

На правах рукописи

Бессолицын Алексей Витальевич

**ПОЛЕВЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические
системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2010

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научные руководители: доктор технических наук, профессор Попов Владимир Анатольевич,
кандидат технических наук, доцент
Попов Максим Георгиевич.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Коровкин Николай Владимирович,
кандидат технических наук, доцент
Ярмаркин Михаил Кириллович

Ведущая организация: Филиал ОАО «ФСК ЕЭС» – МЭС Северо-Запада

Защита состоится « 10 » декабря 2010 г. в « 12 » часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.11 в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Главное здание, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Автореферат разослан «___» ноября 2010 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.229.11

кандидат технических наук

Попов М.Г.

Актуальность темы.

При анализе установившихся и переходных режимов работы воздушных линий (ВЛ) электроэнергетических систем требуется точное построение их математических моделей. В общем случае, процессы в линиях с распределенными параметрами описываются системой телеграфных уравнений. Для ее формирования требуется найти первичные параметры воздушной линии электропередачи (ЛЭП): собственные и взаимные продольные активные и индуктивные сопротивления, а также поперечные емкостные проводимости. В практике эксплуатации достаточно часто возникает задача расчета характеристик электромагнитного влияния воздушных линий электропередач на линии связи, кабели различного назначения, трубопроводы и т.п., что также требует определения взаимных индуктивностей и емкостей проводов ВЛ с близкорасположенными протяженными металлическими конструкциями.

Проблема расчета первичных продольных и поперечных параметров линий электропередач рассматривалась в работах Б.Э. Бонштедта, В.И. Глушко, В.Г. Гольдштейна, Г.А. Гринберга, Г.А. Евдокунина, К.П. Кадомской, М.В. Костенко, С.А. Лаврова, Б.К. Максимова, Л.С. Перельмана, J.R. Carson, P.S. Dokoroulos, D.P. Labridis и других. Так как решение задачи определения данных величин требует тщательного анализа электрического и магнитного поля, создаваемого проводами ВЛ, все существующие методы рассмотрения этой проблемы по используемому подходу к расчету характеристик электромагнитного поля можно разделить на две группы: аналитические и численные. В основе аналитических методов лежит расчет электромагнитного поля, создаваемого ЛЭП, путем решения системы уравнений Максвелла через переход к уравнениям Гельмгольца относительно составляющих векторов напряженности электрического и магнитного поля. Численные подходы предполагают поиск распределения в рассматриваемой области какого-либо параметра, описывающего электромагнитное поле, путем численного решения соответствующего дифференциального уравнения в частных производных.

По причине того, что при определении продольных и поперечных параметров ЛЭП следует учитывать геометрические особенности воздушных линий: провес проводов, участки косоугольного сближения разных линий, пересечение ВЛ между собой и тому подобное, аналитические методы не позволяют получить точное решение рассматриваемой задачи из-за существенных допущений, принимаемых при выводе аналитических формул. Применение численных методов дает возможность снизить погрешность решения данной проблемы, за счет использования математических моделей более строго описывающих прохождение проводов ВЛ, многослойную структуру грунта и различные объекты, влияющие на распределение электромагнитного поля. Реализация численных методов при использовании языков программирования высокого уровня, многоядерных процессоров

ПЭВМ, кластерных вычислительных систем и других достижений информационных технологий позволяет вывести рассмотрение задачи об определении параметров воздушной линии электропередачи на качественно новый уровень.

Таким образом, разработка новых и развитие существующих численных методик расчета электрического и магнитного полей применительно к решению проблемы нахождения продольных сопротивлений и поперечных проводимостей проводов ВЛ является актуальной задачей, определившей тему данной диссертации.

Цель работы.

Разработка методики определения продольных и поперечных параметров воздушных линий электропередачи, основанной на численном расчете трехмерных электрического и магнитного полей ЛЭП с учетом геометрических особенностей расположения проводов ВЛ, а также многослойной структуры земли.

Научная новизна.

1. Разработана методика и новый программный комплекс DoACR расчета трехмерных электрических и магнитных полей, создаваемых воздушными линиями электропередачи, основанные на методе конечных элементов (МКЭ), и позволяющие учитывать провисание проводов, поворот трасс ВЛ, многослойный грунт и наличие в непосредственной близости от линии объектов, искажающих картину поля.

2. Разработан оригинальный, эффективный алгоритм разбиения трехмерного пространства на тетраэдральные конечные элементы, дающий возможность получить качественную дискретизацию области решения при рассмотрении объектов (воздушных линий) со значительными отличиями геометрических размеров.

3. Разработан способ расчета продольных и поперечных параметров ВЛ, основанный на численном расчете создаваемых ими трехмерных электрических и магнитных полей. Предложенный подход позволяет отказаться от упрощений, принимаемых при аналитическом расчете параметров линий с использованием широко известных выражений.

4. Выполнена оценка влияния на погрешность численного расчета параметров ВЛ различных факторов (частоты, удельного сопротивления грунта, стрелы провеса и др.), связанных как с условиями решаемой задачи, так и с особенностями реализации предлагаемой численной методики. Установлена взаимосвязь между размерами расчетной области, числом узлов и погрешностью определения продольных и поперечных параметров ВЛ.

Практическая ценность.

Разработанные методики и программное обеспечение DoACSR могут использоваться при решении научно-исследовательских и эксплуатационных задач, связанных с определением электрических параметров воздушных линий электропередачи (математическое моделирование ВЛ для расчета нормальных и аварийных режимов, наведенного напряжения на протяженных конструкциях и т.п.).

Программный комплекс DoACSR применялся для расчета наведенного напряжения на линиях 35 – 220 кВ Норильской энергосистемы, проходящих над многослойной землей, и на линиях 500 кВ ОЭС Центра. Результаты работы использовались при разработке по заказу ОАО «ФСК ЕЭС» нормативно-технического документа «Методические указания по определению наведенного напряжения на отключенных воздушных линиях, находящихся вблизи действующих ВЛ».

Полученные материалы применяются в научно-исследовательской и учебной работе кафедр «Электрические станции» ГОУ ВПО «ВятГУ» и «Электрические станции и автоматизация энергосистем» ГОУ ВПО «СПбГПУ».

Апробация работы и публикации.

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной научно-практической конференции «Энергетика сегодня и завтра» (2004 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Наука – производство – технология – экология» (2006, 2009 гг.), на научных семинарах кафедры «Электрические станции» Вятского государственного университета (2007, 2009 гг.).

По теме диссертации опубликовано 11 работ, причем пять из них содержатся в реферируемых изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и библиографического списка из 65 наименований. Содержание работы изложено на 154 страницах и иллюстрировано 33 рисунками и 8 таблицами.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы, приведены положения, отражающие научную новизну и практическую ценность диссертации.

В первой главе рассмотрены существующие методики расчета продольных сопротивлений и поперечных емкостей линий электропередачи.

Задачу расчета электромагнитного поля можно решать, используя две основные группы методов: аналитические и численные. По этой при-

чине имеются два соответствующих подхода к определению электрических параметров линий электропередачи, причем каждый из них имеет свои принципиальные достоинства и недостатки.

В строгой постановке без каких-либо упрощений задача расчета электромагнитного поля переменного тока, протекающего в прямолинейном цилиндрическом проводнике бесконечной длины, проходящем над поверхностью плоской земли, и определения электрических параметров такой линии была решена Гринбергом и Бонштедтом. Однако во все полученные ими результирующие выражения входят исключительно сложные неопределенные интегралы, которые невозможно взять аналитически. По этой причине наибольшее распространение в исследовательской практике получил другой менее строгий подход к интегрированию уравнений Максвелла, основанный на ряде допущений, предложенных Карсоном (Carson). Данная методика получила значительное развитие и была распространена на случаи непараллельного прохождения проводов ВЛ, наличия у земли нескольких слоев с разными электрическими свойствами и т.п.

Опыт многих исследований, выполненных в нашей стране и за рубежом, показывает, что из всего многообразия численных методов для решения задачи с бесконечно удаленными границами и резко разномасштабной геометрией, какой является задача расчета электромагнитного поля воздушной линии с целью определения ее параметров, наиболее целесообразно использовать метод конечных элементов. Он обладает хорошей вычислительной устойчивостью и для рассматриваемой в данной работе задачи обеспечивает приемлемую погрешность расчетов при наименьших затратах на разработку алгоритмов и программного обеспечения.

К настоящему времени теория использования метода конечных элементов для расчета переменного магнитного поля с учетом вихревых токов, наводимых в проводящих телах, хорошо разработана для двумерного случая. Она широко используется для расчета магнитных полей кабелей и воздушных линий, а также определения их погонных параметров.

Существующие программные комплексы (ANSYS, COMSOL, EL-CUT и др.) могут осуществлять расчет индуктивных и емкостных параметров воздушных линий только в ограниченной (двумерной) задаче исследования их электрического и магнитного полей. При этом используется энергетический подход, требующий вычисления полной энергии поля во всей рассматриваемой области. Например, определение собственной емкости i -го проводника системы реализуется через расчет полной энергии электрического поля W_E при условии равенства нулю напряжений на всех проводниках, кроме i -го ($U_i \neq 0$):

$$C_{ii} = \frac{2 \cdot W_E}{U_i^2}. \quad (1)$$

Указанное программное обеспечение широко используется при решении полевых задач в ограниченной расчетной области, однако в случаях с бесконечно удаленными границами, оно становится неэффективным. В этой связи требуется разработка обобщенной методики и реализации нового программного комплекса для определения электрических характеристик ВЛ с использованием усовершенствованного математического описания полевой задачи.

Во второй главе выполнен анализ методов решения уравнений Максвелла для электромагнитного поля ВЛ и исследованы принимаемые при этом допущения.

При исследовании аналитическими методами поля, создаваемого проводниками воздушной линии, делаются следующие допущения: проводники расположены над абсолютно плоской землей с неограниченной глубиной, они проходят параллельно поверхности земли, стрелой провеса пренебрегается, все среды в рассматриваемой задаче являются однородными и изотропными, свободные заряды отсутствуют, поперечная активная проводимость линии равна нулю. Кроме того, пренебрегают токами смещения и поперечными токами проводимости в земле.

Магнитное поле провода в воздухе и земле рассматривается как сумма двух составляющих. Первая составляющая, представляет собой магнитное поле, создаваемое электрическим током в проводнике, при отсутствии проводящей земли. Вторая составляющая магнитного поля создается электрическим током, протекающим в земле, наведенным переменным электромагнитным полем исходного тока. С использованием в качестве основы выражений для проекций на оси координат вектора напряженности магнитного поля, записывается формула, описывающая распределение векторного магнитного потенциала в воздухе. Она позволяет получить формулу для расчета продольной составляющей вектора напряженности электрического поля \dot{E}_x и определить коэффициент распространения γ , что в свою очередь приводит к выражению для расчета погонных собственных Z_C и взаимных Z_M продольных сопротивлений проводов, расположенных параллельно проводящей земле (предполагается, что ось x направлена параллельно проводам, ось z – вертикально, ось y – горизонтально):

$$Z_C = Z_{\text{внутр}} + \frac{j\omega\mu_0}{\pi} F + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{2z_1}{R_{np}}, \quad (2)$$

$$Z_M = \frac{j\omega\mu_0}{\pi} F + \frac{j\omega\mu_0}{4\pi} \cdot \ln \frac{r''}{r'}, \quad (3)$$

где $Z_{\text{внутр}}$ – внутреннее сопротивление провода,

μ_0 – абсолютная магнитная проницаемость,

F – интеграл Карсона,

$(y_1, z_1), (y_2, z_2)$ – координаты расположения первого и второго проводов соответственно,

R_{np} – радиус провода,

$$r' = (z_2 - z_1)^2 + (y_2 - y_1)^2,$$

$$r'' = (z_2 + z_1)^2 + (y_2 - y_1)^2.$$

Электрическое поле, создаваемое проводниками ВЛ, находящимися под высоким напряжением, рассматривается как электростатическое. Для расчета по известным формулам собственных и взаимных емкостей проводов их потенциальные коэффициенты определяются, исходя из предположения о параллельности проводников земле, методом зеркальных изображений.

Предложен способ оценки методической погрешности, заключающийся в сравнительном анализе результатов определения погонных параметров ЛЭП численным и аналитическим методами. Результаты расчета продольных и поперечных параметров ВЛ с применением аналитических методов должны быть использованы в качестве эталонных значений при проведении исследований погрешности численных методов. Однако, понятие относительной погрешности в этом случае является весьма условным, поскольку аналитическое решение полевой задачи не отвечает ее строгой постановке. Данная проблема детально исследована в пятой главе работы.

В третьей главе описывается использование метода конечных элементов для расчета электрического и магнитного полей воздушной линии и определения ее продольных и поперечных параметров.

В работе при определении параметров магнитного поля ВЛ предлагается использовать проекции векторного магнитного потенциала \vec{A} на оси прямоугольной системы координат, а при определении параметров электрического поля скалярный электрический потенциал φ . Для разбиения рассчитываемой области на конечные элементы используются простейшие трехмерные фигуры – тетраэдры с заданием узловых точек только в их вершинах. В соответствии с этим, для аппроксимации распределения искомого потенциала внутри конечного элемента используется линейный полином.

Для формирования системы линейных алгебраических уравнений относительно узловых значений искомого потенциалов \vec{A} и φ применяется метод Галеркина. Формально он заключается в приравнивании нулю интеграла по объему одного конечного элемента $V^{(e)}$ от произведения транспонированной строки функций форм данного элемента на исследуемое дифференциальное уравнение. Например, для проекции на ось x векторного магнитного потенциала в вершинах e -го конечного элемента будет справедливо линейное уравнение:

$$\left(\frac{1}{\mu} \mathbf{S}^{(e)} + j\omega \mathbf{T}^{(e)} \right) \cdot \dot{\mathbf{A}}_x^{(e)} = \mathbf{T}^{(e)} \cdot \dot{\Phi}_x^{(e)}, \quad (4)$$

а для скалярного электрического потенциала:

$$\mathbf{S}^{(e)} \Phi^{(e)} = \mathbf{0}, \quad (5)$$

где μ – магнитная проницаемость среды, $\mathbf{S}^{(e)}$ и $\mathbf{T}^{(e)}$ – матрицы, элементы которых вычисляются, исходя из координат узлов рассматриваемого e -го конечного элемента с использованием интегрирования в естественной системе координат тетраэдра, $\dot{\mathbf{A}}_x^{(e)}$, $\dot{\Phi}_x^{(e)}$, $\Phi^{(e)}$ – вектора, элементами которых являются узловые значения проекции векторного магнитного потенциала на ось x , производные по координате x от электрического потенциала в вершинах конечного элемента и узловые значения скалярного электрического потенциала e -го конечного элемента соответственно.

Полученные уравнения (4), (5), сформированные для каждого отдельного конечного элемента, должны быть объединены в глобальную систему уравнений относительно значений искомого потенциала во всех узловых точках рассматриваемой области. Элементы глобальных матриц \mathbf{S} и \mathbf{T} рассчитываются как суммы соответствующих элементов локальных матриц $\mathbf{S}^{(e)}$ и $\mathbf{T}^{(e)}$ всех конечных элементов области решения.

При определении продольных собственных и взаимных сопротивлений проводов воздушной линии используется допущение о неизменности модуля градиента скалярного электрического потенциала по всей длине проводника. С учетом этого алгоритм определения элементов матрицы продольных сопротивлений участка линии заключается в следующем:

1) Задание падений напряжения на рассматриваемом участке каждого проводника $\dot{U}_1, \dot{U}_2 \dots \dot{U}_n$ (где n - число проводников в системе).

2) Расчет проекций на оси координат градиента скалярного электрического потенциала во всех узловых точках каждого провода.

3) Решение систем линейных алгебраических уравнений относительно проекций векторного магнитного потенциала на все оси координат.

4) Расчет вектора плотности суммарного тока в узловых точках проводов по рассчитанным значениям векторного магнитного потенциала и заданным значениям градиента электрического потенциала:

$$\dot{\delta} = -j\omega\sigma\dot{\mathbf{A}} - \sigma \text{grad } \dot{\phi}, \quad (6)$$

где σ – удельная проводимость провода.

5) Определение среднего тока, протекающего вдоль каждого провода системы при заданном в первом пункте настоящего алгоритма наборе падений напряжений в проводниках:

$$I_{cpm} = \frac{\sum (\dot{\delta}_i + \dot{\delta}_j + \dot{\delta}_k + \dot{\delta}_l) \cdot V^{(e)}}{4 \cdot L_m}, \quad (7)$$

где $\delta_i, \delta_j, \delta_k, \delta_l$ – проекции вектора плотности тока на ось провода в данном сечении для узловых точек e -го конечного элемента, вычисленные в предыдущем пункте, L_m – длина рассматриваемого m -го проводника на рассчитываемом участке. Суммирование в числителе формулы ведется по всем e -ым конечным элементам, принадлежащим проводнику m .

б) Выполнение пунктов алгоритма с первого по пятый с разными задающими (см. п. 1) значениями падений напряжений столько раз, сколько имеется проводников в задаче.

7) Решение системы из n уравнений, каждое из которых соответствует одному из исходных наборов падений напряжения, а неизвестными выступают собственное и взаимные сопротивления первого проводника.

$$\begin{cases} Z_{11}\dot{I}_1^{(1)} + Z_{12}\dot{I}_2^{(1)} + \dots + Z_{1n}\dot{I}_n^{(1)} = \dot{U}_1^{(1)}, \\ Z_{11}\dot{I}_1^{(2)} + Z_{12}\dot{I}_2^{(2)} + \dots + Z_{1n}\dot{I}_n^{(2)} = \dot{U}_1^{(2)}, \\ \vdots \\ Z_{11}\dot{I}_1^{(n)} + Z_{12}\dot{I}_2^{(n)} + \dots + Z_{1n}\dot{I}_n^{(n)} = \dot{U}_1^{(n)}, \end{cases} \quad (8)$$

где верхний индекс указывает на номер исходного набора падений напряжений.

8) Формирование и решение аналогичных систем уравнений для каждого последующего провода с учетом уменьшения размерности на каждом шаге из-за того, что часть взаимных параметров рассчитывается на предыдущих шагах.

Для расчета собственных и взаимных частичных емкостей участков проводов ВЛ в данной работе предлагается алгоритм представленный на рис. 1.

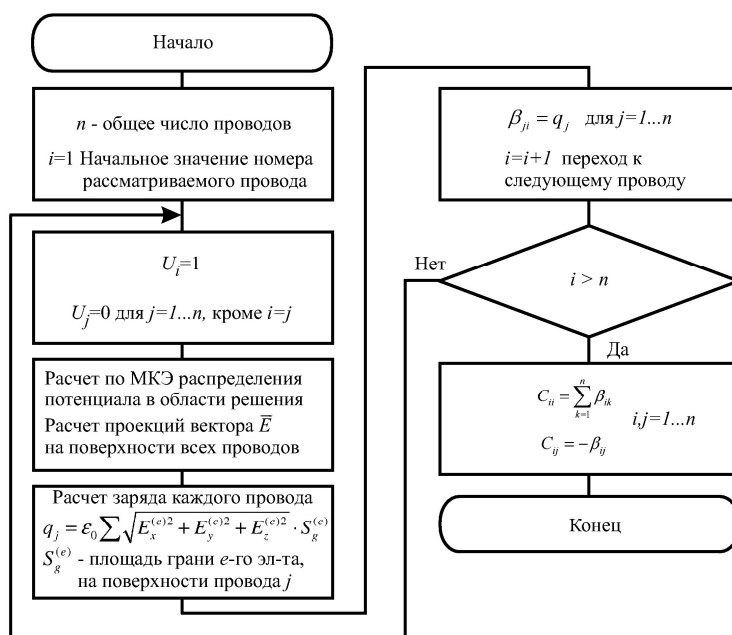


Рис. 1. Блок-схема алгоритма определения емкостных параметров проводов ВЛ

Согласно представленной на рис. 1 блок-схеме в основе алгоритма лежит последовательное определение емкостных коэффициентов проводов рассматриваемого участка воздушной линии. Данная задача решается путем вычисления заряда каждого провода как потока вектора электрической индукции через его боковую поверхность при равенстве нулю потенциалов всех проводов, кроме одного с потенциалом равным единице. Для расчета напряженности электрического поля на поверхности проводов используется метод конечных элементов.

Предлагаемые методы расчета продольных и поперечных параметров ВЛ позволяют полностью учесть реальное расположение проводов ЛЭП в пространстве, так как опираются на результаты расчета трехмерных электрического и магнитного полей.

В четвертой главе изложена методика триангуляции трехмерного пространства вокруг ВЛ при реализации предложенного способа конечно-элементного расчета электрического и магнитного полей для определения продольных и поперечных параметров ВЛ.

Наибольшую трудность в программной реализации предлагаемой численной методики представляет разбиение трехмерной области на конечные элементы (см. рис. 2). Выполнение дискретизации трехмерного пространства для расчета электромагнитного поля, создаваемого ВЛ, осложняется тем, что в данной задаче имеется неблагоприятное сочетание размеров и взаимных расстояний между элементами линии: диаметр проводов измеряется миллиметрами, расстояния между ними метрами, а длина ВЛ и размер расчетной области километрами.

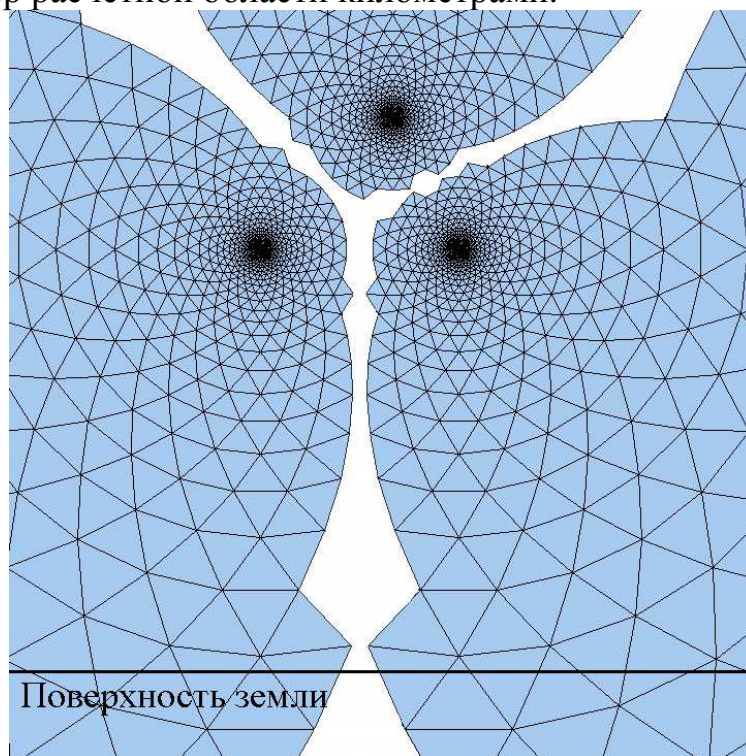


Рис. 2. Разбиение расчетной области методом фронтальной триангуляции

В диссертационной работе выполнен анализ различных вариантов построения трехмерной триангуляции и показано, что наиболее эффективным вариантом является использования метода тиражируемых сечений. Суть этого метода заключается в том, что на первом этапе строится плоская триангуляция одного из сечений расчетной области, и затем она копируется вдоль неких траекторий тиражирования. Предлагаемый в работе алгоритм двумерной дискретизации заключается в следующем: 1) выполнение триангуляции подобластей, лежащих внутри проводов, грозозащитных тросов, трубопроводов и других круговых структур; 2) выполнение дискретизации всей расчетной области, распространяя фронт триангуляции с круговых границ, внутри которых конечные элементы построены в первом пункте; 3) связывание между собой областей триангуляции, построенных в предыдущем пункте от разных круговых объектов; 4) включение в триангуляцию протяженных границ (например, между воздухом и землей, между слоями земли и т.п.).

Части полученной плоской триангуляции копируются вдоль траекторий тиражирования таким образом, чтобы плотность узлов в области с наибольшим градиентом поля была максимальной. В качестве траекторий тиражирования выбираются кривые аналогичные кривым провисания проводов. Блок-схема предлагаемого алгоритма получения трехмерной триангуляции представлена на рис. 3.

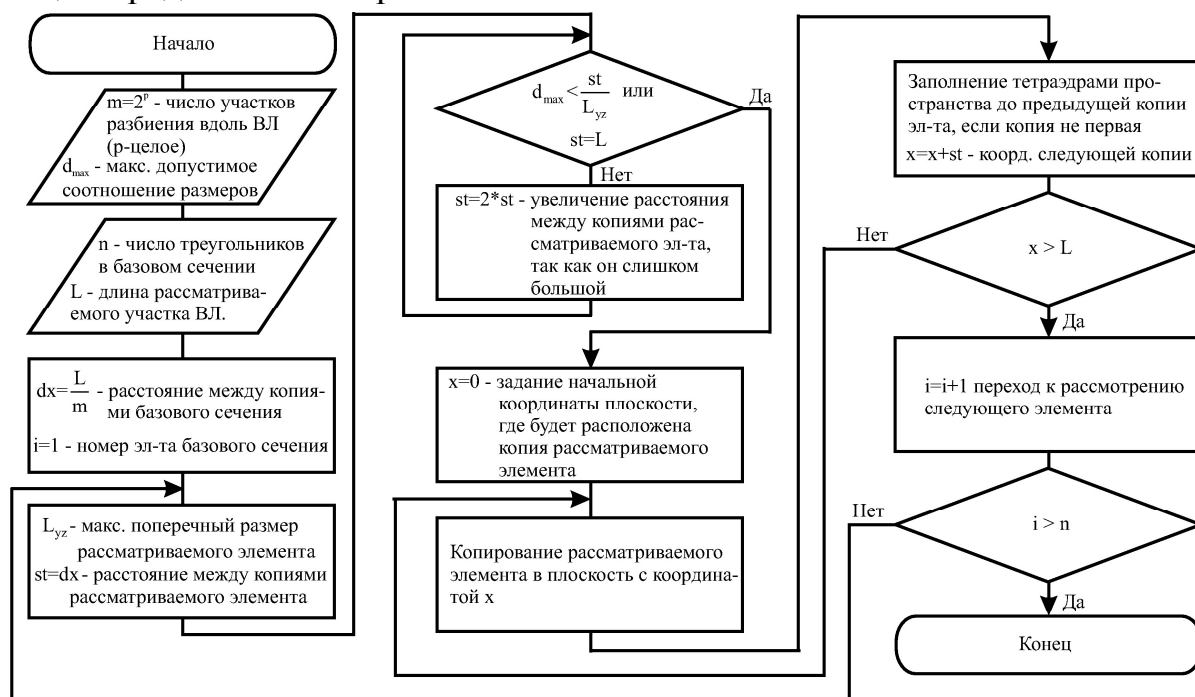


Рис. 3. Блок-схема алгоритма выполнения трехмерной дискретизации в программе DoACP

Результатом его работы является дискретизация расчетной области с максимальной плотностью узловых точек там, где градиент электрическо-

го и магнитного полей наибольший, что позволяет уменьшить погрешность расчетов при ограниченном размере решаемой системы линейных алгебраических уравнений относительно узловых значений потенциалов полей.

В пятой главе выполнены исследования погрешности разработанного численного метода расчета параметров воздушных линий.

Для оценки погрешности предлагаемой численной методики определения электрических параметров ВЛ введено понятие относительной погрешности расчета, при вычислении которой в качестве эталонного значения использовались результаты расчета соответствующих параметров аналитическим методом. Расчетные исследования производились при широкой вариации частоты, удельного сопротивления грунта, числа узловых точек, размеров рассматриваемой области и др.

В результате тщательного анализа установлено, что погрешность расчета продольных и поперечных параметров ВЛ практически не зависит от высоты расположения проводов и от расстояния между ними по причине использования специализированной методики трехмерной триангуляции, учитывающей геометрические особенности задачи расчета полей систем протяженных тонких проводников, проходящих над плоской землей.

Основными факторами, определяющими погрешность расчета параметров воздушной линии по разработанной методике, являются количество узловых точек в области, где рассчитываются электрическое и магнитное поля, а также размер этой области. Расширение расчетной области и увеличение числа узлов в ней обуславливает значительное снижение погрешности определения продольных сопротивлений и поперечных емкостей проводов.

Анализ полученных частотных зависимостей в диапазоне от 10 Гц до 1 МГц показал, что погрешность расчета индуктивных сопротивлений не превышает полутора процентов при изменении удельного сопротивления грунта в широких пределах (см. рис. 4).

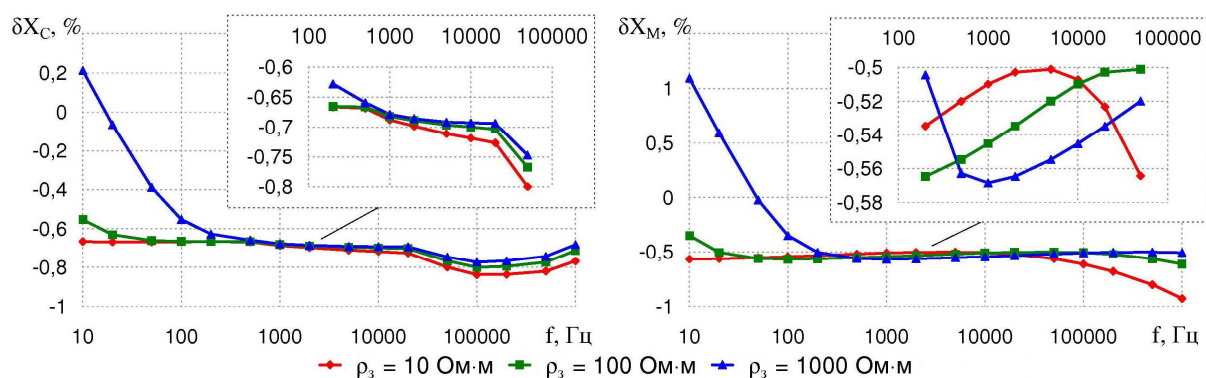


Рис. 4. Относительная погрешность расчета индуктивных сопротивлений при вариации удельного сопротивления земли

Кроме этого в данной главе выполнен сопоставительный анализ разработанной программы DoACP с аналогичными расчетными комплексами. Сравнение с промышленной конечно-элементной расчетной системой ANSYS выполнялось согласно показателям вычислительных и пользовательских временных затрат, а также по величине погрешности вычислений. Превосходство проблемно-ориентированного программного обеспечения DoACP при решении специальной задачи расчета емкостных параметров ВЛ было выявлено по всем указанным критериям (см. табл. 1).

Табл. 1. Сравнение результатов работы программ DoACP и ANSYS

Число узлов DoACP / ANSYS	Время расчета, с DoACP / ANSYS	$\delta C_c, \%$		$\delta C_m, \%$	
		DoACP / ANSYS	DoACP / ANSYS	DoACP / ANSYS	DoACP / ANSYS
1045 / 13722	0,047 / 4	1,59 / 23,63		4,55 / 55,62	
1335 / 26797	0,078 / 8	0,78 / 19,46		4,41 / 44,79	
1973 / 56047	0,188 / 17	-0,21 / 5,88		1,02 / 20,38	
2689 / 223593	0,406 / 70	-0,51 / -1,82		0,44 / 17,75	

В соответствии с принятым критерием (максимальное значение погрешности пять процентов) в работе сформулированы рекомендации по допустимости применения упрощенных аналитических выражений для расчета электрических характеристик линий электропередачи номинальным напряжением 110 – 220 кВ.

Апробация разработанного программного обеспечения для определения электрических параметров ВЛ выполнена при исследовании уровней наведенного напряжения на реальных ВЛ 500 кВ Каширская ГРЭС – Пахра (ОЭС Центра) и ВЛ 220 кВ ЛЭП-201, ЛЭП-207 (Норильская энергосистема). Результаты измерений и расчеты наведенного напряжения на ВЛ Норильской энергосистемы представлены в табл. 2.

Табл. 2. Результаты измерения и расчетов наведенного напряжения на опорах ВЛ 220 кВ Норильской энергосистемы

Отключенная ВЛ	Номер опоры	Наведенное напряжение, В		$\delta U_{НАВ}, \%$
		Измерено	Рассчитано	
ЛЭП-201	271	275	262	-2,9
ЛЭП-201	354	80	88,8	11,0
ЛЭП-207	396	35,3	38,8	9,9
ЛЭП-207	421	33,5	36,0	7,5

Приемлемая погрешность (около десяти процентов) результатов расчетов наведенного напряжения подтверждает адекватность предлагаемой методики определения параметров воздушных линий.

Заключение

1. Выполнено научное обоснование методики конечно-элементного расчета параметров электрического и магнитного поля, создаваемого проводами воздушных линий электропередачи при трехмерной постановке проблемы.

2. Предложен алгоритм определения собственных и взаимных продольных сопротивлений проводников ВЛ, основанный на расчете трехмерного магнитного поля. Разработана методика расчета собственных и взаимных частичных емкостей проводов воздушных линий электропередачи, основанная на численном расчете методом конечных элементов распределения скалярного электрического потенциала.

3. Разработана модификация метода тиражируемых сечений для построения дискретизации трехмерного пространства, позволяющая моделировать провисание проводов по вертикали и непараллельное расположение проводов разных ВЛ по горизонтали. Эффективность предложенного подхода заключается в значительном снижении (на два порядка) вычислительных затрат при достижении приемлемых значений погрешности.

4. Исследовано влияние частоты, проводимости грунта, количества узловых точек, размеров расчетной области на погрешность расчета численным методом. При количественной оценке погрешности установлены условия допустимости использования различных модификаций аналитических выражений для расчета электрических параметров ВЛ.

5. На основе сопоставительного анализа результатов расчета и натурного эксперимента по определению величины наведенного напряжения установлена адекватность (погрешность составляет около десяти процентов) предложенного математического описания задачи расчета продольных и поперечных параметров воздушных линий электропередачи.

Основные положения диссертации отражены в публикациях Журналы, рекомендованные ВАК:

1. Бессолицын А.В. Погрешность расчета взаимоиндукции между проводами воздушных линий [Текст] / А.В. Бессолицын, В.А. Попов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2008. № 4. С. 14 – 16.

2. Бессолицын А.В. Измерение и расчет наведенного напряжения на отключенной ВЛ 500 кВ [Текст] / А.В. Бессолицын, Р.В. Медов, В.А. Попов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2008. № 4. С. 27 – 28.

3. Бессолицын А.В. О безопасности персонала при работах на отключенных ВЛ 35-220 кВ, находящихся под наведенным напряжением [Текст] / И.Г. Барг, А.В. Бессолицын // Энергетик. 2008. № 5. С. 23 – 27.

4. Бессолицын А.В. Разработка методики численного расчета продольных параметров воздушной линии на основе трехмерной краевой за-

дачи [Текст] / А.В. Бессолицын, О.А. Новоселова, М.Г. Попов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2010. № 2. С. 50 – 55.

5. Бессолицын А.В. Использование численного расчета трехмерного электростатического поля для определения собственных и взаимных емкостей проводов воздушной линии [Текст] / А.В. Бессолицын, М.Г. Попов, Е.Н. Хорошина // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2010. № 2. С. 55 – 59.

Прочие:

6. Бессолицын А.В. Анализ некоторых факторов, влияющих на наведенное напряжение при ремонте воздушных линий [Текст] / А.В. Бессолицын, Р.В. Медов, В.А. Попов // Международная научно-практическая конференция «Энергетика сегодня и завтра». Сборник трудов. 2004. Киров. С. 17 – 20.

7. Бессолицын А.В. Расчет наведенного напряжения на отключенной ВЛ 500 кВ Каширская ГРЭС – Пахра с использованием данных воздушного лазерного сканирования [Текст] / А.В. Бессолицын, Р.В. Медов, В.А. Попов // Всероссийская научно-техническая конференция «Наука – производство – технология – экология». Сборник материалов. 2006. Киров. С. 306 – 310.

8. Бессолицын А.В. Анализ методов расчета сопротивления взаимной индукции между проводами воздушных линий [Текст] / А.В. Бессолицын, В.А. Попов // Вятский научный сборник. 2008. Киров. С. 16 – 21.

9. Бессолицын А.В. Расчет напряженности магнитного поля воздушной линии электропередачи методом конечных элементов [Текст] / А.В. Бессолицын // Всероссийская научно-техническая конференция «Общество – наука – инновации». Сборник материалов. 2010. Киров. Т. 2. С. 338 – 342.

10. Бессолицын А.В. Численная методика определения продольных параметров воздушной линии электропередачи [Текст] / А.В. Бессолицын // Всероссийская научно-техническая конференция «Общество – наука – инновации». Сборник материалов. 2010. Киров. Т. 2. С. 342 – 346.

11. Бессолицын А.В. Определение собственных и взаимных емкостей проводов воздушной линии на основе расчета трехмерного электростатического поля [Текст] / А.В. Бессолицын // Всероссийская научно-техническая конференция «Общество – наука – инновации». Сборник материалов. 2010. Киров. Т. 2. С. 346 – 350.