исследователя участка, а p – это длина всей линии, вполне можно утверждать, что $p - l$ есть расстояние от упомянутого участка до конца линии. Эту разницу обозначим символом l_1 .

$$l_1 = p - l.$$

В результате произведенных преобразований уравнения (3.47) и (3.48) предстанут в ином виде:

$$\dot{U}_{A'n} = \frac{1}{6} \left(\sum_{i=1}^6 \left(\dot{U}_{2A'n} \cdot ch\gamma_{in} l_1 + \dot{I}_{2A'n} \cdot \underline{Z}_{cA'in} \cdot sh\gamma_{in} l_1 \right) \right); \quad (3.49)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A'n} = & \frac{1}{6} \left(\sum_{i=1}^6 \left(\dot{I}_{2A'n} \cdot ch\gamma_{in} l_1 + \frac{\dot{U}_{2A'n}}{\underline{Z}_{cA'in}} \cdot sh\gamma_{in} l_1 \right) + \right. \\ & + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{I}_{2B'n}}{\underline{Z}_{cA'B'in}} \cdot \underline{Z}_{cB'in} \cdot ch\gamma_{in} l_1 + \frac{\dot{U}_{2B'n}}{\underline{Z}_{cA'B'in}} \cdot sh\gamma_{in} l_1 \right) + \\ & + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{I}_{2C'n}}{\underline{Z}_{cC'A'in}} \cdot \underline{Z}_{cC'in} \cdot ch\gamma_{in} l_1 + \frac{\dot{U}_{2C'n}}{\underline{Z}_{cC'A'in}} \cdot sh\gamma_{in} l_1 \right) + \\ & + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{I}_{2A''n}}{\underline{Z}_{cA'A''in}} \cdot \underline{Z}_{cA''in} \cdot ch\gamma_{in} l_1 + \frac{\dot{U}_{2A''n}}{\underline{Z}_{cA'A''in}} \cdot sh\gamma_{in} l_1 \right) + \\ & + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{I}_{2B''n}}{\underline{Z}_{cA'B''in}} \cdot \underline{Z}_{cB''in} \cdot ch\gamma_{in} l_1 + \frac{\dot{U}_{2B''n}}{\underline{Z}_{cA'B''in}} \cdot sh\gamma_{in} l_1 \right) + \\ & \left. + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{I}_{2C''n}}{\underline{Z}_{cC'A''in}} \cdot \underline{Z}_{cC''in} \cdot ch\gamma_{in} l_1 + \frac{\dot{U}_{2C''n}}{\underline{Z}_{cC'A''in}} \cdot sh\gamma_{in} l_1 \right) \right). \quad (3.50) \end{aligned}$$

При умножении напряжения $\dot{U}_{A'n}$ на сопряженный вектор тока $I_{A'n}^*$ получаем полную мощность:

$$\tilde{S}_{A'n} = \dot{U}_{A'n} \cdot I_{A'n}^*. \quad (3.51)$$

Уравнения для других линий составляются аналогично.

При использовании предлагаемой методики прогнозирования распределения электрической энергии по двухцепной ВЛ следует помнить, что напряжение, ток и мощность, вычисляемые по формулам (3.29), (3.32), (3.49 – 3.51) являются функциями расстояния от контрольной точки до конца анализируемого участка двухцепной ВЛ.

По формулам (3.29), (3.32), (3.49 – 3.51) можно вычислить действующие значения напряжения, тока и мощность лишь для частоты n - ой гармонической составляющей. Для представления описываемых характеристик электрической энергии в целом следует суммировать гармонические состав-

ляющие тока и напряжения в каких-либо ранее определенных точках двухцепной ВЛ.

По приведенным выше математическим формулировкам, становится очевидной реальная возможность определения количественных и качественных оценок основных характеристик электрической энергии практически на любой частоте в любом месте однородного участка двухцепной ВЛ. Для этого необходимо лишь иметь четкие и достоверные представления о параметрах электрической схемы замещения данного участка и спектральный состав напряжений и токов в начале или в конце этого участка.

3.2 Расчет напряжений и токов в неоднородном участке двухцепной воздушной линии

Предыдущая глава была посвящена анализу однородного участка двухцепной ВЛ. Но об абсолютно однородном участке ВЛ можно говорить лишь в идеализированной ситуации. Невозможно представить участок двухцепной ВЛ сколько-нибудь заметной протяженности с абсолютно одинаковыми по всей длине продольными и поперечными параметрами. В реальной ситуации практически невозможно обеспечить абсолютно неизменными химический состав, а также качество и толщину окисной пленки проводящих частей ВЛ, биохимическую обстановку атмосферы, рельеф и состав грунта местности, оказавшейся под воздействием электромагнитного излучения анализируемой линии. Это перечисление можно продолжать достаточно долго.

Если бы обстоятельства сложились так, что потребовалось бы в реальной двухцепной ВЛ выделить абсолютно однородные участки, то их протяженность была бы ничтожно мала. Однако в инженерных расчетах такая точность вовсе не обязательна и постоянность (неизменность) того или иного компонента, отвечающего за степень однородности линии, может быть принята с той или иной степенью достоверности.

Если учесть сказанное, то реальную двухцепную ВЛ вполне можно разбить на протяженные относительно однородные участки. Любую двухцепную ВЛ можно представить как совокупность относительно однородных участков. Границами их могут служить узлы двухцепной ВЛ или точки качественного раздела ВЛ (изменение марки и взаимного расположения проводов, резкое изменение рельефа местности и т. п.).

Неоднородный участок двухцепной ВЛ целесообразно представить в виде совокупности относительно однородных участков небольшой протяженности. Причем каждый из таких участков следует представлять в виде многополюсника. Данный прием достаточно широко распространен среди специалистов в соответствующих областях науки и техники [51, 57, 80]. Такое представление неоднородной ВЛ или ее неоднородных участков тем более оправдано вследствие того, что, как известно из теории электротехники, граница неоднородности является источником отраженной волны электромагнитной энергии.

В рассматриваемом случае каждый однородный участок целесообразно представлять в виде четырнадцатиполусника, шесть проводов и заземленная конструкция двухцепной ВЛ (рисунок 3.1). Весь же выделенный участок двухцепной ВЛ следует представлять в виде совокупности k четырнадцатиполусников (рисунок 3.2). Это будет совокупность пассивных четырнадцатиполусников.

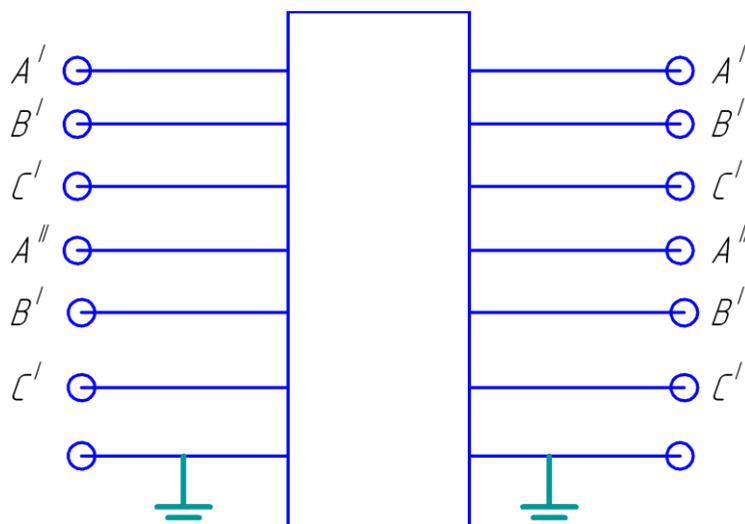


Рисунок 3.1 – Четырнадцатиполусник, иллюстрирующий однородный участок двухцепной ВЛ

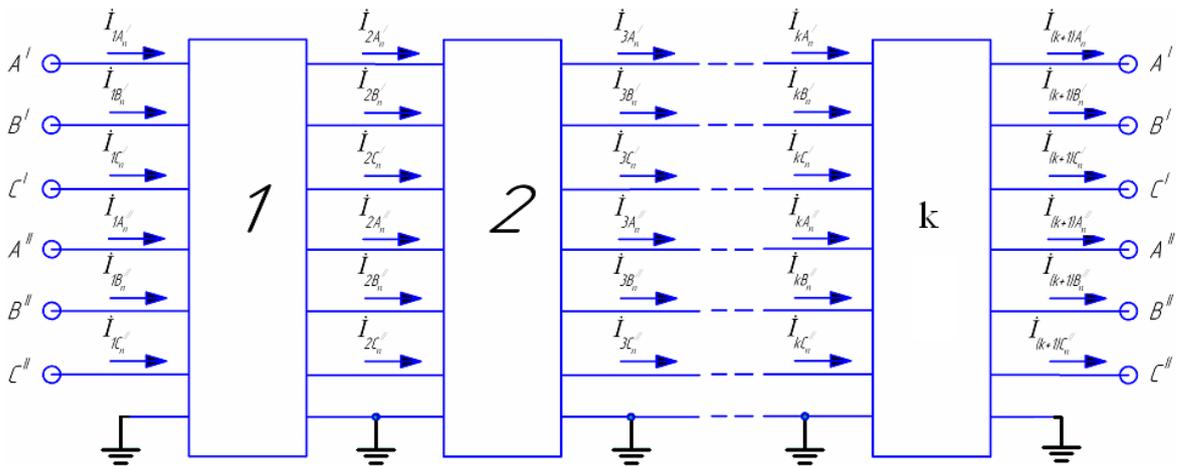


Рисунок 3.2 – Вариант представления неоднородного участка двухцепной ВЛ на частоте n -ой гармонической составляющей

Сведений о вторичных параметрах каждого однородного участка ВЛ для анализа распределения электрической энергии недостаточно. Необходимо иметь сведения об основных характеристиках электрической энергии в начале или в конце анализируемого неоднородного участка двухцепной ВЛ на соответствующих частотах.

Допустим, что известны выходные характеристики электрической энергии каждого однородного участка на частоте n -ой гармонической составляющей. Тогда по формулам, аналогичным равенствам (3.49) и (3.50) можно будет определить входные характеристики каждого однородного участка на той же частоте:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{1A'n} &= \frac{1}{6} \left(\sum_{i=1}^6 \left(\dot{U}_{2A'n} \cdot \text{ch} \gamma_{in1} l_1 + \dot{I}_{2A'n} \cdot \underline{Z}_{1cA'in1} \cdot \text{sh} \gamma_{in1} l_1 \right) \right); & (3.52) \\ \dot{I}_{1A'n} &= \frac{1}{6} \left(\sum_{i=1}^6 \left(\dot{I}_{2A'n} \cdot \text{ch} \gamma_{in1} l_1 + \frac{\dot{U}_{2A'n}}{\underline{Z}_{1cA'in1}} \cdot \text{sh} \gamma_{in1} l_1 \right) + \right. \\ &+ \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{I}_{2B'n} \cdot \underline{Z}_{1cB'in1}}{\underline{Z}_{1cA'B'in1}} \cdot \text{ch} \gamma_{in1} l_1 + \frac{\dot{U}_{2B'n}}{\underline{Z}_{1cA'B'in1}} \cdot \text{sh} \gamma_{in1} l_1 \right) + \\ &+ \left. \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{I}_{2C'n} \cdot \underline{Z}_{1cC'in1}}{\underline{Z}_{1cC'A'in1}} \cdot \text{ch} \gamma_{in1} l_1 + \frac{\dot{U}_{2C'n}}{\underline{Z}_{1cC'A'in1}} \cdot \text{sh} \gamma_{in1} l_1 \right) + \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{I}_{2A''n} \cdot \underline{Z}_{1cA''in1}}{\underline{Z}_{1cA'A''in1}} \cdot ch\gamma_{in1} l_1 + \frac{\dot{U}_{2A''n}}{\underline{Z}_{1cA'A''in1}} \cdot sh\gamma_{in1} l_1 \right) + \\
& + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{I}_{2B''n} \cdot \underline{Z}_{1cB''in1}}{\underline{Z}_{1cA'B''in1}} \cdot ch\gamma_{in1} l_1 + \frac{\dot{U}_{2B''n}}{\underline{Z}_{1cA'B''in1}} \cdot sh\gamma_{in1} l_1 \right) + \\
& + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{I}_{2C''n} \cdot \underline{Z}_{1cC''in1}}{\underline{Z}_{1cC'A''in1}} \cdot ch\gamma_{in1} l_1 + \frac{\dot{U}_{2C''n}}{\underline{Z}_{1cC'A''in1}} \cdot sh\gamma_{in1} l_1 \right); \tag{3.53}
\end{aligned}$$

$$\dot{U}_{2A'n} = \frac{1}{6} \left(\sum_{i=1}^6 \left(\dot{U}_{3A'n} \cdot ch\gamma_{in2} l_2 + \dot{I}_{3A'n} \cdot \underline{Z}_{2cA'in2} \cdot sh\gamma_{in2} l_2 \right) \right); \tag{3.54}$$

$$\begin{aligned}
\dot{I}_{2A'n} & = \frac{1}{6} \left(\sum_{i=1}^6 \left(\dot{I}_{3A'n} \cdot ch\gamma_{in2} l_2 + \frac{\dot{U}_{3A'n}}{\underline{Z}_{2cA'in2}} \cdot sh\gamma_{in2} l_2 \right) + \right. \\
& + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{I}_{3B'n} \cdot \underline{Z}_{2cB'in2}}{\underline{Z}_{2cA'B'in2}} \cdot ch\gamma_{in2} l_2 + \frac{\dot{U}_{3B'n}}{\underline{Z}_{2cA'B'in2}} \cdot sh\gamma_{in2} l_2 \right) + \\
& + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{I}_{3C'n} \cdot \underline{Z}_{2cC'in2}}{\underline{Z}_{2cC'A'in2}} \cdot ch\gamma_{in2} l_2 + \frac{\dot{U}_{3C'n}}{\underline{Z}_{2cC'A'in2}} \cdot sh\gamma_{in2} l_2 \right) + \\
& + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{I}_{3A''n} \cdot \underline{Z}_{kcA''in2}}{\underline{Z}_{2cA'A''in2}} \cdot ch\gamma_{in2} l_2 + \frac{\dot{U}_{3A''n}}{\underline{Z}_{2cA'A''in2}} \cdot sh\gamma_{in2} l_2 \right) + \\
& + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{I}_{3B''n} \cdot \underline{Z}_{2cB''in2}}{\underline{Z}_{2cA'B''in2}} \cdot ch\gamma_{in2} l_2 + \frac{\dot{U}_{3B''n}}{\underline{Z}_{2cA'B''in2}} \cdot sh\gamma_{in2} l_2 \right) + \\
& \left. + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{I}_{3C''n} \cdot \underline{Z}_{kcC''in2}}{\underline{Z}_{2cC'A''in2}} \cdot ch\gamma_{in2} l_2 + \frac{\dot{U}_{3C''n}}{\underline{Z}_{2cC'A''in2}} \cdot sh\gamma_{in2} l_2 \right) \right), \tag{3.55}
\end{aligned}$$

$$\dot{U}_{kA'n} = \frac{1}{6} \left(\sum_{i=1}^6 \left(\dot{U}_{(k+1)A'n} \cdot ch\gamma_{ink} l_k + \dot{I}_{(k+1)A'n} \cdot \underline{Z}_{kcA'ink} \cdot sh\gamma_{ink} l_k \right) \right); \tag{3.56}$$

$$\dot{I}_{kA'n} = \frac{1}{6} \left(\sum_{i=1}^6 \left(\dot{I}_{(k+1)A'n} \cdot ch\gamma_{ink} l_k + \frac{\dot{U}_{(k+1)A'n}}{\underline{Z}_{kcA'ink}} \cdot sh\gamma_{ink} l_k \right) + \right.$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{I}_{(k+1)B'n}}{\underline{Z}_{kcA'B'ink}} \cdot ch\gamma_{ink} l_k + \frac{\dot{U}_{(k+1)B'n}}{\underline{Z}_{kcA'B'ink}} \cdot sh\gamma_{ink} l_k \right) + \\
& + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{I}_{(k+1)C'n}}{\underline{Z}_{kcC'A'ink}} \cdot ch\gamma_{ink} l_k + \frac{\dot{U}_{(k+1)C'n}}{\underline{Z}_{kcC'A'ink}} \cdot sh\gamma_{ink} l_k \right) + \\
& + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{I}_{(k+1)A''n}}{\underline{Z}_{kcA''A'ink}} \cdot ch\gamma_{ink} l_k + \frac{\dot{U}_{(k+1)A''n}}{\underline{Z}_{kcA''A'ink}} \cdot sh\gamma_{ink} l_k \right) + \\
& + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{I}_{(k+1)B''n}}{\underline{Z}_{kcA''B''ink}} \cdot ch\gamma_{ink} l_k + \frac{\dot{U}_{(k+1)B''n}}{\underline{Z}_{kcA''B''ink}} \cdot sh\gamma_{ink} l_k \right) + \\
& + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{I}_{(k+1)C''n}}{\underline{Z}_{kcC''A'ink}} \cdot ch\gamma_{ink} l_k + \frac{\dot{U}_{(k+1)C''n}}{\underline{Z}_{kcC''A'ink}} \cdot sh\gamma_{ink} l_k \right) \Bigg), \quad (3.57)
\end{aligned}$$

где $\dot{I}_{1A'n}, \dot{I}_{2A'n}, \dot{I}_{2B'n}, \dot{I}_{2C'n}, \dot{I}_{2A''n}, \dot{I}_{2B''n}, \dot{I}_{2C''n}, \dot{I}_{kA'n}$ - действующие значения линейных токов на входе первого, второго и k -го однородного участка выделенной части двухцепной ВЛ соответственно на комплексной плоскости на частоте n -ой гармонической составляющей; $\dot{I}_{2A'n}, \dot{I}_{2B'n}, \dot{I}_{2C'n}, \dot{I}_{2A''n}, \dot{I}_{2B''n}, \dot{I}_{2C''n}, \dot{I}_{(k+1)A'n}, \dot{I}_{(k+1)B'n}, \dot{I}_{(k+1)C'n}, \dot{I}_{(k+1)A''n}, \dot{I}_{(k+1)B''n}, \dot{I}_{(k+1)C''n}$ - действующие значения линейных токов на выходе первого и k -го однородного участка выделенной части двухцепной ВЛ соответственно на комплексной плоскости, на частоте n -ой гармонической составляющей; $\dot{U}_{1A'n}, \dot{U}_{2A'n}, \dot{U}_{2B'n}, \dot{U}_{2C'n}, \dot{U}_{2A''n}, \dot{U}_{2B''n}, \dot{U}_{2C''n}, \dot{U}_{kA'n}$ - действующие значения фазных напряжений на входных клеммах первого, второго и k -го однородного участка двухцепной ВЛ соответственно на комплексной плоскости на частоте n -ой гармонической составляющей; $\dot{U}_{2A'n}, \dot{U}_{2B'n}, \dot{U}_{2C'n}, \dot{U}_{2A''n}, \dot{U}_{2B''n}, \dot{U}_{2C''n}, \dot{U}_{(k+1)A'n}, \dot{U}_{(k+1)B'n}, \dot{U}_{(k+1)C'n}, \dot{U}_{(k+1)A''n}, \dot{U}_{(k+1)B''n}, \dot{U}_{(k+1)C''n}$ - действующие значения фазных напряжений на выходных клеммах первого и k -го однородного участка выделенной двухцепной ВЛ соответственно на комплексной плоскости на частоте n -

ой гармонической составляющей; $\underline{\gamma}_{1n1}, \underline{\gamma}_{2n1}, \underline{\gamma}_{3n1}, \underline{\gamma}_{4n1}, \underline{\gamma}_{5n1}, \underline{\gamma}_{6n1}, \underline{\gamma}_{1nk}, \underline{\gamma}_{2nk}, \underline{\gamma}_{3nk}, \underline{\gamma}_{4nk}, \underline{\gamma}_{5nk}, \underline{\gamma}_{6nk}$ - постоянные распространения электромагнитной волны на частоте n -ой гармонической составляющей по линиям $1, \dots, k$ -го однородного участка двухцепной ВЛ; $\underline{Z}_{1cA'1n}, \underline{Z}_{1cA'2n}, \underline{Z}_{1cA'3n}, \underline{Z}_{1cA'4n}, \underline{Z}_{1cA'5n}, \underline{Z}_{1cA'6n}, \underline{Z}_{1cB'1n}, \underline{Z}_{1cB'2n}, \underline{Z}_{1cB'3n}, \underline{Z}_{1cB'4n}, \underline{Z}_{1cB'5n}, \underline{Z}_{1cB'6n}, \underline{Z}_{1cC'1n}, \underline{Z}_{1cC'2n}, \underline{Z}_{1cC'3n}, \underline{Z}_{1cC'4n}, \underline{Z}_{1cC'5n}, \underline{Z}_{1cC'6n}, \underline{Z}_{1cA''1n}, \underline{Z}_{1cA''2n}, \underline{Z}_{1cA''3n}, \underline{Z}_{1cA''4n}, \underline{Z}_{1cA''5n}, \underline{Z}_{1cA''6n}, \underline{Z}_{1cB''1n}, \underline{Z}_{1cB''2n}, \underline{Z}_{1cB''3n}, \underline{Z}_{1cB''4n}, \underline{Z}_{1cB''5n}, \underline{Z}_{1cB''6n}, \underline{Z}_{1cC''1n}, \underline{Z}_{1cC''2n}, \underline{Z}_{1cC''3n}, \underline{Z}_{1cC''4n}, \underline{Z}_{1cC''5n}, \underline{Z}_{1cC''6n}, \underline{Z}_{kcA'1n}, \underline{Z}_{kcA'2n}, \underline{Z}_{kcA'3n}, \underline{Z}_{kcA'4n}, \underline{Z}_{kcA'5n}, \underline{Z}_{kcA'6n}, \underline{Z}_{kcB'1n}, \underline{Z}_{kcB'2n}, \underline{Z}_{kcB'3n}, \underline{Z}_{kcB'4n}, \underline{Z}_{kcB'5n}, \underline{Z}_{kcB'6n}, \underline{Z}_{kcC'1n}, \underline{Z}_{kcC'2n}, \underline{Z}_{kcC'3n}, \underline{Z}_{kcC'4n}, \underline{Z}_{kcC'5n}, \underline{Z}_{kcC'6n}, \underline{Z}_{kcA''1n}, \underline{Z}_{kcA''2n}, \underline{Z}_{kcA''3n}, \underline{Z}_{kcA''4n}, \underline{Z}_{kcA''5n}, \underline{Z}_{kcA''6n}, \underline{Z}_{kcB''1n}, \underline{Z}_{kcB''2n}, \underline{Z}_{kcB''3n}, \underline{Z}_{kcB''4n}, \underline{Z}_{kcB''5n}, \underline{Z}_{kcB''6n}, \underline{Z}_{kcC''1n}, \underline{Z}_{kcC''2n}, \underline{Z}_{kcC''3n}, \underline{Z}_{kcC''4n}, \underline{Z}_{kcC''5n}, \underline{Z}_{kcC''6n}$ - собственные волновые сопротивления проводов $1, \dots, k$ -ых однородных участков выделенной части двухцепной ВЛ на комплексной плоскости на частоте n -ой гармонической составляющей; $\underline{Z}_{1cA'B'1n}, \underline{Z}_{1cA'B'2n}, \underline{Z}_{1cA'B'3n}, \underline{Z}_{1cA'B'4n}, \underline{Z}_{1cA'B'5n}, \underline{Z}_{1cA'B'6n}, \underline{Z}_{1cA'A''1n}, \underline{Z}_{1cA'A''2n}, \underline{Z}_{1cA'A''3n}, \underline{Z}_{1cA'A''4n}, \underline{Z}_{1cA'A''5n}, \underline{Z}_{1cA'A''6n}, \underline{Z}_{1cA'B''1n}, \underline{Z}_{1cA'B''2n}, \underline{Z}_{1cA'B''3n}, \underline{Z}_{1cA'B''4n}, \underline{Z}_{1cA'B''5n}, \underline{Z}_{1cA'B''6n}, \underline{Z}_{1cC'A'1n}, \underline{Z}_{1cC'A'2n}, \underline{Z}_{1cC'A'3n}, \underline{Z}_{1cC'A'4n}, \underline{Z}_{1cC'A'5n}, \underline{Z}_{1cC'A'6n}, \underline{Z}_{1cC''A'1n}, \underline{Z}_{1cC''A'2n}, \underline{Z}_{1cC''A'3n}, \underline{Z}_{1cC''A'4n}, \underline{Z}_{1cC''A'5n}, \underline{Z}_{1cC''A'6n}, \underline{Z}_{kcA'B'1n}, \underline{Z}_{kcA'B'2n}, \underline{Z}_{kcA'B'3n}, \underline{Z}_{kcA'B'4n}, \underline{Z}_{kcA'B'5n}, \underline{Z}_{kcA'B'6n}, \underline{Z}_{kcA'A''1n}, \underline{Z}_{kcA'A''2n}, \underline{Z}_{kcA'A''3n}, \underline{Z}_{kcA'A''4n}, \underline{Z}_{kcA'A''5n}, \underline{Z}_{kcA'A''6n}, \underline{Z}_{kcA'B''1n}, \underline{Z}_{kcA'B''2n}, \underline{Z}_{kcA'B''3n}, \underline{Z}_{kcA'B''4n}, \underline{Z}_{kcA'B''5n}, \underline{Z}_{kcA'B''6n}, \underline{Z}_{kcC'A'1n}, \underline{Z}_{kcC'A'2n}, \underline{Z}_{kcC'A'3n}, \underline{Z}_{kcC'A'4n}, \underline{Z}_{kcC'A'5n}, \underline{Z}_{kcC'A'6n}, \underline{Z}_{kcC''A'1n}, \underline{Z}_{kcC''A'2n}, \underline{Z}_{kcC''A'3n}, \underline{Z}_{kcC''A'4n}, \underline{Z}_{kcC''A'5n}, \underline{Z}_{kcC''A'6n}$ - взаимные волновые сопротивления проводов $1, \dots, k$ -ых однородных участков выделенной части двухцепной ВЛ на комплексной плоскости на частоте n -ой гармонической составляющей; l_1, \dots, l_k - протяженности $1, \dots, k$ -го однородного участка выделенной части двухцепной ВЛ [68].

Уравнения для других линий составляются аналогично.

На рисунке 3.2 однородные участки выделенной части двухцепной ВЛ представлены в виде четырнадцатиполосников. Опираясь на теорию многополосников, уравнения (3.52 – 3.57) можно переписать так [12]:

$$\dot{U}_{1A'n} = \underline{A}_{A'1n} \cdot \dot{U}_{2A'n} + \underline{B}_{A'1n} \cdot \dot{I}_{2A'n}; \quad (3.58)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{1A'n} = & \underline{C}_{A'1n} \cdot \dot{U}_{2A'n} + \underline{D}_{A'1n} \cdot \dot{I}_{2A'n} + \underline{E}_{A'1n} \cdot \dot{U}_{2B'n} + \underline{F}_{A'1n} \cdot \dot{I}_{2B'n} + \underline{G}_{A'1n} \cdot \dot{U}_{2C'n} + \\ & + \underline{H}_{A'1n} \cdot \dot{I}_{2C'n} + \underline{J}_{A'1n} \cdot \dot{U}_{2A''n} + \underline{K}_{A'1n} \cdot \dot{I}_{2A''n} + \underline{L}_{A'1n} \cdot \dot{U}_{2B''n} + \underline{M}_{A'1n} \cdot \dot{I}_{2B''n} + \\ & + \underline{N}_{A'1n} \cdot \dot{U}_{2C''n} + \underline{O}_{A'1n} \cdot \dot{I}_{2C''n}; \end{aligned} \quad (3.59)$$

$$\dot{U}_{2A'n} = \underline{A}_{A'2n} \cdot \dot{U}_{3A'n} + \underline{B}_{A'2n} \cdot \dot{I}_{3A'n}; \quad (3.60)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{2A'n} = & \underline{C}_{A'2n} \cdot \dot{U}_{3A'n} + \underline{D}_{A'2n} \cdot \dot{I}_{3A'n} + \underline{E}_{A'2n} \cdot \dot{U}_{3B'n} + \underline{F}_{A'2n} \cdot \dot{I}_{3B'n} + \underline{G}_{A'2n} \cdot \dot{U}_{3C'n} + \\ & + \underline{H}_{A'2n} \cdot \dot{I}_{3C'n} + \underline{J}_{A'2n} \cdot \dot{U}_{3A''n} + \underline{K}_{A'2n} \cdot \dot{I}_{3A''n} + \underline{L}_{A'2n} \cdot \dot{U}_{3B''n} + \underline{M}_{A'2n} \cdot \dot{I}_{3B''n} + \\ & + \underline{N}_{A'2n} \cdot \dot{U}_{3C''n} + \underline{O}_{A'2n} \cdot \dot{I}_{3C''n}; \end{aligned} \quad (3.61)$$

$$\dot{U}_{kA'n} = \underline{A}_{A'kn} \cdot \dot{U}_{(k+1)A'n} + \underline{B}_{A'kn} \cdot \dot{I}_{(k+1)A'n}; \quad (3.62)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{kA'n} = & \underline{C}_{A'kn} \cdot \dot{U}_{(k+1)A'n} + \underline{D}_{A'kn} \cdot \dot{I}_{(k+1)A'n} + \underline{E}_{A'kn} \cdot \dot{U}_{(k+1)B'n} + \underline{F}_{A'kn} \cdot \dot{I}_{(k+1)B'n} + \\ & + \underline{G}_{A'kn} \cdot \dot{U}_{(k+1)C'n} + \underline{H}_{A'kn} \cdot \dot{I}_{(k+1)C'n} + \underline{J}_{A'kn} \cdot \dot{U}_{(k+1)A''n} + \underline{K}_{A'kn} \cdot \dot{I}_{(k+1)A''n} + \\ & + \underline{L}_{A'kn} \cdot \dot{U}_{(k+1)B''n} + \underline{M}_{A'kn} \cdot \dot{I}_{(k+1)B''n} + \underline{N}_{A'kn} \cdot \dot{U}_{(k+1)C''n} + \underline{O}_{A'kn} \cdot \dot{I}_{(k+1)C''n}; \end{aligned} \quad (3.63)$$

где $\underline{A}_{A'1n}$, $\underline{B}_{A'1n}$, $\underline{C}_{A'1n}$, $\underline{D}_{A'1n}$, $\underline{E}_{A'1n}$, $\underline{F}_{A'1n}$, $\underline{G}_{A'1n}$, $\underline{H}_{A'1n}$, $\underline{J}_{A'1n}$, $\underline{K}_{A'1n}$, $\underline{L}_{A'1n}$, $\underline{M}_{A'1n}$, $\underline{N}_{A'1n}$, $\underline{O}_{A'1n}$, $\underline{A}_{A'2n}$, $\underline{B}_{A'2n}$, $\underline{C}_{A'2n}$, $\underline{D}_{A'2n}$, $\underline{E}_{A'2n}$, $\underline{F}_{A'2n}$, $\underline{G}_{A'2n}$, $\underline{H}_{A'2n}$, $\underline{J}_{A'2n}$, $\underline{K}_{A'2n}$, $\underline{L}_{A'2n}$, $\underline{M}_{A'2n}$, $\underline{N}_{A'2n}$, $\underline{O}_{A'2n}$, $\underline{A}_{A'kn}$, $\underline{C}_{A'kn}$, $\underline{D}_{A'kn}$, $\underline{E}_{A'kn}$, $\underline{F}_{A'kn}$, $\underline{G}_{A'kn}$, $\underline{H}_{A'kn}$, $\underline{J}_{A'kn}$, $\underline{K}_{A'kn}$, $\underline{L}_{A'kn}$, $\underline{M}_{A'kn}$, $\underline{N}_{A'kn}$, $\underline{O}_{A'kn}$ - коэффициенты 1,..., k-ого четырнадцатиполосников, иллюстрирующие на рисунке 3.2 соответствующие однородные участки выделенной части двухцепной ВЛ.

Количественные оценки коэффициентов описываемых четырнадцатиполосников получаются из сопоставления равенств (3.52 - 3.57) и (3.58 - (3.63):

$$\underline{A}_{A'1n} = \sum_{i=1}^6 ch\gamma_{in1} l_1; \quad (3.64)$$

$$\underline{B}_{A'1n} = \sum_{i=1}^6 \frac{Z_{1cA'in}}{Z_{1cA'in}} \cdot sh\gamma_{in1} l_1; \quad (3.65)$$

$$\underline{C}_{A'1n} = \sum_{i=1}^6 \frac{sh\gamma_{in1} l_1}{Z_{1cA'in}}; \quad (3.66)$$

$$\underline{D}_{A'1n} = \sum_{i=1}^6 ch\gamma_{in1} l_1; \quad (3.67)$$

$$\underline{E}_{A'1n} = \sum_{i=1}^6 \frac{sh\gamma_{in1} l_1}{Z_{1cA'B'in}}; \quad (3.68)$$

$$\underline{F}_{A'1n} = \sum_{i=1}^6 \frac{Z_{1cB'in}}{Z_{1cA'B'in}} \cdot ch\gamma_{in1} l_1; \quad (3.69)$$

$$\underline{G}_{A'1n} = \sum_{i=1}^6 \frac{sh\gamma_{in1} l_1}{Z_{1cC'A'in}}; \quad (3.70)$$

$$\underline{H}_{A'1n} = \sum_{i=1}^6 \frac{Z_{1cC'in}}{Z_{1cC'A'in}} \cdot ch\gamma_{in1} l_1; \quad (3.71)$$

$$\underline{J}_{A'1n} = \sum_{i=1}^6 \frac{sh\gamma_{in1} l_1}{Z_{1cA'A''in}}; \quad (3.72)$$

$$\underline{K}_{A'1n} = \sum_{i=1}^6 \frac{Z_{1cA''in}}{Z_{1cA'A''in}} \cdot ch\gamma_{in1} l_1; \quad (3.73)$$

$$\underline{L}_{A'1n} = \sum_{i=1}^6 \frac{sh\gamma_{in1} l_1}{Z_{1cA'B''in}}; \quad (3.74)$$

$$\underline{M}_{A'1n} = \sum_{i=1}^6 \frac{Z_{1cB''in}}{Z_{1cA'B''in}} \cdot ch\gamma_{in1} l_1; \quad (3.75)$$

$$\underline{N}_{A'1n} = \sum_{i=1}^6 \frac{sh\gamma_{in1} l_1}{Z_{1cC''A'in}}; \quad (3.76)$$

$$\underline{O}_{A'1n} = \sum_{i=1}^6 \frac{Z_{1cC''in}}{Z_{1cC''A'in}} \cdot ch\gamma_{in1} l_1; \quad (3.77)$$

$$\underline{A}_{A'2n} = \sum_{i=1}^6 ch\gamma_{in2} l_2; \quad (3.78)$$

$$\underline{B}_{A'2n} = \sum_{i=1}^6 \underline{Z}_{2cA'in} \cdot sh\gamma_{in2} l_2 ; \quad (3.79)$$

$$\underline{C}_{A'2n} = \sum_{i=1}^6 \frac{sh\gamma_{in2} l_2}{\underline{Z}_{2cA'in}} ; \quad (3.80)$$

$$\underline{D}_{A'2n} = \sum_{i=1}^6 ch\gamma_{in2} l_2 ; \quad (3.81)$$

$$\underline{E}_{A'2n} = \sum_{i=1}^6 \frac{sh\gamma_{in2} l_2}{\underline{Z}_{2cA'B'in}} ; \quad (3.82)$$

$$\underline{F}_{A'2n} = \sum_{i=1}^6 \frac{\underline{Z}_{2cB'in}}{\underline{Z}_{2cA'B'in}} \cdot ch\gamma_{in2} l_2 ; \quad (3.83)$$

$$\underline{G}_{A'2n} = \sum_{i=1}^6 \frac{sh\gamma_{in2} l_2}{\underline{Z}_{2cC'A'in}} ; \quad (3.84)$$

$$\underline{H}_{A'2n} = \sum_{i=1}^6 \frac{\underline{Z}_{2cC'in}}{\underline{Z}_{2cC'A'in}} \cdot ch\gamma_{in2} l_2 ; \quad (3.85)$$

$$\underline{J}_{A'2n} = \sum_{i=1}^6 \frac{sh\gamma_{in2} l_2}{\underline{Z}_{2cA'A'in}} ; \quad (3.86)$$

$$\underline{K}_{A'2n} = \sum_{i=1}^6 \frac{\underline{Z}_{2cA'in}}{\underline{Z}_{2cA'A'in}} \cdot ch\gamma_{in2} l_2 ; \quad (3.87)$$

$$\underline{L}_{A'2n} = \sum_{i=1}^6 \frac{sh\gamma_{in2} l_2}{\underline{Z}_{2cA'B''in}} ; \quad (3.88)$$

$$\underline{M}_{A'2n} = \sum_{i=1}^6 \frac{\underline{Z}_{2cB''in}}{\underline{Z}_{2cA'B''in}} \cdot ch\gamma_{in2} l_2 ; \quad (3.89)$$

$$\underline{N}_{A'2n} = \sum_{i=1}^6 \frac{sh\gamma_{in2} l_2}{\underline{Z}_{2cC''A'in}} ; \quad (3.90)$$

$$\underline{O}_{A'2n} = \sum_{i=1}^6 \frac{\underline{Z}_{2cC''in}}{\underline{Z}_{2cC''A'in}} \cdot ch\gamma_{in2} l_2 ; \quad (3.91)$$

$$\underline{A}_{A'kn} = \sum_{i=1}^6 ch\gamma_{ink} l_k ; \quad (3.92)$$

$$\underline{B}_{A'kn} = \sum_{i=1}^6 \underline{Z}_{kcA'in} \cdot sh\gamma_{ink} l_k ; \quad (3.93)$$

$$\underline{C}_{A'kn} = \sum_{i=1}^6 \frac{sh\gamma_{ink} l_k}{Z_{kcA'in}}; \quad (3.94)$$

$$\underline{D}_{A'kn} = \sum_{i=1}^6 ch\gamma_{ink} l_k; \quad (3.95)$$

$$\underline{E}_{A'kn} = \sum_{i=1}^6 \frac{sh\gamma_{ink} l_k}{Z_{kcA'B'in}}; \quad (3.96)$$

$$\underline{F}_{A'kn} = \sum_{i=1}^6 \frac{Z_{kcB'in}}{Z_{kcA'B'in}} \cdot ch\gamma_{ink} l_k; \quad (3.97)$$

$$\underline{G}_{A'kn} = \sum_{i=1}^6 \frac{sh\gamma_{ink} l_k}{Z_{kcC'A'in}}; \quad (3.98)$$

$$\underline{H}_{A'kn} = \sum_{i=1}^6 \frac{Z_{kcC'in}}{Z_{kcC'A'in}} \cdot ch\gamma_{ink} l_k; \quad (3.99)$$

$$\underline{J}_{A'kn} = \sum_{i=1}^6 \frac{sh\gamma_{ink} l_k}{Z_{kcA'A'in}}; \quad (3.100)$$

$$\underline{K}_{A'kn} = \sum_{i=1}^6 \frac{Z_{kcA'in}}{Z_{kcA'A'in}} \cdot ch\gamma_{ink} l_k; \quad (3.101)$$

$$\underline{L}_{A'kn} = \sum_{i=1}^6 \frac{sh\gamma_{ink} l_k}{Z_{kcA'B'in}}; \quad (3.102)$$

$$\underline{M}_{A'kn} = \sum_{i=1}^6 \frac{Z_{kcB'in}}{Z_{kcA'B'in}} \cdot ch\gamma_{ink} l_k; \quad (3.103)$$

$$\underline{N}_{A'kn} = \sum_{i=1}^6 \frac{sh\gamma_{ink} l_k}{Z_{kcC'A'in}}; \quad (3.104)$$

$$\underline{O}_{A'kn} = \sum_{i=1}^6 \frac{Z_{kcC'in}}{Z_{kcC'A'in}} \cdot ch\gamma_{ink} l_k; \quad (3.105)$$

Анализируя уравнения (3.64), (3.78), (3.92) и (3.67), (3.81), (3.95) можно сделать вывод, что:

$$\underline{A}_{A'1n} = \underline{D}_{A'1n};$$

$$\underline{A}_{A'2n} = \underline{D}_{A'2n};$$

$$\underline{A}_{A'kn} = \underline{D}_{A'kn}.$$

Эти равенства свидетельствуют о том, что рассматриваемые здесь четырнадцатиполосники являются симметричными, что подтверждает факт распределения токов и напряжений по всей длине однородного участка двухцепной ВЛ на комплексной плоскости без каких-либо изменений ее характеристик [66].

Этот факт означает, что в двухцепной ВЛ ток и напряжение может распространяться как в прямом, так и в обратном направлении.

В этом случае, если необходимо найти значения тока и напряжения на частоте n – ой гармонической составляющей в начале выделенного участка двухцепной ВЛ отсутствует необходимость в информации о токах и напряжениях данной частоты в конце каждого однородного участка, что требовалось в равенствах (3.52) – (3.57) [69].

Значит при соединении первого и второго четырнадцатиполосника для нахождения тока и напряжения n – ой гармонической составляющей не обязательно знать сведения о токе и напряжении этой же частоты в конце первого четырнадцатиполосника [69]:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{1A'n} = & (\underline{A}_{A'1n} \underline{A}_{A'kn} + \underline{B}_{A'1n} \underline{C}_{A'kn}) \cdot \dot{U}_{(k+1)A'n} + (\underline{A}_{A'1n} \underline{B}_{A'kn} + \underline{B}_{A'1n} \underline{D}_{A'kn}) \cdot \dot{I}_{(k+1)A'n} + \\ & + \underline{B}_{A'1n} \underline{E}_{A'kn} \cdot \dot{U}_{(k+1)B'n} + \underline{B}_{A'1n} \underline{F}_{A'kn} \cdot \dot{I}_{(k+1)B'n} + \underline{B}_{A'1n} \underline{G}_{A'kn} \cdot \dot{U}_{(k+1)C'n} + \\ & + \underline{B}_{A'1n} \underline{H}_{A'kn} \cdot \dot{I}_{(k+1)C'n} + \underline{B}_{A'1n} \underline{J}_{A'kn} \cdot \dot{U}_{(k+1)A''n} + \underline{B}_{A'1n} \underline{K}_{A'kn} \cdot \dot{I}_{(k+1)A''n} + \\ & + \underline{B}_{A'1n} \underline{L}_{A'kn} \cdot \dot{U}_{(k+1)B''n} + \underline{B}_{A'1n} \underline{M}_{A'kn} \cdot \dot{I}_{(k+1)B''n} + \underline{B}_{A'1n} \underline{N}_{A'kn} \cdot \dot{U}_{(k+1)C''n} + \\ & + \underline{B}_{A'1n} \underline{O}_{A'kn} \cdot \dot{I}_{(k+1)C''n}; \end{aligned} \quad (3.109)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{1A'n} = & (\underline{C}_{A'1n} \underline{A}_{A'kn} + \underline{D}_{A'1n} \underline{C}_{A'kn} + \underline{F}_{A'1n} \underline{E}_{B'kn} + \underline{H}_{A'1n} \underline{E}_{C'kn} + \underline{K}_{A'1n} \underline{E}_{A''kn} + \underline{M}_{A'1n} \underline{E}_{B''kn} + \\ & + \underline{O}_{A'1n} \underline{E}_{C''kn}) \cdot \dot{U}_{(k+1)A'n} + (\underline{C}_{A'1n} \underline{B}_{A'kn} + \underline{D}_{A'1n} \underline{D}_{A'kn} + \underline{F}_{A'1n} \underline{F}_{B'kn} + \underline{H}_{A'1n} \underline{F}_{C'kn} + \\ & + \underline{K}_{A'1n} \underline{F}_{A''kn} + \underline{M}_{A'1n} \underline{F}_{B''kn} + \underline{O}_{A'1n} \underline{F}_{C''kn}) \cdot \dot{I}_{(k+1)A'n} + (\underline{D}_{A'1n} \underline{E}_{A'kn} + \underline{E}_{A'1n} \underline{A}_{B'kn} + \\ & + \underline{F}_{A'1n} \underline{C}_{B'kn} + \underline{H}_{A'1n} \underline{G}_{C'kn} + \underline{K}_{A'1n} \underline{G}_{A''kn} + \underline{M}_{A'1n} \underline{G}_{B''kn} + \underline{O}_{A'1n} \underline{G}_{C''kn}) \cdot \dot{U}_{(k+1)B'n} + \\ & + (\underline{D}_{A'1n} \underline{F}_{A'kn} + \underline{E}_{A'1n} \underline{B}_{B'kn} + \underline{F}_{A'1n} \underline{D}_{B'kn} + \underline{H}_{A'1n} \underline{H}_{C'kn} + \underline{K}_{A'1n} \underline{H}_{A''kn} + \underline{M}_{A'1n} \underline{H}_{B''kn} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \underline{O}_{A'1n} \underline{H}_{C''kn} \cdot \dot{I}_{(k+1)B'n} + (\underline{D}_{A'1n} \underline{G}_{A'kn} + \underline{F}_{A'1n} \underline{G}_{B'kn} + \underline{G}_{A'1n} \underline{A}_{C'kn} + \underline{H}_{A'1n} \underline{C}_{C'kn} + \\
& + \underline{K}_{A'1n} \underline{J}_{A''kn} + \underline{M}_{A'1n} \underline{J}_{B''kn} + \underline{O}_{A'1n} \underline{J}_{C''kn}) \cdot \dot{U}_{(k+1)C'n} + (\underline{D}_{A'1n} \underline{H}_{A'kn} + \underline{F}_{A'1n} \underline{H}_{B'kn} + \\
& + \underline{G}_{A'1n} \underline{B}_{C'kn} + \underline{H}_{A'1n} \underline{D}_{C'kn} + \underline{K}_{A'1n} \underline{K}_{A''kn} + \underline{M}_{A'1n} \underline{K}_{B''kn} + \underline{O}_{A'1n} \underline{K}_{C''kn}) \cdot \dot{I}_{(k+1)C'n} + \\
& + (\underline{D}_{A'1n} \underline{J}_{A'kn} + \underline{F}_{A'1n} \underline{J}_{B'kn} + \underline{H}_{A'1n} \underline{J}_{C'kn} + \underline{J}_{A'1n} \underline{A}_{A''kn} + \underline{K}_{A'1n} \underline{C}_{A''kn} + \underline{M}_{A'1n} \underline{L}_{B''kn} + \\
& + \underline{O}_{A'1n} \underline{L}_{C''kn}) \cdot \dot{U}_{(k+1)A'n} + (\underline{D}_{A'1n} \underline{K}_{A'kn} + \underline{F}_{A'1n} \underline{K}_{B'kn} + \underline{H}_{A'1n} \underline{K}_{C'kn} + \underline{J}_{A'1n} \underline{B}_{A''kn} + \\
& + \underline{K}_{A'1n} \underline{D}_{A''kn} + \underline{M}_{A'1n} \underline{M}_{B''kn} + \underline{O}_{A'1n} \underline{M}_{C''kn}) \cdot \dot{I}_{(k+1)A'n} + (\underline{D}_{A'1n} \underline{L}_{A'kn} + \underline{F}_{A'1n} \underline{L}_{B'kn} + \\
& + \underline{H}_{A'1n} \underline{L}_{C'kn} + \underline{K}_{A'1n} \underline{L}_{A''kn} + \underline{L}_{A'1n} \underline{A}_{B''kn} + \underline{M}_{A'1n} \underline{C}_{B''kn} + \underline{O}_{A'1n} \underline{N}_{C''kn}) \cdot \dot{U}_{(k+1)B'n} + \\
& + (\underline{D}_{A'1n} \underline{M}_{A'kn} + \underline{F}_{A'1n} \underline{D}_{B'2n} + \underline{H}_{A'1n} \underline{M}_{C'kn} + \underline{K}_{A'1n} \underline{M}_{A''kn} + \underline{L}_{A'1n} \underline{B}_{B''kn} + \underline{M}_{A'1n} \underline{D}_{B''kn} + \\
& + \underline{O}_{A'1n} \underline{O}_{C''kn}) \cdot \dot{I}_{(k+1)B'n} + (\underline{D}_{A'1n} \underline{N}_{A'kn} + \underline{F}_{A'1n} \underline{N}_{B'kn} + \underline{H}_{A'1n} \underline{N}_{C'kn} + \underline{K}_{A'1n} \underline{N}_{A''kn} + \\
& + \underline{M}_{A'1n} \underline{N}_{B''kn} + \underline{N}_{A'1n} \underline{A}_{C''kn} + \underline{O}_{A'1n} \underline{C}_{C''kn}) \cdot \dot{U}_{(k+1)C'n} + (\underline{D}_{A'1n} \underline{O}_{A'kn} + \underline{F}_{A'1n} \underline{O}_{B'kn} + \\
& + \underline{H}_{A'1n} \underline{O}_{C'kn} + \underline{K}_{A'1n} \underline{O}_{A''kn} + \underline{M}_{A'1n} \underline{O}_{B''kn} + \underline{N}_{A'1n} \underline{B}_{C''kn} + \underline{O}_{A'1n} \underline{D}_{C''kn}) \cdot \dot{I}_{(k+1)C'n}. \quad (3.110)
\end{aligned}$$

Уравнения (3.109), (3.110) можно показать иначе:

$$\begin{aligned}
\dot{U}_{1A'n} = & \underline{A}_{(1-2)A'n} \cdot \dot{U}_{3A'n} + \underline{B}_{(1-2)A'n} \cdot \dot{I}_{3A'n} + \underline{P}_{(1-2)A'n} \cdot \dot{U}_{3B'n} + \underline{Q}_{(1-2)A'n} \cdot \dot{I}_{3B'n} + \\
& + \underline{R}_{(1-2)A'n} \cdot \dot{U}_{3C'n} + \underline{S}_{(1-2)A'n} \cdot \dot{I}_{3C'n} + \underline{T}_{(1-2)A'n} \cdot \dot{U}_{3A''n} + \underline{V}_{(1-2)A'n} \cdot \dot{I}_{3A''n} + \\
& + \underline{W}_{(1-2)A'n} \cdot \dot{U}_{3B''n} + \underline{X}_{(1-2)A'n} \cdot \dot{I}_{3B''n} + \underline{Y}_{(1-2)A'n} \cdot \dot{U}_{3C''n} + \underline{Z}_{(1-2)A'n} \cdot \dot{I}_{3C''n}; \quad (3.111)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\dot{I}_{1A'n} = & \underline{C}_{(1-2)A'n} \cdot \dot{U}_{3A'n} + \underline{D}_{(1-2)A'n} \cdot \dot{I}_{3A'n} + \underline{E}_{(1-2)A'n} \cdot \dot{U}_{3B'n} + \underline{F}_{(1-2)A'n} \cdot \dot{I}_{3B'n} + \\
& + \underline{G}_{(1-2)A'n} \cdot \dot{U}_{3C'n} + \underline{H}_{(1-2)A'n} \cdot \dot{I}_{3C'n} + \underline{J}_{(1-2)A'n} \cdot \dot{U}_{3A''n} + \underline{K}_{(1-2)A'n} \cdot \dot{I}_{3A''n} + \\
& + \underline{L}_{(1-2)A'n} \cdot \dot{U}_{3B''n} + \underline{M}_{(1-2)A'n} \cdot \dot{I}_{3B''n} + \underline{N}_{(1-2)A'n} \cdot \dot{U}_{3C''n} + \underline{O}_{(1-2)A'n} \cdot \dot{I}_{3C''n}, \quad (3.112)
\end{aligned}$$

где $\underline{A}_{(1-2)A'n}$, $\underline{B}_{(1-2)A'n}$, $\underline{P}_{(1-2)A'n}$, $\underline{Q}_{(1-2)A'n}$, $\underline{R}_{(1-2)A'n}$, $\underline{S}_{(1-2)A'n}$, $\underline{T}_{(1-2)A'n}$, $\underline{V}_{(1-2)A'n}$, $\underline{W}_{(1-2)A'n}$, $\underline{X}_{(1-2)A'n}$, $\underline{Y}_{(1-2)A'n}$, $\underline{Z}_{(1-2)A'n}$, $\underline{C}_{(1-2)A'n}$, $\underline{D}_{(1-2)A'n}$, $\underline{E}_{(1-2)A'n}$, $\underline{F}_{(1-2)A'n}$, $\underline{G}_{(1-2)A'n}$, $\underline{H}_{(1-2)A'n}$, $\underline{J}_{(1-2)A'n}$, $\underline{K}_{(1-2)A'n}$, $\underline{L}_{(1-2)A'n}$, $\underline{M}_{(1-2)A'n}$, $\underline{N}_{(1-2)A'n}$, $\underline{O}_{(1-2)A'n}$ – коэффициенты четырнадцатиполюсника, объединяющего первый и второй четырнадцатиполюсники, изображенные на рисунке 3.2. Эти коэффициенты мож-

но определить из сопоставления уравнений (3.109), (3.110) и (3.111), (3.112)

$$\begin{aligned}
\underline{A}_{(1-2)A'n} &= \underline{A}_{A'1n} \underline{A}_{A'2n} + \underline{B}_{A'1n} \underline{C}_{A'2n}; \underline{B}_{(1-2)A'n} = \underline{A}_{A'1n} \underline{B}_{A'2n} + \underline{B}_{A'1n} \underline{D}_{A'1n}; \\
\underline{P}_{(1-2)A'n} &= \underline{B}_{A'1n} \underline{E}_{A'2n}; \underline{Q}_{(1-2)A'n} = \underline{B}_{A'1n} \underline{F}_{A'2n}; \underline{R}_{(1-2)A'n} = \underline{B}_{A'1n} \underline{G}_{A'2n}; \\
\underline{S}_{(1-2)A'n} &= \underline{B}_{A'1n} \underline{H}_{A'2n}; \underline{T}_{(1-2)A'n} = \underline{B}_{A'1n} \underline{J}_{A'2n}; \underline{V}_{(1-2)A'n} = \underline{B}_{A'1n} \underline{K}_{A'2n}; \\
\underline{W}_{(1-2)A'n} &= \underline{B}_{A'1n} \underline{L}_{A'2n}; \underline{X}_{(1-2)A'n} = \underline{B}_{A'1n} \underline{M}_{A'2n}; \underline{Y}_{(1-2)A'n} = \underline{B}_{A'1n} \underline{N}_{A'2n}; \\
\underline{Z}_{(1-2)A'n} &= \underline{B}_{A'1n} \underline{O}_{A'2n}, \\
\underline{C}_{(1-2)A'n} &= \underline{C}_{A'1n} \underline{A}_{A'2n} + \underline{D}_{A'1n} \underline{C}_{A'2n} + \underline{F}_{A'1n} \underline{E}_{B'2n} + \underline{H}_{A'1n} \underline{E}_{C'2n} + \underline{K}_{A'1n} \underline{E}_{A''2n} + \\
&\quad + \underline{M}_{A'1n} \underline{E}_{B''2n} + \underline{O}_{A'1n} \underline{E}_{C''2n}; \\
\underline{D}_{(1-2)A'n} &= \underline{C}_{A'1n} \underline{B}_{A'2n} + \underline{D}_{A'1n} \underline{D}_{A'2n} + \underline{F}_{A'1n} \underline{F}_{B'2n} + \underline{H}_{A'1n} \underline{F}_{C'2n} + \underline{K}_{A'1n} \underline{F}_{A''2n} + \\
&\quad + \underline{M}_{A'1n} \underline{F}_{B''2n} + \underline{O}_{A'1n} \underline{F}_{C''2n}; \\
\underline{E}_{(1-2)A'n} &= \underline{D}_{A'1n} \underline{E}_{A'2n} + \underline{E}_{A'1n} \underline{A}_{B'2n} + \underline{F}_{A'1n} \underline{C}_{B'2n} + \underline{H}_{A'1n} \underline{G}_{C'2n} + \underline{K}_{A'1n} \underline{G}_{A''2n} + \\
&\quad + \underline{M}_{A'1n} \underline{G}_{B''2n} + \underline{O}_{A'1n} \underline{G}_{C''2n}; \\
\underline{F}_{(1-2)A'n} &= \underline{D}_{A'1n} \underline{F}_{A'2n} + \underline{E}_{A'1n} \underline{B}_{B'2n} + \underline{F}_{A'1n} \underline{D}_{B'2n} + \underline{H}_{A'1n} \underline{H}_{C'2n} + \underline{K}_{A'1n} \underline{H}_{A''2n} + \\
&\quad + \underline{M}_{A'1n} \underline{H}_{B''2n} + \underline{O}_{A'1n} \underline{H}_{C''2n}; \\
\underline{G}_{(1-2)A'n} &= \underline{D}_{A'1n} \underline{G}_{A'2n} + \underline{F}_{A'1n} \underline{G}_{B'2n} + \underline{G}_{A'1n} \underline{A}_{C'2n} + \underline{H}_{A'1n} \underline{C}_{C'2n} + \underline{K}_{A'1n} \underline{J}_{A''2n} + \\
&\quad + \underline{M}_{A'1n} \underline{J}_{B''2n} + \underline{O}_{A'1n} \underline{J}_{C''2n}; \\
\underline{H}_{(1-2)A'n} &= \underline{D}_{A'1n} \underline{H}_{A'2n} + \underline{F}_{A'1n} \underline{H}_{B'2n} + \underline{G}_{A'1n} \underline{B}_{C'2n} + \underline{H}_{A'1n} \underline{D}_{C'2n} + \underline{K}_{A'1n} \underline{K}_{A''2n} + \\
&\quad + \underline{M}_{A'1n} \underline{K}_{B''2n} + \underline{O}_{A'1n} \underline{K}_{C''2n}; \\
\underline{J}_{(1-2)A'n} &= \underline{D}_{A'1n} \underline{J}_{A'2n} + \underline{F}_{A'1n} \underline{J}_{B'2n} + \underline{H}_{A'1n} \underline{J}_{C'2n} + \underline{J}_{A'1n} \underline{A}_{A''2n} + \underline{K}_{A'1n} \underline{C}_{A''2n} + \\
&\quad + \underline{M}_{A'1n} \underline{L}_{B''2n} + \underline{O}_{A'1n} \underline{L}_{C''2n}; \\
\underline{K}_{(1-2)A'n} &= \underline{D}_{A'1n} \underline{K}_{A'2n} + \underline{F}_{A'1n} \underline{K}_{B'2n} + \underline{H}_{A'1n} \underline{K}_{C'2n} + \underline{J}_{A'1n} \underline{B}_{A''2n} + \underline{K}_{A'1n} \underline{D}_{A''2n} + \\
&\quad + \underline{M}_{A'1n} \underline{M}_{B''2n} + \underline{O}_{A'1n} \underline{M}_{C''2n}; \\
\underline{L}_{(1-2)A'n} &= \underline{D}_{A'1n} \underline{L}_{A'2n} + \underline{F}_{A'1n} \underline{L}_{B'2n} + \underline{H}_{A'1n} \underline{L}_{C'2n} + \underline{K}_{A'1n} \underline{L}_{A''2n} + \underline{L}_{A'1n} \underline{A}_{B''2n} + \\
&\quad + \underline{M}_{A'1n} \underline{C}_{B''2n} + \underline{O}_{A'1n} \underline{N}_{C''2n};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\underline{M}_{(1-2)A'n} &= \underline{D}_{A'1n} \underline{M}_{A'2n} + \underline{F}_{A'1n} \underline{D}_{B'2n} + \underline{H}_{A'1n} \underline{M}_{C'2n} + \underline{K}_{A'1n} \underline{M}_{A''2n} + \underline{L}_{A'1n} \underline{B}_{B''2n} + \\
&\quad + \underline{M}_{A'1n} \underline{D}_{B''2n} + \underline{O}_{A'1n} \underline{O}_{C''2n}; \\
\underline{N}_{(1-2)A'n} &= \underline{D}_{A'1n} \underline{N}_{A'2n} + \underline{F}_{A'1n} \underline{N}_{B'2n} + \underline{H}_{A'1n} \underline{N}_{C'2n} + \underline{K}_{A'1n} \underline{N}_{A''2n} + \underline{M}_{A'1n} \underline{N}_{B''2n} + \\
&\quad + \underline{N}_{A'1n} \underline{A}_{C''2n} + \underline{O}_{A'1n} \underline{C}_{C''2n}; \\
\underline{O}_{(1-2)A'n} &= \underline{D}_{A'1n} \underline{O}_{A'2n} + \underline{F}_{A'1n} \underline{O}_{B'2n} + \underline{H}_{A'1n} \underline{O}_{C'2n} + \underline{K}_{A'1n} \underline{O}_{A''2n} + \underline{M}_{A'1n} \underline{O}_{B''2n} + \\
&\quad + \underline{N}_{A'1n} \underline{B}_{C''2n} + \underline{O}_{A'1n} \underline{D}_{C''2n}.
\end{aligned}$$

Подобным образом можно объединить все однородные участки, показанные на рисунке 3.2, в единый четырнадцатиполюсник, где будут учтены практически все параметры рассматриваемой двухцепной ВЛ. Уравнения этого четырнадцатиполюсника будет выглядеть так:

$$\begin{aligned}
\dot{U}_{1A'n} &= \left(\underline{A}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{A}_{A'kn} + \underline{B}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{C}_{A'kn} + \underline{Q}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{C}_{B'kn} + \underline{S}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{C}_{C'kn} + \right. \\
&\quad \left. + \underline{V}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{C}_{A''kn} + \underline{X}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{C}_{B''kn} + \underline{Z}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{C}_{C''kn} \right) \cdot \dot{U}_{(k+1)A'n} + \\
&+ \left(\underline{A}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{B}_{A'kn} + \underline{B}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{D}_{A'kn} + \underline{Q}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{D}_{B'kn} + \underline{S}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{D}_{C'kn} + \right. \\
&\quad \left. + \underline{V}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{D}_{A''kn} + \underline{X}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{D}_{B''kn} + \underline{Z}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{D}_{C''kn} \right) \cdot \dot{I}_{(k+1)A'n} + \\
&+ \left(\underline{B}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{E}_{A'kn} + \underline{P}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{A}_{B'kn} + \underline{Q}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{E}_{B'kn} + \underline{S}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{E}_{C'kn} + \right. \\
&\quad \left. + \underline{V}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{E}_{A''kn} + \underline{X}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{E}_{B''kn} + \underline{Z}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{E}_{C''kn} \right) \cdot \dot{U}_{(k+1)B'n} + \\
&\left(\underline{B}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{F}_{A'kn} + \underline{P}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{B}_{B'kn} + \underline{Q}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{F}_{B'kn} + \underline{S}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{F}_{C'kn} + \right. \\
&\quad \left. + \underline{V}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{F}_{A''kn} + \underline{X}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{E}_{B''kn} + \underline{Z}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{E}_{C''kn} \right) \cdot \dot{I}_{(k+1)B'n} + \\
&+ \left(\underline{B}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{G}_{A'kn} + \underline{R}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{A}_{C'kn} + \underline{Q}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{G}_{B'kn} + \underline{S}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{G}_{C'kn} + \right. \\
&\quad \left. + \underline{V}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{G}_{A''kn} + \underline{X}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{G}_{B''kn} + \underline{Z}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{G}_{C''kn} \right) \cdot \dot{U}_{(k+1)C'n} + \\
&+ \left(\underline{B}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{H}_{A'kn} + \underline{R}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{B}_{C'kn} + \underline{Q}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{H}_{B'kn} + \underline{S}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{H}_{C'kn} + \right. \\
&\quad \left. + \underline{V}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{H}_{A''kn} + \underline{X}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{H}_{B''kn} + \underline{Z}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{H}_{C''kn} \right) \cdot \dot{I}_{(k+1)C'n} + \\
&+ \left(\underline{B}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{J}_{A'kn} + \underline{T}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{A}_{A''kn} + \underline{Q}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{J}_{B'kn} + \underline{S}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{J}_{C'kn} + \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \underline{O}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{K}_{C''kn} \cdot \dot{I}_{(k+1)A''n} + (\underline{D}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{L}_{A'kn} + \underline{L}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{A}_{B''kn} + \\
& + \underline{F}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{L}_{B'kn} + \underline{H}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{L}_{C'kn} + \underline{K}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{L}_{A''kn} + \underline{M}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{L}_{B''kn} + \\
& + \underline{O}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{L}_{C''kn}) \cdot \dot{U}_{(k+1)B''n} + (\underline{D}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{M}_{A'kn} + \underline{M}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{B}_{B''kn} + \\
& + \underline{F}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{M}_{B'kn} + \underline{H}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{M}_{C'kn} + \underline{K}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{M}_{A''kn} + \underline{M}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{M}_{B''kn} + \\
& + \underline{O}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{M}_{C''kn}) \cdot \dot{I}_{(k+1)B''n} + (\underline{D}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{N}_{A'kn} + \underline{N}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{A}_{C''kn} + \\
& + \underline{F}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{N}_{B'kn} + \underline{H}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{N}_{C'kn} + \underline{K}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{N}_{A''kn} + \underline{M}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{N}_{B''kn} + \\
& + \underline{O}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{N}_{C''kn}) \cdot \dot{U}_{(k+1)C''n} + (\underline{D}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{O}_{A'kn} + \underline{O}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{B}_{C''kn} + \\
& + \underline{F}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{O}_{B'kn} + \underline{H}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{O}_{C'kn} + \underline{K}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{O}_{A''kn} + \underline{M}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{O}_{B''kn} + \\
& + \underline{O}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{O}_{C''kn}) \cdot \dot{I}_{(k+1)C''n} \tag{3.114}
\end{aligned}$$

По аналогичной методике объединяются четырнадцатиполюсники и для других линий двухцепной ВЛ. Выходит, что для нахождения токов и напряжений в начале выделенного участка двухцепной ВЛ на частоте n -ой гармонической составляющей хватит знать параметры каждого однородного участка и значения токов и напряжений этой же частоты в конце выделенной части двухцепной ВЛ [69].

Показанные ранее математические выражения допустимы для анализа распределения электрической энергии по участку двухцепной ВЛ с отсутствием узлами и с любой долей неоднородности, параметры которой можно определить [69].

Уравнения (3.113) и (3.114) можно показать и несколько упрощенно:

$$\begin{aligned}
\dot{U}_{1A'n} = & \underline{A}_{(1-k)A'n} \cdot \dot{U}_{(k+1)A'n} + \underline{B}_{(1-k)A'n} \cdot \dot{I}_{(k+1)A'n} + \underline{P}_{(1-k)A'n} \cdot \dot{U}_{(k+1)B'n} + \underline{Q}_{(1-k)A'n} \cdot \dot{I}_{(k+1)B'n} + \\
& + \underline{R}_{(1-k)A'n} \cdot \dot{U}_{(k+1)C'n} + \underline{S}_{(1-k)A'n} \cdot \dot{I}_{(k+1)C'n} + \underline{T}_{(1-k)A'n} \cdot \dot{U}_{(k+1)A''n} + \underline{FI}_{(1-k)A'n} \cdot \dot{I}_{(k+1)A''n} + \\
& + \underline{X}_{(1-k)A'n} \cdot \dot{U}_{(k+1)B''n} + \underline{V}_{(1-k)A'n} \cdot \dot{I}_{(k+1)B''n} + \underline{W}_{(1-k)A'n} \cdot \dot{U}_{(k+1)C''n} + \\
& + \underline{Z}_{(1-k)A'n} \cdot \dot{I}_{(k+1)C''n}; \tag{3.115}
\end{aligned}$$

$$\dot{I}_{1A'n} = \underline{C}_{(1-k)A'n} \cdot \dot{U}_{(k+1)A'n} + \underline{D}_{(1-k)A'n} \cdot \dot{I}_{(k+1)A'n} + \underline{E}_{(1-k)A'n} \cdot \dot{U}_{(k+1)B'n} + \underline{F}_{(1-k)A'n} \cdot \dot{I}_{(k+1)B'n} +$$

$$\begin{aligned}
& + \underline{K}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{L}_{A''kn} + \underline{M}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{L}_{B''kn} + \underline{O}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{L}_{C''kn}; \\
\underline{M}_{(1-k)A'n} = & \underline{D}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{M}_{A'kn} + \underline{M}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{B}_{B''kn} + \underline{F}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{M}_{B'kn} + \underline{H}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{M}_{C'kn} + \\
& + \underline{K}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{M}_{A''kn} + \underline{M}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{M}_{B''kn} + \underline{O}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{M}_{C''kn}; \\
\underline{N}_{(1-k)A'n} = & \underline{D}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{N}_{A'kn} + \underline{N}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{A}_{C''kn} + \underline{F}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{N}_{B'kn} + \\
& + \underline{H}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{N}_{C'kn} + \underline{K}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{N}_{A''kn} + \underline{M}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{N}_{B''kn} + \underline{O}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{N}_{C''kn}; \\
\underline{O}_{(1-k)A'n} = & \underline{D}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{O}_{A'kn} + \underline{O}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{B}_{C''kn} + \underline{F}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{O}_{B'kn} + \underline{H}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{O}_{C'kn} + \\
& + \underline{K}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{O}_{A''kn} + \underline{M}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{O}_{B''kn} + \underline{O}_{[1-(k-1)]A'n} \cdot \underline{O}_{C''kn}.
\end{aligned}$$

Коэффициенты $\underline{A}_{(1-k)A'n}$, $\underline{B}_{(1-k)A'n}$, $\underline{P}_{(1-k)A'n}$, $\underline{Q}_{(1-k)A'n}$, $\underline{R}_{(1-k)A'n}$, $\underline{S}_{(1-k)A'n}$, $\underline{T}_{(1-k)A'n}$, $\underline{V}_{(1-k)A'n}$, $\underline{W}_{(1-k)A'n}$, $\underline{X}_{(1-k)A'n}$, $\underline{Y}_{(1-k)A'n}$, $\underline{Z}_{(1-k)A'n}$, $\underline{C}_{(1-k)A'n}$, $\underline{D}_{(1-k)A'n}$, $\underline{E}_{(1-k)A'n}$, $\underline{F}_{(1-k)A'n}$, $\underline{G}_{(1-k)A'n}$, $\underline{H}_{(1-k)A'n}$, $\underline{J}_{(1-k)A'n}$, $\underline{K}_{(1-k)A'n}$, $\underline{L}_{(1-k)A'n}$, $\underline{M}_{(1-k)A'n}$, $\underline{N}_{(1-k)A'n}$, $\underline{O}_{(1-k)A'n}$ являются коэффициентами четырнадцатиполюсника, объединяющего первый и k -ые однородные участки выделенной части двухцепной ВЛ, а уравнения (3.115) – (3.16) – конечные уравнения этого четырнадцатиполюсника. В результате объединения первого, второго и k -ого однородного участка в единый четырнадцатиполюсник оказывается ненужными сведения о токе и напряжении соответствующей частоты на выходе первого и второго однородного участка в двухцепной ВЛ [68].

3.3. Выводы по главе 3

1. Разработана математическая модель передачи электрической энергии по двухцепной ВЛ, позволяющая выполнить расчет токов и напряжений на каждой частоте n -ой гармонической составляющей в любом месте ВЛ.

2. Показано, что в каждом проводе двухцепной ВЛ присутствуют шесть пар волн электромагнитного поля – шесть падающих и шесть отраженных. За качество электрической энергии несет ответственность отраженная волна электромагнитного поля, распространяющаяся по двухцепной ВЛ.

3. Линию электропередачи двухцепного исполнения предложено представить в виде совокупности относительно однородных участков.

4. Предложена схема замещения двухцепной ВЛ четырнадцатиполюсниками, замещающими каждый однородный участок, входящий в состав этой линии.

5. При наличии сведений о спектральных составах токов и напряжений в конце или в начале анализируемого неоднородного участка открывается возможность выяснить спектральный состав этих характеристик электрической энергии на любой границе однородности двухцепной ВЛ.

6. Достоинство предлагаемой схемы распределения электрической энергии пониженного качества по двухцепной ВЛ заключается в учете взаимосвязей практически всех токов и напряжений вдоль однородного участка двухцепной ВЛ.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

4.1. Установившийся режим передачи электрической энергии в двухцепной воздушной линии

Для выявления достоверности разработанной математической модели были проведены экспериментальные исследования на двухцепной ВЛ напряжением 220кВ Братская ГЭС - Седановский переключательный пункт («Бр.ГЭС-СПП») длиной 94 км. Схема электропередачи «Бр.ГЭС-СПП» представлена на рисунке 4.1. Из рисунка 4.1 видно, что на общих шинах питания «Бр.ГЭС-СПП» находится Братский алюминиевый завод, высшие гармоники которого и будет вносить искажения в качество электрической энергии. Исследуемая линия принадлежит «ООО Иркутской Электросетевой компании», обслуживается «Северными Электрическими Сетями» и значится под номерами 242, 243. Она выполнена проводом марки АС 300/39. Протокол испытаний электрической энергии представлен в приложении Б.

Суть эксперимента заключается в сопоставлении результатов расчета параметров установившегося режима двухцепной ВЛ с данными, полученными от «Северных Электрических Сетей».

Используя методику определения первичных параметров, представленных в п. 2.2, был выполнен расчет первичных параметров для данной линии «Бр.ГЭС-СПП».

Погонное активное сопротивление провода A' линии 243 равно $R_{0A'n} = 0,098 \text{ Ом/км}$; погонная собственная индуктивность провода равна $L_{0A'n} = 1,28 \text{ мГн/км}$. Погонная взаимная индуктивность между проводами ВЛ определяется величинами: $M_{0A'B'n} = 0,001 \text{ Гн/км}$; $M_{0C'A'n} = 0,001 \text{ Гн/км}$; $M_{0A'A'n} = 0,0011 \text{ Гн/км}$; $M_{0A'B'n} = 0,0011 \text{ Гн/км}$; $M_{0C'A'n} = 0,001 \text{ Гн/км}$; погонная

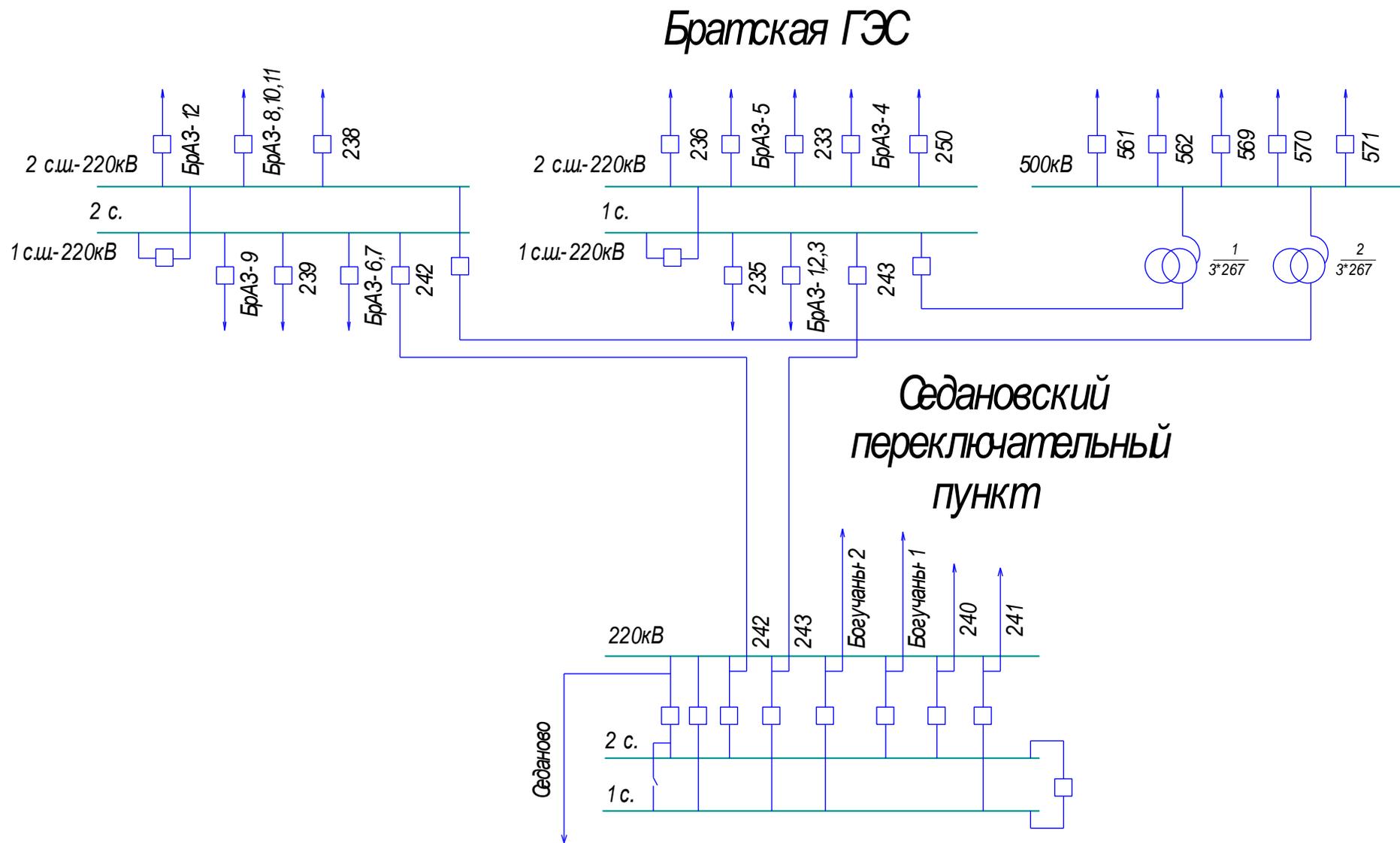


Рисунок 4.1 - Схема электропередачи «Братская ГЭС – Седановский переключательный пункт»

активная проводимость равна $G_{0A'n} = 3,5714 \cdot 10^{-11}$ См/км. Емкость между проводом A' и заземленными конструкциями ВЛ равна $\tilde{N}_{0A'n} = 6,7 \cdot 10^{-9}$ Ф/км.

Емкостные связи между линейными проводами ВЛ характеризуются погонными емкостями:

$$\tilde{N}_{A'B'n} = 2,29 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/км}; \quad \tilde{N}_{C'A'n} = 4,09 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/км};$$

$$\tilde{N}_{A'A''n} = 4,42 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/км}; \quad \tilde{N}_{A'B''n} = 4,15 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/км}; \quad \tilde{N}_{C''A'n} = 3,8 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/км}.$$

Полученные значения позволили получить вторичные параметры рассматриваемого участка двухцепной ВЛ:

$$\underline{\gamma}_{1n} = 1,456 \cdot 10^{-5} + j \cdot 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ км}^{-1}; \quad \underline{\gamma}_{2n} = 1,457 \cdot 10^{-5} + j \cdot 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ км}^{-1};$$

$$\underline{\gamma}_{3n} = 1,465 \cdot 10^{-5} + j \cdot 1,09 \cdot 10^{-3} \text{ км}^{-1}; \quad \underline{\gamma}_{4n} = 1,48 \cdot 10^{-5} + j \cdot 1,08 \cdot 10^{-3} \text{ км}^{-1};$$

$$\underline{\gamma}_{5n} = 1,48 \cdot 10^{-5} + j \cdot 1,08 \cdot 10^{-3} \text{ км}^{-1}; \quad \underline{\gamma}_{6n} = 1,48 \cdot 10^{-5} + j \cdot 1,08 \cdot 10^{-3} \text{ км}^{-1};$$

$$\underline{Z}_{cA'1n} = 125,66 \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_{cA'2n} = 221,24 \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_{cA'3n} = 222,5 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{cA'4n} = 210,68 \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_{cA'5n} = 219,48 \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_{cA'6n} = 222,51 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{cA'B'1n} = 9,05 \cdot 10^3 \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_{cA'B'2n} = 5,19 \cdot 10^4 \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_{cA'B'3n} = 6,3 \cdot 10^4 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{cA'B'4n} = 8,8 \cdot 10^4 \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_{cA'B'5n} = 1,05 \cdot 10^5 \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_{cA'B'6n} = 1,2 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{cC'A'1n} = 3,5 \cdot 10^4 \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_{cC'A'2n} = 2,03 \cdot 10^5 \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_{cC'A'3n} = 2,4 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{cC'A'4n} = 3,45 \cdot 10^5 \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_{cC'A'5n} = 4,09 \cdot 10^5 \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_{cC'A'6n} = 4,8 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{cA'A''1n} = 8,9 \cdot 10^3 \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_{cA'A''2n} = 5,1 \cdot 10^4 \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_{cA'A''3n} = 6,2 \cdot 10^4 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{cA'A''4n} = 8,72 \cdot 10^4 \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_{cA'A''5n} = 1,03 \cdot 10^5 \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_{cA'A''6n} = 1,2 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{cA'B''1n} = 3,4 \cdot 10^4 \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_{cA'B''2n} = 1,9 \cdot 10^5 \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_{cA'B''3n} = 2,37 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{cA'B''4n} = 3,33 \cdot 10^5 \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_{cA'B''5n} = 3,9 \cdot 10^5 \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_{cA'B''6n} = 4,6 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{cC''A'1n} = 6,1 \cdot 10^4 \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_{cC''A'2n} = 3,5 \cdot 10^5 \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_{cC''A'3n} = 4,25 \cdot 10^5 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{cC''A'4n} = 5,97 \cdot 10^5 \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_{cC''A'5n} = 7,08 \cdot 10^5 \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_{cC''A'6n} = 8,3 \cdot 10^5 \text{ Ом}.$$

4.2 Спектральный состав напряжений в двухцепной воздушной линии

На рисунках 4.2-4.5 представлены графики коэффициентов n -ых гармонических составляющих напряжения и по коэффициентам искажения фазных и междуфазных (линейных) напряжений на шинах «БрГЭС». Из рисунков 4.2-4.5 видно, что предельно-допустимый уровень коэффициентов n -ых гармонических составляющих превышен на 9, 11 и 13 гармонике, почти в три раза превышены суммарные коэффициенты гармонических составляющих фазных и междуфазных напряжений.

Появление 11 и 13 гармоники связано с передачей возмущений по сети 220 кВ от расположенного в 40 км Братского алюминиевого завода через общие шины питания Братской ГЭС. Появление 9 гармоники вызвано переток 9 гармоники со всей энергосистемы через автотрансформаторы на 500 кВ. Выше всех значение коэффициентов n -ых гармонических составляющих напряжения зафиксировано на частоте 11 гармонике.

Используя предложенную методику, в качестве примера покажем на рисунке 4.6 распределение тока и напряжения на 11 гармонике. Из рисунка 4.6 видно, что на линии A' протяженностью 100 км напряжение на частоте 11 гармонике составляет 10,72 кВ, а ток на этой же частоте равен 14 А.

При повышенном коэффициенте n -ых гармонических составляющих будут наблюдаться перенапряжения. Поэтому присутствие высших гармонических составляющих тока и напряжения будут влиять на значение токов и напряжений при несинусоидальных режимах [55].

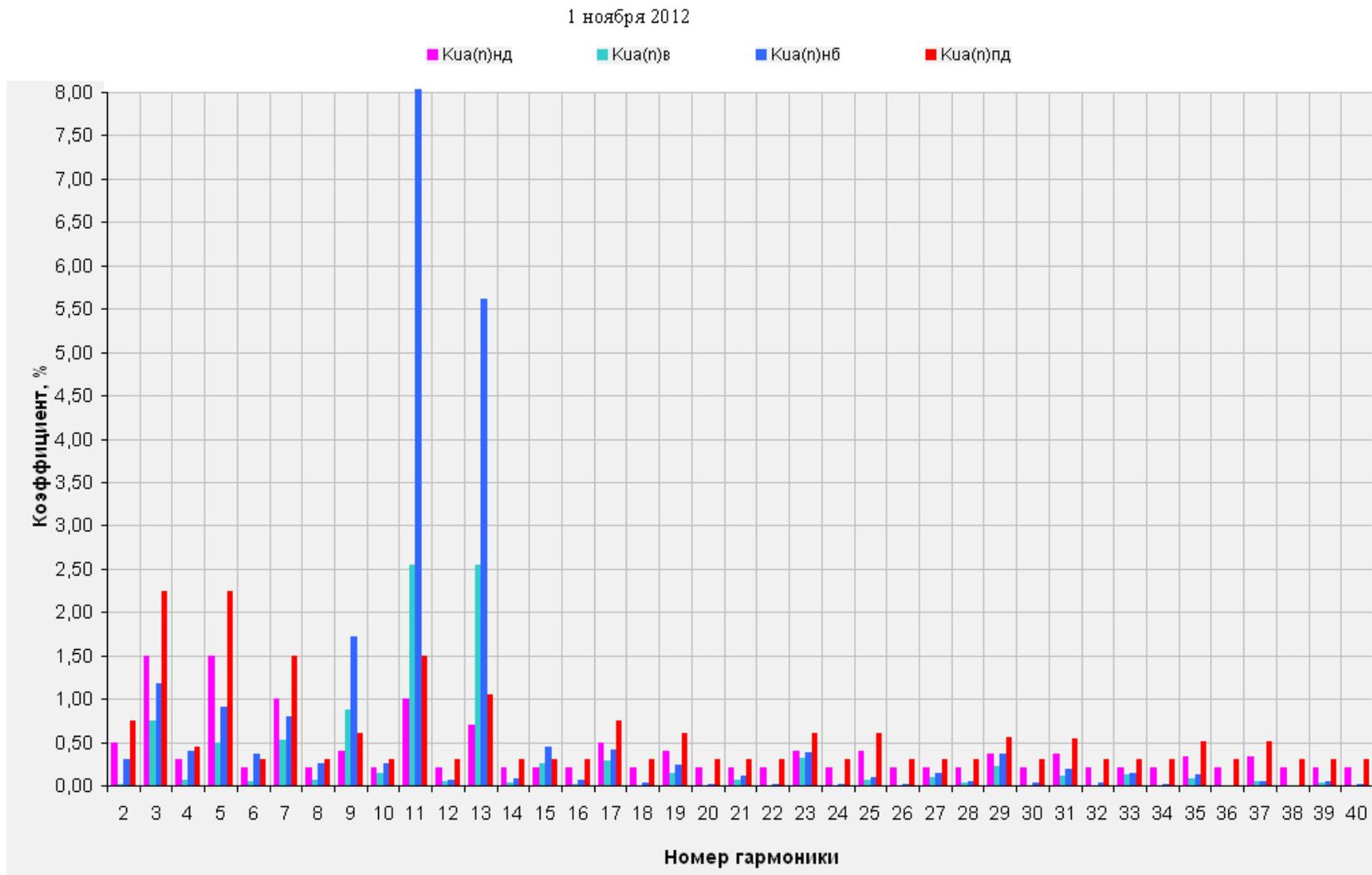


Рисунок 4.2 - Коэффициенты гармонических составляющих фазного напряжения

1 ноября 2012

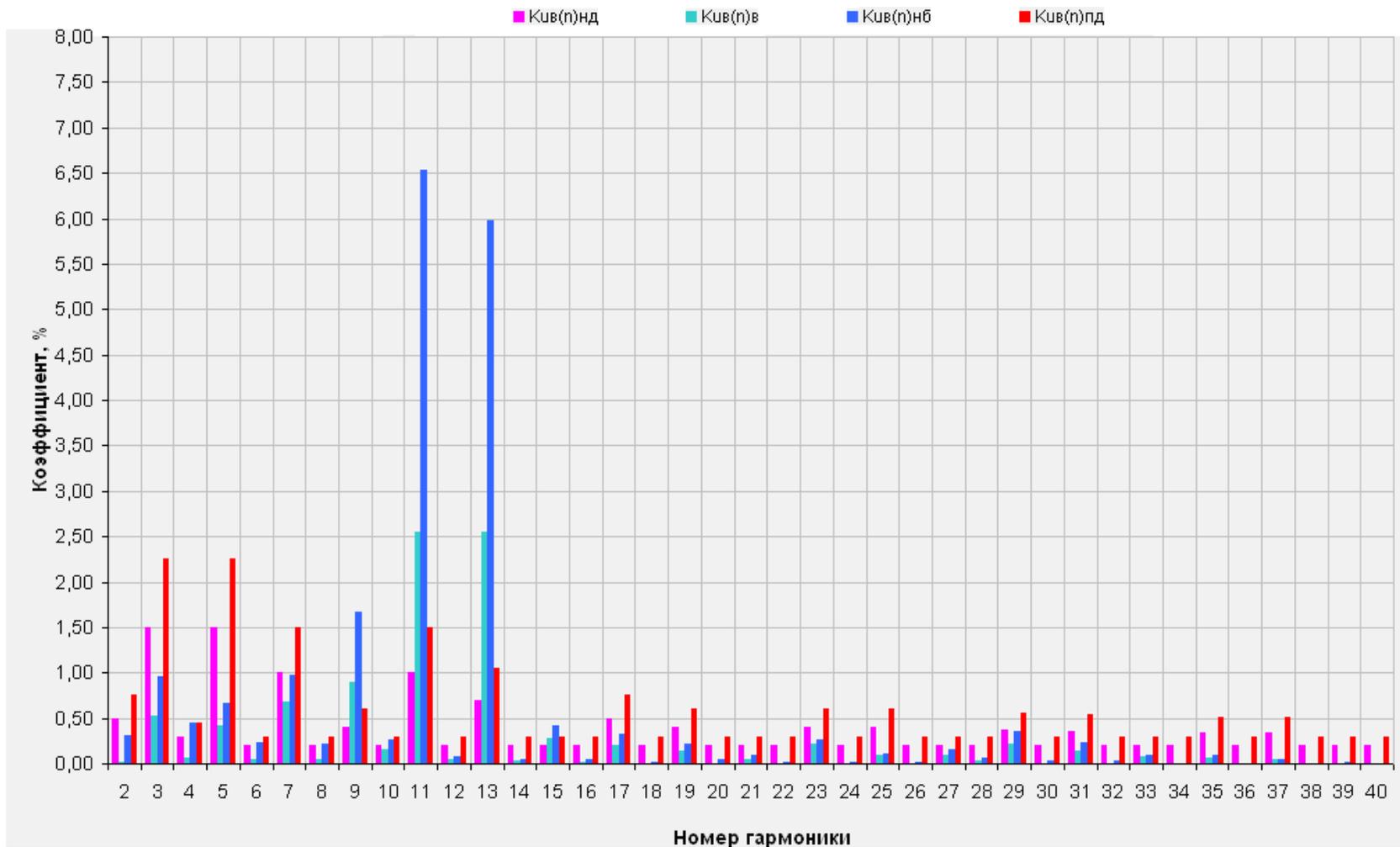


Рисунок 4.3 - Коэффициенты гармонических составляющих линейного напряжения $A'B'$

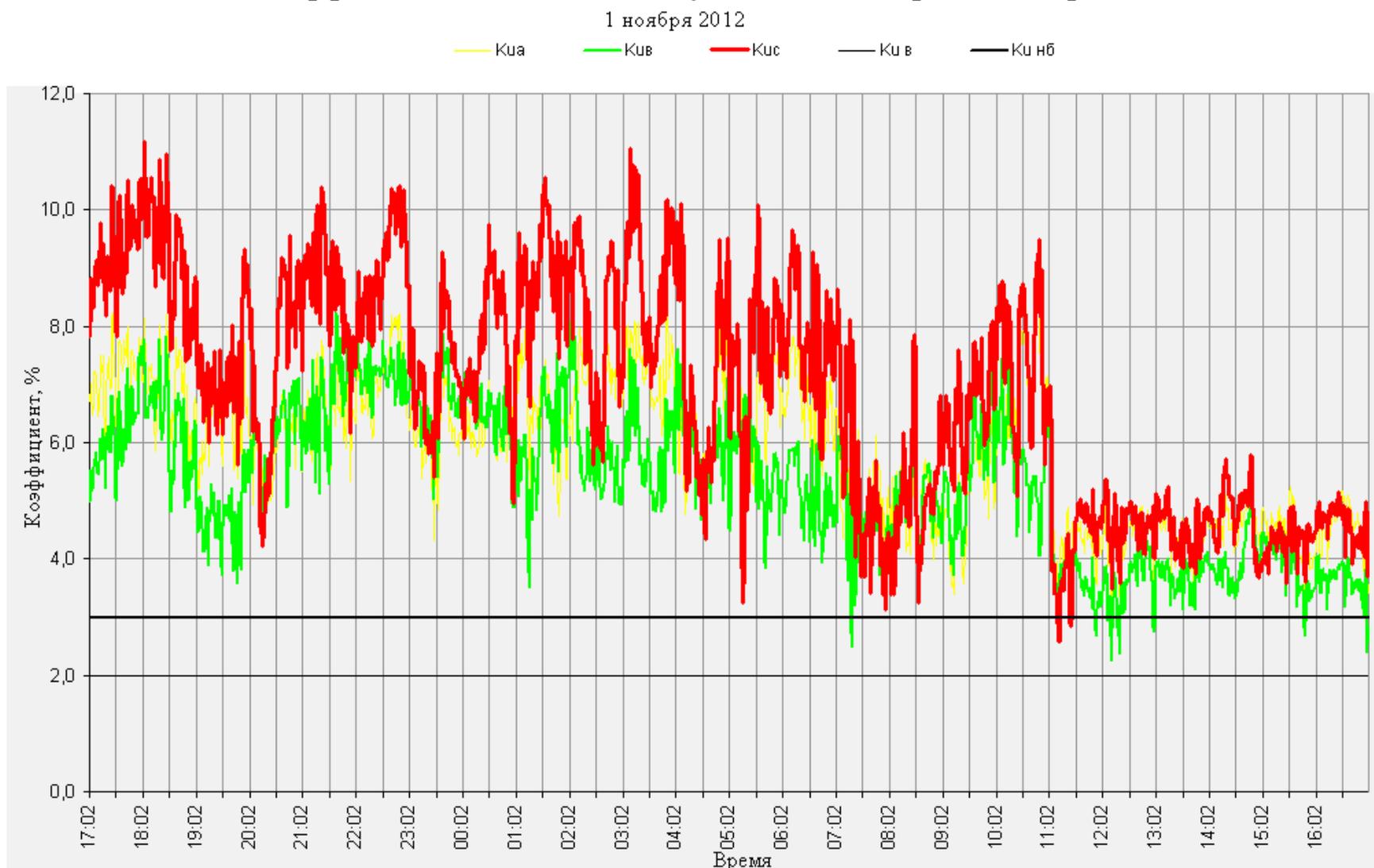


Рисунок 4.4 - Суммарные коэффициенты гармонических составляющих фазного напряжения

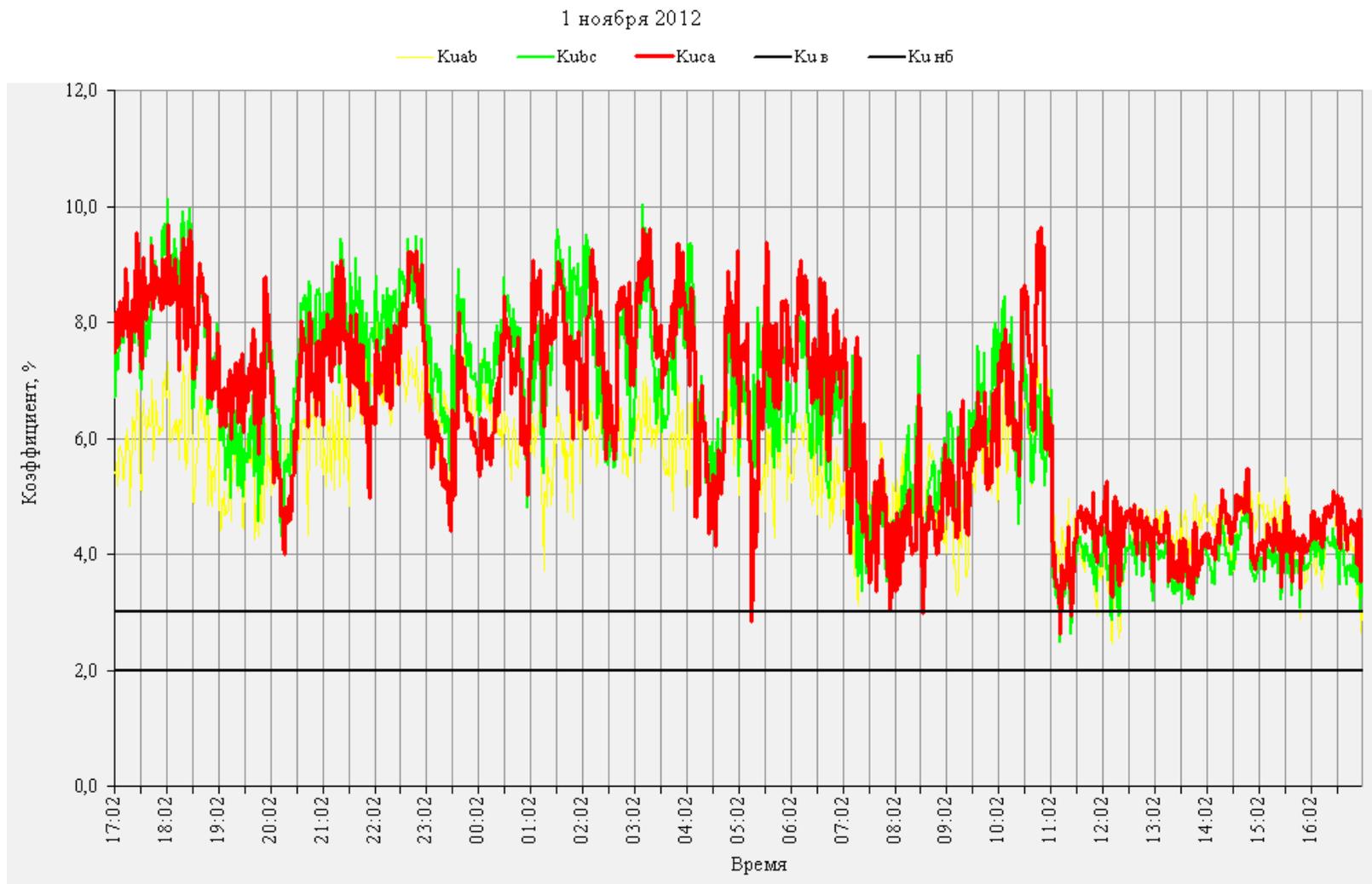


Рисунок 4.5 - Суммарные коэффициенты гармонических составляющих междуфазного (линейного) напряжения

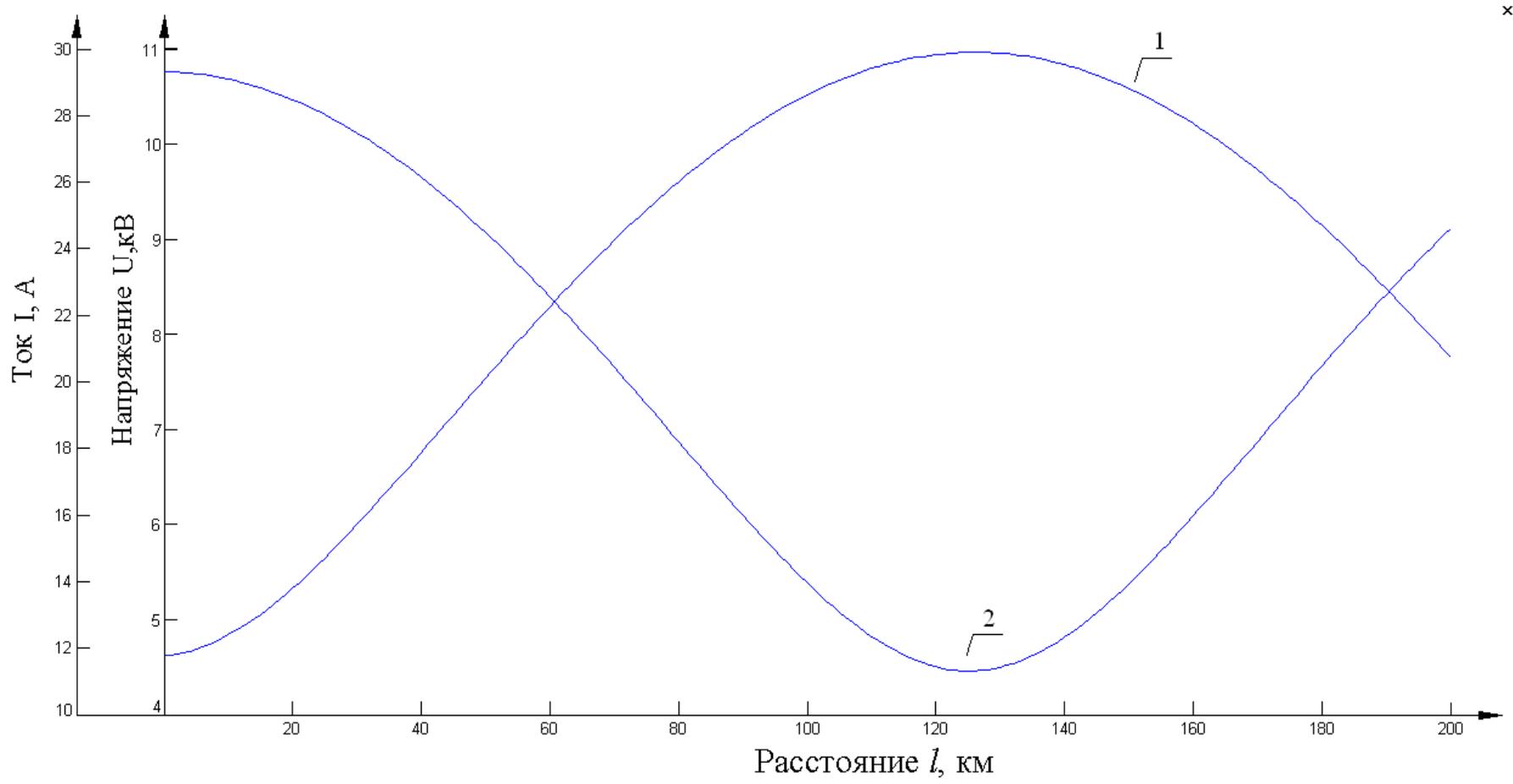


Рисунок 4.6 - Графическая интерпретация распределения напряжения и тока от одной пары волн для линии A' на 11-ой гармонической составляющей вдоль однородного участка двухцепной ВЛ:
 1 – распределение напряжения, 2 – распределение тока

4.3. Экспериментальные исследования передачи электрической энергии в двухцепной воздушной линии

С Братской ГЭС на 02.11.2012 07:00 были получены данные на основной частоте гармонической составляющей.

Линия 242. В начале ВЛ: $P_A = 19,15$ МВт, $Q_A = -6$ МВАр, $I_A = 147,17$ А, $U_{AB} = 237,8$ кВ, $U_A = 134,73$ кВ. В конце ВЛ: $P_A = 18,88$ МВт, $Q_A = 4,8$ МВАр, $I_A = 145,44$ А, $U_{AB} = 234,42$ кВ, $U_A = 131,35$ кВ. На рисунке 4.7 представлена графическая зависимость распределения фазного напряжения на основной частоте гармонической составляющей и с учетом предоставленного спектра на рисунке 4.2.

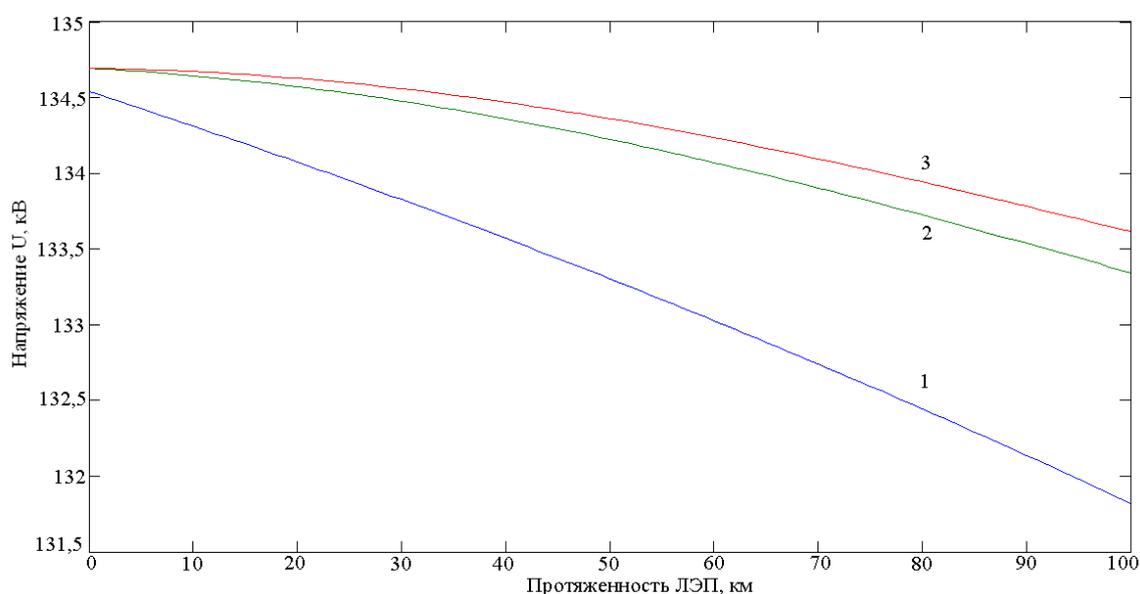


Рисунок 4.7 - Графическая зависимость распределения напряжения по линии A' вдоль однородного участка двухцепной ВЛ: 1 – расчетные данные, выполненные для основной гармонической составляющей, 2 – расчетные данные с учетом несинусоидального режима без учета скин-эффекта, 3 – расчетные данные для несинусоидального режима с учетом скин-эффекта

Из рисунка 4.7 видно, что потери фазного напряжения составили 2,7 кВ. В конце линии 100 км происходит увеличение напряжения на 1,6 кВ (линия 2) и на 2,2 кВ (линия 3) из-за наличия в сети высших гармонических составляющих.

На рисунке 4.8 представлена графическая зависимость распределения тока на основной частоте гармонической составляющей. Из рисунка 4.8 видно, что величина тока уменьшилась на 1,1 А. На линии длиной 100 км происходит увеличение тока на 1 А (линия 2) и на 1,5 А (линия 3).

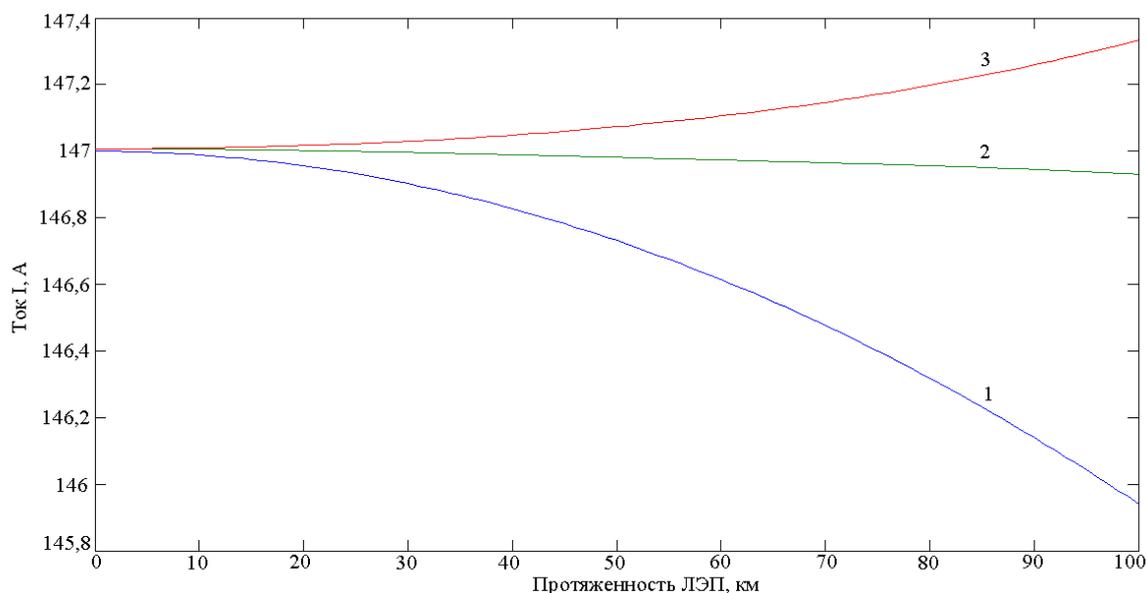


Рисунок 4.8 - Графическая интерпретация распределения тока для линии A' вдоль однородного участка двухцепной ВЛ: 1 – расчетные данные, выполненные для основной гармонической составляющей, 2 – расчетные данные с учетом несинусоидального режима без учета скин-эффекта, 3 – расчетные данные для несинусоидального режима с учетом скин-эффекта

На рисунке 4.9 представлена графическая зависимость распределения активной мощности для линии A' вдоль однородного участка двухцепной ВЛ. Потери активной мощности на участке двухцепной ВЛ обусловлены активным сопротивлением проводов. Из рисунка 4.9 видно, что на линии длиной в 100 км активная мощность по традиционной методике составила 19,08 МВт, по предлагаемой методике составила 18,77 МВт. С учетом вещественной

части мощности искажений значение активной мощности в начале ВЛ составила 19,2 МВт, а в конце 18,93 МВт.

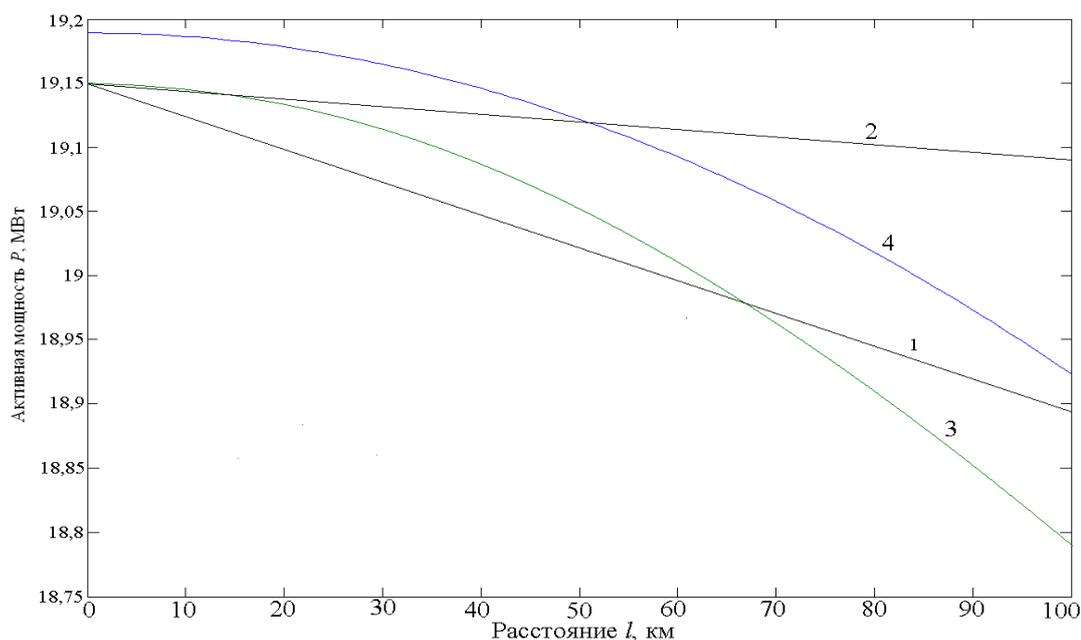


Рисунок 4.9 - Графическая интерпретация распределения активной мощности для линии A' вдоль однородного участка двухцепной ВЛ: 1 – экспериментальные данные, 2 – расчетные данные, выполненные по традиционной методике, 3 – расчетные данные по предлагаемой методике, 4 – расчетные данные с учетом вещественной части мощности искажений

На рисунке 4.10 представлена графическая зависимость распределения реактивной мощности для линии A' вдоль однородного участка двухцепной ВЛ. Потери реактивной мощности на участке двухцепной ВЛ обусловлены реактивным сопротивлением проводов. Из рисунка 4.10 видно, что на линии длиной в 100 км реактивная мощность по традиционной методике составила 4,85 МВАр, а по предлагаемой методике составила 4,83 МВАр. С учетом мнимой части мощности искажений значение реактивной мощности в начале ВЛ составила 6,01 МВАр, а в конце 4,88 МВАр.

Таким образом, рисунки 4.7-4.10 доказывают необходимость корректировки расчетов на основной гармонической составляющей.

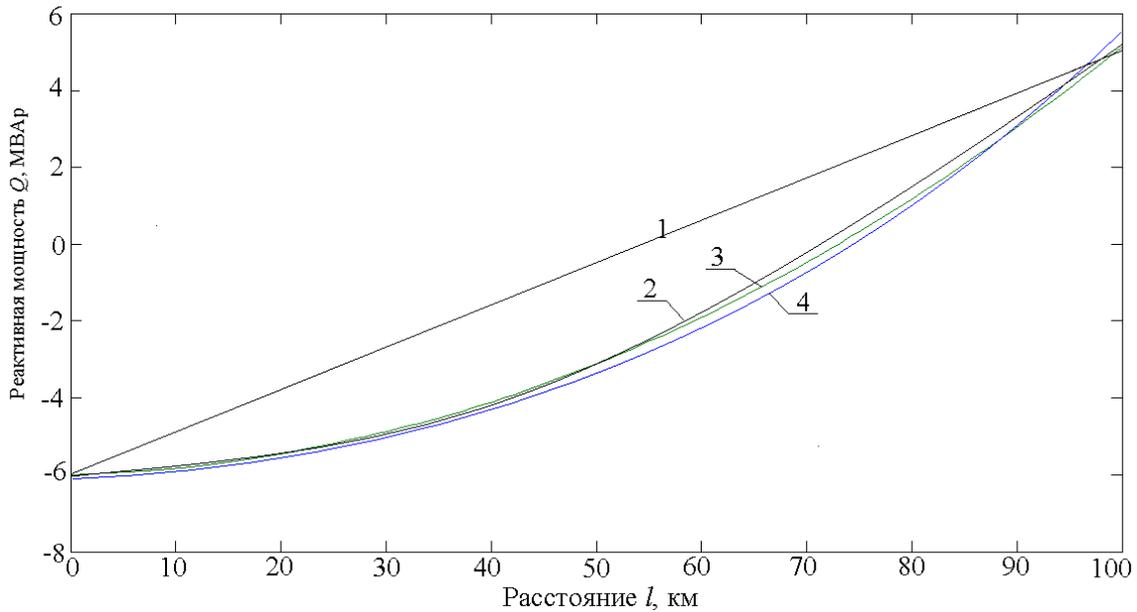


Рисунок 4.10 - Графическая интерпретация распределения реактивной мощности для линии A' вдоль однородного участка двухцепной ВЛ:
 1 – экспериментальные данные, 2 – расчетные данные, выполненные по традиционной методике, 3 – расчетные данные по предлагаемой методике, 4 – расчетные данные с учетом мнимой части мощности искажений

Определим параметры режима, потери активной мощности по традиционной «П» - образной схеме замещения (рисунок 4.11). Сравним полученные результаты с предлагаемой методикой расчета.

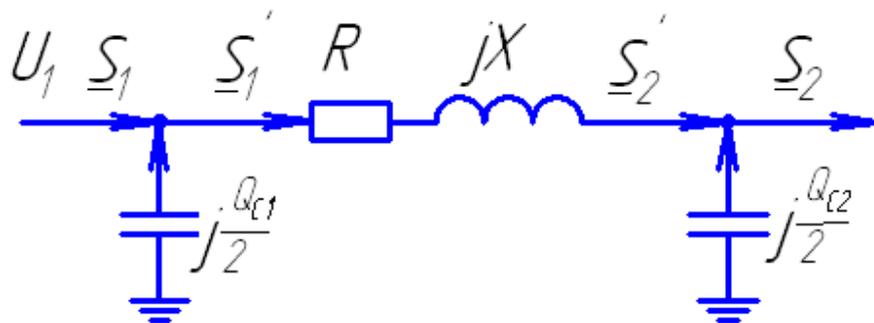


Рисунок 4.11 - П – образная схема замещения ВЛ:

U_1, U_2 – напряжение в начале и в конце линии соответственно (кВ);
 Q_C – емкостная проводимость линии на землю (См); R – активное сопротивление линии (Ом); X – индуктивное сопротивление линии (Ом)

Исходные параметры для расчета $l = 100$ км, $r_0 = 0,098$ Ом/км, $x_0 = 0,424$ Ом/км, $\tilde{N}_{0A'n} = 6,02 \cdot 10^{-9}$ Ф/км, $P_A = 19,15$ МВт, $Q_A = -6$ МВАр.

Индуктивное сопротивление линии определяется выражением:

$$X = x_0 \cdot l;$$

$$x_0 = 0,144 \cdot \lg \frac{D_{CP}}{r} + 0,016;$$

где x_0 – удельное (погонное) индуктивное сопротивление ВЛ (Ом/км); l – протяженность ВЛ (км); D_{CP} – среднегеометрическое расстояние между фазами (м); r – радиус проводника (м).

Среднегеометрическое расстояние между проводами можно определить согласно выражению:

$$D_{CP} = \sqrt[3]{D_{AB} \cdot D_{BC} \cdot D_{CA}};$$

где D_{AB} , D_{BC} , D_{CA} – расстояние между соответствующими проводами.

Емкостная проводимость линии обусловлена наличием емкости между проводниками линии и землей и определяется выражением:

$$B = b_0 \cdot l;$$

$$b_0 = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg \frac{D_{CP}}{r}};$$

где b_0 – удельная (погонная) емкостная проводимость линии на землю (См/км).

$$D_{CP} = \sqrt[3]{6,8 \cdot 6,8 \cdot 13} = 8,439 \text{ м};$$

$$x_0 = 0,144 \cdot \lg \frac{8,439}{0,098} + 0,016 = 0,295 \text{ Ом/км};$$

$$X = 0,295 \cdot 100 = 29,5 \text{ Ом};$$

$$b_0 = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg \frac{8,44}{0,098}} = 3,917 \cdot 10^{-6} \text{ См/км};$$

$$B = 3,91 \cdot 10^{-6} \cdot 100 = 3,917 \cdot 10^{-4} \text{ См}.$$

Генерация реактивной мощности линии:

$$Q_c = U^2 \cdot \frac{B}{2};$$

$$Q_c = \frac{237,8^2 \cdot 3,91 \cdot 10^{-4}}{2} = 11,075 \text{ МВАр.}$$

$$\underline{S}_1 = P + j \cdot Q; \underline{S}_1 = (19,15 - j \cdot 6) \text{ МВА};$$

$$\underline{S}'_1 = 19,15 - j \cdot 6 + j \cdot 11,06 = (19,15 + j \cdot 5,075) \text{ МВА.}$$

Потери мощности в линии:

$$\Delta P = \frac{(P)^2 + (Q)^2}{U_1^2} \cdot R; \Delta P = \frac{(19,15)^2 + (5,075)^2}{237,8^2} \cdot 9,8 = 0,068 \text{ МВт};$$

$$\Delta Q = \frac{(P)^2 + (Q)^2}{U_1^2} \cdot X; \Delta Q = \frac{(19,15)^2 + (5,075)^2}{237,8^2} \cdot 29,5 = 0,205 \text{ МВАр};$$

$$\underline{S}'_2 = \underline{S}'_1 - \Delta \underline{S};$$

$$\underline{S}'_2 = 19,15 + j \cdot 5,075 - 0,068 - j \cdot 0,29 = 19,082 + j \cdot 4,86 \text{ МВА.}$$

Расчет погрешности.

Абсолютная погрешность.

$$\Delta P = P_{\hat{Y}\hat{E}\hat{N}\hat{I}} - P_{\hat{D}\hat{A}\hat{N}\hat{x}};$$

$$\Delta P = 18,88 - 18,77 = 0,11 \text{ МВт};$$

Относительная погрешность.

$$\delta = \frac{\Delta P}{P_{\hat{D}\hat{A}\hat{N}\hat{x}}} \cdot 100;$$

$$\delta = \frac{0,11}{18,77} \cdot 100 = 0,58\% .$$

Погрешность расчетов по предложенной методике составила 0,58 %, а по традиционной методике представления ВЛ в виде однопроводной схемы замещения составила 1,05 %. Предлагаемая методика дает наиболее достоверный результат за счет учета электромагнитных связей между конструктивными элементами двухцепной ВЛ. Традиционная методика расчета токов

и напряжений не учитывает распределенность параметров, а значит нелинейность распределений напряжений и токов по линейным проводам ВЛ.

4.4. Влияние первичных параметров двухцепной воздушной линии на уровень напряжений и токов

Каждый провод в двухцепной ВЛ обладает продольными параметрами, имеющими признаки резистивных, индуктивных и емкостных составляющих, а также поперечными параметрами, которые имеют признаки резистивных и емкостных составляющих, иллюстрирующих связи между проводами и между проводами и заземленными конструктивными элементами ВЛ. Распределение токов и напряжений, в первую очередь, зависят от величин первичных параметров линии, т.е. от параметров ее схемы замещения.

На рисунке 4.12 представлен график зависимости емкостной составляющей линейного провода от высоты подвеса. Из графика видно, что с увеличением высоты подвеса провода над землей емкость уменьшается.

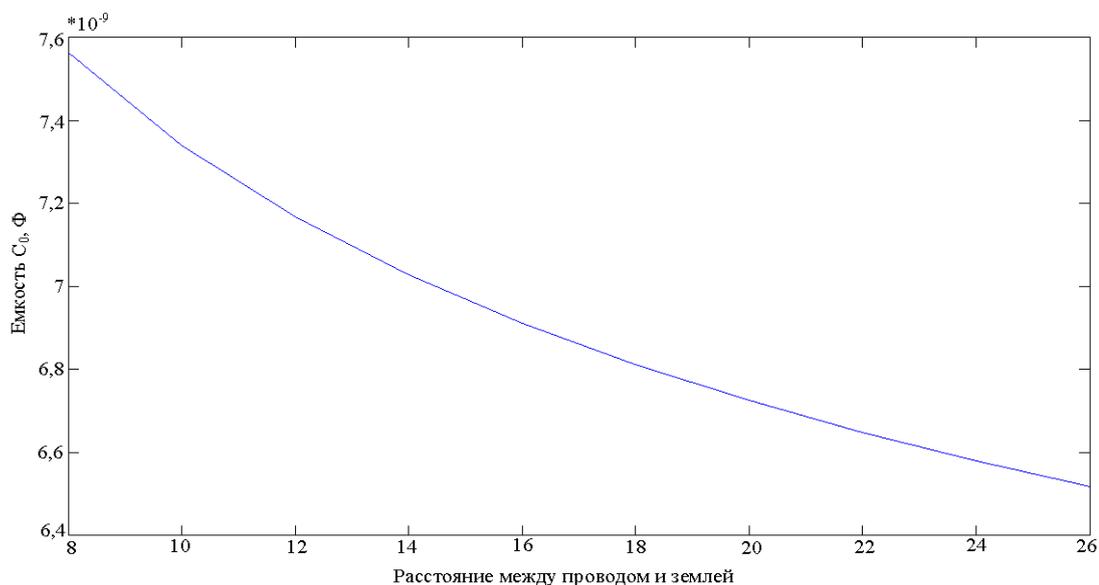


Рисунок 4.12 - Графическая зависимость емкости провода от высоты его подвеса

На рисунках 4.13-4.14 приведены графические зависимости распределения фазного напряжения и линейного тока от величины емкостной связи между проводом и заземленными конструкциями линии. Из рисунка 4.13 следует, что с увеличением высоты подвеса провода происходит снижение фазного напряжения с 133,58 кВ до 133,5 кВ.

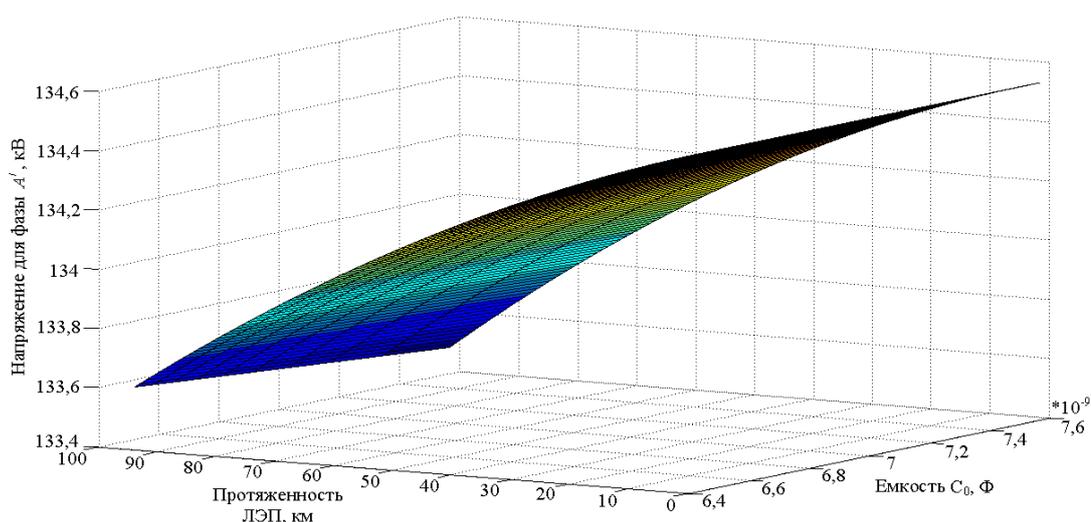


Рисунок 4.13 - Графическая зависимость распределения фазного напряжения на основной частоте гармонической составляющей от емкостной связи линейного провода с заземленными конструкциями линии

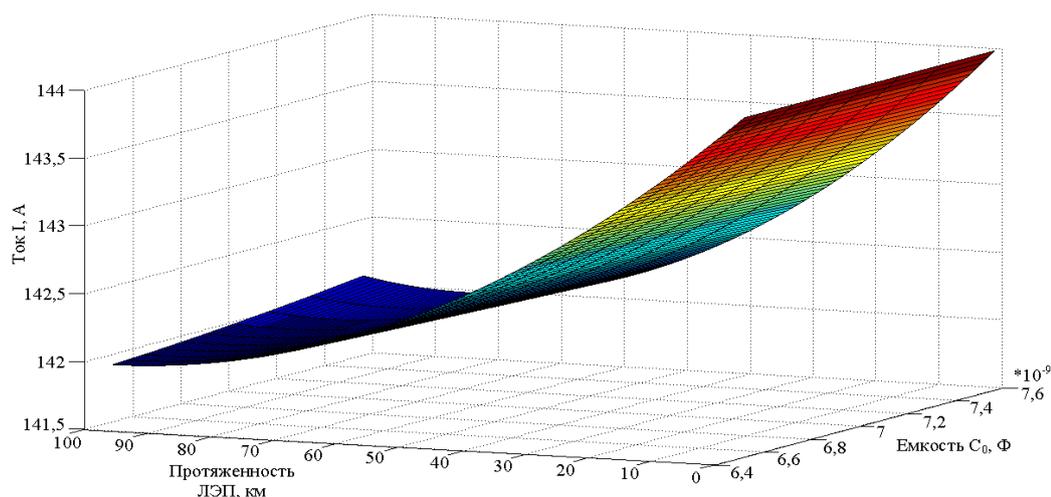


Рисунок 4.14 - Графическая зависимость распределения линейного тока на основной частоте гармонической составляющей от емкостной связи линейного провода с заземленными конструкциями линии

Из рисунка 4.14 следует, что с увеличением высоты подвеса провода происходит увеличение тока с 141,8 А до 142,1 А.

На рисунке 4.15 представлен график зависимости емкостной составляющей между проводами ВЛ. Из рисунка 4.15 видно, что с уменьшением расстояния между проводами емкостная составляющая увеличивается.

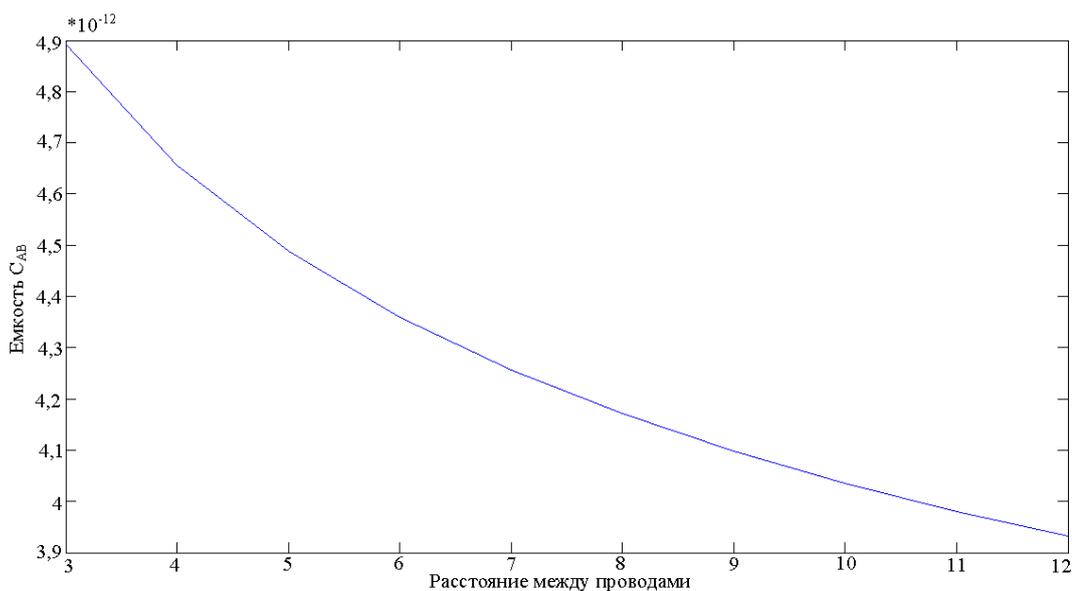


Рисунок 4.15 - Графическая зависимость емкостной составляющей между проводами ВЛ

С увеличением емкостной составляющей увеличивается емкостная проводимость линии, а значит, увеличивается генерация реактивной мощности в линии, соответственно больше активной мощности можно передать по ВЛ. Однако, при уменьшении расстояний между проводами необходимо учитывать требуемые изоляционные расстояния между проводами для соблюдения электрической прочности воздушных промежутков. Высота подвеса линейных проводов должна зависеть и от местности прохождения трассы линии.

На рисунках 4.16-4.17 представлены графические зависимости фазного напряжения и линейного тока от индуктивного сопротивления провода в зависимости от емкостной составляющей между проводами ВЛ.

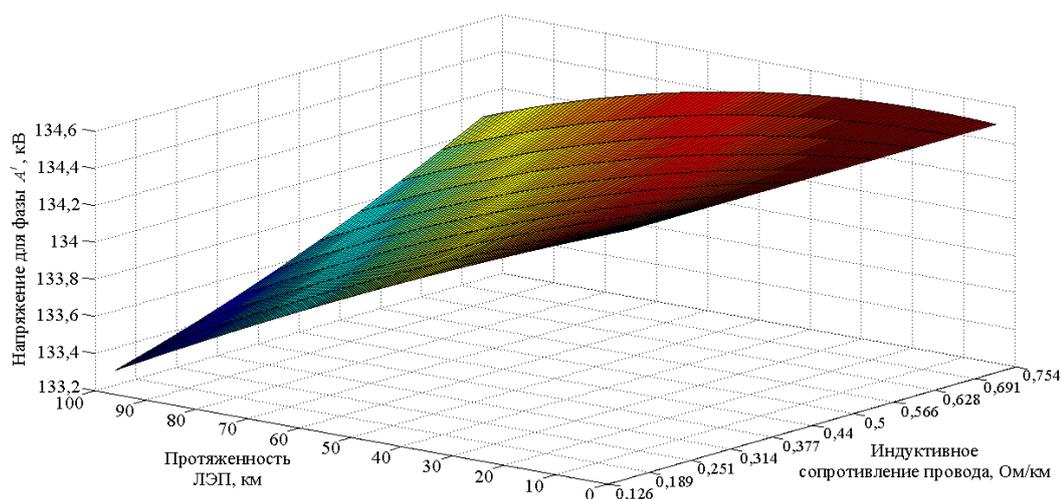


Рисунок 4.16 - Графическая зависимость распределения фазного напряжения на основной частоте гармонической составляющей от индуктивного сопротивления провода

Из рисунка 4.16 следует, что с увеличением индуктивного сопротивления провода ВЛ, напряжение увеличивается с 133,3 кВ до 134,1 кВ. Из рисунка 4.17 следует, что с увеличением индуктивного сопротивления провода ВЛ, ток уменьшается с 142,3 А до 141,5 А.

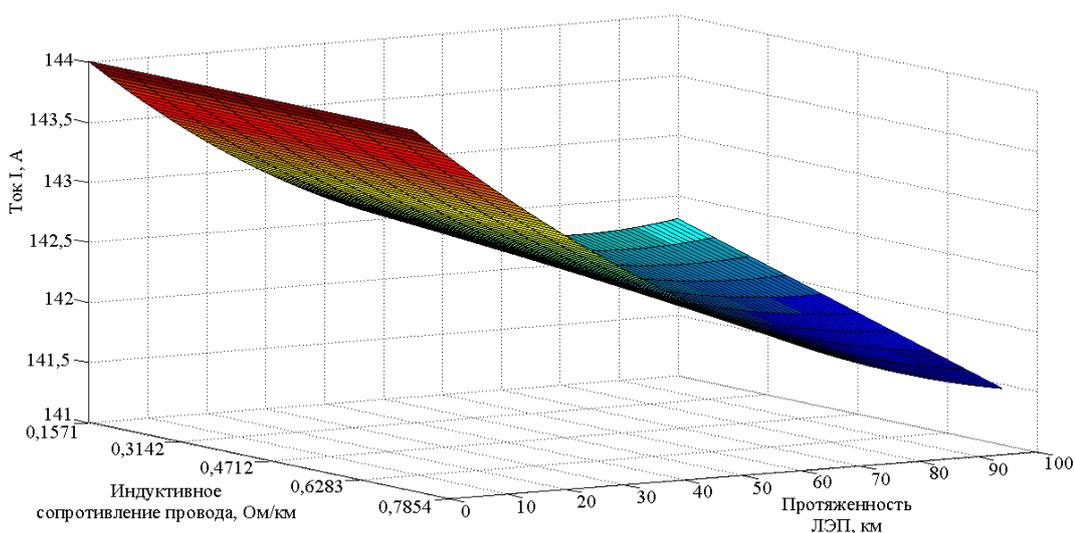


Рисунок 4.17 - Графическая зависимость распределения линейного тока на основной частоте гармонической составляющей от индуктивного сопротивления провода

На рисунке 4.18 представлена графическая зависимость взаимной индуктивности от расстояния между проводами.

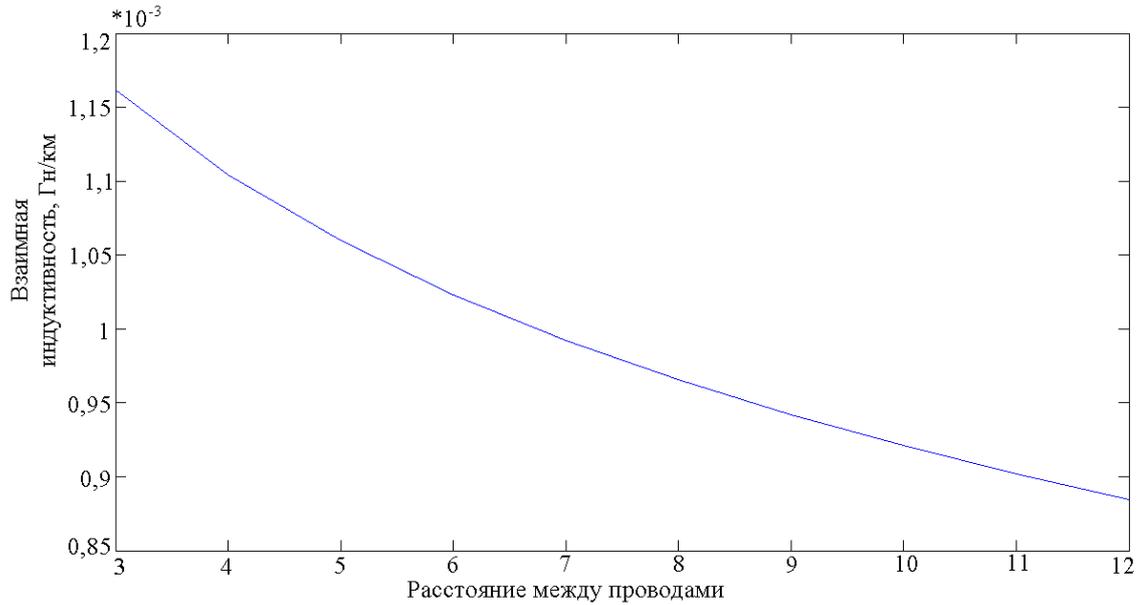


Рисунок 4.18 - Графическая зависимость распределения взаимной индуктивности от расстояния между проводами

Из рисунка 4.18. видно, что с увеличением расстояния между проводами взаимная индуктивность уменьшается.

На рисунках 4.19-4.20 представлены графические зависимости напряжения и тока от взаимной индуктивности.

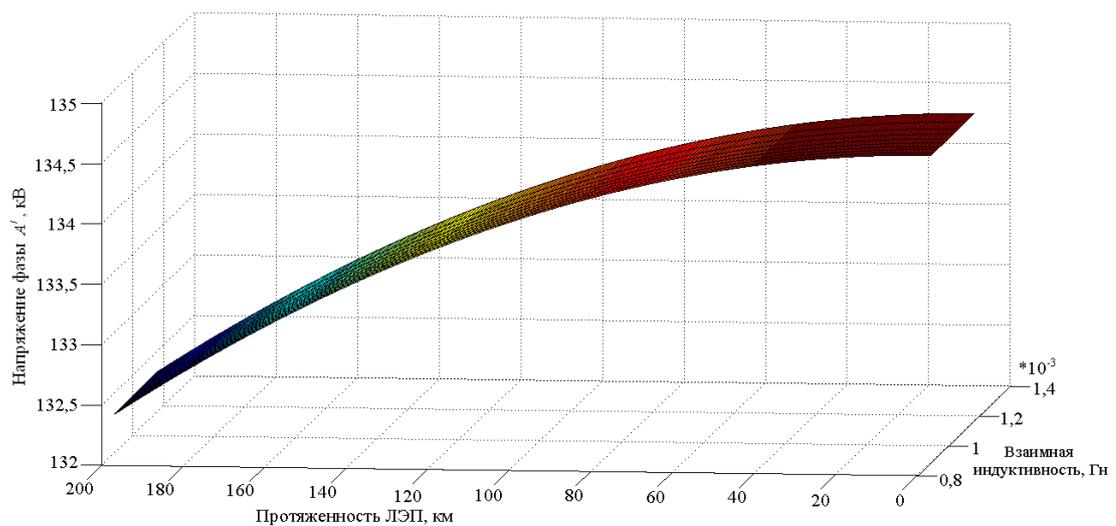


Рисунок 4.19 - Графическая зависимость распределения фазного напряжения от взаимной индуктивности на основной частоте гармонической составляющей

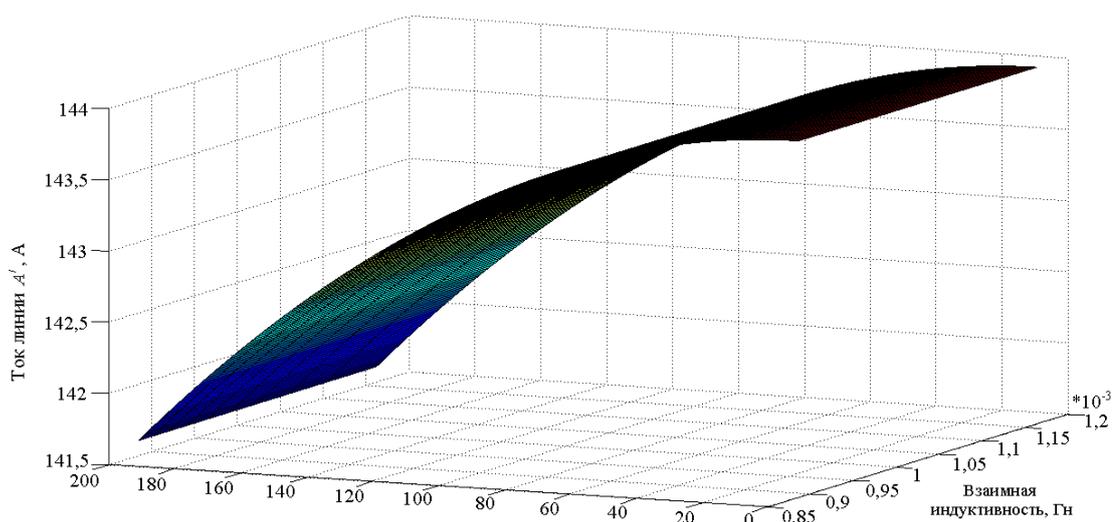


Рисунок 4.20 - Графическая зависимость распределения тока от взаимной индуктивности на основной частоте гармонической составляющей

Из рисунков 4.19-4.20 следует, что с увеличением взаимной индуктивности между проводами, напряжение и ток увеличиваются, но весьма незначительно.

Таким образом, практически все первичные параметры оказывают влияние на уровень напряжения и тока. Однако, можно сделать вывод, что учет взаимной индуктивности практически не влияет на изменение тока и напряжения.

4.5 Передаточная функция двухцепной воздушной линии

Передачу электрической энергии по двухцепной ВЛ можно оценить с помощью передаточной функции линии электропередачи по соответствующим характеристикам.

Передаточная функция объекта определяется как отношение спектральной плотности входного спектра к спектральной плотности выходного:

$$K(j \cdot \omega) = \frac{F_2(j \cdot \omega)}{F_1(j \cdot \omega)},$$

где $F_2(j \cdot \omega)$ – спектральная плотность выходного сигнала; $F_1(j \cdot \omega)$ – спектральная плотность входного сигнала.

Спектральная плотность (спектральная функция) определяется из прямого преобразования Фурье:

$$F(j \cdot \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot e^{-j \cdot \omega t} dt.$$

Если учесть, что при $t < 0$ $f(t) = 0$, то выражение спектральной плотности для прямого преобразования Фурье примет следующий вид:

$$F(j \cdot \omega) = \int_0^{+\infty} f(t) \cdot e^{-j \cdot \omega t} dt.$$

В данной функции следует оценить производную функции ВЛ по напряжению и по току. Цель построения этих функций заключается в получении амплитудно-частотных (АЧХ) и фазо-частотных (ФЧХ) характеристик напряжений и токов в двухцепной ВЛ.

Передаточная функция по напряжению и по току определяется как:

$$K_U(j \cdot \omega) = \frac{U_2(j \cdot \omega)}{U_1(j \cdot \omega)}; \quad (4.1)$$

$$K_I(j \cdot \omega) = \frac{I_2(j \cdot \omega)}{I_1(j \cdot \omega)}, \quad (4.2)$$

где $U_2(j \cdot \omega)$ и $U_1(j \cdot \omega)$ – спектральные плотности выходного и входного напряжений; $I_2(j \cdot \omega)$ и $I_1(j \cdot \omega)$ – спектральные плотности выходного и входного токов.

Выходные напряжения и токи на частоте n -ой гармонической составляющей изменяются во времени по гармоническим законам:

$$u_{1n} = \dot{U}_{1mn} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_{un});$$

$$i_{1n} = \dot{I}_{1mn} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_{in}).$$

В этих уравнениях, которые, как и в уравнениях (4.1)-(4.2) частота изменения тока и напряжения во времени

В этих уравнениях спектра как и в уравнениях (4.1)-(4.2) гармонический ряд определяет ω как частоту изменения тока и напряжения во времени.

Спектральная плотность этих величин определяется уравнениями:

$$U_1(j \cdot \omega) = -\frac{U_{1mn} \cdot \sqrt{2}}{n \cdot \omega} \cdot (\cos(\varphi_{un}) - j \cdot \sin(\varphi_{un})); \quad (4.3)$$

$$I_1(j \cdot \omega) = -\frac{I_{1mn} \cdot \sqrt{2}}{n \cdot \omega} \cdot (\cos(\varphi_{in}) - j \cdot \sin(\varphi_{in})), \quad (4.4)$$

где I_{1mn} и U_{1mn} – действующие значения токов и напряжений на частоте n -ой гармонической составляющей в начале однородного участка двухцепной ВЛ; φ_{un} и φ_{in} – аргумент напряжений и токов в начале однородного участка двухцепной ВЛ на частоте n -ой гармонической составляющей.

Действующие величины выходных напряжений и токов однородных участков двухцепной ВЛ определяются из уравнения (3.29), (3.32). Мгновенные значения этих величин определяются как произведение мнимой части токов и напряжений без действующих значений:

Мгновенные значения выходного тока и напряжения определяются как произведение мнимой части соответствующих производных действующих значений токов и напряжений на $\sqrt{2} \cdot e^{j\omega t}$:

$$u_2 = \sqrt{2} \cdot \left\| \frac{1}{6} \left(\sum_{i=1}^6 (\dot{U}_{1mA'n} \cdot ch\gamma_{in} l - \dot{I}_{1mA'n} \cdot \underline{Z}_{cA'in} \cdot sh\gamma_{in} l) \right) \right\| \cdot \sin(\varphi_{un}); \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A'n} = & \sqrt{2} \cdot \left\| \frac{1}{6} \left(\sum_{i=1}^6 \left(\dot{I}_{1A'n} \cdot ch\gamma_{in} l - \frac{\dot{U}_{1A'n}}{\underline{Z}_{cA'in}} \cdot sh\gamma_{in} l \right) + \right. \right. \\ & + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{I}_{1B'n} \cdot \underline{Z}_{cB'in}}{\underline{Z}_{cA'B'in}} \cdot ch\gamma_{in} l - \frac{\dot{U}_{1B'n}}{\underline{Z}_{cA'B'in}} \cdot sh\gamma_{in} l \right) + \\ & + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{I}_{1C'n} \cdot \underline{Z}_{cC'in}}{\underline{Z}_{cC'A'in}} \cdot ch\gamma_{in} l - \frac{\dot{U}_{1C'n}}{\underline{Z}_{cC'A'in}} \cdot sh\gamma_{in} l \right) + \\ & \left. \left. + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{I}_{1A''n} \cdot \underline{Z}_{cA''in}}{\underline{Z}_{cA'A'in}} \cdot ch\gamma_{in} l - \frac{\dot{U}_{1A''n}}{\underline{Z}_{cA'A'in}} \cdot sh\gamma_{in} l \right) \right) \right\| \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{I}_{1B''n} \cdot Z_{cB''in}}{Z_{cA'B''in}} \cdot ch\gamma_{in} l - \frac{\dot{U}_{1B''n}}{Z_{cA'B''in}} \cdot sh\gamma_{in} l \right) + \\
& + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{I}_{1C''n} \cdot Z_{cC''in}}{Z_{cC''A'in}} \cdot ch\gamma_{in} l - \frac{\dot{U}_{1C''n}}{Z_{cC''A'in}} \cdot sh\gamma_{in} l \right) \Bigg) \cdot \sin(\varphi_{in}), \quad (4.6)
\end{aligned}$$

где γ_{in} – постоянные распространения электромагнитной волны по однородному участку двухцепной ВЛ на частоте n -ой гармонической составляющей; $Z_{cA'in}$, $Z_{cA'B'in}$, $Z_{cC'A'in}$, $Z_{cA'A''in}$, $Z_{cA'B''in}$, $Z_{cC''A'in}$ – собственные и взаимные волновые сопротивления для линии A' на частоте n -ой гармонической составляющей.

Спектральная плотность выходных напряжений и токов определяется из уравнений (4.5)-(4.6):

$$\begin{aligned}
U_2(j \cdot \omega) = & -\frac{\sqrt{2}}{n \cdot \omega} \cdot \left\| \frac{1}{6} \left(\sum_{i=1}^6 \left(\dot{U}_{1mA'n} \cdot ch\gamma_{in} l - \dot{I}_{1mA'n} \cdot Z_{cA'in} \cdot sh\gamma_{in} l \right) \right) \right\| \cdot \\
& \cdot (\cos(\varphi_{un}) - j \cdot \sin(\varphi_{u2n})); \quad (4.7)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_2(j \cdot \omega) = & -\frac{\sqrt{2}}{n \cdot \omega} \cdot \left\| \frac{1}{6} \left(\sum_{i=1}^6 \left(\dot{I}_{1A'n} \cdot ch\gamma_{in} l - \frac{\dot{U}_{1A'n}}{Z_{cA'in}} \cdot sh\gamma_{in} l \right) + \right. \right. \\
& + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{I}_{1B'n} \cdot Z_{cB'in}}{Z_{cA'B'in}} \cdot ch\gamma_{in} l - \frac{\dot{U}_{1B'n}}{Z_{cA'B'in}} \cdot sh\gamma_{in} l \right) + \\
& + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{I}_{1C'n} \cdot Z_{cC'in}}{Z_{cC'A'in}} \cdot ch\gamma_{in} l - \frac{\dot{U}_{1C'n}}{Z_{cC'A'in}} \cdot sh\gamma_{in} l \right) + \\
& + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{I}_{1A''n} \cdot Z_{cA''in}}{Z_{cA'A''in}} \cdot ch\gamma_{in} l - \frac{\dot{U}_{1A''n}}{Z_{cA'A''in}} \cdot sh\gamma_{in} l \right) + \\
& + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{I}_{1B''n} \cdot Z_{cB''in}}{Z_{cA'B''in}} \cdot ch\gamma_{in} l - \frac{\dot{U}_{1B''n}}{Z_{cA'B''in}} \cdot sh\gamma_{in} l \right) + \\
& \left. \left. + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{I}_{1C''n} \cdot Z_{cC''in}}{Z_{cC''A'in}} \cdot ch\gamma_{in} l - \frac{\dot{U}_{1C''n}}{Z_{cC''A'in}} \cdot sh\gamma_{in} l \right) \right) \right\| \cdot (\cos(\varphi_{in}) - j \cdot \sin(\varphi_{i2n})) \quad (4.8)
\end{aligned}$$

При подстановки уравнений (4.3)-(4.4) и (4.7)-(4.8) в уравнения (4.1)-(4.2) получается передаточная функция по напряжению и току двухцепной ВЛ:

$$K_U(j \cdot \omega) = \frac{\left\| \frac{1}{6} \left(\sum_{i=1}^6 \left(\dot{U}_{1mA'n} \cdot ch\gamma_{in} l - \dot{I}_{1mA'n} \cdot Z_{cA'in} \cdot sh\gamma_{in} l \right) \right) \right\|}{U_{1mn} \cdot (\cos(\varphi_{un}) - j \cdot \sin(\varphi_{un})) \cdot (\cos(\varphi_{un}) - j \cdot \sin(\varphi_{u2n}))}; \quad (4.9)$$

$$K_I(j \cdot \omega) = \left(\frac{1}{6} \left(\sum_{i=1}^6 \left(\dot{I}_{1A'n} \cdot ch\gamma_{in} l - \frac{\dot{U}_{1A'n}}{Z_{cA'in}} \cdot sh\gamma_{in} l \right) + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{I}_{1B'n} \cdot Z_{cB'in}}{Z_{cA'B'in}} \cdot ch\gamma_{in} l - \frac{\dot{U}_{1B'n}}{Z_{cA'B'in}} \cdot sh\gamma_{in} l \right) + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{I}_{1C'n} \cdot Z_{cC'in}}{Z_{cC'A'in}} \cdot ch\gamma_{in} l - \frac{\dot{U}_{1C'n}}{Z_{cC'A'in}} \cdot sh\gamma_{in} l \right) + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{I}_{1A''n} \cdot Z_{cA''in}}{Z_{cA'A'in}} \cdot ch\gamma_{in} l - \frac{\dot{U}_{1A''n}}{Z_{cA'A'in}} \cdot sh\gamma_{in} l \right) + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{I}_{1B''n} \cdot Z_{cB''in}}{Z_{cA'B'in}} \cdot ch\gamma_{in} l - \frac{\dot{U}_{1B''n}}{Z_{cA'B'in}} \cdot sh\gamma_{in} l \right) + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\dot{I}_{1C''n} \cdot Z_{cC''in}}{Z_{cC'A'in}} \cdot ch\gamma_{in} l - \frac{\dot{U}_{1C''n}}{Z_{cC'A'in}} \cdot sh\gamma_{in} l \right) \right) \cdot (\cos(\varphi_{in}) - j \cdot \sin(\varphi_{in})) \right) / I_{1mn} \cdot (\cos(\varphi_{in}) - j \cdot \sin(\varphi_{in})), \quad (4.10)$$

Передаточные функции по напряжению и току представляют собой комплексные величины:

$$K_U(j \cdot \omega) = A_U(\omega) \cdot e^{j \cdot \varphi_U(\omega)}; \quad (4.11)$$

$$K_I(j \cdot \omega) = A_I(\omega) \cdot e^{j \cdot \varphi_I(\omega)}, \quad (4.12)$$

где $A_U(\omega)$ – АЧХ напряжения; φ_U – ФЧХ напряжения; $A_I(\omega)$ – АЧХ тока; φ_I – ФЧХ тока.

Используя формулы (4.9)-(4.10) приведем АЧХ и ФЧХ напряжения и тока для двухцепной ВЛ.

На рисунке 4.21 представлена АЧХ напряжения от n -ой гармонической составляющей и от протяженности двухцепной ВЛ.

Из рисунка 4.21. видно, что с увеличением расстояния амплитуда напряжения увеличивается. На протяженности линии в 100 км амплитуда напряжения увеличивается на 13 гармонической составляющей в 4 раза и на 33 гармонической составляющей в 11 раз, а 23 высшая гармоническая составляющая уменьшается.

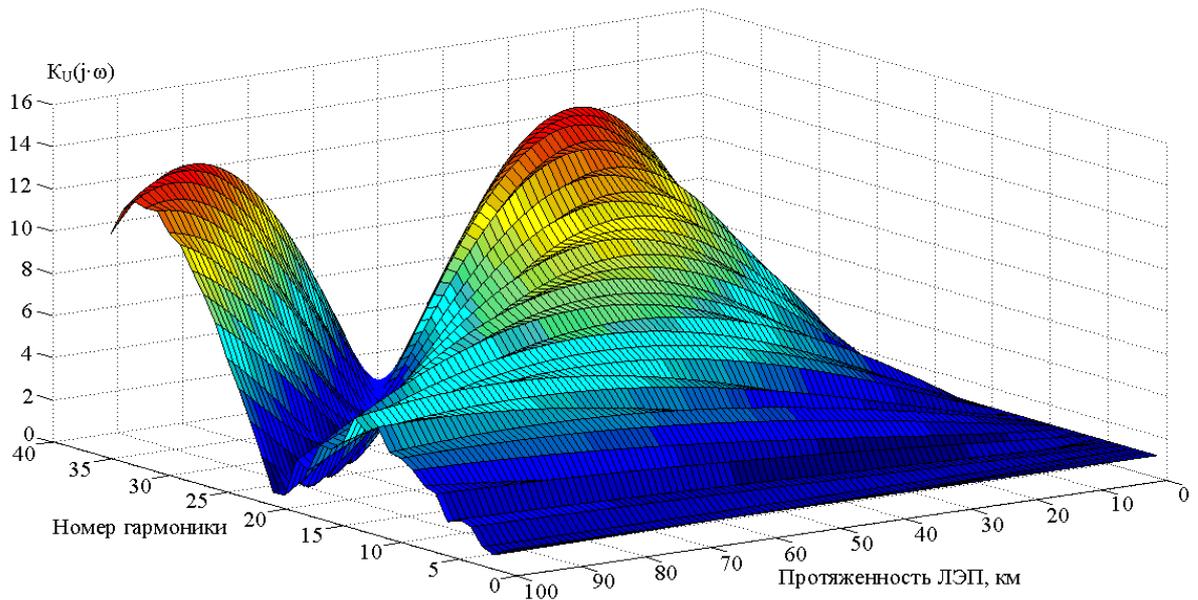


Рисунок 4.21 - АЧХ напряжения от n -ой гармонической составляющей и от протяженности двухцепной ВЛ

На рисунке 4.22 представлена ФЧХ напряжения от n -ой гармонической составляющей и от протяженности двухцепной ВЛ, показывающий зависимость изменения фазы от протяженности ВЛ.

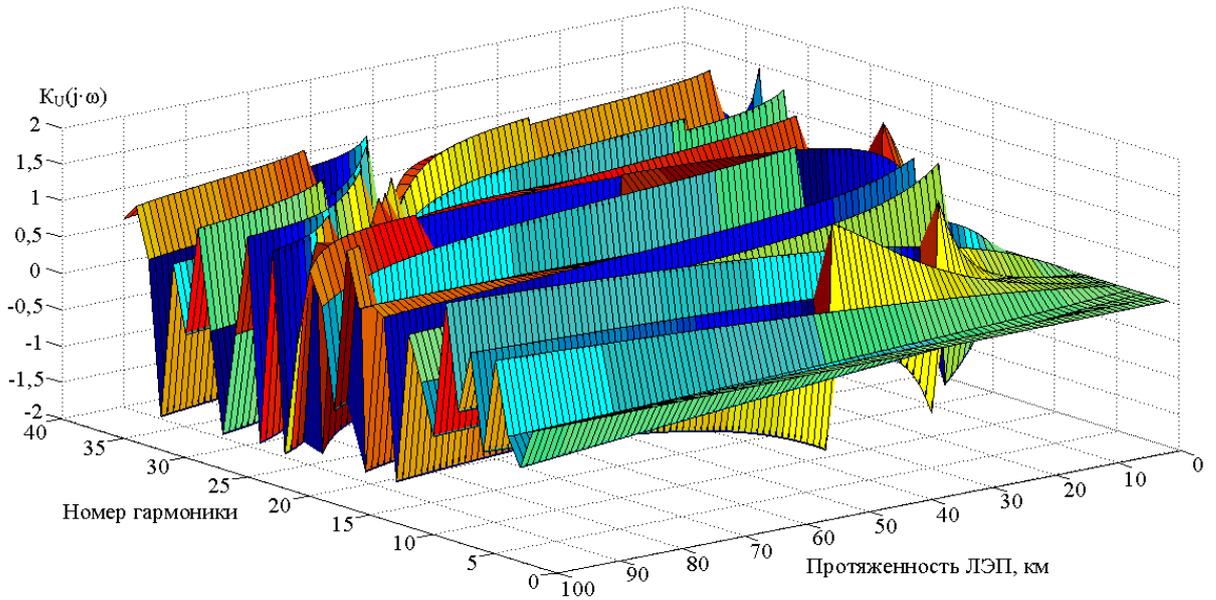


Рисунок 4.22 - ФЧХ напряжения от n -ой гармонической составляющей и от протяженности двухцепной ВЛ

На рисунке 4.23 представлена АЧХ тока от n -ой гармонической составляющей и от протяженности двухцепной ВЛ. Из рисунка 4.23 видно, что с увеличением расстояния амплитуда тока на 5 гармонической составляющей увеличивается в 2 раза, на 17 гармонической составляющей в 3 раза, а на 35 гармонической составляющей в 3,5 раза.

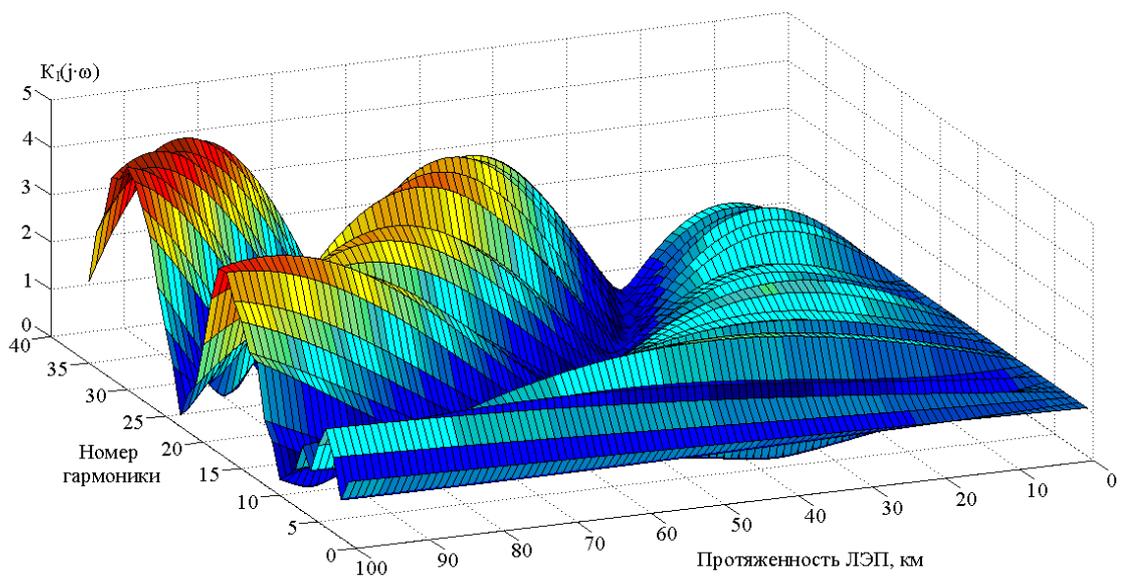


Рисунок 4.23 - АЧХ тока от n -ой гармонической составляющей и от протяженности двухцепной ВЛ

На рисунке 4.24 представлена ФЧХ тока от n-ой гармонической составляющей и от протяженности двухцепной ВЛ, показывающая зависимость изменения фазы от протяженности ВЛ.

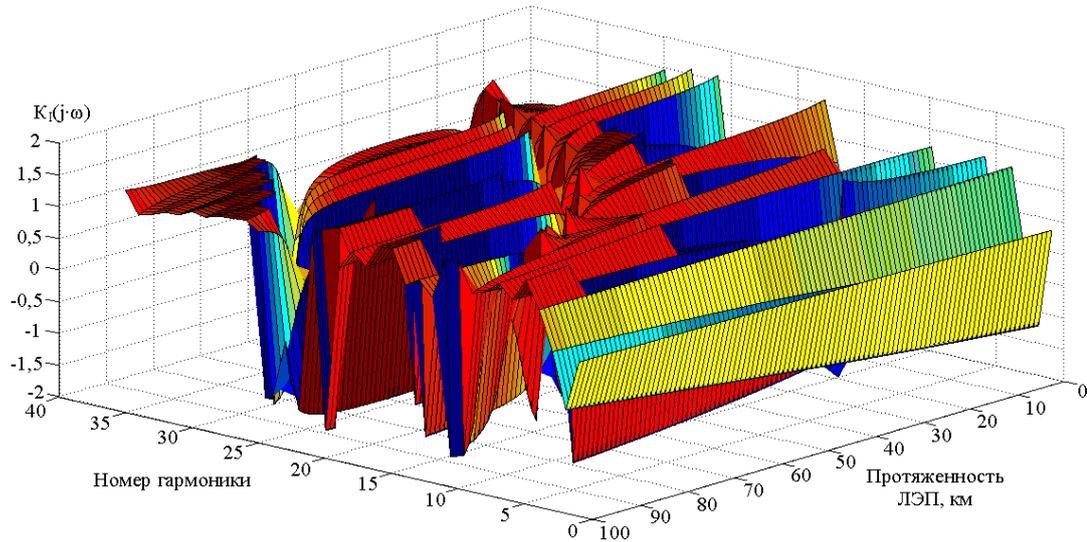


Рисунок 4.24 - ФЧХ напряжения от n-ой гармонической составляющей и от протяженности двухцепной ВЛ

Анализ частотных характеристик двухцепной ВЛ позволяет прогнозировать перенапряжения и принять меры по их устранению. Регулированием фазы напряжения можно добиться оптимальных режимов по управлению и передаче электрической энергии.

4.6 Частотные характеристики двухцепной воздушной линии

Частотные характеристики (ЧХ), иллюстрирующие амплитудные и фазовые зависимости дают возможность проанализировать свойства ВЛ и обнаружить резонансную частоту. Резонанс может произойти при изменении частоты приложенного напряжения, а также при изменении индуктивности или емкости ВЛ.

На рисунке 4.25 показан график, характеризующий зависимость изменения продольных и поперечных параметров ВЛ от частоты с учетом скин-эффекта для линии протяженностью 100 км.

В полных продольных и поперечных сопротивлениях определяющими являются реактивные составляющие, которые имеют период изменения 1700 Гц. Продольное реактивное сопротивление с увеличением частоты увеличивается до своего максимального значения 250 Ом на частоте 400 Гц, затем уменьшается и становится равным нулю на частоте 850 Гц. Между частотами 850 Гц и 1700 Гц продольное реактивное сопротивление имеет емкостной характер. Поперечное реактивное сопротивление, наоборот, имеет индуктивный характер и максимальное значение на основной частоте равно 450 Ом, уменьшаясь с увеличением частоты, становится равным нулю на частоте 600 Гц. На частотах, превышающих 850 Гц, поперечное реактивное сопротивление имеет индуктивный характер.

Поперечные активные сопротивления могут быть значительными на резонансных частотах. В данном случае на резонансной частоте, равной 1700 Гц значение поперечной активной проводимости достигает 600 Ом.

Максимальные значения продольного активного сопротивления с увеличением частоты увеличиваются пропорционально \sqrt{n} [36]. Поскольку продольное активное сопротивление не достигает слишком большого значения, затухание гармоник происходит очень медленно [5]. На частоте 1700 Гц наблюдается резонанс напряжений, продольные и поперечные реактивные сопротивления равны. В этом случае полное сопротивление линии минимально и равно ее активному сопротивлению, а величина тока при неизменном напряжении будет принимать максимальное значение. Поперечные активные сопротивления могут быть значительными на резонансных частотах. В данном случае на резонансной частоте равной 1700 Гц значение поперечного сопротивления достигает 600 Ом.

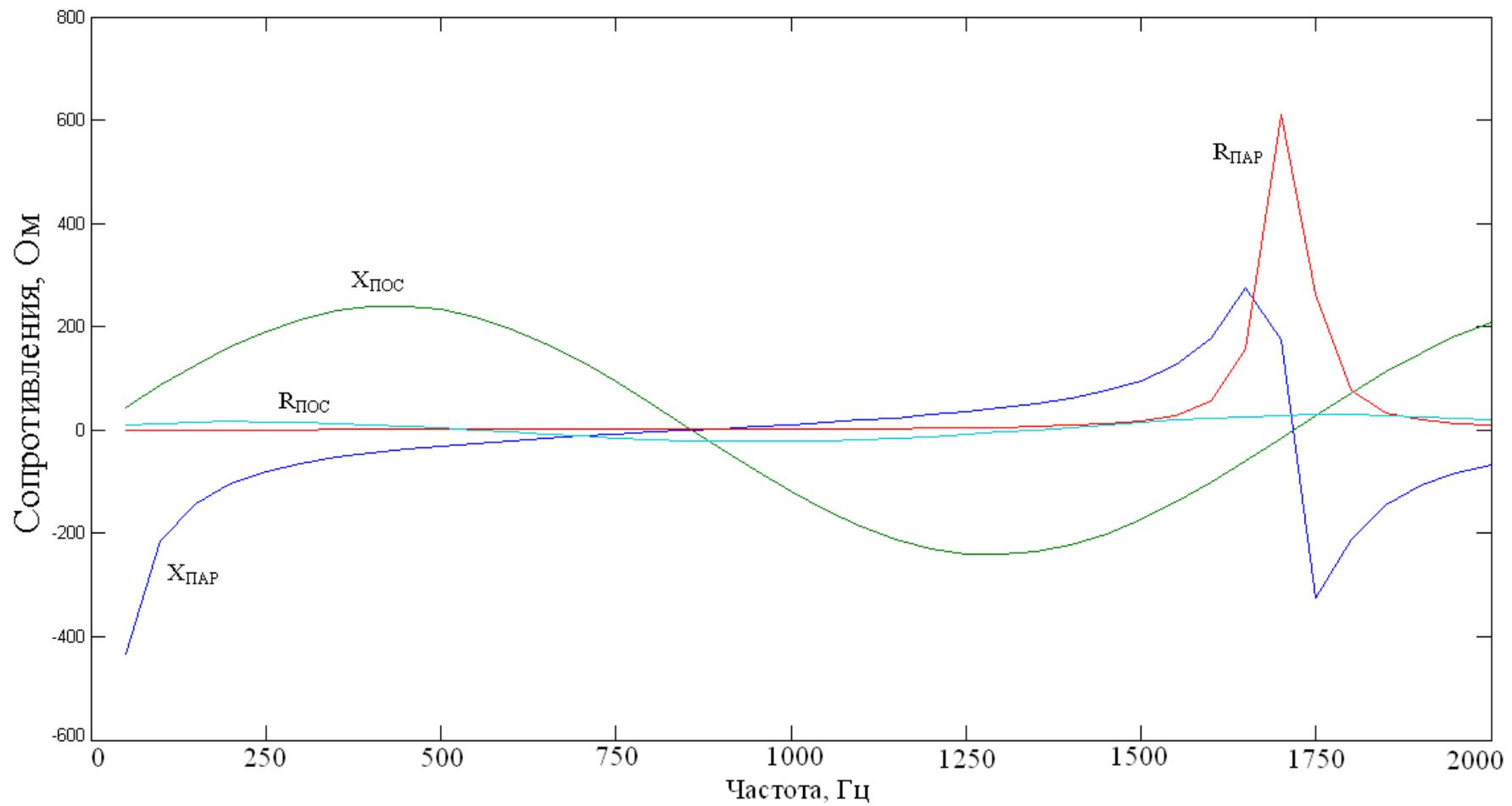


Рисунок 4.25 - Зависимость изменений продольных и поперечных параметров ВЛ от частоты с учетом скин-эффекта

На частоте, равной 400 Гц, продольное реактивное сопротивление имеет максимальное значение, соответственно на этой частоте будут наблюдаться перенапряжения, вызванные ВГ. На частоте 850 Гц в линии будет происходить резонанс токов. Реактивная проводимость линии становится равной нулю, а сама линия приобретает чисто активный характер. В этом случае полная проводимость линии минимальна и определяется ее активной составляющей, а величина тока при неизменном напряжении принимает наименьшее значение [97].

4.7. Выводы по главе 4

1. Экспериментальные исследования подтвердили возможность расчета напряжений и токов в двухцепной ВЛ. Погрешность такого расчета не превышает 0,58 %, в то же время, как традиционная методика расчета этих характеристик электрической энергии выполняется с погрешностью до 1,05 %.

2. Увеличение степени достоверности расчета режимных параметров в двухцепной ВЛ достигается за счет учета распределенности параметров линии электропередачи, что позволяет учесть нелинейность распределения напряжений и токов по исследуемой линии.

3. Экспериментальные исследования показали, что на предприятиях электроснабжения Братского региона показатели коэффициентов n -ых гармонических составляющих 9, 11 и 13-ой гармонической составляющей превышают свое предельно допустимое значение, а суммарный коэффициент гармонических составляющих фазных напряжений в течение суток превышает предельно-допустимое значение, что не соответствует ГОСТ Р 54149 – 2010, что свидетельствует о некорректности расчета токов и напряжений по традиционной методике.

4. Разработанная в ФГБОУ ВПО «БрГУ» математическая модель «Моделирование несинусоидальных режимов двухцепных воздушных линий электропередачи» обеспечивает достоверность получаемых результатов и

может быть использована на различных предприятиях, занимающихся передачей электрической энергии в двухцепных ВЛ.

Заключение

1. Разработана полнофазная схема замещения и математическая модель, учитывающая скин-эффект и электромагнитные связи между конструктивными элементами двухцепной ВЛ.
2. Разработан алгоритм моделирования режимных параметров двухцепных воздушных линий при несинусоидальных режимах.
3. Разработан метод расчёта режимных параметров двухцепной ВЛ с использованием полнофазной схемы замещения в фазных координатах и теории четырнадцатиполюсников при несинусоидальных режимах.
4. Произведены экспериментальные исследования для определения степени достоверности предлагаемой методики расчета режимных параметров в двухцепной ВЛ на примере предприятия «Северные электрические сети» ОАО «Иркутская электросетевая компания».
5. Разработано программное обеспечение для определения количественной оценки напряжений и токов в двухцепной ВЛ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Абраменкова Н.А. Структурный анализ электроэнергетических систем в задачах моделирования и синтеза / Абраменкова Н.А., Воропай Н.И., Заславская Т.Б – Новосибирск: Наука, 1990. – 125 с.
2. Александров Г.Н. Передача электрической энергии переменным током / Г.Н. Александров – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 176 с.
3. Александров Г.Н. Проектирование линий электропередачи сверхвысокого напряжения / Под ред. Г.Н.Александрова и Л.Л. Петерсона. – Л.: Энергоатом, 1983 - 368 с.
4. Альмендеев А.А. Повышение эффективности функционирования двухцепных линий электропередачи: дисс.... к. техн. н. / Альмендеев Андрей Аркадьевич. – Самара, 2009. – 139 с.
5. Аррилага Дж. Гармоники в электрических системах: Пер. с англ. / Дж. Аррилага, Д. Брэдли, П. Боджер – М.: Энергоатомиздат, 1990. - 320с, ил.
6. Астахов Ю.Н. Повышение пропускной способности за счет рационального размещения проводов двухцепных линий электропередачи. / Ю.Н. Астахов, В.А. Веников, Э.Н. Зуев // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1965. № 6.
7. Багиев Г. Л. Основы экономики и управления качеством энергии / Г.Л. Багиев. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1979. - 119 с.
8. Баламетов, А. Б. О повышении эффективности расчета установившихся режимов электрических сетей с линиями электропередачи сверхвысокого напряжения / А. Б. Баламетов // Электричество. - 2004. -№1.-С. 13-15.
9. Баринов В.А. Режимы энергосистемы: методы анализа и управления. / В.А. Баринов, С.А. Совалов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 440 с.

10. Белашов В.Ю. Специальные функции и алгоритмы их вычисления. / В.Ю. Белашов. - Магадан: МПУ, 1997. 335 с.
11. Берман А.П. Расчет несимметричных режимов электрических систем с использованием фазных координат / А.П. Берман // Электричество. 1985. № 12. С. 6 – 12.
12. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – 11-е изд., испр. и доп. – М. : Гардарики, 2007. – 701 с. : ил.
13. Большанин Г.А. Анализ распределения электрической энергии пониженного качества по неразветвленной трехфазной ВЛ. / Г.А. Большанин, Л.Ю. Большанина. // Системы. Методы. Технологии. – 2009. - № 1. – с 85-89.
14. Большанин Г.А. К вопросу о волновой теории передачи электрической энергии по линиям электропередач. / Г.А. Большанин, Л.Ю. Большанина, Е.Г. Марьясова. // Системы. Методы. Технологии. – 2010. - № 3. – с 71-79.
15. Большанин Г.А. Особенности распространения электромагнитного поля по линиям электропередачи в условиях пониженного качества электрической энергии / Г.А. Большанин, Л.Ю. Большанина // Системы. Методы. Технологии. – 2009. - № 2. – с. 56-59.
16. Большанин Г.А. Распределение электрической энергии пониженного качества по участкам электроэнергетических систем: в 2 кн. / Г.А. Большанин – Братск: БрГУ, 2006. – 807 с.
17. Борбат В.С. Цифровая модель электрической сети промышленного предприятия для оптимизации режима напряжения / В. С. Борбат, А. Н. Дойников, И. В. Игнатьев // Исследование качества электроэнергии в сложных электрических системах: Сборник научных трудов. - Братск: БРИИ, 1990. - с.100-107.-с. 37-43.

18. Вагнер К. Ф., Эванс Р.Д.. Метод симметричных составляющих. / К.Ф. Вагнер, Р.Д. Эванс. - М.: Объединенное научно-техническое издательство, 1936. – 48 с.
19. Вайнштейн Л.М., Мельников Н.А. О возможности замены схем со взаимной индукцией эквивалентными без взаимной индукции / Л.М. Вайнштейн, Н.А. Мельников // Электричество. – 1965. – № 5. – С. 16-18.
20. Варламов А.Л. Новая матричная система линий электропередачи и сетей на их основе / А.Л. Варламов, С.А. Сбитнев, В.Е. Шмелев // Электро. - 2002. - № 3. - С. 16-18.
21. Васин В.П. Расчеты режимов электрических систем: Проблемы существования решения. / В.П. Васин – М.: Московский энергетический институт, 1981.
22. Ведерников А.С. Развитие теории и разработка методик анализа режимов несимметричных двухцепных линий электропередачи: дисс.... д.-ра т.н. / Ведерников Александр Сергеевич. – Екатеринбург, 2013. – 279 с.
23. Висящев А.Н. Качество электрической энергии и электромагнитная совместимость в электроэнергетических системах. / А.Н. Висящев – Иркутск, 1997. – Ч.1. – 187с.
24. Висящев А.Н. Расчет режимов электроэнергетических систем в фазных координатах / А.Н. Висящев, А.Б. Осак // Конференция молодых специалистов электроэнергетики – М.: НИЦ ЭНАС, 2000.
25. Гамм, А.З. Методы расчета нормальных режимов электроэнергетических систем на ЭВМ. / А.З. Гамм – Иркутск: ИПИ-СЭИ, 1972. – 186 с.
26. Головщиков В.О. Экспериментальный анализ несинусоидальных режимов работы северо-восточной части ОЭС Сибири / В.О. Головщиков, В.Г. Курбацкий, В.Н. Яременко // Электрические станции. 1988. - №11.
27. ГОСТ Р 54149-2010. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энер-

- гии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 2013-01-01. – М. : Стандартиформ, 2012. – 15 с.
28. Градштейн И.С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. / И.С. Градштейн, И.М. Рыжик – М.: Физматгиз. 1963 г. – 1100 с.
29. Гусейнов А.М. Расчет в фазных координатах несимметричных установившихся режимов в сложных системах. / А.М. Гусейнов // Электричество, 1989, № 3.
30. Евдокунин Г.А. О целесообразности расположении фаз двухцепных линий для снижения пофазной несимметрии. / Г.А. Евдокунин, Ю.В. Чуйков, О.В. Щербаков. – Электрические станции, 1980, № 3.
31. Евдокунин Г.А. Электрические системы и сети. / Г.А. Евдокунин. – Спб: Изд-во Сизова М.П., 2001. – 304 с.
32. Ершевич А.В. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / А.В. Ершевич, А.Н. Зейлигер, Г.А. Илларионов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 352 с.
33. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 1994.-266 с.
34. Жежеленко И.В. Вопросы качества электроэнергии в электроустановках. / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко. - Мариуполь: ГІГТУ, 1996.-173 с.
35. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. / И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2000. - 331 с.
36. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. - 3-е изд., перераб. и доп. / И.В. Жежеленко. – М: Энергоатомиздат, 2000.- 252 с., 74 ил.
37. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. / И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 1986. - 132 с.

38. Железко Ю.С. Высшие гармоники и напряжения обратной последовательности в энергосистемах Сибири и Урала. / Ю.С. Железко, Е.И. Курдюков // Электричество. 1989. - №7.
39. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии. / Ю.С. Железко. – М.: Энергоатомиздат, 1985. - 224 с., ил.
40. Железко Ю.С. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов. / Ю.С. Железко, А.В. Артемьев, О.В. Савченко. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. – 280 с.: ил.
41. Жуков Л.А. Установившиеся режимы сложных электрических сетей и систем: методы расчетов. / Л.А. Жуков, И.П. Стратан – М.: Энергия, 1979.
42. Закарюкин В.П. Сложносимметричные режимы электрических систем. / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков – Иркутск: Издательство Иркут. гос. ун-та. – 2005. – 273 с.
43. Зуев Э. Н. Параметры и режимные характеристики линий электропередачи. / Э.Н. Зуев – М.: Моск. энерг. ин-т, 1987. – 76 с.
44. Костин В.Н. Передача и распределение электроэнергии: Учеб. пособие / В. Н. Костин, Е. В. Распопов, Е. А. Родченко – СПб.: СЗТУ, 2003 – 147 с.
45. Инструкция по выбору изоляции электроустановок. РД 34.51.101 – 90. – М: СПО Союзтехэнерго, 1990.
46. Инструкция по выбору изоляции электроустановок. РД 34.51.101 – 90. – М: СПО Союзтехэнерго, 1990.
47. Иоссель Ю.Я. Расчет электрической емкости / Ю. Я. Иоссель, Э. С. Кочанов, М. Г. Струнский. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1981. – 288 с., ил.

48. Калантаров П.Л. Расчет индуктивностей: Справочная книга. – 3-е изд., перераб. и доп. / П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин - Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение. 1986. – 488 с.: ил.
49. Колесников Э.В. Скин-эффект в цилиндре, помещенном во внешнее магнитное поле / Э.В. Колесников // Электричество, 1995. -№3. - С. 61-68.
50. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров. / Г. Корн, Т. Корн - М.: Наука, 1984.
51. Костенко М.В. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения. / М.В. Костенко, Л.С. Перельман, Ю.П. Шкарин. – М.: Энергия, 1973. – 272с.
52. Кошляков Н.С. Уравнения в частных производных математической физики. / Н.С. Кошляков – М.: «Высшая школа», 1970.
53. Крайчик Ю.С. Натурные исследования совместной работы преобразователей с шунтовой конденсаторной батареей и кабельными линиями / Ю.С. Крайчик, В.Т. Минин, Е.В. Карань, Л.А. Кучумов // ТРУДЫ НИИПТ. Л.: Энергоатомиздат ЛО, 1988.С.67-71.
54. Крюков А.В. Моделирование электромагнитных влияний на смежные ЛЭП на основе расчета режимов энергосистемы в фазных координатах: монография. / А.В. Крюков, В.П. Закарюкин // Иркутск : Изд-во Иркут. гос. ун-та путей сообщения. – 2009. – 120 с.
55. Кучумов Л.А. Резонансные явления в кабельных электрических сетях городов и промышленных предприятий при однофазных замыканиях на землю. / Л.А. Кучумов, А.А. Кузнецов // Материалы Всероссийской научно-техн. конф. «Городские электрические сети в современных условиях». РНТОЭ, Санкт-Петербург, 1998г. с.70-74.
56. Лосев С.Б. Вычисление электрических величин в несимметричных режимах электрических систем. / С.Б. Лосев, А.Б. Чернин. - М.: Энергоатомиздат, 1983. – 528 с.

57. Лосев С.Б. Об использовании фазных координат при расчете сложно несимметричных режимов / С.Б. Лосев // Электричество. 1979. № 1. С. 15 – 23.
58. Ляпунов А.М. Общая задача об устойчивости движения / А.М. Ляпунов. – М.-Л., 1950. – 472 с.
59. Мельников Н.А. Матричный метод анализа электрических цепей. / Н.А. Мельников – М.: Энергия, 1972. – 230 с.
60. Мельников Н.А. Проектирование электрической части воздушной линии электропередачи 330-500кВ / Н.А. Мельников, С.С. Рокотян, А.Н. Шеренцис. – М.: Энергия, 1974. – 472с.
61. Микуцкий Г.В. Линейные тракты каналов высокочастотной связи по линиям электропередачи / Г.В. Микуцкий, Ю.П. Шкарин. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 200 с.
62. Мисриханов М.Ш. Взаимовлияние двухцепных линий и их воздействие на режим электрических систем / М.Ш. Мисриханов, В.А. Попов, Н.Н. Якимчук // Электрические станции, 2001, №2.
63. Музыченко А.Д. Устройства для измерения несимметрии в трехфазных сетях / А.Д. Музыченко, В.Ф.Буденный // Устройства преобразовательной техники. – Киев: Наукова думка. – 1969. – Вып. 3. – с. 292 -299.
64. Насыров Р.Р. Исследование влияния источников высших гармоник на качество электроэнергии в электроэнергетических системах 220-500 кВ / Р.Р. Насыров, И.И. Карташев, Б.В. Олексюк, М.Г. Симуткин, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов // Электричество. 2013. № 1. С. 13-18.
65. Неклепаев Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: учеб. пособие для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. / Б.Н. Неклепаев, И.П. Крючков – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.: ил.
66. Плотников М.П. Алгоритм построения математической модели однородного участка двухцепной линии электропередачи в условиях пониженного качества электрической энергии. / М.П. Плотников, Г.А.

- Большанин // Электротехнические комплексы и системы управления. 2012. № 4. С. 34-40.
67. Плотников М.П. Математическая модель трехфазной двухцепной ВЛ. / М.П. Плотников, Г.А. Большанин // Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири: материалы XI (XXXIII) Всероссийской научно-технической конференции. – Братск: Изд.-во БрГУ, 2012. – 183 с.
68. Плотников М.П. Несинусоидальность напряжения как один из факторов ухудшения качества электрической энергии. / М.П. Плотников // Сборник научных трудов Sworld. Материалы международной научно-практической конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2011». – Выпуск 4. Том 9. – Одесса: Черноморье, 2011. – 96 с.
69. Плотников М.П. Распределение электрической энергии вдоль неоднородного участка двухцепной линии электропередачи. / М.П. Плотников, Г.А. Большанин // Электротехнические комплексы и системы управления. 2013. № 1. С. 14-20.
70. Плотников М.П. Распределение напряжения по двухцепной линии электропередачи. / М.П. Плотников, Г.А. Большанин // Системы. Методы. Технологии. 2012. № 4 (16). С. 66-70
71. Плотников М.П. Повышение эффективности функционирования двухцепных линий. / М.П. Плотников // MATERIALY Międzynarodowej Naukowi-Praktycznej Konferencji Postępów w nauce. Nowe poglądy, problemy, innowacje/(29.07.2012 – 31.07.2012) – Łódź, 2012. – 64 str.
72. Плотников М.П. Подход к расчету высших гармоник и системное прогнозирование в электроэнергетике. / М.П. Плотников // Н 34 «Наука и техника в современном мире»: материалы международной заочной научно-практической конференции. (05 октября 2011 г.) – Новосибирск: Изд. «Априори», 2011. – 130 с.

73. Плотников М.П. Расчет токов и напряжений по двухцепной воздушной линии электропередачи / М.П. Плотников, Г.А. Большанин // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014615987 от 06.06.2014. М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). – 2014.
74. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. Минэнерго России № 6 от 13.01.03.
75. Правила устройства электроустановок. 7-ое издание. М: Главгосэнергонадзор России, 2001.
76. Рывкин А.А. Справочник по математике для учащихся-заочников средних специальных учебных заведений. / А.А. Рывкин. А.З. Рывкин, Л.С. Хренов – Москва. Издательство «Высшая школа», 1964. – 520 с.
77. Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения: учебник для вузов / Ю.П. Рыжов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 488 с.: ил.
78. Слюсаренко С. Г. Модификация алгоритма расчета установившихся режимов электрических систем на основе поочередного уточнения потокораспределения и напряжений / С. Г. Слюсаренко // Процессы и режимы электрических систем: Межвузовский научно-технический сборник. - Томск: ТПИ, 1990.
79. Смирнов С.С. Высшие гармоники в сетях высокого напряжения. / С.С. Смирнов -Новосибирск: Наука, 2010.- 327 с.
80. Солдатов В. А. Моделирование сложных видов несимметрии в распределительных сетях 10 кВ методом фазных координат / В.А. Солдатов, Н.М. Попов // Электротехника. - 2003. № 10. С. 35-39.
81. Солдатов В.А. Расчет и оптимизация параметров режимов управляемых многопроводных линий. / В.А. Солдатов, В.М. Постолатий. - Кичинец, «Штиинца», 1990. 239 с.
82. Справочник по электрическим сетям 35 – 1150 кВ. – М.: ОАО «Энергосетьпроект», 2004. – 110 с.

83. Тарасов, В.И. Методы минимизации ньютоновского типа для расчета установившихся режимов электроэнергетических систем. / В.И. Тарасов. – Новосибирск: Наука, 2001. – 168 с.
84. Тимофеев Д.В. Режимы в электрических системах с тяговыми нагрузками. / Д.В. Тимофеев. – М.: Энергия, 1972.-296 с.
85. Тульский В.Н. Развитие методики определения фактического вклада при оценке качества электроэнергии в точке общего присоединения: дисс.... к.т.н. / Тульский Владимир Николаевич. – Москва. 2004.-134 с.
86. Федин В.Т. Электропередачи переменного тока повышенной мощности / В.Т. Федин, Ю.Д. Головач, Ю.И. Селиверстов // Мн.: «Навука і тэхніка», 1993. – 224 с.
87. Шидловский А. К. Симметрирование однофазных и двухплечевых электротехнологических установок. / А.К. Шидловский, Б.П. Борисов. – Киев: Наукова думка. – 1977. – 159с.
88. Шидловский А. К. Таблицы симметричных составляющих. / А.К. Шидловский, А.Д. Музыченко. – Киев: Наукова думка. –1976. – 204 с.
89. Шидловский А.К. Электромагнитная совместимость электроприемников промышленных предприятий. / А.К. Шидловский. - Киев, Наукова думка, 1992. - 204 с.
90. Babak B. Designing passive harmonic filters for an aluminium smelting plant / B.Babak // IEEE Transactions on industry application, Vol. 47, No. 2, 2011, - P. 973 - 983.
91. Bibliography of power systems harmonics // IEEE Power systems harmonics working group report, part 1,IEEE Trans, on Power Apparatus and Systems, 1984, PAS 109, -P. 2460-2462.
92. Gary C. General report of group 36. / C. Gary // Electra, - 1982. - №85. - P. 183-186.
93. Grady W. M. Survey of Active Power Line Conditioning Methodologies / W. M. Grady, M.J. Sarnotyj, A. H. Noyola // IEEE Trans, on Power Delivery, vol. 5, no 3, pp. 1536-1542, July 1990.

94. Gwozdz M. Compensate for Loading Effects on Power Lines with a DSP-Controlled Active Shunt Filter / M. Gwozdz, R. Porada. // Analog devices Inc. – 1999. - № 9. Oct., - Vol. 33.
95. Harmonic and reactive power compensation based on the generalized instantaneous reactive power theory for three - phase four -wire systems // IEEE Trans. - 1998. - Vol. PE-13. - № 6. - P.I 174-1181.
96. Heydt G.T. Harmonic Power Flow Studies - Part I. Formulation and solution / G.T. Heydt, D. Xia // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 6, 1982, - P. 1257 - 1265.
97. Heydt G.T. Harmonic Power Flow Studies - Part II. Implementation and Practical Application / G.T. Heydt, D. Xia // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 6, 1982, - P. 1266 - 1270.
98. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions // The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010, - P. 52.
99. IEEE Std 519-1992 IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, 1992.
100. Kanalik M. Computation of harmonic flows in three-phase systems / M. Kanalik, M. Kolcun // Acta Electrotechnica et Informatica No. 3, vol. 7, 2007.
101. Khrushchev Y.V. The Analysis of the sensitivity of an overhead line parameter identifying algorithms to the highest harmonics in the current and voltage instantaneous values / Y.V. Khrushchev, N.L. Barseva, L.V. Abramochkina, A.V. Pankratov // IEEE CONFERENCE PUBLICATIONS, Publication Year, 2014. – P. 79-82
102. Laughton M.A. Analysis of unbalanced polyphase networks by the method of phase coordinates. Part 1. System representation in phase frame of reference / M.A. Laughton // Proc. IEEE. – V. 115. – No. 8. – 1968. – Pp. 1163 – 1172.

103. Modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks. Part I: Concepts, models and simulation techniques // IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, 1996, - P. 452-465.
104. Modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks. Part II: Sample systems and examples // IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, 1996, - P. 466-474.
105. Modelling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks, Part I: Concepts, Models and Simulation Techniques, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 11, pp. 452-465, January 1996.
106. Paris L. Die Zukunft der Ultra – Hochspannungsleitungen / L. Paris. // Elektrizitätswirtschaft. – 1970. № 19. – S. 514-520.
107. Power system harmonics: an overview // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 8, 1983, - P. 2455 - 2460.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(Справочное)

Преобразование математической модели

$$\begin{aligned}
 -d\dot{I}_{A'n} = & \dot{U}_{A'n} \cdot (G_{0A'0n} \cdot dl + jn\omega \cdot C_{0A'0n} \cdot dl) + \dot{U}_{A'B'n} \cdot (G_{0A'B'n} \cdot dl + jn\omega \cdot C_{0A'B'n} \cdot dl) + \\
 & + \dot{U}_{A'A''n} \cdot (G_{0A'A''n} \cdot dl + jn\omega \cdot C_{0A'A''n} \cdot dl) + \dot{U}_{A'B''n} \cdot (G_{0A'B''n} \cdot dl + jn\omega \cdot C_{0A'B''n} \cdot dl) - \\
 & - \dot{U}_{C'A'n} \cdot (G_{0C'A'n} \cdot dl + jn\omega \cdot C_{0C'A'n} \cdot dl) - \dot{U}_{C''A'n} \cdot (G_{0C''A'n} \cdot dl + jn\omega \cdot C_{0C''A'n} \cdot dl); \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 -d\dot{U}_{A'n} = & \dot{I}_{A'n} \cdot [R_{0A'n} \cdot dl + jn\omega \cdot L_{0A'n} \cdot dl] + j\dot{I}_{B'n} \cdot n\omega \cdot M_{0A'B'n} \cdot dl + j\dot{I}_{C'n} \cdot n\omega \cdot M_{0C'A'n} \cdot dl + \\
 & + j\dot{I}_{A''n} \cdot n\omega \cdot M_{0A'A''n} \cdot dl + j\dot{I}_{B''n} \cdot n\omega \cdot M_{0A'B''n} \cdot dl + j\dot{I}_{C''n} \cdot n\omega \cdot M_{0C''A'n} \cdot dl; \quad (2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 -d\dot{U}_{A'B'n} = & \dot{I}_{A'n} \cdot [R_{0A'n} \cdot dl + jn\omega \cdot (L_{0A'n} - M_{0A'B'n}) \cdot dl] + j\dot{I}_{C'n} \cdot n\omega \cdot (M_{0C'A'n} - M_{0B'C'n}) \cdot dl + \\
 & + j\dot{I}_{A''n} \cdot n\omega \cdot (M_{0A'A''n} - M_{0B'A''n}) \cdot dl + j\dot{I}_{B''n} \cdot n\omega \cdot (M_{0A'B''n} - M_{0B'B''n}) \cdot dl + \\
 & + j\dot{I}_{C''n} \cdot n\omega \cdot (M_{0C''A'n} - M_{0B'C''n}) \cdot dl - \dot{I}_{B'n} \cdot [R_{0B'n} \cdot dl + jn\omega \cdot (L_{0B'n} - M_{0A'B'n}) \cdot dl]; \quad (3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 -d\dot{U}_{A'A''n} = & \dot{I}_{A'n} \cdot [R_{0A'n} \cdot dl + jn\omega \cdot (L_{0A'n} - M_{0A'A''n}) \cdot dl] + j\dot{I}_{B'n} \cdot n\omega \cdot (M_{0A'B'n} - M_{0B'A''n}) \cdot dl + \\
 & + j\dot{I}_{C'n} \cdot n\omega \cdot (M_{0C'A'n} - M_{0C''A'n}) \cdot dl + j\dot{I}_{B''n} \cdot n\omega \cdot (M_{0A'B''n} - M_{0A''B''n}) \cdot dl + \\
 & + j\dot{I}_{C''n} \cdot n\omega \cdot (M_{0C''A'n} - M_{0C''A''n}) \cdot dl - \dot{I}_{A''n} \cdot [R_{0A''n} \cdot dl + jn\omega \cdot (L_{0A''n} - M_{0A'A''n}) \cdot dl]; \quad (4)
 \end{aligned}$$

где $\dot{I}_{A'n}, \dot{I}_{B'n}, \dot{I}_{C'n}, \dot{I}_{A''n}, \dot{I}_{B''n}, \dot{I}_{C''n}$ - действующие значения линейных токов на комплексной плоскости на частоте п-ой гармонической составляющей; $\dot{U}_{A'n}$ - действующие значения фазных напряжений на комплексной плоскости на частоте п-ой гармонической составляющей; $\dot{U}_{A'B'n}, \dot{U}_{A'A''n}, \dot{U}_{A'B''n}, \dot{U}_{B'C'n}, \dot{U}_{B'A''n}, \dot{U}_{B'B''n}, \dot{U}_{B'C''n}, \dot{U}_{C'A'n}, \dot{U}_{C'A''n}, \dot{U}_{C'C'n}, \dot{U}_{A''B''n}, \dot{U}_{B''C'n}, \dot{U}_{B''C''n}, \dot{U}_{C''A'n}, \dot{U}_{C''A''n}$ - действующие значения линейных напряжений на комплексной плоскости на частоте п-ой гармонической составляющей;

Для однородного участка двухцепной ВЛ единичной протяженности уравнения математической модели можно переписать так:

$$-\frac{d\dot{I}_{A'n}}{dl} = \dot{U}_{A'n} \cdot (G_{0A'0n} + jn\omega \cdot C_{0A'0n}) + \dot{U}_{A'B'n} \cdot (G_{0A'B'n} + jn\omega \cdot C_{0A'B'n}) +$$

$$\begin{aligned}
& + \dot{U}_{A'A''_n} \cdot (G_{0A'A''_n} + jn\omega \cdot C_{0A'A''_n}) + \dot{U}_{A'B''_n} \cdot (G_{0A'B''_n} + jn\omega \cdot C_{0A'B''_n}) - \\
& - \dot{U}_{C'A'_n} \cdot (G_{0C'A'_n} + jn\omega \cdot C_{0C'A'_n}) - \dot{U}_{C''A''_n} \cdot (G_{0C''A''_n} + jn\omega \cdot C_{0C''A''_n}). \quad (5)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
-\frac{d\dot{U}_{A'_n}}{dl} = & \dot{I}_{A'_n} \cdot [R_{0A'_n} + jn\omega \cdot L_{0A'_n}] + j\dot{I}_{B''_n} \cdot n\omega \cdot M_{0A'B''_n} + j\dot{I}_{C'_n} \cdot n\omega \cdot M_{0C'A'_n} + \\
& + j\dot{I}_{A''_n} \cdot n\omega \cdot M_{0A'A''_n} + j\dot{I}_{B''_n} \cdot n\omega \cdot M_{0A'B''_n} + j\dot{I}_{C''_n} \cdot n\omega \cdot M_{0C''A''_n}; \quad (6)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
-\frac{d\dot{U}_{A'B'_n}}{dl} = & \dot{I}_{A'_n} \cdot [R_{0A'_n} + jn\omega \cdot (L_{0A'_n} - M_{0A'B'_n})] + j\dot{I}_{C'_n} \cdot n\omega \cdot (M_{0C'A'_n} - M_{0B'C'_n}) + \\
& + j\dot{I}_{A''_n} \cdot n\omega \cdot (M_{0A'A''_n} - M_{0B'A''_n}) + j\dot{I}_{B''_n} \cdot n\omega \cdot (M_{0A'B''_n} - M_{0B'B''_n}) + \\
& + j\dot{I}_{C''_n} \cdot n\omega \cdot (M_{0C''A''_n} - M_{0B''C''_n}) - \dot{I}_{B''_n} \cdot [R_{0B''_n} + jn\omega \cdot (L_{0B''_n} - M_{0A'B''_n})]; \quad (7)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
-\frac{d\dot{U}_{A'A''_n}}{dl} = & \dot{I}_{A'_n} \cdot [R_{0A'_n} + jn\omega \cdot (L_{0A'_n} - M_{0A'A''_n})] + j\dot{I}_{B''_n} \cdot n\omega \cdot (M_{0A'B''_n} - M_{0B'A''_n}) + \\
& + j\dot{I}_{C'_n} \cdot n\omega \cdot (M_{0C'A'_n} - M_{0C''A''_n}) + j\dot{I}_{B''_n} \cdot n\omega \cdot (M_{0A'B''_n} - M_{0A''B''_n}) + \\
& + j\dot{I}_{C''_n} \cdot n\omega \cdot (M_{0C''A''_n} - M_{0C'A'_n}) - \dot{I}_{A''_n} \cdot [R_{0A''_n} + jn\omega \cdot (L_{0A''_n} - M_{0A'A''_n})]. \quad (8)
\end{aligned}$$

Уравнения для других линий составляются аналогично.

В скобках уравнения (5) содержатся полные проводимости, характеризующие электромагнитные связи между проводами и поверхностью земли. Полную проводимость электромагнитной связи линейного провода A' с землей на частоте n -ой гармонической составляющей определяют:

$$\underline{Y}_{0A'0n} = G_{0A'0n} + jn\omega \cdot C_{0A'0n}. \quad (9)$$

Продольные параметры ВЛ на частоте n -ой гармонической составляющей представляют собой полное погонное сопротивление провода:

$$\underline{Z}_{0A'_n} = R_{0A'_n} + jn\omega \cdot L_{0A'_n}; \quad (10)$$

Для определения взаимных сопротивлений между фазными проводами следует использовать равенства:

$$\underline{Z}_{0A'B'_n} = jn\omega \cdot M_{0A'B'_n}; \quad (11)$$

$$\underline{Z}_{0A'A''_n} = jn\omega \cdot M_{0A'A''_n}; \quad (12)$$

Уравнения для других линий составляются аналогично.

С учетом этих уравнений математическая модель преобразуется в следующий вид:

$$-\frac{d\dot{i}_{A'n}}{dl} = \dot{U}_{A'n} \cdot \underline{Y}_{0A'0n} + \dot{U}_{A'B'n} \cdot \underline{Y}_{0A'B'n} + \dot{U}_{A'A'n} \cdot \underline{Y}_{0A'A'n} + \dot{U}_{A'B''n} \cdot \underline{Y}_{0A'B''n} - \dot{U}_{C'A'n} \cdot \underline{Y}_{0C'A'n} - \dot{U}_{C''A'n} \cdot \underline{Y}_{0C''A'n}; \quad (13)$$

$$-\frac{d\dot{U}_{A'n}}{dl} = \dot{i}_{A'n} \cdot \underline{Z}_{0A'n} + \dot{i}_{B'n} \cdot \underline{Z}_{0A'B'n} + \dot{i}_{C'n} \cdot \underline{Z}_{0C'A'n} + \dot{i}_{A''n} \cdot \underline{Z}_{0A'A'n} + \dot{i}_{B''n} \cdot \underline{Z}_{0A'B''n} + \dot{i}_{C''n} \cdot \underline{Z}_{0C''A'n}; \quad (14)$$

$$-\frac{d\dot{U}_{A'B'n}}{dl} = \dot{i}_{A'n} \cdot (\underline{Z}_{0A'0n} - \underline{Z}_{0A'B'n}) + \dot{i}_{C'n} \cdot (\underline{Z}_{0C'A'n} - \underline{Z}_{0B'C'n}) + \dot{i}_{A''n} \cdot (\underline{Z}_{0A'A'n} - \underline{Z}_{0B'A'n}) + \dot{i}_{B''n} \cdot (\underline{Z}_{0A'B''n} - \underline{Z}_{0B'B''n}) + \dot{i}_{C''n} \cdot (\underline{Z}_{0C''A'n} - \underline{Z}_{0B'C''n}) - \dot{i}_{B'n} \cdot (\underline{Z}_{0B'0n} - \underline{Z}_{0A'B'n}); \quad (15)$$

$$-\frac{d\dot{U}_{A'A'n}}{dl} = \dot{i}_{A'n} \cdot (\underline{Z}_{0A'0n} - \underline{Z}_{0A'A'n}) + \dot{i}_{B'n} \cdot (\underline{Z}_{0A'B'n} - \underline{Z}_{0B'A'n}) + \dot{i}_{C'n} \cdot (\underline{Z}_{0C'A'n} - \underline{Z}_{0C''A'n}) + \dot{i}_{B''n} \cdot (\underline{Z}_{0A'B''n} - \underline{Z}_{0A''B''n}) + \dot{i}_{C''n} \cdot (\underline{Z}_{0C''A'n} - \underline{Z}_{0C''A'n}) - \dot{i}_{A''n} \cdot (\underline{Z}_{0A''0n} - \underline{Z}_{0A''A'n}); \quad (16)$$

Уравнения для других линий составляются аналогично.

Продифференцируем эти уравнения по переменной l :

Уравнения токов примут следующий вид:

$$-\frac{d^2\dot{i}_{A'n}}{dl^2} = \underline{Y}_{0A'0n} \frac{d\dot{U}_{A'n}}{dl} + \underline{Y}_{0A'B'n} \frac{d\dot{U}_{A'B'n}}{dl} + \underline{Y}_{0A'A'n} \frac{d\dot{U}_{A'A'n}}{dl} + \underline{Y}_{0A'B''n} \frac{d\dot{U}_{A'B''n}}{dl} - \underline{Y}_{0C'A'n} \frac{d\dot{U}_{C'A'n}}{dl} - \underline{Y}_{0C''A'n} \frac{d\dot{U}_{C''A'n}}{dl}; \quad (17)$$

$$-\frac{d^2\dot{U}_{A'n}}{dl^2} = \underline{Z}_{0A'n} \frac{d\dot{i}_{A'n}}{dl} + \underline{Z}_{0A'B'n} \frac{d\dot{i}_{B'n}}{dl} + \underline{Z}_{0C'A'n} \frac{d\dot{i}_{C'n}}{dl} + \underline{Z}_{0A'A'n} \frac{d\dot{i}_{A''n}}{dl} + \underline{Z}_{0A'B''n} \frac{d\dot{i}_{B''n}}{dl} + \underline{Z}_{0C''A'n} \frac{d\dot{i}_{C''n}}{dl}; \quad (18)$$

$$-\frac{d^2\dot{U}_{A'B'n}}{dl^2} = (\underline{Z}_{0A'0n} - \underline{Z}_{0A'B'n}) \frac{d\dot{i}_{A'n}}{dl} + (\underline{Z}_{0C'A'n} - \underline{Z}_{0B'C'n}) \frac{d\dot{i}_{C'n}}{dl} + (\underline{Z}_{0A'A'n} - \underline{Z}_{0B'A'n}) \frac{d\dot{i}_{A''n}}{dl} + (\underline{Z}_{0A'B''n} - \underline{Z}_{0B'B''n}) \frac{d\dot{i}_{B''n}}{dl} + (\underline{Z}_{0C''A'n} - \underline{Z}_{0B'C''n}) \frac{d\dot{i}_{C''n}}{dl} - (\underline{Z}_{0B'0n} - \underline{Z}_{0A'B'n}) \frac{d\dot{i}_{B'n}}{dl}; \quad (19)$$

$$\begin{aligned}
-\frac{d^2\dot{U}^{A'A''n}}{dl^2} = & (\underline{Z}_{0A'0n} - \underline{Z}_{0A'A''n}) \frac{d\dot{I}^{A'n}}{dl} + (\underline{Z}_{0A'B'n} - \underline{Z}_{0B'A''n}) \frac{d\dot{I}^{B'n}}{dl} + (\underline{Z}_{0C'A'n} - \underline{Z}_{0C'A''n}) \frac{d\dot{I}^{C'n}}{dl} + \\
& + (\underline{Z}_{0A'B''n} - \underline{Z}_{0A''B'n}) \frac{d\dot{I}^{B''n}}{dl} + (\underline{Z}_{0C''A'n} - \underline{Z}_{0C''A''n}) \frac{d\dot{I}^{C''n}}{dl} - (\underline{Z}_{0A'0n} - \underline{Z}_{0A'A''n}) \frac{d\dot{I}^{A''n}}{dl}; \quad (20)
\end{aligned}$$

Теперь следует подставить в уравнения (17)-(20) описанные выше формулы тока и напряжения (13)-(16). В результате получим:

$$\begin{aligned}
\frac{d^2\dot{I}^{A'n}}{dl^2} = & \dot{I}_{A'n} \cdot \underline{Z}_{0A'n} \underline{Y}_{0A'0n} + \dot{I}_{B'n} \cdot \underline{Z}_{0A'B'n} \underline{Y}_{0A'0n} + \dot{I}_{C'n} \cdot \underline{Z}_{0C'A'n} \underline{Y}_{0A'0n} + \\
& + \dot{I}_{A''n} \cdot \underline{Z}_{0A'A''n} \underline{Y}_{0A'0n} + \dot{I}_{B''n} \cdot \underline{Z}_{0A'B''n} \underline{Y}_{0A'0n} + \dot{I}_{C''n} \cdot \underline{Z}_{0C''A'n} \underline{Y}_{0A'0n} + \\
& + \dot{I}_{A'n} \cdot (\underline{Z}_{0A'0n} - \underline{Z}_{0A'B'n}) \underline{Y}_{0A'B'n} + \dot{I}_{C'n} \cdot (\underline{Z}_{0C'A'n} - \underline{Z}_{0B'C'n}) \underline{Y}_{0A'B'n} + \\
& + \dot{I}_{A''n} \cdot (\underline{Z}_{0A'A''n} - \underline{Z}_{0B'A''n}) \underline{Y}_{0A'B'n} + \dot{I}_{B''n} \cdot (\underline{Z}_{0A'B''n} - \underline{Z}_{0B'B''n}) \underline{Y}_{0A'B'n} + \\
& + \dot{I}_{C''n} \cdot (\underline{Z}_{0C''A'n} - \underline{Z}_{0B'C''n}) \underline{Y}_{0A'B'n} - \dot{I}_{B'n} \cdot (\underline{Z}_{0B'0n} - \underline{Z}_{0A'B'n}) \underline{Y}_{0A'B'n} + \\
& + \dot{I}_{A'n} \cdot (\underline{Z}_{0A'0n} - \underline{Z}_{0A'A''n}) \underline{Y}_{0A'A''n} + \dot{I}_{B'n} \cdot (\underline{Z}_{0A'B'n} - \underline{Z}_{0B'A''n}) \underline{Y}_{0A'A''n} + \\
& + \dot{I}_{C'n} \cdot (\underline{Z}_{0C'A'n} - \underline{Z}_{0C'A''n}) \underline{Y}_{0A'A''n} + \dot{I}_{B''n} \cdot (\underline{Z}_{0A'B''n} - \underline{Z}_{0A''B'n}) \underline{Y}_{0A'A''n} + \\
& + \dot{I}_{C''n} \cdot (\underline{Z}_{0C''A'n} - \underline{Z}_{0C''A''n}) \underline{Y}_{0A'A''n} - \dot{I}_{A''n} \cdot (\underline{Z}_{0A'0n} - \underline{Z}_{0A'A''n}) \underline{Y}_{0A'A''n} + \\
& + \dot{I}_{A'n} \cdot (\underline{Z}_{0A'0n} - \underline{Z}_{0A'B''n}) \underline{Y}_{0A'B''n} + \dot{I}_{B'n} \cdot (\underline{Z}_{0A'B'n} - \underline{Z}_{0B'B''n}) \underline{Y}_{0A'B''n} + \\
& + \dot{I}_{C'n} \cdot (\underline{Z}_{0C'A'n} - \underline{Z}_{0B'C''n}) \underline{Y}_{0A'B''n} + \dot{I}_{A''n} \cdot (\underline{Z}_{0A'A''n} - \underline{Z}_{0A''B'n}) \underline{Y}_{0A'B''n} + \\
& + \dot{I}_{C''n} \cdot (\underline{Z}_{0C''A'n} - \underline{Z}_{0B'C''n}) \underline{Y}_{0A'B''n} - \dot{I}_{B''n} \cdot (\underline{Z}_{0B'0n} - \underline{Z}_{0A'B''n}) \underline{Y}_{0A'B''n} - \\
& - \dot{I}_{C'n} \cdot (\underline{Z}_{0C'0n} - \underline{Z}_{0C'A'n}) \underline{Y}_{0C'A'n} - \dot{I}_{B'n} \cdot (\underline{Z}_{0B'C'n} - \underline{Z}_{0A'B'n}) \underline{Y}_{0C'A'n} - \\
& - \dot{I}_{A''n} \cdot (\underline{Z}_{0C'A''n} - \underline{Z}_{0A'A''n}) \underline{Y}_{0C'A'n} - \dot{I}_{B''n} \cdot (\underline{Z}_{0B'C''n} - \underline{Z}_{0A'B''n}) \underline{Y}_{0C'A'n} - \\
& - \dot{I}_{C''n} \cdot (\underline{Z}_{0C''C''n} - \underline{Z}_{0C''A'n}) \underline{Y}_{0C'A'n} + \dot{I}_{A'n} \cdot (\underline{Z}_{0A'0n} - \underline{Z}_{0C'A'n}) \underline{Y}_{0C'A'n} - \\
& - \dot{I}_{C''n} \cdot (\underline{Z}_{0C''0n} - \underline{Z}_{0C''A'n}) \underline{Y}_{0C''A'n} - \dot{I}_{B'n} \cdot (\underline{Z}_{0B'C''n} - \underline{Z}_{0A'B'n}) \underline{Y}_{0C''A'n} - \\
& - \dot{I}_{C'n} \cdot (\underline{Z}_{0C'C''n} - \underline{Z}_{0C'A'n}) \underline{Y}_{0C''A'n} - \dot{I}_{A''n} \cdot (\underline{Z}_{0C'A''n} - \underline{Z}_{0A'A''n}) \underline{Y}_{0C''A'n} - \\
& - \dot{I}_{B''n} \cdot (\underline{Z}_{0B''C''n} - \underline{Z}_{0A'B''n}) \underline{Y}_{0C''A'n} + \dot{I}_{A'n} \cdot (\underline{Z}_{0A'0n} - \underline{Z}_{0C''A'n}) \underline{Y}_{0C''A'n}; \quad (21)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{d^2\dot{U}}{dl^2}{}_{A/n} &= \dot{U}_{A/n} \cdot \underline{Y}_{0A'0n} \underline{Z}_{0A'n} + \dot{U}_{A'B'n} \cdot \underline{Y}_{0A'B'n} \underline{Z}_{0A'n} + \dot{U}_{A'A''n} \cdot \underline{Y}_{0A'A''n} \underline{Z}_{0A'n} + \\
&+ \dot{U}_{A'B''n} \cdot \underline{Y}_{0A'B''n} \underline{Z}_{0A'n} - \dot{U}_{C'A'n} \cdot \underline{Y}_{0C'A'n} \underline{Z}_{0A'n} - \dot{U}_{C'A''n} \cdot \underline{Y}_{0C'A''n} \underline{Z}_{0A'n} + \\
&+ \dot{U}_{B'n} \cdot \underline{Y}_{0B'0n} \underline{Z}_{0A'B'n} + \dot{U}_{B'C'n} \cdot \underline{Y}_{0B'C'n} \underline{Z}_{0A'B'n} + \dot{U}_{B'B''n} \cdot \underline{Y}_{0B'B''n} \underline{Z}_{0A'B'n} + \\
&+ \dot{U}_{B'C''n} \cdot \underline{Y}_{0B'C''n} \underline{Z}_{0A'B'n} + \dot{U}_{B'A''n} \cdot \underline{Y}_{0B'A''n} \underline{Z}_{0A'B'n} - \dot{U}_{A'B'n} \cdot \underline{Y}_{0A'B'n} \underline{Z}_{0A'B'n} + \\
&+ \dot{U}_{C'n} \cdot \underline{Y}_{0C'0n} \underline{Z}_{0C'A'n} + \dot{U}_{C'A'n} \cdot \underline{Y}_{0C'A'n} \underline{Z}_{0C'A'n} + \dot{U}_{C'A''n} \cdot \underline{Y}_{0C'A''n} \underline{Z}_{0C'A'n} + \\
&+ \dot{U}_{C'C'n} \cdot \underline{Y}_{0C'C'n} \underline{Z}_{0C'A'n} - \dot{U}_{B'C'n} \cdot \underline{Y}_{0B'C'n} \underline{Z}_{0C'A'n} - \dot{U}_{B'C''n} \cdot \underline{Y}_{0B'C''n} \underline{Z}_{0C'A'n} + \\
&+ \dot{U}_{A''n} \cdot \underline{Y}_{0A''0n} \underline{Z}_{0A'A''n} + \dot{U}_{A'B''n} \cdot \underline{Y}_{0A'B''n} \underline{Z}_{0A'A''n} - \dot{U}_{A'A''n} \cdot \underline{Y}_{0A'A''n} \underline{Z}_{0A'A''n} - \\
&- \dot{U}_{B'A''n} \cdot \underline{Y}_{0B'A''n} \underline{Z}_{0A'A''n} - \dot{U}_{C'A''n} \cdot \underline{Y}_{0C'A''n} \underline{Z}_{0A'A''n} - \dot{U}_{C'A''n} \cdot \underline{Y}_{0C'A''n} \underline{Z}_{0A'A''n} + \\
&+ \dot{U}_{B'n} \cdot \underline{Y}_{0B'0n} \underline{Z}_{0A'B'n} + \dot{U}_{B'C'n} \cdot \underline{Y}_{0B'C'n} \underline{Z}_{0A'B'n} + \dot{U}_{B'C''n} \cdot \underline{Y}_{0B'C''n} \underline{Z}_{0A'B'n} - \\
&- \dot{U}_{A'B'n} \cdot \underline{Y}_{0A'B'n} \underline{Z}_{0A'B'n} - \dot{U}_{B'B''n} \cdot \underline{Y}_{0B'B''n} \underline{Z}_{0A'B'n} - \dot{U}_{A'B''n} \cdot \underline{Y}_{0A'B''n} \underline{Z}_{0A'B'n} + \\
&+ \dot{U}_{C'n} \cdot \underline{Y}_{0C'0n} \underline{Z}_{0C'A'n} + \dot{U}_{C'A'n} \cdot \underline{Y}_{0C'A'n} \underline{Z}_{0C'A'n} + \dot{U}_{C'A''n} \cdot \underline{Y}_{0C'A''n} \underline{Z}_{0C'A'n} - \\
&- \dot{U}_{B'C'n} \cdot \underline{Y}_{0B'C'n} \underline{Z}_{0C'A'n} - \dot{U}_{C'C'n} \cdot \underline{Y}_{0C'C'n} \underline{Z}_{0C'A'n} - \dot{U}_{B'C''n} \cdot \underline{Y}_{0B'C''n} \underline{Z}_{0C'A'n}; \quad (22)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{d^2\dot{U}}{dl^2}{}_{A'B'n} &= \dot{U}_{A'n} \cdot \underline{Y}_{0A'0n} (\underline{Z}_{0A'0n} - \underline{Z}_{0A'B'n}) + \dot{U}_{A'B'n} \cdot \underline{Y}_{0A'B'n} (\underline{Z}_{0A'0n} - \underline{Z}_{0A'B'n}) + \\
&+ \dot{U}_{A'A''n} \cdot \underline{Y}_{0A'A''n} (\underline{Z}_{0A'0n} - \underline{Z}_{0A'B'n}) + \dot{U}_{A'B''n} \cdot \underline{Y}_{0A'B''n} (\underline{Z}_{0A'0n} - \underline{Z}_{0A'B'n}) - \\
&- \dot{U}_{C'A'n} \cdot \underline{Y}_{0C'A'n} (\underline{Z}_{0A'0n} - \underline{Z}_{0A'B'n}) - \dot{U}_{C'A''n} \cdot \underline{Y}_{0C'A''n} (\underline{Z}_{0A'0n} - \underline{Z}_{0A'B'n}) + \\
&+ \dot{U}_{C'n} \cdot \underline{Y}_{0C'0n} (\underline{Z}_{0C'A'n} - \underline{Z}_{0B'C'n}) + \dot{U}_{C'A'n} \cdot \underline{Y}_{0C'A'n} (\underline{Z}_{0C'A'n} - \underline{Z}_{0B'C'n}) + \\
&+ \dot{U}_{C'A''n} \cdot \underline{Y}_{0C'A''n} (\underline{Z}_{0C'A'n} - \underline{Z}_{0B'C'n}) + \dot{U}_{C'C'n} \cdot \underline{Y}_{0C'C'n} (\underline{Z}_{0C'A'n} - \underline{Z}_{0B'C'n}) - \\
&- \dot{U}_{B'C'n} \cdot \underline{Y}_{0B'C'n} (\underline{Z}_{0C'A'n} - \underline{Z}_{0B'C'n}) - \dot{U}_{B'C''n} \cdot \underline{Y}_{0B'C''n} (\underline{Z}_{0C'A'n} - \underline{Z}_{0B'C'n}) + \\
&+ \dot{U}_{A''n} \cdot \underline{Y}_{0A''0n} (\underline{Z}_{0A'A''n} - \underline{Z}_{0B'A''n}) + \dot{U}_{A'B''n} \cdot \underline{Y}_{0A'B''n} (\underline{Z}_{0A'A''n} - \underline{Z}_{0B'A''n}) - \\
&- \dot{U}_{A'A''n} \cdot \underline{Y}_{0A'A''n} (\underline{Z}_{0A'A''n} - \underline{Z}_{0B'A''n}) - \dot{U}_{B'A''n} \cdot \underline{Y}_{0B'A''n} (\underline{Z}_{0A'A''n} - \underline{Z}_{0B'A''n}) - \\
&- \dot{U}_{C'A''n} \cdot \underline{Y}_{0C'A''n} (\underline{Z}_{0A'A''n} - \underline{Z}_{0B'A''n}) - \dot{U}_{C'A''n} \cdot \underline{Y}_{0C'A''n} (\underline{Z}_{0A'A''n} - \underline{Z}_{0B'A''n}) +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \dot{U}_{B''n} \cdot \underline{Y}_{0B''0n} (\underline{Z}_{0A'B''n} - \underline{Z}_{0B'B''n}) + \dot{U}_{B'C'n} \cdot \underline{Y}_{0B''C'n} (\underline{Z}_{0A'B''n} - \underline{Z}_{0B'B''n}) + \\
& + \dot{U}_{B'C''n} \cdot \underline{Y}_{0B''C''n} (\underline{Z}_{0A'B''n} - \underline{Z}_{0B'B''n}) - \dot{U}_{A'B''n} \cdot \underline{Y}_{0A'B''n} (\underline{Z}_{0A'B''n} - \underline{Z}_{0B'B''n}) - \\
& - \dot{U}_{B'B''n} \cdot \underline{Y}_{0B'B''n} (\underline{Z}_{0A'B''n} - \underline{Z}_{0B'B''n}) - \dot{U}_{A''B'n} \cdot \underline{Y}_{0A''B'n} (\underline{Z}_{0A'B''n} - \underline{Z}_{0B'B''n}) + \\
& + \dot{U}_{C''n} \cdot \underline{Y}_{0C''0n} (\underline{Z}_{0C''A'n} - \underline{Z}_{0B'C''n}) + \dot{U}_{C'A'n} \cdot \underline{Y}_{0C''A'n} (\underline{Z}_{0C''A'n} - \underline{Z}_{0B'C''n}) + \\
& + \dot{U}_{C'A''n} \cdot \underline{Y}_{0C''A''n} (\underline{Z}_{0C''A'n} - \underline{Z}_{0B'C''n}) - \dot{U}_{B'C''n} \cdot \underline{Y}_{0B'C''n} (\underline{Z}_{0C''A'n} - \underline{Z}_{0B'C''n}) - \\
& - \dot{U}_{C'C''n} \cdot \underline{Y}_{0C'C''n} (\underline{Z}_{0C''A'n} - \underline{Z}_{0B'C''n}) - \dot{U}_{B'C'n} \cdot \underline{Y}_{0B''C'n} (\underline{Z}_{0C''A'n} - \underline{Z}_{0B'C''n}) - \\
& - \dot{U}_{B'n} \cdot \underline{Y}_{0B'0n} (\underline{Z}_{0B'0n} - \underline{Z}_{0A'B'n}) - \dot{U}_{B'C'n} \cdot \underline{Y}_{0B'C'n} (\underline{Z}_{0B'0n} - \underline{Z}_{0A'B'n}) - \\
& - \dot{U}_{B'B'n} \cdot \underline{Y}_{0B'B'n} (\underline{Z}_{0B'0n} - \underline{Z}_{0A'B'n}) - \dot{U}_{B'C'n} \cdot \underline{Y}_{0B'C'n} (\underline{Z}_{0B'0n} - \underline{Z}_{0A'B'n}) - \\
& - \dot{U}_{B'A'n} \cdot \underline{Y}_{0B'A'n} (\underline{Z}_{0B'0n} - \underline{Z}_{0A'B'n}) + \dot{U}_{A'B'n} \cdot \underline{Y}_{0A'B'n} (\underline{Z}_{0B'0n} - \underline{Z}_{0A'B'n}); \quad (23)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{d^2 \dot{U}}{dl^2} & \overset{A'A''n}{=} \dot{U}_{A'n} \cdot \underline{Y}_{0A'0n} (\underline{Z}_{0A'0n} - \underline{Z}_{0A'A''n}) + \dot{U}_{A'B'n} \cdot \underline{Y}_{0A'B'n} (\underline{Z}_{0A'0n} - \underline{Z}_{0A'A''n}) + \\
& + \dot{U}_{A'A''n} \cdot \underline{Y}_{0A'A''n} (\underline{Z}_{0A'0n} - \underline{Z}_{0A'A''n}) + \dot{U}_{A'B''n} \cdot \underline{Y}_{0A'B''n} (\underline{Z}_{0A'0n} - \underline{Z}_{0A'A''n}) - \\
& - \dot{U}_{C'A'n} \cdot \underline{Y}_{0C'A'n} (\underline{Z}_{0A'0n} - \underline{Z}_{0A'A''n}) - \dot{U}_{C'A''n} \cdot \underline{Y}_{0C'A''n} (\underline{Z}_{0A'0n} - \underline{Z}_{0A'A''n}) + \\
& + \dot{U}_{B'n} \cdot \underline{Y}_{0B'0n} (\underline{Z}_{0A'B'n} - \underline{Z}_{0B'A''n}) + \dot{U}_{B'C'n} \cdot \underline{Y}_{0B'C'n} (\underline{Z}_{0A'B'n} - \underline{Z}_{0B'A''n}) + \\
& + \dot{U}_{B'B''n} \cdot \underline{Y}_{0B'B''n} (\underline{Z}_{0A'B'n} - \underline{Z}_{0B'A''n}) + \dot{U}_{B'C''n} \cdot \underline{Y}_{0B'C''n} (\underline{Z}_{0A'B'n} - \underline{Z}_{0B'A''n}) + \\
& + \dot{U}_{B'A''n} \cdot \underline{Y}_{0B'A''n} (\underline{Z}_{0A'B'n} - \underline{Z}_{0B'A''n}) - \dot{U}_{A'B'n} \cdot \underline{Y}_{0A'B'n} (\underline{Z}_{0A'B'n} - \underline{Z}_{0B'A''n}) + \\
& + \dot{U}_{C'n} \cdot \underline{Y}_{0C'0n} (\underline{Z}_{0C'A'n} - \underline{Z}_{0C'A''n}) + \dot{U}_{C'A''n} \cdot \underline{Y}_{0C'A''n} (\underline{Z}_{0C'A'n} - \underline{Z}_{0C'A''n}) + \\
& - \dot{U}_{B'C'n} \cdot \underline{Y}_{0B'C'n} (\underline{Z}_{0C'A'n} - \underline{Z}_{0C'A''n}) - \dot{U}_{B''C'n} \cdot \underline{Y}_{0B''C'n} (\underline{Z}_{0C'A'n} - \underline{Z}_{0C'A''n}) + \\
& + \dot{U}_{C'A'n} \cdot \underline{Y}_{0C'A'n} (\underline{Z}_{0C'A'n} - \underline{Z}_{0C'A''n}) + \dot{U}_{C'C''n} \cdot \underline{Y}_{0C'C''n} (\underline{Z}_{0C'A'n} - \underline{Z}_{0C'A''n}) - \\
& + \dot{U}_{B''n} \cdot \underline{Y}_{0B''0n} (\underline{Z}_{0A'B''n} - \underline{Z}_{0A''B'n}) + \dot{U}_{B''C'n} \cdot \underline{Y}_{0B''C'n} (\underline{Z}_{0A'B''n} - \underline{Z}_{0A''B'n}) + \\
& + \dot{U}_{B''C''n} \cdot \underline{Y}_{0B''C''n} (\underline{Z}_{0A'B''n} - \underline{Z}_{0A''B'n}) - \dot{U}_{A'B''n} \cdot \underline{Y}_{0A'B''n} (\underline{Z}_{0A'B''n} - \underline{Z}_{0A''B'n}) - \\
& - \dot{U}_{B'B''n} \cdot \underline{Y}_{0B'B''n} (\underline{Z}_{0A'B''n} - \underline{Z}_{0A''B'n}) - \dot{U}_{A''B'n} \cdot \underline{Y}_{0A''B'n} (\underline{Z}_{0A'B''n} - \underline{Z}_{0A''B'n}) + \\
& + \dot{U}_{C''n} \cdot \underline{Y}_{0C''0n} (\underline{Z}_{0C''A'n} - \underline{Z}_{0C''A''n}) + \dot{U}_{C''A'n} \cdot \underline{Y}_{0C''A'n} (\underline{Z}_{0C''A'n} - \underline{Z}_{0C''A''n}) +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \dot{U}_{C''A''n} \cdot \underline{Y}_{0C''A''n} (\underline{Z}_{0C''A''n} - \underline{Z}_{0C''A''n}) - \dot{U}_{B'C''n} \cdot \underline{Y}_{0B'C''n} (\underline{Z}_{0C''A''n} - \underline{Z}_{0C''A''n}) - \\
& - \dot{U}_{C'C''n} \cdot \underline{Y}_{0C'C''n} (\underline{Z}_{0C''A''n} - \underline{Z}_{0C''A''n}) - \dot{U}_{B''C''n} \cdot \underline{Y}_{0B''C''n} (\underline{Z}_{0C''A''n} - \underline{Z}_{0C''A''n}) - \\
& - \dot{U}_{A''n} \cdot \underline{Y}_{0A''0n} (\underline{Z}_{0A''0n} - \underline{Z}_{0A''A''n}) - \dot{U}_{A''B''n} \cdot \underline{Y}_{0A''B''n} (\underline{Z}_{0A''0n} - \underline{Z}_{0A''A''n}) + \\
& + \dot{U}_{A'A''n} \cdot \underline{Y}_{0A'A''n} (\underline{Z}_{0A''0n} - \underline{Z}_{0A''A''n}) + \dot{U}_{B'A''n} \cdot \underline{Y}_{0B'A''n} (\underline{Z}_{0A''0n} - \underline{Z}_{0A''A''n}) + \\
& + \dot{U}_{C'A''n} \cdot \underline{Y}_{0C'A''n} (\underline{Z}_{0A''0n} - \underline{Z}_{0A''A''n}) + \dot{U}_{C''A''n} \cdot \underline{Y}_{0C''A''n} (\underline{Z}_{0A''0n} - \underline{Z}_{0A''A''n}); \quad (24)
\end{aligned}$$

Уравнения для других линий составляются аналогично.

Учитывая равенства

$$\dot{U}_{A'B'} = \dot{U}_{A'} - \dot{U}_{B'}; \quad (25)$$

$$\dot{U}_{A'A''} = \dot{U}_{A'} - \dot{U}_{A''}, \quad (26)$$

уравнение (22) предстанет в следующем виде:

$$\begin{aligned}
& \frac{d^2 \dot{U}_{A'n}}{dt^2} = \dot{U}_{A'n} \cdot \underline{Y}_{0A'0n} \underline{Z}_{0A'n} + \dot{U}_{A'n} \cdot \underline{Y}_{0A'B'n} \underline{Z}_{0A'n} - \dot{U}_{B'n} \cdot \underline{Y}_{0A'B'n} \underline{Z}_{0A'n} + \\
& + \dot{U}_{A'n} \cdot \underline{Y}_{0A'A''n} \underline{Z}_{0A'n} - \dot{U}_{A''n} \cdot \underline{Y}_{0A'A''n} \underline{Z}_{0A'n} + \dot{U}_{A'n} \cdot \underline{Y}_{0A'B''n} \underline{Z}_{0A'n} - \dot{U}_{B''n} \cdot \underline{Y}_{0A'B''n} \underline{Z}_{0A'n} - \\
& - \dot{U}_{C'n} \cdot \underline{Y}_{0C'A'n} \underline{Z}_{0A'n} + \dot{U}_{A'n} \cdot \underline{Y}_{0C'A'n} \underline{Z}_{0A'n} - \dot{U}_{C''n} \cdot \underline{Y}_{0C''A'n} \underline{Z}_{0A'n} + \dot{U}_{A'n} \cdot \underline{Y}_{0C''A'n} \underline{Z}_{0A'n} + \\
& + \dot{U}_{B'n} \cdot \underline{Y}_{0B'0n} \underline{Z}_{0A'B'n} + \dot{U}_{B'n} \cdot \underline{Y}_{0B'C'n} \underline{Z}_{0A'B'n} - \dot{U}_{C'n} \cdot \underline{Y}_{0B'C'n} \underline{Z}_{0A'B'n} + \dot{U}_{B'n} \cdot \underline{Y}_{0B'B''n} \underline{Z}_{0A'B'n} - \\
& - \dot{U}_{B''n} \cdot \underline{Y}_{0B'B''n} \underline{Z}_{0A'B'n} + \dot{U}_{B'n} \cdot \underline{Y}_{0B'C''n} \underline{Z}_{0A'B'n} - \dot{U}_{C''n} \cdot \underline{Y}_{0B'C''n} \underline{Z}_{0A'B'n} + \dot{U}_{B'n} \cdot \underline{Y}_{0B'A''n} \underline{Z}_{0A'B'n} - \\
& - \dot{U}_{A''n} \cdot \underline{Y}_{0B'A''n} \underline{Z}_{0A'B'n} - \dot{U}_{A'n} \cdot \underline{Y}_{0A'B'n} \underline{Z}_{0A'B'n} + \dot{U}_{B'n} \cdot \underline{Y}_{0A'B'n} \underline{Z}_{0A'B'n} + \dot{U}_{C'n} \cdot \underline{Y}_{0C'0n} \underline{Z}_{0C'A'n} + \\
& + \dot{U}_{C'n} \cdot \underline{Y}_{0C'A''n} \underline{Z}_{0C'A'n} - \dot{U}_{A''n} \cdot \underline{Y}_{0C'A''n} \underline{Z}_{0C'A'n} + \dot{U}_{C'n} \cdot \underline{Y}_{0C'A'n} \underline{Z}_{0C'A'n} - \dot{U}_{A'n} \cdot \underline{Y}_{0C'A'n} \underline{Z}_{0C'A'n} + \\
& + \dot{U}_{C'n} \cdot \underline{Y}_{0C'C''n} \underline{Z}_{0C'A'n} - \dot{U}_{C''n} \cdot \underline{Y}_{0C'C''n} \underline{Z}_{0C'A'n} - \dot{U}_{B'n} \cdot \underline{Y}_{0B'C'n} \underline{Z}_{0C'A'n} + \dot{U}_{C'n} \cdot \underline{Y}_{0B'C'n} \underline{Z}_{0C'A'n} - \\
& - \dot{U}_{B''n} \cdot \underline{Y}_{0B''C'n} \underline{Z}_{0C'A'n} + \dot{U}_{C'n} \cdot \underline{Y}_{0B''C'n} \underline{Z}_{0C'A'n} + \dot{U}_{A''n} \cdot \underline{Y}_{0A''0n} \underline{Z}_{0A'A''n} + \dot{U}_{A''n} \cdot \underline{Y}_{0A''B''n} \underline{Z}_{0A'A''n} - \\
& - \dot{U}_{B''n} \cdot \underline{Y}_{0A''B''n} \underline{Z}_{0A'A''n} - \dot{U}_{A'n} \cdot \underline{Y}_{0A'A''n} \underline{Z}_{0A'A''n} + \dot{U}_{A''n} \cdot \underline{Y}_{0A'A''n} \underline{Z}_{0A'A''n} - \dot{U}_{B'n} \cdot \underline{Y}_{0B'A''n} \underline{Z}_{0A'A''n} + \\
& + \dot{U}_{A''n} \cdot \underline{Y}_{0B'A''n} \underline{Z}_{0A'A''n} - \dot{U}_{C'n} \cdot \underline{Y}_{0C'A''n} \underline{Z}_{0A'A''n} + \dot{U}_{A''n} \cdot \underline{Y}_{0C'A''n} \underline{Z}_{0A'A''n} - \dot{U}_{C''n} \cdot \underline{Y}_{0C''A''n} \underline{Z}_{0A'A''n} + \\
& + \dot{U}_{A''n} \cdot \underline{Y}_{0C''A''n} \underline{Z}_{0A'A''n} + \dot{U}_{B''n} \cdot \underline{Y}_{0B''0n} \underline{Z}_{0A'B''n} + \dot{U}_{B''n} \cdot \underline{Y}_{0B''C'n} \underline{Z}_{0A'B''n} - \dot{U}_{C'n} \cdot \underline{Y}_{0B''C'n} \underline{Z}_{0A'B''n} + \\
& + \dot{U}_{B''n} \cdot \underline{Y}_{0B''C''n} \underline{Z}_{0A'B''n} - \dot{U}_{C''n} \cdot \underline{Y}_{0B''C''n} \underline{Z}_{0A'B''n} - \dot{U}_{A'n} \cdot \underline{Y}_{0A'B'n} \underline{Z}_{0A'B'n} + \dot{U}_{B'n} \cdot \underline{Y}_{0A'B'n} \underline{Z}_{0A'B'n} -
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -\dot{U}_{B'n} \cdot \underline{Y}_{0B'B'n} \underline{Z}_{0A'B'n} + \dot{U}_{B'n} \cdot \underline{Y}_{0B'B'n} \underline{Z}_{0A'B'n} - \dot{U}_{A'n} \cdot \underline{Y}_{0A'B'n} \underline{Z}_{0A'B'n} + \dot{U}_{B'n} \cdot \underline{Y}_{0A'B'n} \underline{Z}_{0A'B'n} + \\
& + \dot{U}_{C'n} \cdot \underline{Y}_{0C'0v} \underline{Z}_{0C'A'n} + \dot{U}_{C'n} \cdot \underline{Y}_{0C'A'n} \underline{Z}_{0C'A'n} - \dot{U}_{A'n} \cdot \underline{Y}_{0C'A'n} \underline{Z}_{0C'A'n} + \dot{U}_{C'n} \cdot \underline{Y}_{0C'A'n} \underline{Z}_{0C'A'n} - \\
& - \dot{U}_{A'n} \cdot \underline{Y}_{0C'A'n} \underline{Z}_{0C'A'n} - \dot{U}_{B'n} \cdot \underline{Y}_{0B'C'n} \underline{Z}_{0C'A'n} + \dot{U}_{C'n} \cdot \underline{Y}_{0B'C'n} \underline{Z}_{0C'A'n} - \dot{U}_{C'n} \cdot \underline{Y}_{0C'C'n} \underline{Z}_{0C'A'n} + \\
& + \dot{U}_{C'n} \cdot \underline{Y}_{0C'C'n} \underline{Z}_{0C'A'n} - \dot{U}_{B'n} \cdot \underline{Y}_{0B'C'n} \underline{Z}_{0C'A'n} + \dot{U}_{C'n} \cdot \underline{Y}_{0B'C'n} \underline{Z}_{0C'A'n}; \quad (27)
\end{aligned}$$

Математические формулировки (3.6 - 3.8, 3.10) позволяют определить действующие величины напряжений и токов на однородном участке двухцепной ВЛ на частоте n -ой гармонической составляющей. Но такой анализ характеристик электрической энергии в рассматриваемом здесь однородном участке двухцепной ВЛ был бы неполным, если бы не была предоставлена возможность определить законы изменения указанных характеристик во времени.

Для выяснения математических формулировок, позволяющих определить законы изменения основных характеристик электрической энергии во времени, необходимо вспомнить, что постоянные распространения волн электромагнитного поля можно определить как сумму коэффициентов затухания и фазы:

$$\underline{\gamma}_{1n} = \alpha_{1n} + j\beta_{1n}; \quad (28)$$

$$\underline{\gamma}_{2n} = \alpha_{2n} + j\beta_{2n}; \quad (29)$$

$$\underline{\gamma}_{3n} = \alpha_{3n} + j\beta_{3n}; \quad (30)$$

$$\underline{\gamma}_{4n} = \alpha_{4n} + j\beta_{4n}; \quad (31)$$

$$\underline{\gamma}_{5n} = \alpha_{5n} + j\beta_{5n}; \quad (32)$$

$$\underline{\gamma}_{6n} = \alpha_{6n} + j\beta_{6n}; \quad (33)$$

где $\alpha_{1n}, \alpha_{2n}, \alpha_{3n}, \alpha_{4n}, \alpha_{5n}, \alpha_{6n}$ - коэффициенты затухания n -ой гармонической составляющей электромагнитной волны; $\beta_{1n}, \beta_{2n}, \beta_{3n}, \beta_{4n}, \beta_{5n}, \beta_{6n}$ - коэффициенты фазы этой же волны.

Математические формулировки для определения мгновенных значений напряжений и токов анализируемого однородного участка двухцепной ВЛ, то

есть законов изменения упомянутых характеристик электрической энергии во времени получаются в результате умножения правых частей уравнений (3.6 - 3.8, 3.10) на $\sqrt{2} \cdot \dot{a}^{jn\omega t}$. Тогда, с учетом равенств (28)-(33) имеем следующее:

$$\begin{aligned}
u_{A'/n} = & \dot{A}_{A'/1n} \cdot \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{1n} \cdot l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{1on} + \alpha_{1n}l) + \dot{A}_{A'/2n} \cdot \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{1n} \cdot l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{1n} - \alpha_{1n}l) + \\
& + \dot{A}_{A'/3n} \cdot \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{2n} \cdot l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{2on} + \alpha_{2n}l) + \dot{A}_{A'/4n} \cdot \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{2n} \cdot l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{2n} - \alpha_{2n}l) + \\
& + \dot{A}_{A'/5n} \cdot \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{3n} \cdot l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{3on} + \alpha_{3n}l) + \dot{A}_{A'/6n} \cdot \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{3n} \cdot l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{3n} - \alpha_{3n}l) + \\
& + \dot{A}_{A'/7n} \cdot \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{4n} \cdot l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{4on} + \alpha_{4n}l) + \dot{A}_{A'/8n} \cdot \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{4n} \cdot l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{4n} - \alpha_{4n}l) + \\
& + \dot{A}_{A'/9n} \cdot \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{5n} \cdot l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{5on} + \alpha_{5n}l) + \dot{A}_{A'/10n} \cdot \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{5n} \cdot l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{5on} - \alpha_{5n}l) + \\
& + \dot{A}_{A'/11n} \cdot \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{6n} \cdot l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{6on} + \alpha_{6n}l) + \\
& + \dot{A}_{A'/12n} \cdot \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{6n} \cdot l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{6on} - \alpha_{6n}l); \tag{34}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
u_{A'/B'/n} = & (\dot{A}_{A'/1n} - \dot{A}_{B'/1n}) \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{1n} \cdot l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{1on} + \alpha_{1n}l) + \\
& + (\dot{A}_{A'/2n} - \dot{A}_{B'/2n}) \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{1n} \cdot l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{1n} - \alpha_{1n}l) + \\
& + (\dot{A}_{A'/3n} - \dot{A}_{B'/3n}) \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{2n} \cdot l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{2on} + \alpha_{2n}l) + \\
& + (\dot{A}_{A'/4n} - \dot{A}_{B'/4n}) \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{2n} \cdot l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{2n} - \alpha_{2n}l) + \\
& + (\dot{A}_{A'/5n} - \dot{A}_{B'/5n}) \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{3n} \cdot l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{3on} + \alpha_{3n}l) + \\
& + (\dot{A}_{A'/6n} - \dot{A}_{B'/6n}) \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{3n} \cdot l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{3n} - \alpha_{3n}l) + \\
& + (\dot{A}_{A'/7n} - \dot{A}_{B'/7n}) \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{4n} \cdot l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{4on} + \alpha_{4n}l) + \\
& + (\dot{A}_{A'/8n} - \dot{A}_{B'/8n}) \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{4n} \cdot l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{4n} - \alpha_{4n}l) + \\
& + (\dot{A}_{A'/9n} - \dot{A}_{B'/9n}) \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{5n} \cdot l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{5on} + \alpha_{5n}l) + \\
& + (\dot{A}_{A'/10n} - \dot{A}_{B'/10n}) \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{5n} \cdot l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{5on} - \alpha_{5n}l) + \\
& + (\dot{A}_{A'/11n} - \dot{A}_{B'/11n}) \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{6n} \cdot l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{6on} + \alpha_{6n}l) + \\
& + (\dot{A}_{A'/12n} - \dot{A}_{B'/12n}) \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{6n} \cdot l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{6on} - \alpha_{6n}l); \tag{35}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
u_{A'A''n} = & \left(\dot{A}_{A'1n} - \dot{A}_{A''1n} \right) \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{1n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{1on} + \alpha_{1n}l) + \\
& + \left(\dot{A}_{A'2n} - \dot{A}_{A''2n} \right) \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{1n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{1n} - \alpha_{1n}l) + \\
& + \left(\dot{A}_{A'3n} - \dot{A}_{A''3n} \right) \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{2n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{2on} + \alpha_{2n}l) + \\
& + \left(\dot{A}_{A'4n} - \dot{A}_{A''4n} \right) \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{2n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{2n} - \alpha_{2n}l) + \\
& + \left(\dot{A}_{A'5n} - \dot{A}_{A''5n} \right) \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{3n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{3on} + \alpha_{3n}l) + \\
& + \left(\dot{A}_{A'6n} - \dot{A}_{A''6n} \right) \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{3n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{3n} - \alpha_{3n}l) + \\
& + \left(\dot{A}_{A'7n} - \dot{A}_{A''7n} \right) \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{4n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{4on} + \alpha_{4n}l) + \\
& + \left(\dot{A}_{A'8n} - \dot{A}_{A''8n} \right) \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{4n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{4n} - \alpha_{4n}l) + \\
& + \left(\dot{A}_{A'9n} - \dot{A}_{A''9n} \right) \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{5n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{5on} + \alpha_{5n}l) + \\
& + \left(\dot{A}_{A'10n} - \dot{A}_{A''10n} \right) \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{5n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{5on} - \alpha_{5n}l) + \\
& + \left(\dot{A}_{A'11n} - \dot{A}_{A''11n} \right) \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{6n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{6on} + \alpha_{6n}l) + \\
& + \left(\dot{A}_{A'12n} - \dot{A}_{A''12n} \right) \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{6n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{6on} - \alpha_{6n}l); \tag{36}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
i_{A'n} = & - \frac{\dot{A}_{A'1n}}{\underline{Z}_{cA'1n}} \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{1n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{1on} + \alpha_{1n}l - \varphi_{cA'1n}) + \\
& + \frac{\dot{A}_{A'2n}}{\underline{Z}_{cA'1n}} \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{1n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{1n} - \alpha_{1n}l - \varphi_{cA'1n}) - \\
& - \frac{\dot{A}_{A'3n}}{\underline{Z}_{cA'2n}} \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{2n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{2on} + \alpha_{2n}l - \varphi_{cA'2n}) + \\
& + \frac{\dot{A}_{A'4n}}{\underline{Z}_{cA'2n}} \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{2n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{2n} - \alpha_{2n}l - \varphi_{cA'2n}) - \\
& - \frac{\dot{A}_{A'5n}}{\underline{Z}_{cA'3n}} \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{3n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{3on} + \alpha_{3n}l - \varphi_{cA'3n}) + \\
& + \frac{\dot{A}_{A'6n}}{\underline{Z}_{cA'3n}} \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{3n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{3n} - \alpha_{3n}l - \varphi_{cA'3n}) -
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{\dot{A}'_{7n}}{\underline{Z}_{cA'4n}} \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{4n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{4on} + \alpha_{4n}l - \varphi_{cA'4n}) + \\
& + \frac{\dot{A}'_{8n}}{\underline{Z}_{cA'4n}} \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{4n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{4n} - \alpha_{4n}l - \varphi_{cA'4n}) - \\
& - \frac{\dot{A}'_{9n}}{\underline{Z}_{cA'5n}} \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{5n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{5on} + \alpha_{5n}l - \varphi_{cA'5n}) + \\
& + \frac{\dot{A}'_{10n}}{\underline{Z}_{cA'5n}} \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{5n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{5n} - \alpha_{5n}l - \varphi_{cA'5n}) - \\
& - \frac{\dot{A}'_{11n}}{\underline{Z}_{cA'6n}} \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{6n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{6on} + \alpha_{6n}l - \varphi_{cA'6n}) + \\
& + \frac{\dot{A}'_{12n}}{\underline{Z}_{cA'6n}} \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{6n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{6n} - \alpha_{6n}l - \varphi_{cA'6n}) - \\
& - \frac{\dot{A}'_{B'1n}}{\underline{Z}_{cA'B'1n}} \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{1n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{1on} + \alpha_{1n}l - \varphi_{cA'B'1n}) + \\
& + \frac{\dot{A}'_{B'2n}}{\underline{Z}_{cA'B'1n}} \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{1n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{1n} - \alpha_{1n}l - \varphi_{cA'B'1n}) - \\
& - \frac{\dot{A}'_{B'3n}}{\underline{Z}_{cA'B'2n}} \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{2n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{2on} + \alpha_{2n}l - \varphi_{cA'B'2n}) + \\
& + \frac{\dot{A}'_{B'4n}}{\underline{Z}_{cA'B'2n}} \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{2n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{2n} - \alpha_{2n}l - \varphi_{cA'B'2n}) - \\
& - \frac{\dot{A}'_{B'5n}}{\underline{Z}_{cA'B'3n}} \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{3n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{3on} + \alpha_{3n}l - \varphi_{cA'B'3n}) + \\
& + \frac{\dot{A}'_{B'6n}}{\underline{Z}_{cA'B'3n}} \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{3n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{3n} - \alpha_{3n}l - \varphi_{cA'B'3n}) - \\
& - \frac{\dot{A}'_{B'7n}}{\underline{Z}_{cA'B'4n}} \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{4n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{4on} + \alpha_{4n}l - \varphi_{cA'B'4n}) + \\
& + \frac{\dot{A}'_{B'8n}}{\underline{Z}_{cA'B'4n}} \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{4n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{4n} - \alpha_{4n}l - \varphi_{cA'B'4n}) -
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{\dot{A}_{B'9n}}{\underline{Z}_{cA'B'5n}} \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{5n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{5on} + \alpha_{5n}l - \varphi_{cA'B'5n}) + \\
& + \frac{\dot{A}_{B'10n}}{\underline{Z}_{cA'B'5n}} \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{5n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{5n} - \alpha_{5n}l - \varphi_{cA'B'5n}) - \\
& - \frac{\dot{A}_{B'11n}}{\underline{Z}_{cA'B'6n}} \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{6n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{6on} + \alpha_{6n}l - \varphi_{cA'B'6n}) + \\
& + \frac{\dot{A}_{B'12n}}{\underline{Z}_{cA'B'6n}} \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{6n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{6n} - \alpha_{6n}l - \varphi_{cA'B'6n}) - \\
& - \frac{\dot{A}_{C'1n}}{\underline{Z}_{cC'A'1n}} \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{1n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{1on} + \alpha_{1n}l - \varphi_{cC'A'1n}) + \\
& + \frac{\dot{A}_{C'2n}}{\underline{Z}_{cC'A'1n}} \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{1n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{1n} - \alpha_{1n}l - \varphi_{cC'A'1n}) - \\
& - \frac{\dot{A}_{C'3n}}{\underline{Z}_{cC'A'2n}} \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{2n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{2on} + \alpha_{2n}l - \varphi_{cC'A'2n}) + \\
& + \frac{\dot{A}_{C'4n}}{\underline{Z}_{cC'A'2n}} \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{2n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{2n} - \alpha_{2n}l - \varphi_{cC'A'2n}) - \\
& - \frac{\dot{A}_{C'5n}}{\underline{Z}_{cC'A'3n}} \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{3n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{3on} + \alpha_{3n}l - \varphi_{cC'A'3n}) + \\
& + \frac{\dot{A}_{C'6n}}{\underline{Z}_{cC'A'3n}} \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{3n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{3n} - \alpha_{3n}l - \varphi_{cC'A'3n}) - \\
& - \frac{\dot{A}_{C'7n}}{\underline{Z}_{cC'A'4n}} \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{4n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{4on} + \alpha_{4n}l - \varphi_{cC'A'4n}) + \\
& + \frac{\dot{A}_{C'8n}}{\underline{Z}_{cC'A'4n}} \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{4n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{4n} - \alpha_{4n}l - \varphi_{cC'A'4n}) - \\
& - \frac{\dot{A}_{C'9n}}{\underline{Z}_{cC'A'5n}} \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{5n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{5on} + \alpha_{5n}l - \varphi_{cC'A'5n}) + \\
& + \frac{\dot{A}_{C'10n}}{\underline{Z}_{cC'A'5n}} \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{5n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{5n} - \alpha_{5n}l - \varphi_{cC'A'5n}) -
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{\dot{A}_{C'11n}}{\underline{Z}_{cC'A'6n}} \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{5n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{6on} + \alpha_{6n}l - \varphi_{cC'A'6n}) + \\
& + \frac{\dot{A}_{C'12n}}{\underline{Z}_{cC'A'6n}} \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{5n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{6n} - \alpha_{6n}l - \varphi_{cC'A'6n}) - \\
& - \frac{\dot{A}_{A''1n}}{\underline{Z}_{cA'A''1n}} \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{1n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{1on} + \alpha_{1n}l - \varphi_{cA'A''1n}) + \\
& + \frac{\dot{A}_{A''2n}}{\underline{Z}_{cA'A''1n}} \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{1n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{1n} - \alpha_{1n}l - \varphi_{cA'A''1n}) - \\
& - \frac{\dot{A}_{A''3n}}{\underline{Z}_{cA'A''2n}} \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{2n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{2on} + \alpha_{2n}l - \varphi_{cA'A''2n}) + \\
& + \frac{\dot{A}_{A''4n}}{\underline{Z}_{cA'A''2n}} \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{2n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{2n} - \alpha_{2n}l - \varphi_{cA'A''2n}) - \\
& - \frac{\dot{A}_{A''5n}}{\underline{Z}_{cA'A''3n}} \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{3n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{3on} + \alpha_{3n}l - \varphi_{cA'A''3n}) + \\
& + \frac{\dot{A}_{A''6n}}{\underline{Z}_{cA'A''3n}} \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{3n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{3n} - \alpha_{3n}l - \varphi_{cA'A''3n}) - \\
& - \frac{\dot{A}_{A''7n}}{\underline{Z}_{cA'A''4n}} \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{4n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{4on} + \alpha_{4n}l - \varphi_{cA'A''4n}) + \\
& + \frac{\dot{A}_{A''8n}}{\underline{Z}_{cA'A''4n}} \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{4n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{4n} - \alpha_{4n}l - \varphi_{cA'A''4n}) - \\
& - \frac{\dot{A}_{A''9n} \cdot e^{\gamma_{5n}l}}{\underline{Z}_{cA'A''5n}} \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{5n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{5on} + \alpha_{5n}l - \varphi_{cA'A''5n}) + \\
& + \frac{\dot{A}_{A''10n}}{\underline{Z}_{cA'A''5n}} \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{5n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{5n} - \alpha_{5n}l - \varphi_{cA'A''5n}) - \\
& - \frac{\dot{A}_{A''11n}}{\underline{Z}_{cA'A''6n}} \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{6n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{6on} + \alpha_{6n}l - \varphi_{cA'A''6n}) + \\
& + \frac{\dot{A}_{A''12n}}{\underline{Z}_{cA'A''6n}} \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{6n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{6n} - \alpha_{6n}l - \varphi_{cA'A''6n}) -
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{\dot{A}_{B''1n}}{\underline{Z}_{cA'B''1n}} \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{1n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{1on} + \alpha_{1n}l - \varphi_{cA'B''1n}) + \\
& + \frac{\dot{A}_{B''2n}}{\underline{Z}_{cA'B''1n}} \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{1n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{1n} - \alpha_{1n}l - \varphi_{cA'B''1n}) - \\
& - \frac{\dot{A}_{B''3n}}{\underline{Z}_{cA'B''2n}} \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{2n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{2on} + \alpha_{2n}l - \varphi_{cA'B''2n}) + \\
& + \frac{\dot{A}_{B''4n}}{\underline{Z}_{cA'B''2n}} \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{2n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{2n} - \alpha_{2n}l - \varphi_{cA'B''2n}) - \\
& - \frac{\dot{A}_{B''5n}}{\underline{Z}_{cA'B''3n}} \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{3n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{3on} + \alpha_{3n}l - \varphi_{cA'B''3n}) + \\
& + \frac{\dot{A}_{B''6n}}{\underline{Z}_{cA'B''3n}} \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{3n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{3n} - \alpha_{3n}l - \varphi_{cA'B''3n}) - \\
& - \frac{\dot{A}_{B''7n}}{\underline{Z}_{cA'B''4n}} \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{4n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{4on} + \alpha_{4n}l - \varphi_{cA'B''4n}) + \\
& + \frac{\dot{A}_{B''8n}}{\underline{Z}_{cA'B''4n}} \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{4n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{4n} - \alpha_{4n}l - \varphi_{cA'B''4n}) - \\
& - \frac{\dot{A}_{B''9n}}{\underline{Z}_{cA'B''5n}} \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{5n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{5on} + \alpha_{5n}l - \varphi_{cA'B''5n}) + \\
& + \frac{\dot{A}_{B''10n}}{\underline{Z}_{cA'B''5n}} \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{5n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{5n} - \alpha_{5n}l - \varphi_{cA'B''5n}) - \\
& - \frac{\dot{A}_{B''11n}}{\underline{Z}_{cA'B''6n}} \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{6n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{6on} + \alpha_{6n}l - \varphi_{cA'B''6n}) + \\
& + \frac{\dot{A}_{B''12n}}{\underline{Z}_{cA'B''6n}} \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{6n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{6n} - \alpha_{6n}l - \varphi_{cA'B''6n}) - \\
& - \frac{\dot{A}_{C''1n}}{\underline{Z}_{cC''A'1n}} \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{1n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{1on} + \alpha_{1n}l - \varphi_{cC''A'1n}) + \\
& + \frac{\dot{A}_{C''2n}}{\underline{Z}_{cC''A'1n}} \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{1n}l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{1n} - \alpha_{1n}l - \varphi_{cC''A'1n}) -
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{\dot{A}_{C'' 3n}}{\underline{Z}_{cC'' A' 2n}} \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{2n} l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{2on} + \alpha_{2n} l - \varphi_{cC'' A' 2n}) + \\
& + \frac{\dot{A}_{C'' 4n}}{\underline{Z}_{cC'' A' 2n}} \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{2n} l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{2n} - \alpha_{2n} l - \varphi_{cC'' A' 2n}) - \\
& - \frac{\dot{A}_{C'' 5n}}{\underline{Z}_{cC'' A' 3n}} \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{3n} l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{3on} + \alpha_{3n} l - \varphi_{cC'' A' 3n}) + \\
& + \frac{\dot{A}_{C'' 6n}}{\underline{Z}_{cC'' A' 3n}} \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{3n} l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{3n} - \alpha_{3n} l - \varphi_{cC'' A' 3n}) - \\
& - \frac{\dot{A}_{C'' 7n}}{\underline{Z}_{cC'' A' 4n}} \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{4n} l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{4on} + \alpha_{4n} l - \varphi_{cC'' A' 4n}) + \\
& + \frac{\dot{A}_{C'' 8n}}{\underline{Z}_{cC'' A' 4n}} \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{4n} l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{4n} - \alpha_{4n} l - \varphi_{cC'' A' 4n}) - \\
& - \frac{\dot{A}_{C'' 9n}}{\underline{Z}_{cC'' A' 5n}} \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{5n} l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{5on} + \alpha_{5n} l - \varphi_{cC'' A' 5n}) + \\
& + \frac{\dot{A}_{C'' 10n}}{\underline{Z}_{cC'' A' 5n}} \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{5n} l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{5n} - \alpha_{5n} l - \varphi_{cC'' A' 5n}) - \\
& - \frac{\dot{A}_{C'' 11n}}{\underline{Z}_{cC'' A' 6n}} \sqrt{2} \cdot e^{\beta_{6n} l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{6on} + \alpha_{6n} l - \varphi_{cC'' A' 6n}) + \\
& + \frac{\dot{A}_{C'' 12n}}{\underline{Z}_{cC'' A' 6n}} \sqrt{2} \cdot e^{-\beta_{6n} l} \cdot \sin(n\omega t + \psi_{6n} - \alpha_{6n} l - \varphi_{cC'' A' 6n}); \tag{37}
\end{aligned}$$

где $\varphi_{cA' 1n}, \varphi_{cA' 2n}, \varphi_{cA' 3n}, \varphi_{cA' 4n}, \varphi_{cA' 5n}, \varphi_{cA' 6n}, \varphi_{cA' B' 1n}, \varphi_{cA' B' 2n}, \varphi_{cA' B' 3n}, \varphi_{cA' B' 4n},$
 $\varphi_{cA' B' 5n}, \varphi_{cA' B' 6n}, \varphi_{cA' A'' 1n}, \varphi_{cA' A'' 2n}, \varphi_{cA' A'' 3n}, \varphi_{cA' A'' 4n}, \varphi_{cA' A'' 5n}, \varphi_{cA' A'' 6n}, \varphi_{cA' B'' 1n},$
 $\varphi_{cA' B'' 2n}, \varphi_{cA' B'' 3n}, \varphi_{cA' B'' 4n}, \varphi_{cA' B'' 5n}, \varphi_{cA' B'' 6n}, \varphi_{cC' A' 1n}, \varphi_{cC' A' 2n}, \varphi_{cC' A' 3n}, \varphi_{cC' A' 4n},$
 $\varphi_{cC' A' 5n}, \varphi_{cC' A' 6n}, \varphi_{cC'' A' 2n}, \varphi_{cC'' A' 3n}, \varphi_{cC'' A' 4n}, \varphi_{cC'' A' 5n}, \varphi_{cC'' A' 6n}$ - показатели сте-
 пени волновых сопротивлений $\underline{Z}_{cA' 1n}, \underline{Z}_{cA' 2n}, \underline{Z}_{cA' 3n}, \underline{Z}_{cA' 4n}, \underline{Z}_{cA' 5n}, \underline{Z}_{cA' 6n},$
 $\underline{Z}_{cA' B' 1n}, \underline{Z}_{cA' B' 2n}, \underline{Z}_{cA' B' 3n}, \underline{Z}_{cA' B' 4n}, \underline{Z}_{cA' B' 5n}, \underline{Z}_{cA' B' 6n}, \underline{Z}_{cA' A'' 1n}, \underline{Z}_{cA' A'' 2n}, \underline{Z}_{cA' A'' 3n},$
 $\underline{Z}_{cA' A'' 4n}, \underline{Z}_{cA' A'' 5n}, \underline{Z}_{cA' A'' 6n}, \underline{Z}_{cA' B'' 1n}, \underline{Z}_{cA' B'' 2n}, \underline{Z}_{cA' B'' 3n}, \underline{Z}_{cA' B'' 4n}, \underline{Z}_{cA' B'' 5n}, \underline{Z}_{cA' B'' 6n},$
 $\underline{Z}_{cC' A' 1n}, \underline{Z}_{cC' A' 2n}, \underline{Z}_{cC' A' 3n}, \underline{Z}_{cC' A' 4n}, \underline{Z}_{cC' A' 5n}, \underline{Z}_{cC' A' 6n}, \underline{Z}_{cC'' A' 2n}, \underline{Z}_{cC'' A' 3n},$

$\underline{Z}_{cC^{II}A'4n}$; $\underline{Z}_{cC^{II}A'5n}$; $\underline{Z}_{cC^{II}A'6n}$; ψ_{1on} и ψ_{1n} , ψ_{2on} и ψ_{2n} , ψ_{3on} и ψ_{3n} , ψ_{4on} и ψ_{4n} , ψ_{5on} и ψ_{5n} , ψ_{6on} и ψ_{6n} - начальные фазы отраженной и падающей волны электромагнитного поля на частоте n-ой гармонической составляющей.

Величины ψ_{1on} и ψ_{1n} , ψ_{2on} и ψ_{2n} , ψ_{3on} и ψ_{3n} , ψ_{4on} и ψ_{4n} , ψ_{5on} и ψ_{5n} , ψ_{6on} и ψ_{6n} можно определять как аргументы комплексных значений постоянных интегрирования $\dot{A}_{A'1n}$, $\dot{A}_{A'2n}$, $\dot{A}_{A'3n}$, $\dot{A}_{A'4n}$, $\dot{A}_{A'5n}$, $\dot{A}_{A'6n}$, $\dot{A}_{A'7n}$, $\dot{A}_{A'8n}$, $\dot{A}_{A'9n}$, $\dot{A}_{A'10n}$, $\dot{A}_{A'11n}$, $\dot{A}_{A'12n}$, $\dot{A}_{B'1n}$, $\dot{A}_{B'2n}$, $\dot{A}_{B'3n}$, $\dot{A}_{B'4n}$, $\dot{A}_{B'5n}$, $\dot{A}_{B'6n}$, $\dot{A}_{B'7n}$, $\dot{A}_{B'8n}$, $\dot{A}_{B'9n}$, $\dot{A}_{B'10n}$, $\dot{A}_{B'11n}$, $\dot{A}_{B'12n}$, $\dot{A}_{C'1n}$, $\dot{A}_{C'2n}$, $\dot{A}_{C'3n}$, $\dot{A}_{C'4n}$, $\dot{A}_{C'5n}$, $\dot{A}_{C'6n}$, $\dot{A}_{C'7n}$, $\dot{A}_{C'8n}$, $\dot{A}_{C'9n}$, $\dot{A}_{C'10n}$, $\dot{A}_{C'11n}$, $\dot{A}_{C'12n}$, $\dot{A}_{A''1n}$, $\dot{A}_{A''2n}$, $\dot{A}_{A''3n}$, $\dot{A}_{A''4n}$, $\dot{A}_{A''5n}$, $\dot{A}_{A''6n}$, $\dot{A}_{A''7n}$, $\dot{A}_{A''8n}$, $\dot{A}_{A''9n}$, $\dot{A}_{A''10n}$, $\dot{A}_{A''11n}$, $\dot{A}_{A''12n}$, $\dot{A}_{B''1n}$, $\dot{A}_{B''2n}$, $\dot{A}_{B''3n}$, $\dot{A}_{B''4n}$, $\dot{A}_{B''5n}$, $\dot{A}_{B''6n}$, $\dot{A}_{B''7n}$, $\dot{A}_{B''8n}$, $\dot{A}_{B''9n}$, $\dot{A}_{B''10n}$, $\dot{A}_{B''11n}$, $\dot{A}_{B''12n}$, $\dot{A}_{C''1n}$, $\dot{A}_{C''2n}$, $\dot{A}_{C''3n}$, $\dot{A}_{C''4n}$, $\dot{A}_{C''5n}$, $\dot{A}_{C''6n}$, $\dot{A}_{C''7n}$, $\dot{A}_{C''8n}$, $\dot{A}_{C''9n}$, $\dot{A}_{C''10n}$, $\dot{A}_{C''11n}$, $\dot{A}_{C''12n}$. Именно эти величины отражают специфические особенности расположения фазных напряжений и токов, свойственные трехфазным системам. Причем, судя по полученным математическим формулировкам, скорость распространения каждой пары электромагнитных волн в каждом проводе рассматриваемой двухцепной ВЛ одинакова.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Интерфейс программы для расчета токов и напряжений по двухцепной воздушной линии

Комплексные значения
Напряжений и токов в начале ЛЭП

ВГ - <input type="text" value="n1"/>		ВГ - <input type="text" value="n2"/>	
<input type="text" value="U1_A1_n1"/> кВ	<input type="text" value="I1_A1_n1"/> А	<input type="text" value="U1_A1_n2"/> кВ	<input type="text" value="I1_A1_n2"/> А
<input type="text" value="U1_B1_n1"/> кВ	<input type="text" value="I1_B1_n1"/> А	<input type="text" value="U1_B1_n2"/> кВ	<input type="text" value="I1_B1_n2"/> А
<input type="text" value="U1_C1_n1"/> кВ	<input type="text" value="I1_C1_n1"/> А	<input type="text" value="U1_C1_n2"/> кВ	<input type="text" value="I1_C1_n2"/> А
<input type="text" value="U1_A2_n1"/> кВ	<input type="text" value="I1_A2_n1"/> А	<input type="text" value="U1_A2_n2"/> кВ	<input type="text" value="I1_A2_n2"/> А
<input type="text" value="U1_B2_n1"/> кВ	<input type="text" value="I1_B2_n1"/> А	<input type="text" value="U1_B2_n2"/> кВ	<input type="text" value="I1_B2_n2"/> А
<input type="text" value="U1_C2_n1"/> кВ	<input type="text" value="I1_C2_n1"/> А	<input type="text" value="U1_C2_n2"/> кВ	<input type="text" value="I1_C2_n2"/> А
ВГ - <input type="text" value="n3"/>		ВГ - <input type="text" value="n4"/>	
<input type="text" value="U1_A1_n3"/> кВ	<input type="text" value="I1_A1_n3"/> А	<input type="text" value="U1_A1_n4"/> кВ	<input type="text" value="I1_A1_n4"/> А
<input type="text" value="U1_B1_n3"/> кВ	<input type="text" value="I1_B1_n3"/> А	<input type="text" value="U1_B1_n4"/> кВ	<input type="text" value="I1_B1_n4"/> А
<input type="text" value="U1_C1_n3"/> кВ	<input type="text" value="I1_C1_n3"/> А	<input type="text" value="U1_C1_n4"/> кВ	<input type="text" value="I1_C1_n4"/> А
<input type="text" value="U1_A2_n3"/> кВ	<input type="text" value="I1_A2_n3"/> А	<input type="text" value="U1_A2_n4"/> кВ	<input type="text" value="I1_A2_n4"/> А
<input type="text" value="U1_B2_n3"/> кВ	<input type="text" value="I1_B2_n3"/> А	<input type="text" value="U1_B2_n4"/> кВ	<input type="text" value="I1_B2_n4"/> А
<input type="text" value="U1_C2_n3"/> кВ	<input type="text" value="I1_C2_n3"/> А	<input type="text" value="U1_C2_n4"/> кВ	<input type="text" value="I1_C2_n4"/> А

Сопротивления проводов

<input type="text" value="r_A1"/> Ом	<input type="text" value="x_A1"/> Ом
<input type="text" value="r_B1"/> Ом	<input type="text" value="x_B1"/> Ом
<input type="text" value="r_C1"/> Ом	<input type="text" value="x_C1"/> Ом
<input type="text" value="r_A2"/> Ом	<input type="text" value="x_A2"/> Ом
<input type="text" value="r_B2"/> Ом	<input type="text" value="x_B2"/> Ом
<input type="text" value="r_C2"/> Ом	<input type="text" value="x_C2"/> Ом

км

мм²

число изоляторов

=

<input type="text" value="U_A1"/> кВ	<input type="text" value="I_A1"/> А	<input type="text" value="U_A1B1"/> кВ
<input type="text" value="U_B1"/> кВ	<input type="text" value="I_B1"/> А	<input type="text" value="U_B1C1"/> кВ
<input type="text" value="U_C1"/> кВ	<input type="text" value="I_C1"/> А	<input type="text" value="U_C1A1"/> кВ
<input type="text" value="U_A2"/> кВ	<input type="text" value="I_A2"/> А	<input type="text" value="U_A2B2"/> кВ
<input type="text" value="U_B2"/> кВ	<input type="text" value="I_B2"/> А	<input type="text" value="U_B2C2"/> кВ
<input type="text" value="U_C2"/> кВ	<input type="text" value="I_C2"/> А	<input type="text" value="U_C2A2"/> кВ

Расстояние между проводами и землей

<input type="text" value="h_A1"/>	<input type="text" value="h_A2"/>
<input type="text" value="h_B1"/>	<input type="text" value="h_B2"/>
<input type="text" value="h_C1"/>	<input type="text" value="h_C2"/>

Расстояние между проводами

<input type="text" value="d_A1B1"/>	<input type="text" value="d_C1A1"/>	<input type="text" value="d_A1A2"/>	<input type="text" value="d_A1B2"/>	<input type="text" value="d_C2A1"/>
	<input type="text" value="d_B1C1"/>	<input type="text" value="d_B1A2"/>	<input type="text" value="d_B1B2"/>	<input type="text" value="d_B1C2"/>
		<input type="text" value="d_C1A2"/>	<input type="text" value="d_B2C1"/>	<input type="text" value="d_C1C2"/>
			<input type="text" value="d_A2B2"/>	<input type="text" value="d_C2A2"/>
				<input type="text" value="d_B2C2"/>

Свидетельство о государственной регистрации программы на ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2014615987

Расчет токов и напряжений по двухцепной воздушной линии
электропередачи (Strom_Spannung v. 1.00)

Правообладатели: *Плотников Михаил Павлович (RU), Большанин
Георгий Анатольевич (RU)*

Авторы: *Плотников Михаил Павлович (RU),
Большанин Георгий Анатольевич (RU)*

Заявка № 2014614367

Дата поступления 18 апреля 2014 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 06 июня 2014 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов

Патент на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2529640

**СПОСОБ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТОКА И
НАПРЯЖЕНИЯ ПО НЕРАЗВЕТВЛЕННЫМ УЧАСТКАМ
ШЕСТИПРОВОДНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

Патентообладатель(и): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Братский государственный университет" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2012152172

Принят в изобретения **04 декабря 2012 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **05 августа 2014 г.**

Срок действия патента истекает **04 декабря 2032 г.**

Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий



ПРИЛОЖЕНИЕ В**Протокол испытаний электрической энергии**

УТВЕРЖДАЮ

Зам. гл. инженера

ОАО «Иркутской электросетевой компании»

Северные Электрические Сети

/Вагин В.А./

«27» мая 2013 г.**ПРОТОКОЛ № 1****Испытаний электрической энергии**

Настоящий протокол испытаний касается только электрической энергии в контрольной точке, указанной в п.1, за период испытаний, определенный в п.2

1. Описание контрольной точки

Место (обозначение) в схеме: ВРУ, ввод № 11705

Адрес: поселок Седаново, Седановский переключательный пункт

2. Сроки проведения испытаний

с 17:02, 1 ноября 2012 года по 17:02, 2 ноября 2012 года

3. Заказчик испытаний: Открытое акционерное общество «Иркутская электросетевая компания»

Адрес: 665709 Иркутская область, Промплощадка КБЖБ, производственный корпус РПБ № 1

4. Цель испытаний:

Испытания на соответствие требованиям ГОСТ 13109 - 97 п. 5.2, 5.4, 5.5, 5.6

5. Методика испытаний:

Испытания проводились в соответствии с РД 153-34.0-15.501-00

6. Перечень средств измерений (СИ).

Измеритель показателей качества электрической энергии

«Ресурс-UF2» № 2859

7. Результаты измерений за время испытаний приведены в приложении 2

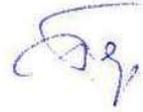
8. Заключение

Из результатов испытаний на соответствие требованиям НД, перечисленных в п.4, в контрольной точке, указанной в п.1, за период времени, определенный в п.2, следует, что качество электрической энергии:

- соответствует установившемуся отклонению напряжения соответствует;
- не соответствует коэффициенту искажения синусоидальности напряжения;
- не соответствует коэффициенту n-й гармонической составляющей напряжения;
- соответствует коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности;
- соответствует коэффициенту несимметрии напряжений по нулевой последовательности;
- соответствует отклонению частоты;

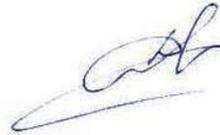
- соответствует длительности провала напряжения.

Начальник службы повышения
эффективности производства



О.Н. Герасименко

Инженер службы повышения
эффективности производства



А.В. Денисов

Аспирант ФГБОУ ВПО «БрГУ»



М.П. Плотников

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

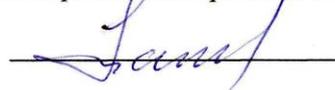
Акт промышленных испытаний

УТВЕРЖДАЮ

Зам. гл. инженера

ОАО «Иркутской электросетевой компании»

Северные Электрические Сети



/Вагин В.А./



«27» мая 2013 г.

АКТ

ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

На сходимость результатов, полученных при обработке математической модели, разработанной в ФГБОУ ВПО «БрГУ» аспирантом Плотниковым М.П. и замеров, произведенных на ОАО «Иркутской электросетевой компании» Северные Электрические Сети (СЭС). Испытания проводились согласно протоколу № 1 от «27» мая 2013 г.

г.Братск

27 мая 2013 г.

Комиссия в составе:

представители СЭС:

Начальник службы повышения эффективности производства Герасименко О.Н., инженер службы повышения эффективности производства Денисов А.В..

представители ФГБОУ ВПО «БрГУ»:

Профессор кафедры Электроэнергетики и электротехники Большанин Г.А., аспирант Плотников М.П..

удостоверяет, что при проведении промышленных испытаний математической модели, разработанной в ФГБОУ ВПО «БрГУ» на основе научной работы «Распределение электрической энергии по двухцепным линиям электропередачи» при обработке результатов получены следующие данные для линии А:

В начале линии: $P_A = 19,15$ МВт, $Q_A = - 6$ МВАр, $I_A = 147,18$ А, $U_{AB} = 237,8$ кВ.
 $U_A = 134,57$ кВ.

В конце линии: $P_A = 18,77$ МВт, $Q_A = 4,83$ МВАр, $I_A = 145,63$ А, $U_{AB} = 232,3$ кВ.
 $U_A = 131,5$ кВ.

Данные полученные при помощи телеизмерений с СЭС для линии А:

Братская ГЭС: $P_A = 19,15$ МВт, $Q_A = - 6$ МВАр, $I_A = 147,17$ А, $U_{AB} = 237,8$ кВ,
 $U_A = 134,73$ кВ.

Седановский переключательный пункт: $P_A = 18,88$ МВт, $Q_A = 4,8$ МВАр, $I_A = 145,44$ А,
 $U_{AB} = 234,42$ кВ, $U_A = 131,35$ кВ.

Максимальная погрешность расчетов составила 0,5 – 1,05 %, что обеспечивает хорошую сходимость и достаточный уровень разработанной математической модели.

Таким образом, разработанная в ФГБОУ ВПО «БрГУ» математическая модель «Распределение электрической энергии по двухцепным линиям электропередачи» обеспечивает качество получаемых результатов и может быть использована на различных предприятиях, занимающихся передачей электрической энергии по двухцепным линиям электропередачи и проектных институтах электрической энергии.

Начальник службы повышения
эффективности производства



О.Н. Герасименко

Инженер службы повышения
эффективности производства



А.В. Денисов

Профессор, к.т.н. ФГБОУ ВПО «БрГУ»



Г.А. Большанин

Аспирант ФГБОУ ВПО «БрГУ»



М.П. Плотников

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Результаты измерений

Таблица Д.1 - Результаты измерений отклонений напряжения

Измеряемая характеристика	Результат измерений	Норм. значение	Измеряемая характеристика	Результат измерений	Норм. значение	T1	T2
Прямая последовательность			Фазное А				
δU_H^I	7,2	-5,0	δU_H^I	6,5	-5,0	68,74	
δU_B^I	9,0	5,0	δU_B^I	8,3	5,0		
δU_{HM}^I	7,2	-10,0	δU_{HM}^I	6,5	-10,0		0,00
δU_{HB}^I	9,3	10,0	δU_{HB}^I	8,6	10,0		
Междуфазное АВ			Фазное В				
δU_H^I	7,5	-5,0	δU_H^I	6,8	-5,0	68,74	
δU_B^I	9,3	5,0	δU_B^I	8,8	5,0		
δU_{HM}^I	7,5	-10,0	δU_{HM}^I	6,8	-10,0		0,00
δU_{HB}^I	9,6	10,0	δU_{HB}^I	9,2	10,0		
Междуфазное ВС			Фазное С				
δU_H^I	6,8	-5,0	δU_H^I	8,0	-5,0	68,75	
δU_B^I	8,8	5,0	δU_B^I	9,9	5,0		
δU_{HM}^I	6,8	-10,0	δU_{HM}^I	8,0	-10,0		0,65
δU_{HB}^I	9,2	10,0	δU_{HB}^I	10,2	10,0		
Междуфазное СА							
δU_H^I	6,7	-5,0					
δU_B^I	8,9	5,0					
δU_{HM}^I	6,7	-10,0					
δU_{HB}^I	9,2	10,0					

Таблица Д.2 - Результаты испытаний электрической энергии по отклонению частоты

Измеряемая характеристика	Результат измерений	Нормативное значение
Δf_H	-0,02	-0,20
Δf_B	0,03	0,20
Δf_{HM}	-0,05	-0,40
$\Delta f_{HБ}$	0,05	0,40

Таблица Д.3 - Результаты испытаний электрической энергии по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности

Измеряемая характеристика	Результат измерений	Нормативное значение
$K_{2U B}, \%$	0,37	2,00
$K_{2U HБ}, \%$	0,51	4,00

Таблица Д.4 - Результаты испытаний электрической энергии по коэффициенту несимметрии напряжений по нулевой последовательности

Измеряемая характеристика	Результат измерений	Нормативное значение
$K_{0U B}, \%$	1,15	2,00
$K_{0U HБ}, \%$	1,17	4,00

Таблица Д.5 - Результаты испытаний электрической энергии по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения

Измеряемая характеристика	Фаза А	Фаза В	Фаза С	Нормативное значение
	Результат измерений	Результат измерений	Результат измерений	
$K_{UВ}, \%$	7,42	7,21	9,61	2,00
$K_{UНВ}, \%$	9,10	8,65	11,57	3,00
Измеряемая характеристика	Междуфазное АВ	Междуфазное ВС	Междуфазное СА	Нормативное значение
	Результат измерений	Результат измерений	Результат измерений	
$K_{UВ}, \%$	6,98	8,71	8,55	2,00
$K_{UНВ}, \%$	8,76	10,62	10,15	3,00

Таблица Д.6 - Результаты испытаний электрической энергии по коэффициенту n – ой гармонической составляющей фазных напряжений

n	Результат измерений, %												Нормативное значение	
	Фаза А				Фаза В				Фаза С					
	$K_{U(n)B}$	$K_{U(n)HB}$	T1	T2	$K_{U(n)B}$	$K_{U(n)HB}$	T1	T2	$K_{U(n)B}$	$K_{U(n)HB}$	T1	T2	$K_{U(n)HD}$	$K_{U(n)PD}$
2	0,02	0,31	0,00	0,00	0,02	0,25	0,00	0,00	0,03	0,12	0,00	0,00	0,50	0,75
3	0,75	1,18	0,00	0,00	0,64	0,97	0,00	0,00	0,90	1,37	0,00	0,00	1,50	2,25
4	0,06	0,40	0,00	0,00	0,05	0,40	0,00	0,00	0,04	0,30	0,00	0,00	0,30	0,45
5	0,49	0,91	0,00	0,00	0,47	0,74	0,00	0,00	0,65	1,29	0,00	0,00	1,50	2,25
6	0,04	0,37	0,00	0,00	0,03	0,27	0,00	0,00	0,03	0,42	0,00	0,00	0,20	0,30
7	0,52	0,80	0,00	0,00	0,75	1,02	0,00	0,00	0,69	0,97	0,00	0,00	1,00	1,50
8	0,06	0,26	0,00	0,00	0,05	0,22	0,00	0,00	0,05	0,34	0,00	0,00	0,20	0,30
9	0,88	1,72	36,48	16,51	0,86	1,60	46,71	18,30	0,75	1,57	39,64	13,90	0,40	0,60
10	0,15	0,25	0,00	0,00	0,13	0,27	0,00	0,00	0,11	0,28	0,00	0,00	0,20	0,30
11	2,55	8,50	99,74	95,50	2,55	6,95	81,95	60,76	2,55	10,01	95,65	84,61	1,00	1,50
12	0,04	0,07	0,00	0,00	0,03	0,07	0,00	0,00	0,03	0,08	0,00	0,00	0,20	0,30
13	2,55	5,61	100	99,67	2,55	5,56	100	99,99	2,55	6,26	100	100	0,70	1,05
14	0,03	0,08	0,00	0,00	0,03	0,06	0,00	0,00	0,04	0,12	0,00	0,00	0,20	0,30
15	0,26	0,44	12,93	1,59	0,29	0,42	21,37	2,94	0,58	0,77	83,26	41,20	0,20	0,30
16	0,02	0,07	0,00	0,00	0,01	0,03	0,00	0,00	0,03	0,10	0,00	0,00	0,20	0,30
17	0,29	0,41	0,00	0,00	0,21	0,33	0,00	0,00	0,26	0,43	0,00	0,00	0,50	0,75
18	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,12	0,00	0,00	0,20	0,30
19	0,15	0,24	0,00	0,00	0,15	0,23	0,00	0,00	0,15	0,25	0,00	0,00	0,40	0,60
20	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,20	0,30
21	0,07	0,11	0,00	0,00	0,10	0,17	0,00	0,00	0,14	0,24	0,11	0,00	0,20	0,30
22	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,20	0,30
23	0,32	0,38	0,00	0,00	0,19	0,22	0,00	0,00	0,33	0,39	0,00	0,00	0,40	0,60
24	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,20	0,30
25	0,07	0,09	0,00	0,00	0,13	0,16	0,00	0,00	0,25	0,30	0,00	0,00	0,40	0,60

Окончание таблицы Д.6

26	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	0,20	0,30
27	0,10	0,15	0,00	0,00	0,07	0,12	0,00	0,00	0,09	0,12	0,00	0,00	0,20	0,30
28	0,03	0,04	0,00	0,00	0,02	0,04	0,00	0,00	0,01	0,04	0,00	0,00	0,20	0,30
29	0,22	0,37	0,00	0,00	0,27	0,43	0,13	0,00	0,35	0,54	2,62	0,00	0,37	0,56
30	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,20	0,30
31	0,11	0,19	0,00	0,00	0,17	0,24	0,00	0,00	0,22	0,27	0,00	0,00	0,36	0,54
32	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,20	0,30
33	0,12	0,15	0,00	0,00	0,07	0,11	0,00	0,00	0,14	0,16	0,00	0,00	0,20	0,30
34	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,20	0,30
35	0,08	0,12	0,00	0,00	0,08	0,11	0,00	0,00	0,06	0,09	0,00	0,00	0,34	0,51
36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,20	0,30
37	0,04	0,05	0,00	0,00	0,06	0,08	0,00	0,00	0,08	0,11	0,00	0,00	0,34	0,51
38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,20	0,30
39	0,03	0,05	0,00	0,00	0,03	0,04	0,00	0,00	0,03	0,04	0,00	0,00	0,20	0,30
40	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,20	0,30

Таблица Д.7 -Результаты испытаний электрической энергии по коэффициенту n – ой гармонической составляющей междуфазных напряжений

n	Результат измерений, %												Нормативное значение	
	Междуфазное АВ				Междуфазное ВС				Междуфазное СА					
	$K_{U(n)В}$	$K_{U(n)НБ}$	T1	T2	$K_{U(n)В}$	$K_{U(n)НБ}$	T1	T2	$K_{U(n)В}$	$K_{U(n)НБ}$	T1	T2	$K_{U(n)НД}$	$K_{U(n)ПД}$
2	0,02	0,31	0,00	0,00	0,02	0,22	0,00	0,00	0,02	0,23	0,00	0,00	0,50	0,75
3	0,53	0,95	0,00	0,00	0,63	1,21	0,00	0,00	0,55	0,97	0,00	0,00	1,50	2,25
4	0,06	0,45	0,00	0,00	0,04	0,31	0,00	0,00	0,05	0,28	0,00	0,00	0,30	0,45
5	0,41	0,66	0,00	0,00	0,59	1,03	0,00	0,00	0,60	1,21	0,00	0,00	1,50	2,25
6	0,04	0,23	0,00	0,00	0,02	0,36	0,01	0,00	0,04	0,43	0,01	0,00	0,20	0,30
7	0,68	0,98	0,00	0,00	0,71	1,04	0,01	0,00	0,53	0,79	0,00	0,00	1,00	1,50
8	0,05	0,21	0,00	0,00	0,05	0,34	0,00	0,00	0,05	0,35	0,00	0,00	0,20	0,30
9	0,89	1,67	40,64	16,72	0,82	1,64	45,95	17,48	0,63	1,27	26,74	6,26	0,40	0,60
10	0,15	0,26	0,00	0,00	0,10	0,27	0,00	0,00	0,14	0,40	0,00	0,00	0,20	0,30
11	2,55	6,53	98,92	84,17	2,55	9,29	93,94	80,16	2,55	9,16	97,35	85,29	1,00	1,50
12	0,04	0,07	0,00	0,00	0,03	0,08	0,00	0,00	0,03	0,07	0,00	0,00	0,20	0,30
13	2,55	5,97	100	99,98	2,55	5,46	100	100	2,55	5,92	100	99,86	0,70	1,05
14	0,03	0,05	0,00	0,00	0,04	0,10	0,00	0,00	0,03	0,11	0,00	0,00	0,20	0,30
15	0,28	0,41	18,26	2,22	0,35	0,49	33,33	11,30	0,47	0,69	45,09	24,83	0,20	0,30
16	0,01	0,05	0,00	0,00	0,02	0,09	0,00	0,00	0,02	0,10	0,00	0,00	0,20	0,30
17	0,20	0,33	0,00	0,00	0,24	0,40	0,00	0,00	0,29	0,43	0,00	0,00	0,50	0,75
18	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,20	0,30
19	0,14	0,21	0,00	0,00	0,13	0,22	0,00	0,00	0,16	0,26	0,00	0,00	0,40	0,60
20	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,20	0,30
21	0,05	0,09	0,00	0,00	0,12	0,20	0,00	0,00	0,11	0,19	0,00	0,00	0,20	0,30
22	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	0,20	0,30
23	0,22	0,27	0,00	0,00	0,27	0,31	0,00	0,00	0,35	0,42	0,04	0,00	0,40	0,60
24	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,20	0,30
25	0,09	0,11	0,00	0,00	0,22	0,25	0,00	0,00	0,18	0,21	0,00	0,00	0,40	0,60

Окончание таблицы Д.7

26	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,20	0,30
27	0,09	0,15	0,00	0,00	0,06	0,10	0,00	0,00	0,10	0,13	0,00	0,00	0,20	0,30
28	0,03	0,06	0,00	0,00	0,02	0,07	0,00	0,00	0,02	0,04	0,00	0,00	0,20	0,30
29	0,22	0,36	0,00	0,00	0,34	0,54	1,91	0,00	0,27	0,44	0,28	0,00	0,37	0,56
30	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,20	0,30
31	0,14	0,23	0,00	0,00	0,21	0,28	0,00	0,00	0,15	0,20	0,00	0,00	0,36	0,54
32	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,20	0,30
33	0,07	0,09	0,00	0,00	0,10	0,12	0,00	0,00	0,14	0,17	0,00	0,00	0,20	0,30
34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,20	0,30
35	0,06	0,09	0,00	0,00	0,03	0,06	0,00	0,00	0,06	0,09	0,00	0,00	0,34	0,51
36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,30
37	0,04	0,05	0,00	0,00	0,04	0,05	0,00	0,00	0,06	0,08	0,00	0,00	0,34	0,51
38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,30
39	0,00	0,02	0,00	0,00	0,02	0,03	0,00	0,00	0,02	0,03	0,00	0,00	0,20	0,30
40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,20	0,30