

На правах рукописи

Плотн.

ПЛОТНИКОВ МИХАИЛ ПАВЛОВИЧ

**Моделирование несинусоидальных режимов двухцепных воздушных
линий электропередачи**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические
системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2015

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

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Большанин Георгий Анатольевич

Официальные оппоненты: **Хрущев Юрий Васильевич**
доктор технических наук, профессор
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
"Национальный исследовательский Томский
политехнический университет", профессор кафедры
«Электрических сетей и электротехники»

Насыров Ринат Ришатович
кандидат технических наук, Федеральное
государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
"Национальный исследовательский университет
"Московский энергетический институт", научный
сотрудник кафедры «Электроэнергетических систем»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Национальный
исследовательский Иркутский государственный
технический университет», г. Иркутск

Защита состоится «18» июня 2015 года в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.173.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет» 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте http://www.nstu.ru/science/dissertation_sov/dissertations/view?id=1681

Автореферат разослан «__» _____ 2015г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



А.Г. Русина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность темы. Расчеты установившихся режимов воздушных линий электропередачи являются неотъемлемой частью решения задач, связанных с проектированием и эксплуатацией электрических систем (ЭС). Результаты этих расчетов используются при планировании режимов, оперативном управлении, расчете потерь мощности и напряжения, а также служат базой для оптимизации, оценки устойчивости и надежности ЭС.

В промышленных регионах электрическая энергия, транспортируемая по двухцепным воздушным линиям (ВЛ), часто характеризуется токами и напряжениями с заметными уровнями несинусоидальности. Такую энергию называют электрической энергией пониженного качества.

Методы расчета токов и напряжений, использующие однопроводное представление ВЛ, справедливы для анализа электрической энергии, удовлетворяющей требованиям ГОСТ 32144 – 2013. Отсутствие учета несинусоидальности при реализации методов расчета приводит к увеличению погрешности при расчете токов и напряжений в двухцепной ВЛ. Понижение качества электрической энергии заставляет вносить в эти методы коррективы, игнорирование которых увеличивает различие между расчетным и фактическим распределением токов и напряжений по участкам двухцепной ВЛ.

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

Таким образом, проблема расчета режимных параметров в двухцепной ВЛ при несинусоидальном режиме работы является актуальной и современной, требующей все новых подходов к ее решению.

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 ВЛ 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 ВЛ на основе метода фазных координат и теории четырнадцатиполосников, учитывающий поверхностный эффект, взаимные электромагнитные связи между проводами, проводами и заземленными конструктивными элементами при несинусоидальных режимах.

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

Практическая ценность результатов работы:

1. Разработан метод расчета несинусоидальных режимов двухцепных ВЛ.

2. Создан программный комплекс, позволяющий во время эксплуатации двухцепных ВЛ 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 ВЛ необходимо учитывать скин-эффект и взаимные электромагнитные связи между проводами, проводами и заземленными конструктивными элементами.

2. Адекватное моделирование несинусоидальных режимов двухцепных ВЛ возможно при их многопроводном представлении в виде каскадного соединения четырнадцатиполосников.

Соответствие специальности.

Содержание диссертации Плотникова Михаила Павловича на соискание степени кандидата технических наук 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.Щёцин 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.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель работы и основные задачи исследования. Показана научная новизна и практическая значимость работы, приводятся основные положения, выносимые на защиту, сведения об апробации.

В первой главе дается обзор современного состояния вопроса моделирования несинусоидальных режимов и методов расчета режимных параметров в двухцепных ВЛ.

Расчеты режимных параметров являются основными при решении огромного количества задач, связанных с проектированием, эксплуатацией ЭС. Результаты расчетов используются при планировании режимов, оперативном управлении, электроснабжении промышленных и иных объектов, а также служат базой для оптимизации, оценки устойчивости и надежности ЭС. Решениям указанных задач посвящено большое количество работ, авторами которых являются: Альмендеев А.А., Аррилага Дж., Баринов В.А., Большанин Г.А., Ведерников А.С., Веников В.А., Воропай Н.И., Евдокунин Г.А., Жежеленко И.В., Железко Ю.С., Закарюкин В.П., Идельчик В.И., Коверникова Л.И., Курбацкий В.Г., Мисриханов М.Ш., Насыров Р.Р., Хрущев Ю.В. и др.

Проведенный анализ показал, что существует ряд методов для решения задач, связанных с расчетом режимных параметров в ВЛ. Наибольшее применение получили методы симметричных составляющих и фазных координат, а также различные их модификации.

Проведенный обзор методов расчета режимных параметров показал, что существующие методы расчета ориентированы на синусоидальную форму напряжений и токов в линии при абсолютной симметрии, что далеко не всегда соответствует действительности, и в этой связи появляется необходимость совершенствовать существующие методы расчета режимных параметров.

Во второй главе разработана электрическая схема замещения двухцепной ВЛ.

В условиях качества электрической энергии, соответствующего требованиям ГОСТ 32144 – 2013, электрические цепи протяженностью меньше 300 км рассматривают как цепи с сосредоточенными параметрами. При наличии в электрической энергии высших гармонических составляющих, когда 5-процентная длина электромагнитной волны меньше протяженности ВЛ, необходимо рассматривать ВЛ как цепи с распределенными параметрами.

Таким образом, для анализа распределения тока и напряжения по двухцепной ВЛ в условиях пониженного качества электроэнергии необходима расчетная схема замещения, при составлении которой учитывается ряд особенностей:

1. Двухцепную ВЛ необходимо представлять в виде схемы с распределенными параметрами.

2. Схему замещения следует составлять для каждой гармонической составляющей.

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

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

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

С учетом выше сказанных особенностей на рисунке 1 представлена расчетная электрическая схема замещения однородного участка двухцепной ВЛ на частоте n -ой гармонической составляющей.

Даная схема позволит учитывать электромагнитные связи между конструктивными элементами двухцепной ВЛ при несинусоидальных режимах работы.

Продольные параметры характеризуют сопротивление самого провода ВЛ, это активное сопротивление провода и индуктивность провода. Поперечные параметры двухцепной ВЛ характеризуют электромагнитную связь между проводами ВЛ и поверхностью земли или заземленными конструктивными элементами.

Сформулирована методика определения первичных параметров двухцепной ВЛ с учетом несинусоидальности токов и напряжений.

В третьей главе сформирована методика расчета режимных параметров в двухцепной ВЛ с учетом взаимных электрических и магнитных связей между проводами.

В двухцепной ВЛ присутствуют шесть фазных токов, фазных напряжений и линейных напряжений, а также три напряжения между одноименными проводами разных цепей и шесть напряжений между разноименными проводами разных цепей. Рабочая математическая модель однородного элементарного участка двухцепной ВЛ будет состоять из двадцати семи уравнений.

Поскольку напряжение и ток являются функциями времени и протяженности анализируемого участка ВЛ, то в модели необходимо использовать частные производные.

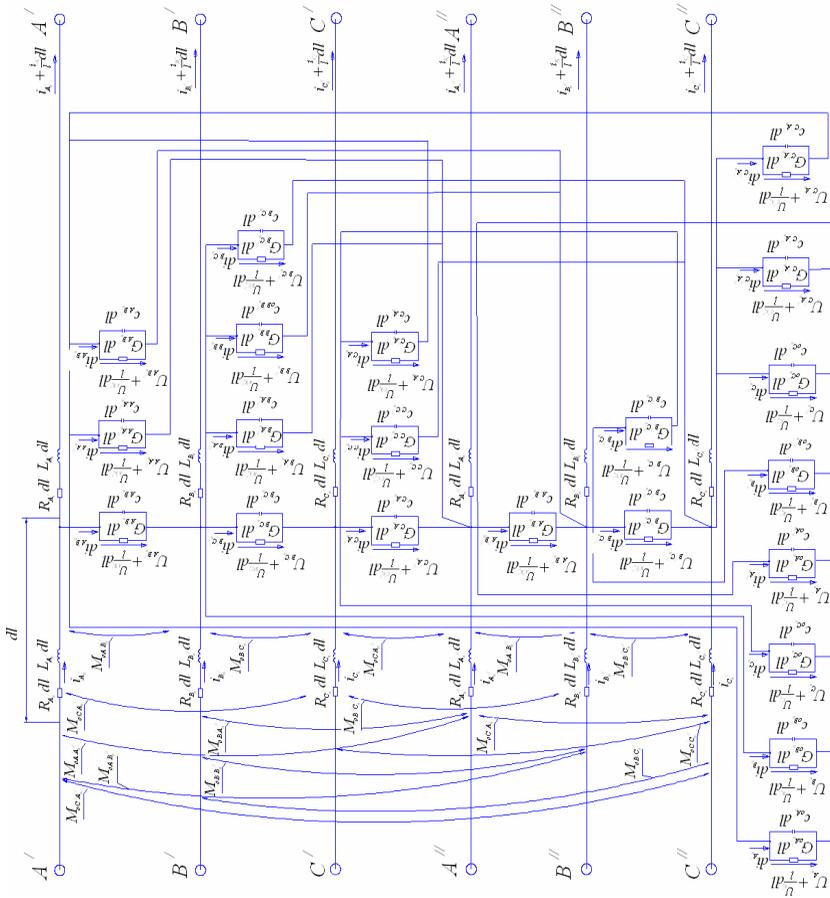


Рисунок 1 – Расчетная электрическая схема замещения однородного участка двухцепной ВЛ на частоте n -ой гармонической составляющей

Математическая модель строится на основании законов Кирхгофа. Для тока в линии A' будет справедлив 1-ый закон Кирхгофа:

$$i_{A'n} = di_{A'n} + di_{A'B'n} + di_{A'A'n} + di_{A'B''n} - di_{C'A'n} - di_{C''A'n} + i_{A'n} + \frac{\partial i_{A'n}}{\partial l} \cdot dl. \quad (1)$$

Для напряжения в фазе A' справедлив 2-ой закон Кирхгофа:

$$u_{A'n} = i_{A'n} \cdot R_{0A'n} \cdot dl + L_{0A'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{A'n}}{\partial t} + M_{0A'B'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{B'n}}{\partial t} + M_{0C'A'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{C'n}}{\partial t} + M_{0A'A'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{A'n}}{\partial t} + M_{0A'B''n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{B''n}}{\partial t} + M_{0C''A'n} \cdot dl \cdot \frac{\partial i_{C''n}}{\partial t} + u_{A'n} + \frac{\partial u_{A'n}}{\partial l} \cdot dl, \quad (2)$$

где $di_{A'n}$, $di_{A'B'n}$, $di_{A'A'n}$, $di_{A'B'n}$, $di_{C'A'n}$, $di_{C'A'n}$ – токи «утечки» по соответствующим линиям; $M_{0A'B'n}$, $M_{0C'A'n}$, $M_{0A'A'n}$, $M_{0A'B'n}$, $M_{0C'A'n}$ – взаимная индуктивность между соответствующими проводами.

Уравнения для других линий составляются аналогично.

В результате совместных преобразований уравнений (1)-(2) для линии A' получается дифференциальное уравнение второго порядка:

$$\begin{aligned} \frac{d^2\dot{U}_{A'n}}{dt^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'C'n} + \underline{Y}_{0B'B'n} + \underline{Y}_{0B'C'n} + \\ & + \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'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}_{0B'C'n}) - \underline{Y}_{0C'A'n}Z_{0A'n} - \underline{Y}_{0B'C'n}Z_{0A'B'n} - \\ & - \underline{Y}_{0C'C'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}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\dot{U}_{A'n}$, $\dot{U}_{B'n}$, $\dot{U}_{C'n}$, $\dot{U}_{A'n}$, $\dot{U}_{B'n}$, $\dot{U}_{C'n}$ – действующие значения напряжения на комплексной плоскости на частоте n -ой гармонической составляющей; $Z_{0A'n}$, $Z_{0B'n}$, $Z_{0C'n}$, $Z_{0A'n}$, $Z_{0B'n}$, $Z_{0C'n}$ – продольные сопротивления каждого провода ВЛ, $\underline{Y}_{0A'0n}$, $\underline{Y}_{0B'0n}$, $\underline{Y}_{0C'0n}$, $\underline{Y}_{0A'0n}$, $\underline{Y}_{0B'0n}$, $\underline{Y}_{0C'0n}$ – поперечная проводимость каждого провода между заземленными конструкциями ВЛ, $\underline{Y}_{0A'B'n}$, $\underline{Y}_{0C'A'n}$, $\underline{Y}_{0A'A'n}$, $\underline{Y}_{0A'B'n}$, $\underline{Y}_{0C'A'n}$ – поперечная проводимость между соответствующими проводами двухцепной ВЛ.

Уравнения для других линий составляются аналогично.

Таким образом, получаются шесть дифференциальных уравнений второго порядка. Характеристическое уравнение системы, составленное из уравнений типа (3) имеет вид:

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

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

Результатом решения уравнения (4) являются шесть корней $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$.

Постоянные распространения электромагнитной волны по однородному участку двухцепной ВЛ для каждой пары волн электромагнитного поля на частоте n -ой гармонической составляющей определяются так:

$$\gamma_{-1n} = \sqrt{x_1}, \gamma_{-2n} = \sqrt{x_2}, \gamma_{-3n} = \sqrt{x_3}, \gamma_{-4n} = \sqrt{x_4}, \gamma_{-5n} = \sqrt{x_5}, \gamma_{-6n} = \sqrt{x_6}.$$

$$\underline{\gamma}_{-in} = \alpha_{in} + j\beta_{in};$$

где α_{in} – коэффициент затухания n -ой гармонической составляющей i -ой пары электромагнитной волны; β_{in} – коэффициент изменения фазы этой же волны при ее перемещении вдоль линии на 1 км.

После преобразования математической модели получим уравнения для определения действующих величин напряжений и токов на однородном участке двухцепной ВЛ на частоте n -ой гармонической составляющей:

$$\dot{U}_{A'n} = \frac{1}{6} \left(\sum_{i=1}^6 \left(\dot{U}_{1A'n} \cdot ch\gamma_{-in} l - \dot{I}_{1A'n} \cdot Z_{cA'in} \cdot sh\gamma_{-in} l \right) \right); \quad (5)$$

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

где $\dot{U}_{1A'n}, \dot{U}_{1B'n}, \dot{U}_{1C'n}, \dot{U}_{1A''n}, \dot{U}_{1B''n}, \dot{U}_{1C''n}$ и $\dot{I}_{1A'n}, \dot{I}_{1B'n}, \dot{I}_{1C'n}, \dot{I}_{1A''n}, \dot{I}_{1B''n}, \dot{I}_{1C''n}$ – напряжения и токи в начале рассматриваемого участка на частоте n -ой гармонической составляющей; $Z_{cA'in}, Z_{cB'in}, Z_{cC'in}, Z_{cA''in}, Z_{cB''in}, Z_{cC''in}, Z_{cA'B'in}, Z_{cC'A'in}, Z_{cA'A'in}, Z_{cA'B''in}, Z_{cC'A''in}$ – собственные и взаимные волновые сопротивления двухцепной ВЛ.

Из уравнений (5) и (6) следует, что передача электрической энергии по каждому проводу обеспечивается шестью парами волн электромагнитного поля – шестью падающими и шестью отраженными.

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

$$\tilde{S}_{A'n} = \dot{U}_{A'n} \cdot I_{A'n}^* . \quad (7)$$

Уравнения для других линий составляются аналогично.

Так определяются основные характеристики электрической энергии, распределенной по однородному участку двухцепной ВЛ на частоте n -ой гармонической составляющей. Применение математических выражений (5)-(7) возможно лишь при известных спектральных составах фазных и линейных напряжений, токов в начале рассматриваемого участка двухцепной ВЛ, но существует возможность определения тока и напряжения и при известных выходных характеристиках электрической энергии.

По формулам (5)-(7) можно вычислить действующие значения напряжения, тока и мощности для частоты n -ой гармонической составляющей. Для полного представления описываемых характеристик электрической энергии следует суммировать все гармонические составляющие тока и напряжения.

С помощью математических выражений (5)-(7) появляется возможность определения количественных оценок основных характеристик электрической энергии практически на любой частоте в любом месте однородного участка двухцепной ВЛ. Для этого, кроме входных или выходных характеристик электрической энергии, необходимо иметь достоверные сведения о параметрах электрической схемы замещения этого участка.

Однако, в реальной ситуации протяженность даже относительно однородного участка ВЛ будет весьма ограничена. Поэтому неоднородный участок двухцепной ВЛ целесообразно представлять в виде совокупности относительно однородных участков. Причем каждый из таких участков можно представить в виде многополюсника. В рассматриваемом случае каждый однородный участок целесообразно представлять в виде четырнадцатиполюсника (шесть проводов + земля) (рисунок 2). Всю двухцепную ВЛ можно представить в виде совокупности k пассивных четырнадцатиполюсников (рисунок 3).

При объединении первого и второго четырнадцатиполюсника для определения напряжения и тока на частоте n -ой гармонической составляющей нет необходимости в сведениях о напряжении и токе этой же частоты в конце первого четырнадцатиполюсника. Так можно объединить любое количество четырнадцатиполюсников.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований.

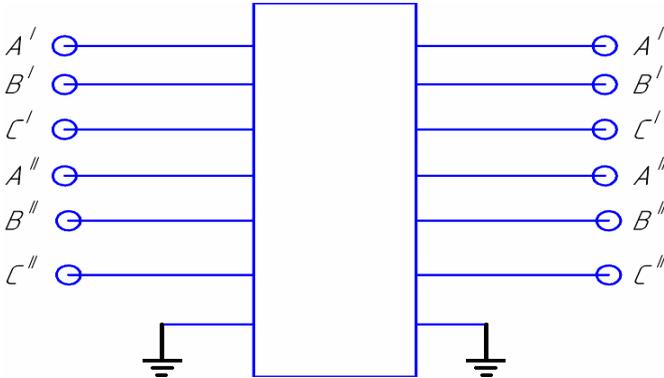


Рисунок 2 – Четырнадцатиполусник, замещающий однородный участок двухцепной ВЛ

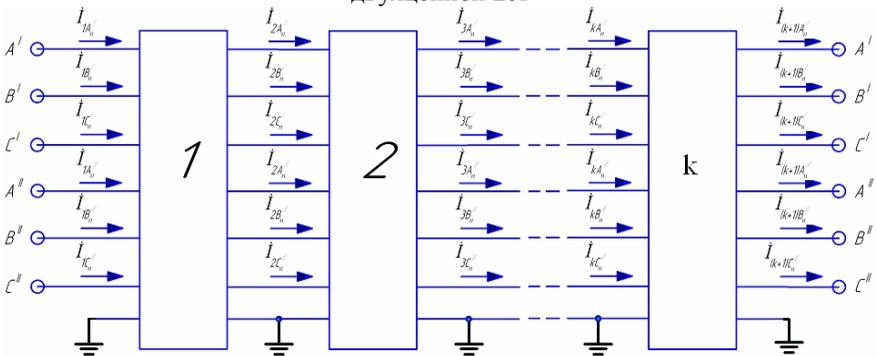


Рисунок 3 – Вариант представления неоднородного участка двухцепной ВЛ на частоте n -ой гармонической составляющей в виде совокупности четырнадцатиполусников

В настоящее время в большинстве программных комплексов используются методы расчета установившихся режимов электрических систем, базирующиеся на однолинейном представлении трехфазных цепей. Кроме того, в расчетах пренебрегают взаимовлиянием проводов ВЛ без каких-либо дополнительных обоснований, что может привести к увеличению погрешности.

Для определения достоверности разработанной математической модели двухцепной ВЛ были проведены экспериментальные исследования на действующих ВЛ.

В диссертационной работе приведены результаты экспериментальных исследований, проведенных на двухцепной ВЛ напряжением 220 кВ Братской ГЭС – Седановский переключательный пункт (Бр.ГЭС-СПП) длиной 94 км. Данная линия принадлежит «ООО Иркутской электросетевой

компании» и обслуживается «Северными электрическими сетями» (СЭС). Значится под номерами 242, 243, выполнена проводом марки АС 300/39.

Математическая модель прошла апробацию в СЭС, что подтверждено соответствующим актом об использовании результатов работы и протоколом измерений.

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.

По полученным данным с Братской ГЭС на рисунке 4 и рисунке 5 были построены графики распределения активной и реактивной мощности от протяженности двухцепной ВЛ.

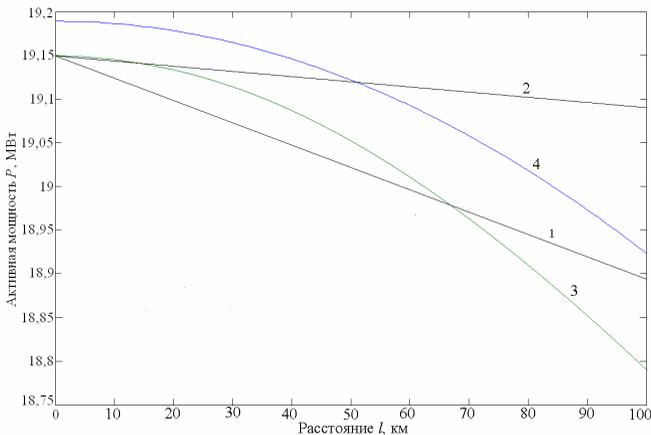


Рисунок 4 – Графическая интерпретация распределения активной мощности для линии A' вдоль однородного участка двухцепной ВЛ, где: 1 – экспериментальные данные, 2 – расчетные данные, выполненные по традиционной методике, 3 – расчетные данные по предлагаемой методике, 4 – расчетные данные с учетом вещественной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

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.

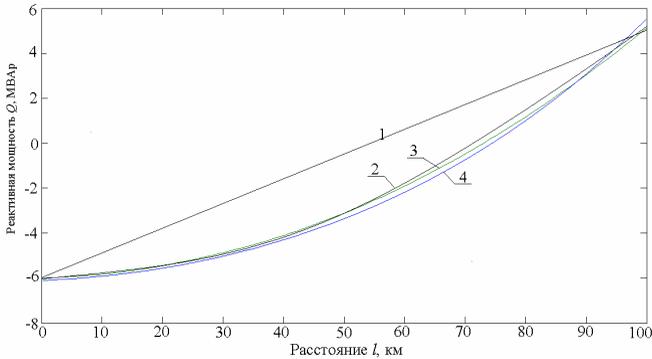


Рисунок 5 – Графическая интерпретация распределения реактивной мощности для линии A^1 вдоль однородного участка двухцепной ВЛ, где: 1 – экспериментальные данные, 2 – расчетные данные, выполненные по традиционной методике, 3 – расчетные данные по предлагаемой методике, 4 – расчетные данные с учетом мнимой части мощности искажений

На рисунке 6 представлена графическая зависимость суммарных коэффициентов гармонических составляющих фазных напряжений на подстанции «Седановский переключательный пункт».

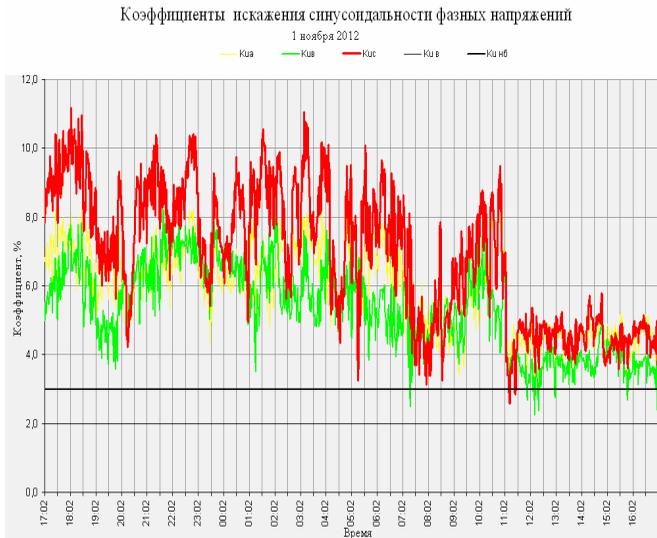


Рисунок 6 – Суммарные коэффициенты гармонических составляющих фазных напряжений, %

Из рисунка 6 видно, что в течение суток суммарный уровень коэффициентов гармонических составляющих фазных напряжений превышает предельно-допустимое значение, что не соответствует ГОСТ 32144 – 2013.

На рисунке 7 представлены коэффициенты n -ых гармонических составляющих напряжения для фазы A' . Из рисунка 7 видно, что уровень коэффициентов 9, 11 и 13-ой гармонической составляющей превышает свое предельно допустимое значение. Появление 9, 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.

Наибольшее значение коэффициента n -ых гармонических составляющих напряжения зафиксировано на 11 гармонике.

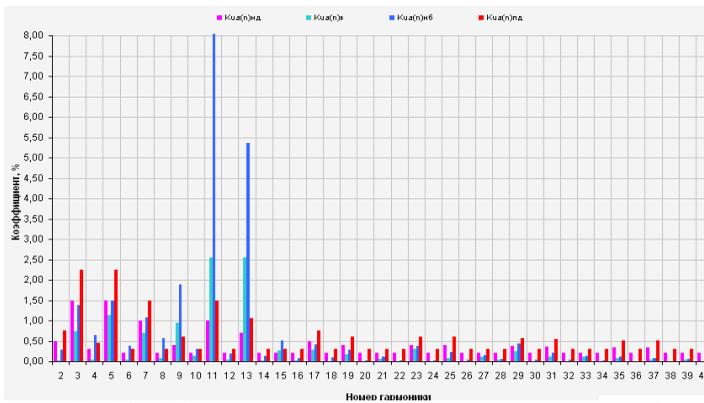


Рисунок 7 – Коэффициенты гармонических составляющих фазного напряжения

Используя предложенную методику в качестве примера, рассмотрим распределение тока и напряжения на 11 гармонике. На рисунке 8 представлена графическая интерпретация распределения действующих значений напряжения и тока для линии A' на 11-ой гармонической составляющей.

Из рисунка 8 видно, что на линии A' протяженностью 100 км напряжение составляет 10,72 кВ, а ток равен 14 А. При повышенных коэффициентах n -ых гармонических составляющих будут наблюдаться перенапряжения. В данном случае в конце линии 100 км происходит увеличение напряжения на 8,8 кВ из-за наличия в сети высших гармонических составляющих.

Учет высших гармоник тока и напряжения позволит получить наиболее достоверный характер распределения электрической энергии в двухцепной ВЛ.

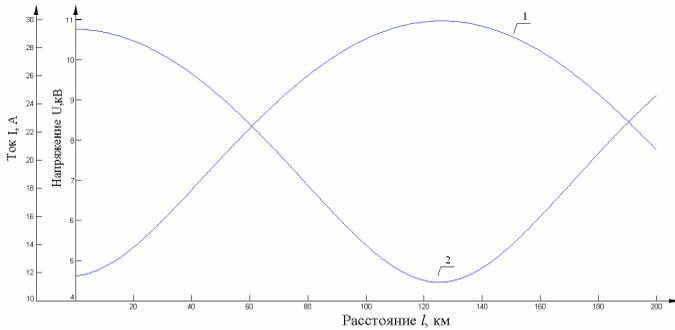


Рисунок 8 – Графическая интерпретация распределения действующих значений напряжения и тока для линии A' на 11-ой гармонической составляющей: 1 – распределение напряжения, 2 – распределение тока

Таким образом, 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.

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

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

2. Разработан метод расчета режимных параметров двухцепной ВЛ на основе метода фазных координат и теории четырнадцатиполосников, учитывающий поверхностный эффект, взаимные электромагнитные связи между проводниками, проводниками и заземленными конструктивными элементами при несинусоидальных режимах.

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

4. Произведены экспериментальные исследования для определения достоверности предлагаемого метода расчета токов и напряжений 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.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ
В изданиях, рекомендованных ВАК

1. 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.
2. Плотников М.П. Распределение напряжения по двухцепной линии электропередачи. / М.П. Плотников, Г.А. Большанин // Системы. Методы. Технологии. 2012. № 4 (16). С. 66-70
3. 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.

В прочих изданиях

4. Плотников М.П. Особенности распределения электрической энергии по городским сетям. / М.П. Плотников, Г.А. Большанин // Труды Братского государственного университета: Сер.: Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири. – в 2 т.– Братск: Изд-во БрГУ, 2011. – Т.2. с. 48-51.
5. Плотников М.П. Особенности распределения электрической энергии пониженного качества по городским сетям. / М.П. Плотников, Г.А. Большанин // Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири: материалы X (XXXII) Всероссийской научно-технической конференции. – Братск: Изд.-во БрГУ, 2011. – с. 68-69.
6. Плотников М.П. Подход к расчету высших гармоник и системное прогнозирование в электроэнергетике. / М.П. Плотников, Г.А. Большанин // Н 34 «Наука и техника в современном мире»: материалы международной заочной научно-практической конференции. (05 октября 2011 г.) – Новосибирск: Изд-во. «Априори», 2011. – с.17-21.
7. Плотников М.П. Несинусоидальность напряжения как один из факторов ухудшения качества электрической энергии. / М.П. Плотников, Г.А. Большанин // 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. – с. 5-9.
8. Плотников М.П. Снижение потерь электрической энергии в районных электрических сетях. / М.П. Плотников, Г.А. Большанин // Наукові дослідження сучасності./Збірка наукових праць. – Киев.: НАИРИ, 2011. – с. 56-59.

9. Плотников М.П.. Компенсация реактивной мощности в районных сетях. / М.П. Плотников, Г.А. Большанин // Ежемесячный научный журнал № 12. – Чита.: Изд-во: «Молодой ученый» 2011 – с. 37 – 39.

10. Плотников М.П.. Повышение эффективности функционирования двухцепных линий. / М.П. Плотников, Г.А. Большанин // MATERIALY Międzynarodowej Naukowo-Praktycznej Konferencji Postępów w nauce. Nowe poglądy, problemy, innowacje/(29.07.2012 – 31.07.2012) – Łódź, 2012. – str. 17-19.

11. 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. – с. 96-97.

12. Плотников М.П.. Особенности схемы замещения трехфазной двухцепной ВЛ пониженного качества электрической энергии. / 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. – с. 97-98.

13. Плотников М.П.. Оптимизация математической модели трехфазной двухцепной ВЛ. / М.П. Плотников, Г.А. Большанин // Труды Братского государственного университета: Сер.: Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири. – в 2 т.– Братск: Изд-во БрГУ, 2012. – Т.2. с. 122-126.

14. Плотников М.П.. Особенности схемы замещения трехфазной двухцепной ВЛ пониженного качества электрической энергии. / М.П. Плотников, Г.А. Большанин // Труды Братского государственного университета: Сер.: Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири. – в 2 т.– Братск: Изд-во БрГУ, 2012. – Т.2. с. 126-128.

15. Плотников М.П.. Распределение тока и напряжения по однородному участку двухцепной линии электропередачи. / М.П. Плотников, Г.А. Большанин // Zbiór raportów naukowych. «Teoretyczne I praktyczne innowacje naukowe». (29.01.2013 – 31.01.2013) – Kraków: Wydawca: Sp. z o.o. «Diamond trading tour», 2013. str. 92-95.

16. Плотников М.П.. Напряжение по двухцепной линии электропередачи. / М.П. Плотников, Г.А. Большанин // Zbiór raportów naukowych. «Perspektywy rozwoju badań naukowych w 21 wieku». (27.02.2013 – 28.02.2013) – Szczecin: Wydawca: Sp. z o.o. «Diamond trading tour», 2013. str. 37-41.

17. Плотников М.П. Взаимная индуктивность между проводами двухцепной воздушной линии. / М.П. Плотников, Г.А. Большанин // Труды Братского государственного университета: Сер.: Естественные и инженерные науки. – Т.1– Братск: Изд-во БрГУ, 2014. – Т.2. с. 73-75.

18. Патент РФ на изобретение № 2529640. Плотников М.П., Большанин Г.А., «Способ прогнозирования распределения гармонических составляющих

тока и напряжения по неразветвленным участкам шестипроводной линии электропередачи». Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 05 августа 2014 г. Опубликовано 05.08.2014. Бюл. № 27.

19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014615987. Плотников М.П., Большанин Г.А., «Расчет токов и напряжений по двухцепной линии электропередачи (Strom_Spannung v. 1.00)». Зарегистрировано в Государственном реестре программ ЭВМ Российской Федерации 06 июня 2014 г. Опубликовано 06.06.2014. Бюл. № 7.

Подписано в печать 13.03.2015

Формат $60 \times 84 \frac{1}{16}$

Печать трафаретная.

Усл. печ. л. 1,19.

Тираж 100 экз. Заказ

Отпечатано в типографии
Братского государственного университета
665709, г. Братск, ул. Макаренко, 40
тел./факс. (3953) 32-53-37