

Добрягина Ольга Александровна,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами,

e-mail: dobryagina@eef.ispu.ru

Dobryagina Olga Alexandrovna,

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering (PhD), Associate Professor of the Department of Automatic Control of Electric Power Systems, e-mail: dobryagina@eef.ispu.ru

Кутумов Юрий Дмитриевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», магистрант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, e-mail: rza@rza.ispu.ru

Kutumov Yuri Dmitrievich,

Ivanovo State Power Engineering University, Master student of the Department of Automatic Control of Electric Power Systems, e-mail: rza@rza.ispu.ru

Шадрикова Татьяна Юрьевна,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами,

e-mail: stu@rza.ispu.ru

Shadrikova Tatyana Yuryevna,

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering (PhD), Associate Professor of the Department of Automatic Control of Electric Power Systems, e-mail: stu@rza.ispu.ru

Шуин Владимир Александрович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, телефон (4932) 26-99-06,

e-mail: vshuin@mail.ru

Shuin Vladimir Alexandrovich,

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering, Professor of the Department of Automatic Control of Electric Power Systems, telephone (4932) 26-99-06, e-mail: vshuin@mail.ru

УДК 621.311

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ НА ВОЛНОВОМ ПРИНЦИПЕ

В.Д. ЛЕБЕДЕВ, Ю.Д. КУТУМОВ

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

г. Иваново, Российская Федерация

E-mail: vd_lebedev@mail.ru, kutumov97@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. Сложность переходных процессов при распространении электромагнитных волн в воздушных линиях электропередачи сверхвысокого напряжения обусловлена наличием большого числа частотных компонент в фронте бегущей электромагнитной волны. Для корректного анализа вышеупомянутых переходных процессов в целях разработки устройств релейной защиты и определения места повреждения на волновом принципе необходим точный учет параметров среды, в которой происходит распространение электромагнитной волны. Для ЛЭП такими параметрами являются продольные индуктивности, продольные активные сопротивления, поперечные емкости, а также поперечные активные проводимости. Стоит отметить, что в силу ряда причин удельные продольные индуктивности и активные сопротивления ЛЭП являются зависимыми от частоты параметрами, что обуславливает различную скорость распространения различных частотных компонент фронта электромагнитной волны. В известных работах, посвященных решению данной проблемы, либо не учитывается зависимость параметров ЛЭП от частоты, либо зависимость учитывается приближенно для диапазона высоких частот, что может привести к значительным неточностям при анализе переходных процессов, протекающих в ЛЭП при распространении электромагнитной волны. В связи с этим проблема разработки подхода к моделированию воздушных ЛЭП, который позволит как определять параметры ЛЭП в широком частотном диапазоне, так и исследовать статические режимы и переходные процессы в длинных линиях, остается актуальной.

Материалы и методы. В качестве основного метода определения параметров воздушной ЛЭП сверхвысокого напряжения выбрано имитационное моделирование в программном комплексе COMSOL Multiphysics. При моделировании приняты следующие допущения: равномерный слой грунта, однородный участок ЛЭП, а также отсутствие провиса проводов. Использование численного метода конечных элементов для решения дифференциальных уравнений в вышеупомянутом программном комплексе также подразумевает собой допущение.

Результаты. Сформулирован подход к моделированию ЛЭП сверхвысокого напряжения, который заключается в использовании уравнений Максвелла в сочетании с численным интегрированием методом конечных элементов. Получены зависимости продольных параметров ЛЭП от частоты и значения скорости распространения различных частотных компонент электромагнитной волны вдоль ЛЭП.

Выводы. Полученные зависимости могут быть использованы при актуализации моделей электроэнергетических систем для дальнейших исследований в области устройств защиты и автоматики. Предложенный подход позволяет оценить параметры ЛЭП других классов напряжения, а также уточнить значения параметров ЛЭП и скорости распространения электромагнитных волн вдоль ЛЭП для области высоких частот. Использование данных моделей воздушной ЛЭП позволит в перспективе сформулировать подходы к усовершенствованию существующих устройств релейной защиты и определению места повреждения на волновом принципе.

Ключевые слова: воздушные ЛЭП сверхвысокого напряжения, параметры воздушных ЛЭП, электромагнитные волны, имитационное моделирование в COMSOL Multiphysics, релейная защита на волновом принципе, определение места повреждения

MATHEMATICAL SIMULATION OF EXTRA-HIGH VOLTAGE OVERHEAD TRANSMISSION LINES FOR TRAVELLING-WAVE-BASED RELAY PROTECTION DEVICES

V.D. LEBEDEV, Yu.D. KUTUMOV

Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

E-mail: vd_lebedev@mail.ru, kutumov97@mail.ru

Abstract

Background. The complexity of transient processes during travelling-wave propagation in extra high voltage overhead lines is determined by the fact that many frequency components are presented in the electromagnetic wave front. For the correct analysis of the aforementioned transient processes and for further development of travelling-wave-based relay protection and fault location devices, it is necessary to take into account the parameters of the environment where electromagnetic wave propagation occurs. For the transmission line, these parameters are longitudinal inductance, longitudinal resistance, shunt capacitance and shunt resistive conductance. It is worth mentioning that for a variety of reasons unit-area longitudinal inductance and resistance are the parameters which depend on frequency, thus travelling wave velocity is different for different frequency components of the electromagnetic wave front. The popular researches which address this problem either fail to consider the dependence of overhead line inductance and resistance on frequency or this dependence is considered approximately for the high-frequency range, which can cause significant errors in the transient processes analysis during travelling wave propagation. In view of this, the development of the approach to overhead transmission lines simulation, which will allow both determining the line parameters in a wide frequency range and evaluating steady-state behaviour and transient processes in long-distance transmission lines, arrears relevant.

Materials and methods. The main research method to establish extra-high voltage transmission line parameters employs the simulation study in COMSOL Multiphysics. A number of assumptions were made in the simulation process: homogeneous soil layer, entire transmission line section and absence of transmission line conductor sag. The usage of finite elements method (FEM) for differential equation solution in the above-mentioned software is also seen as an assumption.

Results. The approach to extra-high voltage transmission lines simulation has been offered. This approach consists of the usage of Maxwell's equations in combination with numerical integration with finite elements method (FEM). Frequency response for transmission line parameters and travelling-wave propagation velocity rate for different frequency components have been obtained.

Conclusions. The results obtained can be used in updating of electrical power system models for further research in the relay protection field. The suggested approach will allow evaluating line parameters of other voltage types and obtaining more accurate values of transmission line parameters and travelling wave propagation speed along transmission lines for high-frequency range. The use of these transmission line models will

enable to formulate approaches to improve the existing algorithms of travelling-wave-based relay protection and fault location devices.

Key words: extra-high voltage overhead transmission lines, overhead transmission line parameters, electromagnetic waves, simulation study in COMSOL Multiphysics, travelling-wave-based relay protection, fault location

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.2.040-050

Введение. Сложность переходных процессов, обусловленных распространением электромагнитной волны (ЭМВ) вдоль воздушной ЛЭП сверхвысокого напряжения, обуславливает необходимость точного расчета параметров воздушной ЛЭП в широком частотном диапазоне. Основная причина заключается в том, что фронт распространяющегося вдоль ЛЭП волнового возмущения имеет множество частотных компонент с частотами от единиц герц до десятков мегагерц. Основными задачами, правильное решение которых определяется наличием корректного расчета параметров ЛЭП, являются:

1) разработка устройств быстродействующей релейной защиты на волновом принципе;

2) разработка устройств определения места повреждения (ОМП) на волновом принципе, обладающих минимальной погрешностью;

3) анализ электромагнитных процессов в воздушных ЛЭП при грозовых и коммутационных перенапряжениях.

Существует множество работ, связанных с оценкой величины параметров воздушных ЛЭП. Существенный вклад в исследование данного аспекта в части расчета зависимостей продольных параметров воздушных ЛЭП от частоты внесли J. Carson [1], R. Rudenberg [2], М.В. Костенко, Л.С. Перельман, Ю.П. Шкарин [3]. Ряд работ посвящен сравнению моделей воздушной ЛЭП согласно теории Carson'a и согласно теории Rudenberg'a [4]. В связи с тем, что в данных источниках приводятся приближенные аналитические зависимости продольных активных сопротивлений и индуктивностей от частоты, в области высоких частот указанные методики могут иметь существенные погрешности. Определение поперечных емкостей, обуславливающих зарядный ток, не представляет затруднений ввиду независимости емкости воздушной ЛЭП от частоты.

Степень проработанности проблемы. Аналитический обзор известных методов расчета параметров воздушных ЛЭП сверхвысокого напряжения.

Основным источником, используемым при расчете удельных продольных параметров ЛЭП, является методика, сформулированная еще в 1926 году J. Carson'ом [1]. Данная методика используется и в настоящее время при определении сопротивлений схемы замещения ЛЭП для расчета токов короткого замыкания согласно Руководящим указаниям по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования. При определении продольных сопротивлений ЛЭП J. Carson'ом было использовано интегральное преобразование, приближенно представленное степенным рядом. Наличие в полученных расчетных формулах только первых членов данного ряда обуславливает погрешность метода Carson'a в диапазоне высоких частот. При этом для частоты 50 Гц значения индуктивностей и активных сопротивлений воздушных ЛЭП весьма приемлемы, что обуславливает их применение и в настоящее время при расчетах уставок устройств релейной защиты, использующих в качестве информационной величины составляющие токов и напряжений основной частоты (50 Гц)¹. Анализ методики Carson'a, а также подходы к анализу результатов, полученных в [1], приведены также в [5–8].

В отличие от продольных индуктивностей и активных сопротивлений, расчет поперечных емкостей, обуславливающих наличие зарядного тока в ЛЭП, представляет собой менее сложную задачу: емкости ЛЭП не зависят от частоты, что значительно облегчает расчеты. При этом стоит отметить, что в Руководящих указаниях по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования весьма приближенно учитывается несимметрия располо-

¹ РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования.

жения фазных проводов воздушной ЛЭП относительно друг друга.

Известна методика расчета поперечных активных сопротивлений, обусловленных коронным разрядом². Отмечается, что коронный разряд является значимым источником высокочастотных помех, его уровень зависит от величины напряжения ЛЭП, степени изношенности провода, а также внешних атмосферных условий. Исследованию способов измерения коронного разряда в ЛЭП, а также моделированию процессов, связанных с коронным разрядом, посвящен ряд работ (например, [9, 10]). В рамках данного исследования оценка влияния нелинейного по своей сути поперечного сопротивления воздушной ЛЭП на ее волновые характеристики производится не будет.

Материалы и методы. С учетом ограниченной возможности определения параметров воздушных ЛЭП на физических моделях целесообразным представляется использовать современные программные комплексы имитационного моделирования, такие как PSCad и COMSOL Multiphysics. Программный комплекс PSCad реализует при расчете параметров схемы замещения ЛЭП модель Carson'a с рядом дополнений, описанных в [11, 12], при этом модель ЛЭП имеет распределенные параметры. Программный комплекс COMSOL Multiphysics позволяет исследовать объекты любой конфигурации, основываясь на уравнениях классической электродинамики (например, уравнении Максвелла)³. Принципы работы в данном программном комплексе широко известны и описаны в ряде источников, например в [13].

Использование уравнений классической электродинамики позволит избежать погрешностей, характерных для метода Carson'a: точность расчета ограничена только шагом разбиения расчетной области на конечные элементы. Так, для расчета продольных индуктивностей и активных сопротивлений ЛЭП предполагается использование раздела Magnetic fields программного комплекса COMSOL Multiphysics. Математической основой для

расчета электромагнитных величин в данном разделе является первое уравнение Максвелла (закон Ампера) в дифференциальной форме:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \quad (1)$$

где H – напряженность магнитного поля; J – плотность тока; D – индукция электрического поля (электрическое смещение).

В соответствии с определением векторного магнитного потенциала A

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu\mu_0} \vec{\nabla} \times \vec{A}, \quad (2)$$

и известным соотношением между электрической индукцией и векторным магнитным потенциалом

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \left(-\nabla \cdot \varphi - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right), \quad (3)$$

получаем закон полного тока в дифференциальной форме в частотной области:

$$(j\omega\sigma - \omega^2 \varepsilon_0 \varepsilon) \vec{A} + \vec{\nabla} \times \left(\frac{1}{\mu_0 \mu} \vec{\nabla} \times \vec{A} \right) = \vec{J}, \quad (4)$$

где ω – циклическая частота; σ – активная проводимость; ε – относительная диэлектрическая проницаемость; μ – относительная магнитная проницаемость; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость вакуума.

Для определения поперечных параметров ЛЭП (в частности, емкости) рекомендуется использовать раздел Electrostatics программного комплекса COMSOL Multiphysics. Основой для расчета в данном разделе является уравнение Пуассона:

$$\vec{\nabla}^2 \varphi = -\frac{\rho_{\text{своб}}}{\varepsilon \varepsilon_0}, \quad (5)$$

где φ – потенциал электростатического поля; $\rho_{\text{своб}}$ – объемная плотность свободных зарядов (в рамках данной задачи $\rho_{\text{своб}} = 0$).

Имитационная модель воздушной ЛЭП СВН. В качестве примера была рассмотрена ЛЭП 750 кВ, каждая фаза которой состоит из 5 проводников марки АС-240/56 (фазные проводники ЛЭП напряжением 330 кВ и выше выполняются расщепленными для снижения потерь на корону); используемая опора ЛЭП – ПП750 (рис. 1, геометрические параметры опре-

² РД 34.20.172. Руководящие указания по учету потерь на корону и помех от короны при выборе проводов воздушных линий электропередачи переменного тока 330–750 кВ и постоянного тока 800–1500 кВ.

³ COMSOL Multiphysics. AC/DC Module User's Guide.

деляются нормативной документацией⁴); изоляторы – ПСВ300А в количестве 35 штук на гирлянду. Исходя из геометрических параметров опоры ЛЭП и гирлянды изоляторов, расстояния от фазных проводников до грунта составляют 28,02 м, а расстояния между горизонтально расположенными фазными проводниками – 18 м. Представленные в данном разделе модели не учитывают влияния заземленных опор ЛЭП, а также гирлянд изоляторов на величину параметров ЛЭП. Грозозащитные тросы также не принимаются во внимание в расчетах магнитного поля, так как они соединены с заземляющим устройством не напрямую, а через разрядник [14].

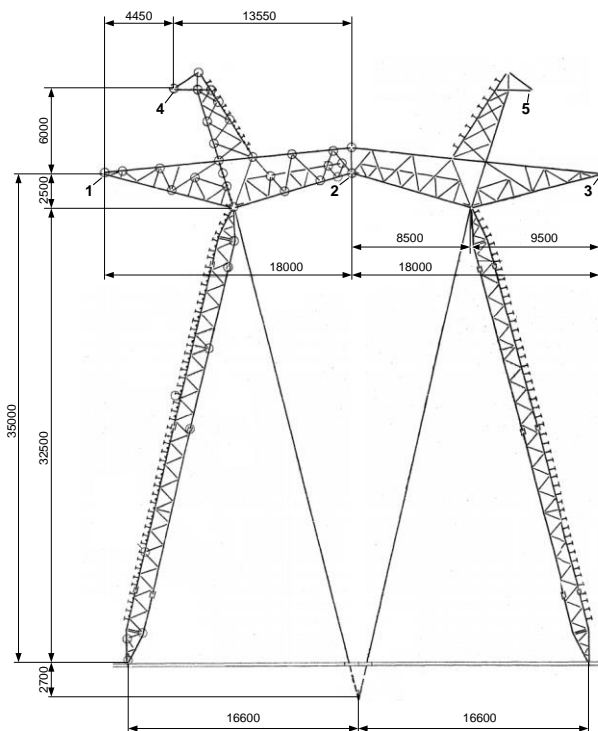


Рис. 1. Опора ЛЭП 750 кВ марки ПП750: 1, 2, 3 – точки крепления поддерживающих гирлянд проводов ЛЭП; 4, 5 – точки крепления поддерживающей гирлянды грозозащитного троса

В ходе исследования было сделано предположение о том, что зависимость индуктивности ЛЭП, а также зависимость составляющей активного сопротивления ЛЭП, обусловленного возвратом тока через грунт, определяются в основном свойствами грунта, а также взаимным расположе-

нием проводников и грунта ввиду малой величины отношения диаметра поперечного сечения проводника к расстоянию между грунтом и проводником и расстоянию между проводниками.

Ввиду того, что при наличии в модели конечных элементов несоизмеримой площади время расчета может увеличиться либо расчет может стать неустойчивым, в рамках исследования были созданы две модели.

Первая модель, предназначенная для расчета продольных индуктивностей и активного сопротивления, возвратом тока через землю обусловленного, представляет собой три проводника бесконечно малого диаметра, размещенные над слоем грунта. Внешний вид данной модели приведен на рис. 2.

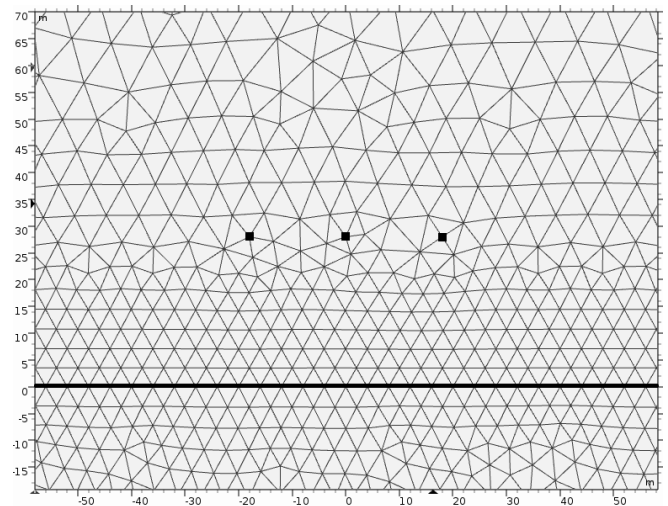


Рис. 2. Модель воздушной ЛЭП 750 кВ для определения удельной продольной индуктивности ЛЭП, а также активного сопротивления, обусловленного возвратом тока через землю

Вторая модель предназначена для расчета емкостей воздушной ЛЭП, а также продольных активных сопротивлений, обусловленных внутренней структурой проводника; в данной модели учитывается реальная конфигурация проводника. При расчете емкостей не учитывается внутренняя структура проводника⁵, при расчете продольных активных сопротивлений не учитывается влияние внешней среды. Конфигурация второй модели изображена на рис. 3.

⁴ Типовые конструкции, изделия и узлы зданий и сооружений. Серия 3.407.2-134. Стальные опоры ВЛ 750 кВ. Вып. 1. Промежуточные порталные опоры на оттяжках. Рабочие чертежи КМ.

⁵ РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования.

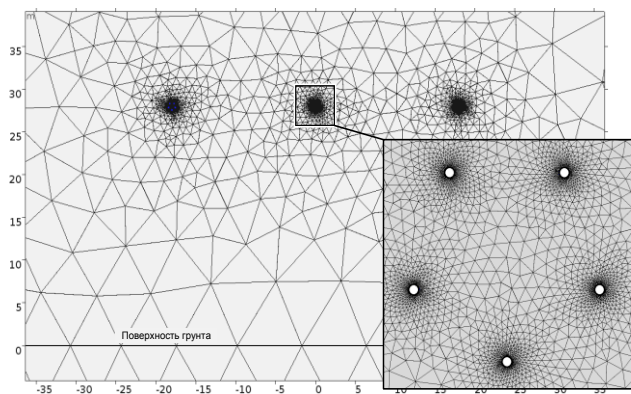


Рис. 3. Модель воздушной ЛЭП 750 кВ для определения емкости ЛЭП прямой и нулевой последовательности, а также для определения продольного активного сопротивления ЛЭП

Расчет удельных параметров воздушной ЛЭП СВН. При расчете продольных индуктивностей в качестве источника исходных данных о зависимости данного параметра от частоты была принята модель Carson'a как наиболее часто употребляемая при расчетах. Расчет производится для диапазона частот от 1 Гц до 1 МГц, соответствующего в первом приближении частотному спектру фронта распространяющейся электромагнитной волны. Индуктивности воздушной ЛЭП прямой L_1 и нулевой L_0 последовательности определяются исходя из рассчитанных значений собственной индуктивности проводника L_c , а также взаимной индуктивности между двумя фазными проводниками M_m по следующим соотношениям:

$$L_1 = L_c - M_m, \tag{6}$$

$$L_0 = L_c + 2 \cdot M_m. \tag{7}$$

На рис. 4, 5 изображены зависимости продольных индуктивных параметров воздушной ЛЭП 750 кВ от частоты, рассчитанные в соответствии с методикой Carson'a и с применением COMSOL Multiphysics.

Исходя из данных, приведенных на рис. 4, 5, нетрудно заметить, что индуктивное сопротивление прямой последовательности воздушной ЛЭП практически не зависит от частоты ввиду того, что характер уменьшения собственной индуктивности проводника аналогичен характеру уменьшения взаимной индуктивности между фазными проводниками при увеличении частоты.

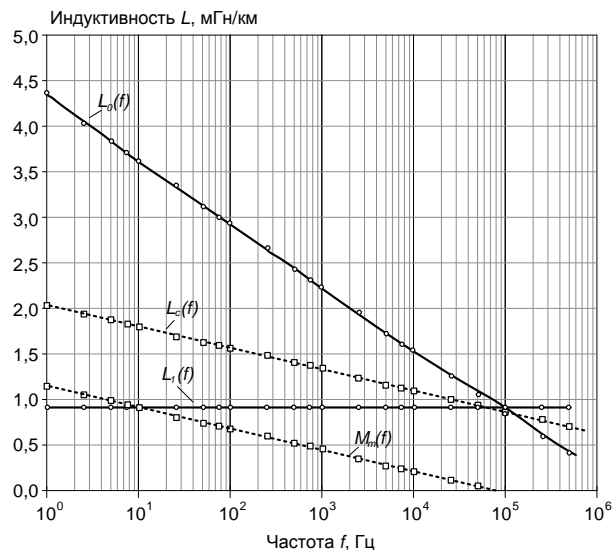


Рис. 4. Зависимости индуктивности уединенного проводника, взаимной индуктивности между двумя фазными проводниками, а также индуктивностей прямой и нулевой последовательности воздушной ЛЭП 750 кВ от частоты (методика Carson'a)

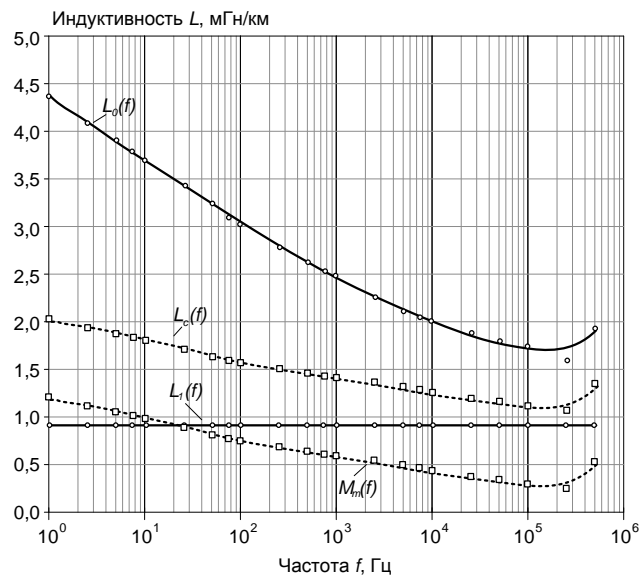


Рис. 5. Зависимости индуктивности уединенного проводника, взаимной индуктивности между двумя фазными проводниками, а также индуктивностей прямой и нулевой последовательности воздушной ЛЭП 750 кВ от частоты (расчет в Comsol Multiphysics)

Вместе с этим индуктивность нулевой последовательности уменьшается вместе с увеличением частоты; зависимости на рис. 5 на частотах выше 100 кГц, рассчитанные с помощью COMSOL Multiphysics, имеют экстремум.

Величина индуктивности, рассчитанная с помощью COMSOL Multiphysics, от-

личается от величины, рассчитанной с помощью методики Carson'a, на частотах 1 кГц и выше. Данное отличие демонстрирует рис. 6.

Независимость сопротивления прямой последовательности от частоты не трудно объяснить путем анализа токов в грунте, обусловленных действием вектора электрической индукции (Electric displacement currents). При протекании токов прямой последовательности данные токи, протекающие в грунте, компенсируют друг друга; их суммарная плотность стремится к нулю. Интеграл плотности тока по сечению слоя грунта при протекании токов прямой последовательности (согласно данным на модели, полученной с применением COMSOL Multiphysics) составляет $1,3149 \cdot 10^{-9}$ А. При протекании по ЛЭП токов нулевой последовательности, направленных в любой момент времени в одну сторону, ток в грунте не является скомпенсированным. Интеграл плотности тока по сечению слоя грунта при протекании токов нулевой последовательности составляет $1,293 \cdot 10^{-7}$ А. Стоит отметить, что модель, изображенная на рис. 2, не отображает реальных величин индуцированных в грунте токов ввиду своей конечности, однако соотношения между величинами индуцированных токов с помощью данной модели могут быть оценены с достаточной точностью.

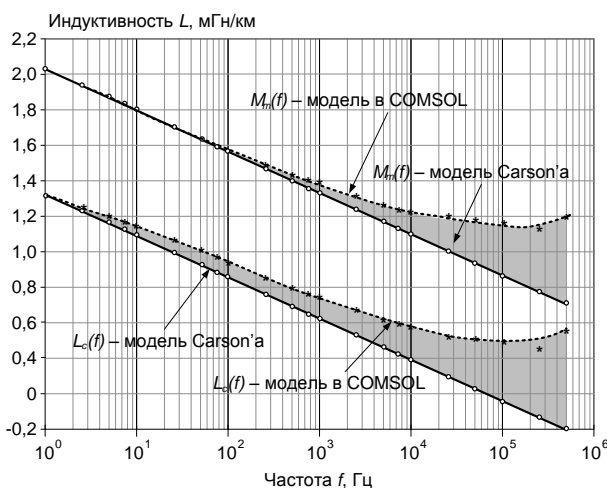


Рис. 6. Зависимости индуктивности уединенного проводника, взаимной индуктивности между двумя фазными проводниками, рассчитанные с помощью методики Carson'a и с применением Comsol Multiphysics

Согласно [1], активное сопротивление (Ом/км), обусловленное возвратом тока че-

рез землю, прямо пропорционально частоте электрического тока:

$$r_{з\text{ уд}} = 0,25 \cdot \pi \mu_0 f \cdot 10^3. \quad (8)$$

Результаты, полученные с помощью второй модели в COMSOL Multiphysics, подтверждают (с определенной погрешностью) справедливость выражения (8). На рис. 7 изображены зависимости активного сопротивления, обусловленного возвратом тока через землю, от частоты при использовании различных расчетных методов.

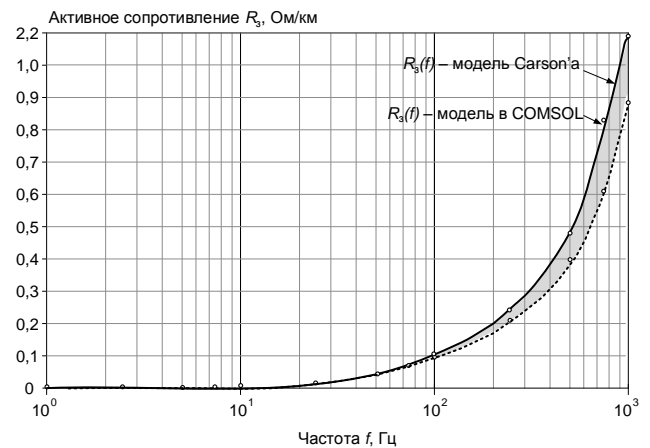


Рис. 7. Зависимости активного сопротивления, обусловленного возвратом тока через землю, рассчитанные с помощью методики Carson'a и с применением Comsol Multiphysics

Оценка величины активного сопротивления необходима для того, чтобы рассчитать постоянные затухания различных частотных компонент фронта распространяющейся электромагнитной волны. Вместе с этим необходимо понимать, что активное сопротивление проводника имеет также составляющую, обусловленную потерями в материале провода (сталь и алюминий). Данная составляющая также зависит от частоты ввиду влияния поверхностного эффекта и эффекта близости. Рис. 8 иллюстрирует зависимость распределения плотности тока внутри проводника от частоты (рассмотрены частоты 50 и 750 Гц).

Рис. 8 иллюстрирует также сущность явления вытеснения тока на поверхность проводника (поверхностный эффект): оно может быть представлено в виде явления затухания электромагнитной волны определенной частоты по мере распространения данной волны к геометрическому центру проводника. На рис. 9 изображена зависимость активного сопротивления фаз-

ного проводника от частоты, рассчитанная с помощью COMSOL Multiphysics.

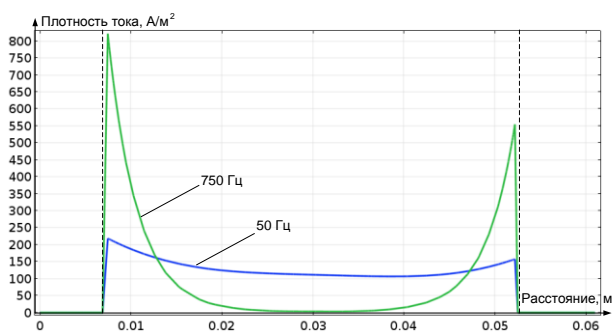


Рис. 8. Зависимость распределения плотности тока внутри фазного проводника от частоты

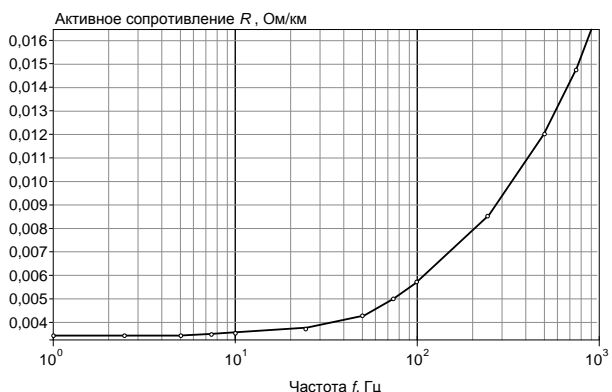


Рис. 9. Зависимость активного сопротивления фазного проводника АС-240/56 от частоты, обусловленная влиянием поверхностного эффекта

Вторая модель позволяет также осуществить расчет емкостей воздушной ЛЭП (уже было отмечено, что данный параметр не зависит от частоты). Согласно результатам расчета, емкость нулевой последовательности ЛЭП представляет собой утроенную емкость между фазным проводом и поверхностью грунта и равна $C_0 = 0,9124 \cdot 10^{-8}$ Ф/км. На емкость прямой последовательности также оказывают влияние частичные емкости между фазными проводниками; ее значение равно $C_1 = 1,3065 \cdot 10^{-8}$ Ф/км.

Расчет зависимости скорости распространения частотных компонент фронта электромагнитной волны от частоты. Для решения задачи моделирования устройств определения места повреждения (ОМП), основанных на волновом принципе, целесообразно иметь корректное представление о скоростях распространения различных частотных компонент фронта распространяющейся электромагнитной волны вдоль ЛЭП. Существуют два канала распространения электромагнитной волны: канал «фаза-фаза» и канал «фаза-земля».

Скорость распространения волны в каналах «фаза-фаза» ($v_{\phi-\phi}$) и «фаза-земля» ($v_{\phi-з}$) определяется, прежде всего, поперечной емкостью ЛЭП, а также ее продольной индуктивностью и может быть ориентировочно оценена по следующим выражениям:

$$v_{\phi-\phi} = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}, \quad (9)$$

$$v_{\phi-з} = \frac{\omega}{\beta_0}, \quad (10)$$

$$\beta_0 = \sqrt{\frac{1}{2}(\omega^2 L_0 C_0 - G_0 R_0) + \frac{1}{2} \sqrt{(R_0^2 + \omega^2 L_0^2)(G_0^2 + \omega^2 C_0^2)}}, \quad (11)$$

Ввиду того, что индуктивность прямой последовательности ЛЭП практически не зависит от частоты (см. рис. 4–5), скорость распространения различных частотных компонент в канале «фаза-фаза» одинакова и составляет 298–299 км/мс. Индуктивность ЛЭП нулевой последовательности с ростом частоты снижается; это обуславливает увеличение скорости распространения частотных компонент фронта электромагнитной волны с увеличением частоты (рис. 10). Анализ зависимости (рис. 10) показывает, что на частотах 5 кГц и выше скорости распространения электромагнитных волн в канале «фаза-земля», вычисленные по данным математической модели Carson'a и по данным COMSOL Multiphysics, значительно различаются. Более того, на частотах выше 50 кГц расчет с помощью данных модели Carson'a показывает, что скорость распространения электромагнитной волны превышает 300 км/мс, что противоречит законам классической электродинамики.

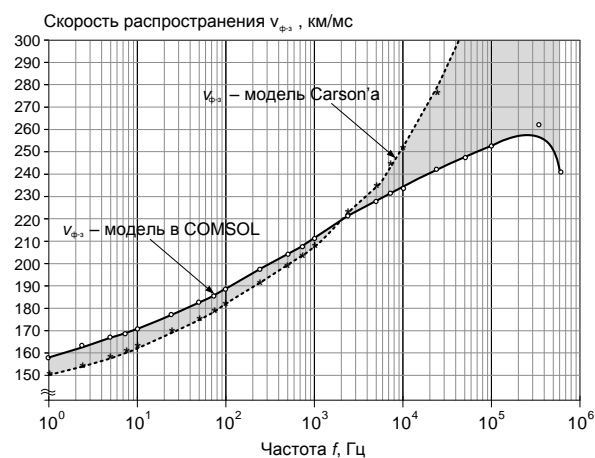


Рис. 10. Зависимость величины скорости распространения электромагнитной волны в канале «фаза-земля» для различных частотных компонент фронта ЭМВ

Верификация моделей для расчета параметров воздушной ЛЭП СВН в COMSOL Multiphysics. Одним из критериев адекватности расчета удельных параметров воздушной ЛЭП может служить сравнение величин данных параметров, рассчитанных по методике Carson'a и с применением COMSOL Multiphysics для частоты $f = 50$ Гц. Обоснованность такого подхода обусловлена прежде всего тем, что значения параметров воздушных ЛЭП, рассчитанные по модели Carson'a, позволяют достаточно точно оценить величины токов короткого замыкания в электроэнергетических системах для последующего выбора параметров срабатывания устройств релейной защиты и автоматики. В таблице приведено сравнение результатов расчета активных продольных сопротивлений, индуктивностей и емкостей исследуемой воздушной ЛЭП со справочными данными и результатами расчета по методике Carson'a.

Сравнение результатов расчета параметров воздушной ЛЭП 750 кВ в COMSOL Multiphysics со справочными данными и результатами расчета по методике Carson'a

Параметр	Методика Carson'a / расчет по справочным данным	Расчет в COMSOL	Относительная погрешность
Индуктивное сопротивление прямой последовательности, Ом/км	0,287	0,2704	5,8 %
Индуктивное сопротивление нулевой последовательности, Ом/км	0,989	1,0238	3,4 %
Активное сопротивление, обусловленное возвратом тока через землю, Ом/км	0,049	0,046	6,1 %
Емкость ЛЭП нулевой последовательности / емкость фазного проводника на землю, $10^{-8} \cdot \text{Ф/км}$	1,028	0,9124	11,2 %
Емкость ЛЭП прямой последовательности, $10^{-8} \cdot \text{Ф/км}$	1,245	1,3065	4,9 %

Анализ данных, приведенных в таблице, показывает, что результаты имитационного моделирования в программном комплексе COMSOL Multiphysics корректны, так как для исследуемых параметров погрешности не превышают 7–12 %.

Выводы. Таким образом, предложенный подход к моделированию ЛЭП сверхвысокого напряжения с использованием программного комплекса COMSOL Multiphysics позволяет определять продольные параметры воздушных ЛЭП (индуктивности и активные сопротивления) в широком частотном диапазоне. Подтверждено, что значения индуктивностей воздушной ЛЭП определяются в основном расстоянием между фазными проводниками и высотой их расположения над грунтом, а не конфигурацией и величиной поперечного сечения самого фазного проводника. Согласно полученным данным, величины собственной индуктивности фазного проводника, а также индуктивности нулевой последовательности, рассчитанные с применением наиболее часто употребляемой методики Carson'a, недостаточно корректны; более точную оценку данных параметров позволяет произвести модель, составленная в COMSOL Multiphysics.

В ходе исследования также уточнены значения скорости распространения различных частотных компонент фронта распространяющейся ЭМВ в канале «фаза-земля», которая определяется величиной индуктивности нулевой последовательности ЛЭП.

Полученные величины параметров воздушной ЛЭП СВН позволяют получить полевые модели для исследований функционирования устройств релейной защиты и определения места повреждения на волновом принципе.

Предложенный подход позволяет оценить параметры воздушных ЛЭП любого класса напряжения. Использование данного подхода позволяет получить более корректные значения параметров ЛЭП нулевой последовательности и скоростей распространения электромагнитной волны в канале «фаза-земля», в особенности для диапазона частот выше 5 кГц.

Использование программного комплекса COMSOL Multiphysics позволяет сократить время на расчет удельных параметров воздушных ЛЭП.

В рамках продолжения данного исследования целесообразно создание модели воздушной ЛЭП для анализа процесса распространения импульсов различной формы и длительности вдоль воздушной ЛЭП.

Список литературы

1. **Carson J.R.** Wave propagation in overhead wires with ground return // *The Bell System Technical Journal*. – Oct., 1926. – Vol. 5, No. 4. – P. 539–554.

2. **Rudenberg R.** *Transient Performance of Electric Power Systems*. – New York, USA: McGraw-Hill Book Company, 1950. – P. 393–408.

3. **Костенко М.В., Перельман Л.С., Шкарин Ю.П.** Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях электропередачи. – М.: Энергия, 1973. – 270 с.

4. **El-Tamaly H.H., Ziedan H.A.** Sequence Impedances of Overhead Transmission Lines Carson's Method Versus Rudenberg's Method // *Proceedings of the 41st International Universities Power Engineering Conference*. – Newcastle-upon-Tyne, 2006. – P. 298–302.

5. **Krolo I., Modrić T., Vujević S.** Definition and computation of carson formulas // *2nd International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science (SpliTech)*. – Split, 2017. – P. 1–6.

6. **Krolo I., Vujević S., Modrić T.** Computation of Carson formulas using piecewise quadratic approximation // *25th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*. – Split, 2017. – P. 1–7.

7. **Accurate and Approximate Evaluation of Power-Line Earth Impedances Through the Carson Integral** / O. Ramos-Leaños, J.L. Naredo, F.A. Uribe, J.L. Guardado // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. – Oct. 2017. – Vol. 59, No. 5. – P. 1465–1473.

8. **Noda T.** A double logarithmic approximation of Carson's ground-return impedance // *IEEE Power Engineering Society General Meeting*. – Montreal, Que., 2006.

9. **Hilbert** Fractal Antenna Design for Detecting Corona Discharge on Transmission Lines / C. Yin, H. Wei, Y. Xia, G. Hei, Y. Zhang // *10th International Conference on Communications, Circuits and Systems (ICCCAS)*. – Chengdu, China, 2018. – P. 172–175.

10. **Coelho Marques Costa E., Kurokawa S., Pissolato J.** Corona Discharge Model for Transmission Lines by Lumped Elements // *IEEE Latin America Transactions*. – March 2011. – Vol. 9, No. 1. – P. 804–809.

11. **The Complex** Ground Return Plane – A Simplified Model for Homogeneous and Multi-Layer Earth Return / A. Deri, G. Tevan, A. Semlyen, A. Castanheira // *IEEE Transactions on Pow-*

er Apparatus and Systems. – August 1981. – Vol. PAS-100, No. 8. – P. 3686–3693.

12. **Amos D.E.** A Portable Package For Bessel Functions Of A Complex Argument And Nonnegative Order, *Trans. Math. Software*, 1986.

13. **Лебедев В.Д., Яблоков А.А.** Моделирование физических процессов технических устройств в программе COMSOL Multiphysics / ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2013. – 328 с.

14. **Дмитриев М.В., Родчихин С.** Грозо-защитные тросы ВЛ 35–750 кВ. Выбор мест заземления // *Новости электротехники*. – 2017. – № 2(104).

References

1. Carson, J.R. Wave propagation in overhead wires with ground return. *The Bell System Technical Journal*, Oct. 1926, vol. 5, no. 4, pp. 539–554.

2. Rudenberg, R. *Transient Performance of Electric Power Systems*. New York, USA: McGraw-Hill Book Company, 1950, pp. 393–408.

3. Kostenko, M.V., Perel'man, L.S., Shkarin, Yu.P. *Volnovye protsessy i elektricheskie pomekhi v mnogoprovodnykh liniyakh elektroperedachi* [Wave processes and electrical noises in multiconductor transmission lines]. Moscow: Energiya, 1973. 270 p.

4. El-Tamaly, H.H., Ziedan, H.A. Sequence Impedances of Overhead Transmission Lines Carson's Method Versus Rudenberg's Method. *Proceedings of the 41st International Universities Power Engineering Conference*. Newcastle-upon-Tyne, 2006, pp. 298–302.

5. Krolo, I., Modrić, T., Vujević, S. Definition and computation of carson formulas. *2nd International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science (SpliTech)*. Split, 2017, pp. 1–6.

6. Krolo, I., Vujević, S., Modrić, T. Computation of Carson formulas using piecewise quadratic approximation. *25th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*. Split, 2017, pp. 1–7.

7. Ramos-Leaños, O., Naredo, J.L., Uribe, F.A., Guardado, J.L. Accurate and Approximate Evaluation of Power-Line Earth Impedances Through the Carson Integral. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Oct. 2017, vol. 59, no. 5, pp. 1465–1473.

8. Noda, T. A double logarithmic approximation of Carson's ground-return impedance. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*. Montreal, Que., 2006.

9. Yin, C., Wei, H., Xia, Y., Hei, G., Zhang, Y. Hilbert Fractal Antenna Design for Detecting Corona Discharge on Transmission Lines. *10th International Conference on Communications,*

Circuits and Systems (ICCCAS). Chengdu, China, 2018, pp. 172–175.

10. Coelho Marques Costa, E., Kurokawa, S., Pissolato, J. Corona Discharge Model for Transmission Lines by Lumped Elements. IEEE Latin America Transactions, March 2011, vol. 9, no. 1, pp. 804–809.

11. Deri, A., Tevan, G., Semlyen, A., Castanheira, A. The Complex Ground Return Plane – A Simplified Model for Homogeneous and Multi-Layer Earth Return. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, August 1981, vol. PAS-100, no. 8, pp. 3686–3693.

12. Amos, D.E. A Portable Package For Bessel Functions Of A Complex Argument And Nonnegative Order, Trans. Math. Software, 1986.

13. Lebedev, V.D., Yablokov, A.A. *Modelirovanie fizicheskikh protsessov tekhnicheskikh ustroystv v programme COMSOL Multiphysics* [Simulation study of physical processes of the technical devices in COMSOL Multiphysics software]. Ivanovo, 2013. 328 p.

14. Dmitriev, M.V., Rodchikhin, S. Grozozashchitnye trosy VL 35–750 kV. Vybor mest zazemleniya [Overhead protection wire of 35–750 kV transmission lines. Earthing points selection]. *Novosti elektrotekhniki*, 2017, no. 2(104).

Кутумов Юрий Дмитриевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», магистрант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, e-mail: kutumov97@mail.ru

Kutumov Yuri Dmitrievich,

Ivanovo State Power Engineering University, Master student, Department of Electric Power Systems Automatic Control, e-mail: kutumov97@mail.ru

Лебедев Владимир Дмитриевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматического управления электроэнергетическими системами, e-mail: vd_lebedev@mail.ru

Lebedev Vladimir Dmitrievich,

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor, Head of the Department of Electric Power Systems Automatic Control, e-mail: vd_lebedev@mail.ru