



PS2 – Poster-20



Полевой метод численного расчета расстояния до места повреждения воздушных линий электропередачи

М.Г. ПОПОВ¹, А.В. БЕССОЛИЦЫН¹, О.А. НОВОСЕЛОВА²
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет¹,
Вятский государственный университет²
Россия

PopovMG@eef.spbstu.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Воздушная линия электропередачи, строгое математическое описание полевой задачи, трехмерная математическая модель воздушной линии (ВЛ), численный расчет расстояния до места повреждения ВЛ, программное обеспечение.

1 ВВЕДЕНИЕ. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Согласно статистическим данным, значительная доля аварийных режимов объединенных электроэнергетических систем обусловлена электрическими (перекрытие изоляции, перенапряжения и др.) или механическими повреждениями высоковольтных линий электропередачи (ЛЭП). В зависимости от места и продолжительности устранения аварийных повреждений воздушных ЛЭП (ВЛ) технологические и экономические последствия могут иметь как локальный, так и общесистемный характер [1, 2]. При этом на оперативность выявления, ликвидации аварийных режимов электрической сети и, как следствие этого, на величину ожидаемого ущерба от перерывов электроснабжения электроприемников влияют следующие факторы:

1. быстрдействие средств защиты и противоаварийной автоматики;
2. быстрота отыскания и устранения аварий силового электрооборудования.

Решение проблемы оперативного поиска места повреждения воздушных линий электропередачи осуществляется с привлечением специализированного оборудования, реализующего как локационные (зондирующие), так и дистанционные методы. Проблема повышения быстрдействия и чувствительности дистанционных измерительных органов на сегодняшний день решается путем совершенствования соответствующих численных методов и функциональных алгоритмов контроля и диагностики. В некоторых случаях (см. табл. 1) величина абсолютной погрешности численного расчета расстояния до места короткого замыкания (КЗ) воздушных ЛЭП может достигать нескольких километров (или более 10 % относительно всей длины ВЛ). В связи с этим задача снижения приведенной погрешности до приемлемых значений ($\pm 2.5\%$) чрезвычайно актуальна.

В общем случае погрешность численного расчета расстояния до места КЗ (РМКЗ) имеет две составляющие – методическую (определяется в основном адекватностью (погрешностью) математической модели воздушной ЛЭП) и инструментальную, которая обусловлена характеристиками измерительной части. Способы компенсации (снижения) инструментальной составляющей погрешности трансформаторов тока разработаны и исследованы на кафедре «Электрические станции и автоматизация энергосистем» ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» (см. результаты исследований продольной дифференциальной защиты в данном издании). Настоящее исследование посвящено снижению

методической составляющей погрешности дистанционных методов численного расчета РМКЗ ВЛ при разработке строгого математического описания уравнений переходных процессов при решении полевой задачи в трехмерной постановке. Применение полевых методов определения электрических параметров воздушных линий электропередачи это новое и перспективное направление в решении проблемы.

2 ПОЛЕВЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Современные численные методы расчета РМКЗ воздушных ЛЭП основаны на использовании электрических параметров режима работы электрической системы, регистрируемых цифровыми осциллографами. Обобщенный алгоритм процедуры расчета РМКЗ линий электропередачи изображен на рис. 1.

Как отмечалось ранее, методическая составляющая погрешности численного расчета в значительной степени обусловлена адекватностью (строгостью) математической модели электрической сети, содержащей ВЛ. Поскольку при определении продольных и поперечных параметров воздушных ЛЭП следует учитывать их геометрические особенности (провис проводов, участки непараллельного прохождения разных линий, пересечения, сближения с другими ВЛ и др.), широко известные аналитические выражения не дают точного решения в связи с множеством используемых допущений (упрощений).

В свою очередь, применение численных методов исследования (моделирования) электромагнитного и электрического полей воздушных линий со строгим математическим описанием указанных выше геометрических особенностей, неоднородности (многослойности) структуры грунта позволяет исключить методическую составляющую погрешности, проявляющуюся при расчете параметров схемы замещения.

Опыт отечественных и зарубежных исследований показывает, что для решения задачи расчета электромагнитного поля воздушной линии наиболее целесообразно использовать метод конечных элементов [3], который обладает преимуществами простоты программной реализации и приемлемой погрешностью при аппроксимации (моделировании) поля.

В работе численный расчет параметров магнитного поля ВЛ производится с использованием проекций векторного магнитного потенциала $\vec{A}$ на оси прямоугольной системы координат, а определение параметров электрического поля осуществляется через скалярный электрический потенциал φ . Для разбиения расчетной 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 искомых 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:

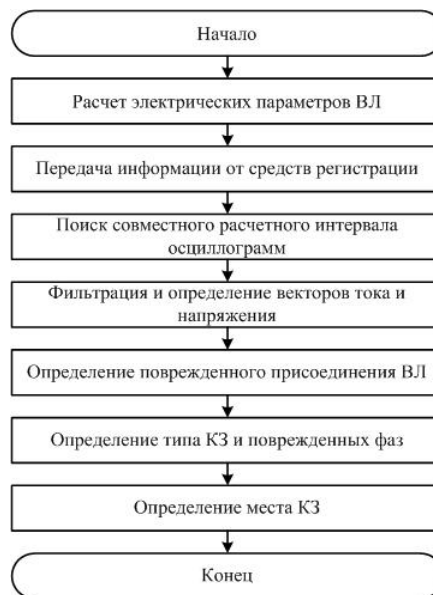


Рис. 1: Блок-схема обобщенного алгоритма численного метода расчета РМКЗ ВЛ

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

а для скалярного электрического потенциала:

$$\mathbf{S}^{(e)} \Phi^{(e)} = \mathbf{0}, \quad (2)$$

где μ – магнитная проницаемость среды;

$\mathbf{S}^{(e)}$, $\mathbf{T}^{(e)}$ – 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

Уравнения (1), (2) каждого конечного элемента, должны быть объединены в общую систему уравнений, решение которой осуществляется относительно значений потенциала во всех узловых точках расчетной области. При этом элементы 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.

Тогда, расчет собственных и взаимных продольных сопротивлений для n проводов воздушной линии выполняется согласно алгоритму [3] рис. 2 с учетом допущения о постоянстве модуля градиента скалярного электрического потенциала ($\text{grad } \phi$) по всей длине проводника. С учетом этого процедура определения среднего (по сечению) значения тока каждого (m -го) провода заключается в следующем:

1. Расчет проекций на оси координат градиента скалярного электрического потенциала ($\text{grad } \phi$) во всех узловых точках каждого провода при заданных падениях напряжения ($\dot{U}_m^{(1)}$, $\dot{U}_m^{(2)} \dots \dot{U}_m^{(n)}$) каждого проводника.
2. Решение систем линейных алгебраических уравнений вида (1) относительно проекций векторного магнитного потенциала $\dot{\mathbf{A}}$ на все оси координат.

3. Расчет вектора плотности суммарного тока в узловых точках проводов:

$$\dot{\delta} = -\sigma \cdot (\text{grad } \phi + j\omega \dot{\mathbf{A}}), \quad (3)$$

где σ – удельная проводимость провода.

4. Определение среднего (в сечении) значения тока, протекающего вдоль каждого провода системы:

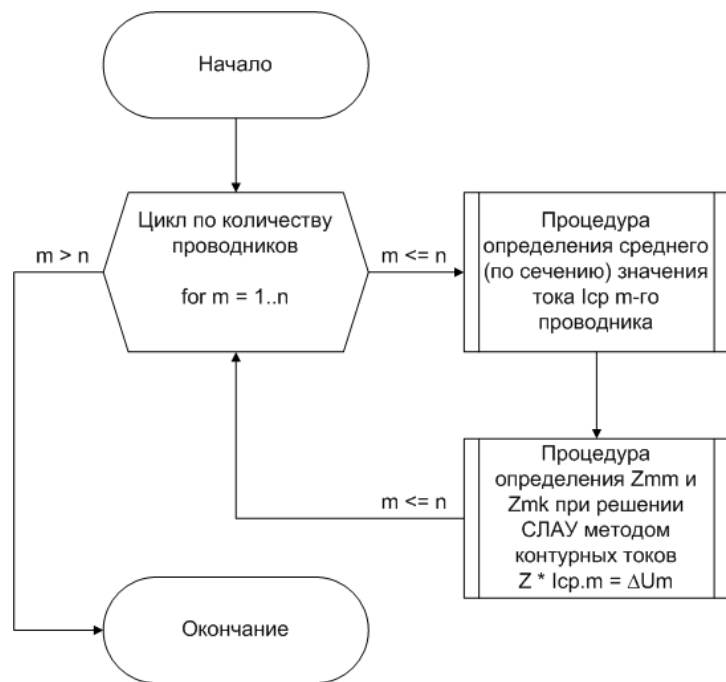


Рис. 2: Блок-схема алгоритма численного расчета собственных и взаимных продольных сопротивлений проводов ВЛ

$$\dot{I}_{cpm} = \frac{\sum_{e=1}^N \left[\left(\dot{\delta}_i + \dot{\delta}_j + \dot{\delta}_k + \dot{\delta}_l \right) \cdot V^{(e)} \right]}{4 \cdot L_m}, \quad (4)$$

где $\dot{\delta}_i, \dot{\delta}_j, \dot{\delta}_k, \dot{\delta}_l$ – проекции вектора плотности тока на ось провода в данном сечении для узловых точек e -го конечного элемента
 L_m – длина рассматриваемого m -го проводника на рассчитываемом участке

Определение собственных Z_{mm} и взаимных Z_{mk} продольных сопротивлений m -го проводника осуществляется при решении системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) порядка n .

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_{mm}\dot{\boldsymbol{i}}_m^{(1)} + Z_{m2}\dot{\boldsymbol{i}}_2^{(1)} + \dots + Z_{mk}\dot{\boldsymbol{i}}_k^{(1)} + Z_{mn}\dot{\boldsymbol{i}}_n^{(1)} = \dot{\boldsymbol{U}}_m^{(1)} \\ Z_{mm}\dot{\boldsymbol{i}}_m^{(2)} + Z_{m2}\dot{\boldsymbol{i}}_2^{(2)} + \dots + Z_{mk}\dot{\boldsymbol{i}}_k^{(2)} + Z_{mn}\dot{\boldsymbol{i}}_n^{(2)} = \dot{\boldsymbol{U}}_m^{(2)} \\ \vdots \\ Z_{mm}\dot{\boldsymbol{i}}_m^{(k)} + Z_{m2}\dot{\boldsymbol{i}}_2^{(k)} + \dots + Z_{mk}\dot{\boldsymbol{i}}_k^{(k)} + Z_{mn}\dot{\boldsymbol{i}}_n^{(k)} = \dot{\boldsymbol{U}}_m^{(k)} \\ Z_{mm}\dot{\boldsymbol{i}}_m^{(n)} + Z_{m2}\dot{\boldsymbol{i}}_2^{(n)} + \dots + Z_{mk}\dot{\boldsymbol{i}}_k^{(n)} + Z_{mn}\dot{\boldsymbol{i}}_n^{(n)} = \dot{\boldsymbol{U}}_m^{(n)} \end{array} \right. \quad (5)$$

В свою очередь, расчет собственных и взаимных частичных емкостей β проводов ВЛ осуществляется согласно алгоритму [4], изображенному на рис. 3:

1. Расчет методом конечных элементов распределения скалярного электрического потенциала φ (2) в пространстве ВЛ при условиях равенства единице потенциала m -го (исследуемого) провода и равенства нулю значений потенциалов остальных (в том числе и земли) проводов;
2. Вычисление проекций вектора напряженности (E_x , E_y , E_z) электрического поля в граничных с поверхностью проводников конечных элементах;
3. Определение заряда (частичного емкостного коэффициента β_{im}) m -го (исследуемого) провода при пренебрежении торцевыми составляющими потока его электрического поля;

$$q_i = \varepsilon_0 \cdot \sum_{e=1}^N \left(\sqrt{E_x^{(e)2} + E_y^{(e)2} + E_z^{(e)2}} \cdot S_g^{(e)} \right), \quad (6)$$

где ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость;
 $S_g^{(e)}$ – площадь грани e -го конечного элемента, входящей в боковую поверхность m -го провода.

Окончательно, значения собственных и взаимных емкостей проводов ВЛ рассчитываются согласно выражениям (7) и (8):

$$C_{ii} = \sum_{k=1}^n \beta_{ik}, \quad (7)$$

$$C_{ij} = -\beta_{ij} . \quad (8)$$

Изложенная выше методика [3, 4] расчета электрических параметров воздушных линий электропередачи с произвольным числом проводов и грозозащитных тросов реализует строгое математическое описание с учетом действительного расположения проводов в трехмерном пространстве (провисание проводов, их возможное косоугольное сближение, реальные характеристики грунта и др.).

Оценка погрешности расчета электрических параметров (взаимного индуктивного сопротивления и емкости) ВЛ с использованием аналитических выражений производилась применительно к расчетной схеме, состоящей из двух проводов радиусом $R_1 = R_2 = 9.4$ мм (габарит первого провода $G_1 = 6.0$ м, а второго - $G_2 = 8.0$ м), которые имеют провисание и косоугольное сближение на участке (пролете ВЛ) длиной 285 метров. При этом высота подвеса проводов в два раза больше их габарита. Минимальное расстояние между проводами a_1 составляет 6.5 м.

При аналитическом расчете [5] взаимных индуктивных сопротивлений расчетной схемы с непараллельными проводниками в выражениях используются понятия эквивалентных (усредненных) значений высоты их подвеса $h_{эkv}$ и расстояния между ними $a_{эkv}$ [6]:

$$h_{эkv} = G + \frac{2}{3} h_c, \quad (9)$$

$$a_{эkv} = \frac{a_2 + 2a_1}{3} \quad (10)$$

где G – габарит провода;

h_c – максимальная стрела провиса провода;

a_1, a_2 – соответственно минимальное и максимальное расстояние между проводами.

Кроме этого, эквивалентное расстояние между проводами $a_{эkv}$, может быть найдено как среднее геометрическое значение [7]:

$$a_{эkv} = \sqrt{a_1 \cdot a_2}. \quad (11)$$

Определение взаимной емкости двух проводов ВЛ, проходящих под углом друг к другу, также осуществляется при расчете усредненного расстояния между ними:

$$a_{эkv} = \frac{a_1 + a_2}{2}. \quad (12)$$

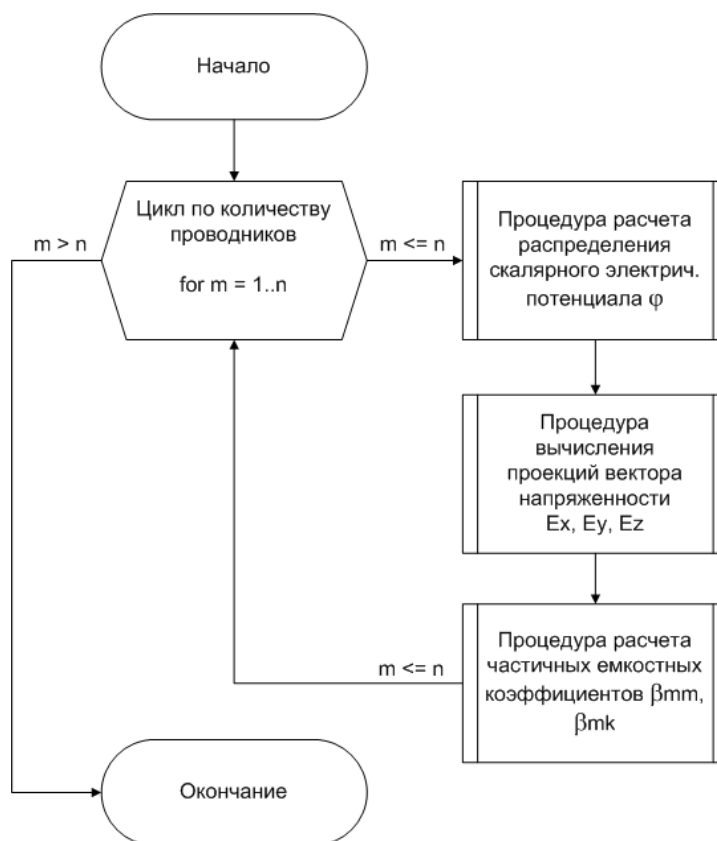


Рис. 3: Блок-схема алгоритма численного расчета собственных и взаимных частичных емкостей проводов ВЛ

Анализ результатов численного и аналитического расчета комплексного сопротивления взаимного влияния двух проводов ВЛ на частотах 50 и 500 Гц (см. рис. 4, 5) при вариации максимального расстояния между проводами a_2 выявил значительное влияние угла сближения проводов на погрешность вычисления реактивной составляющей X_M с использованием допущений (9), (10) и (11).

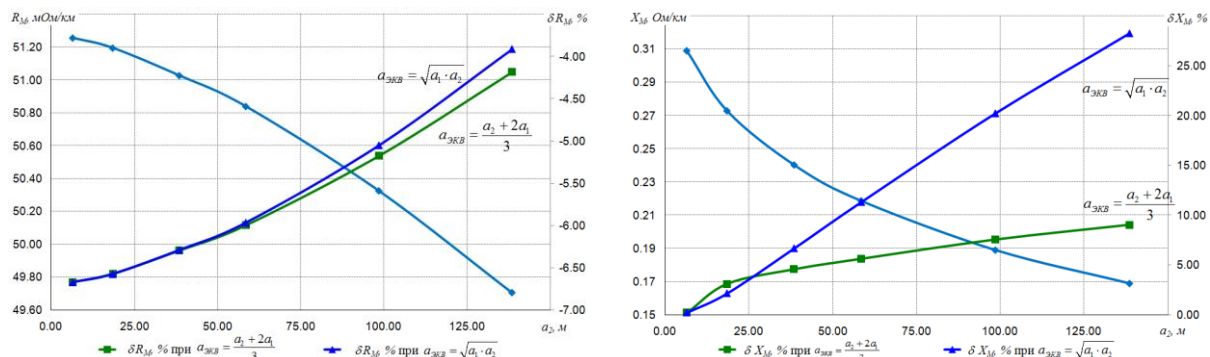


Рис. 4: Погрешность аналитического расчета активной и реактивной составляющих продольного взаимного сопротивления на частоте 50 Гц при вариации угла сближения проводов

В рассматриваемых случаях при угле сближения около 25 градусов ($a_2 = 138.5$ м) относительная погрешность расчета реактивного сопротивления взаимной индукции составляла более 28 % ($f = 50$ Гц) и 46 % ($f = 500$ Гц). В тоже время, установлено малое влияние косоугольного сближения проводов на погрешность аналитического расчета активной составляющей R_M – максимальное значение относительной погрешности составляет около 4 % (при угле сближения не более 25 градусов).

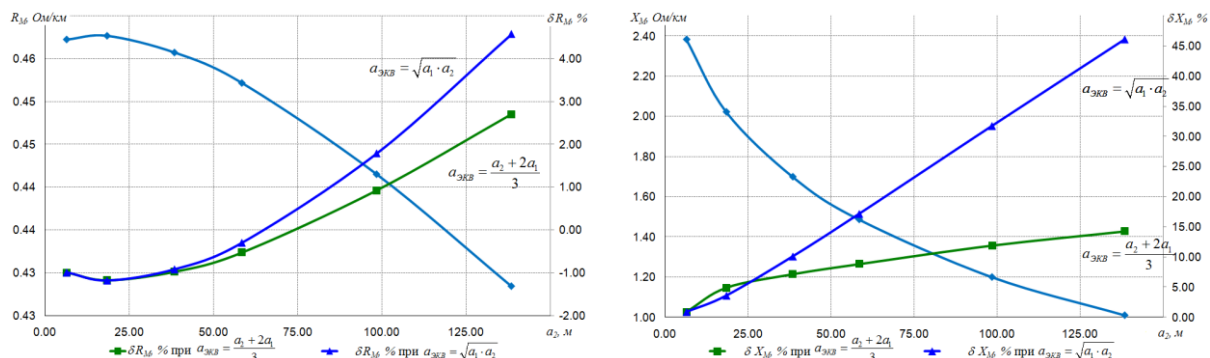


Рис. 5: Погрешность аналитического расчета активной и реактивной составляющих продольного взаимного сопротивления на частоте 500 Гц при вариации угла сближения проводов

Также следует отметить значительную погрешность аналитического расчета (см. рис. 6) взаимной емкости C_M в рассматриваемой схеме, обусловленную допущением (12). Величина относительной погрешности вычисления C_M составляет от 10 % до 50 % даже при относительно небольших углах (4..10 градусов) сближения. Применение допущения (9) при аналитических вычислениях собственных емкостей проводов воздушной ЛЭП слабо сказывается на погрешности расчета (при стрелах провеса провода, близких к реальным, погрешность составляет не более 3 %).

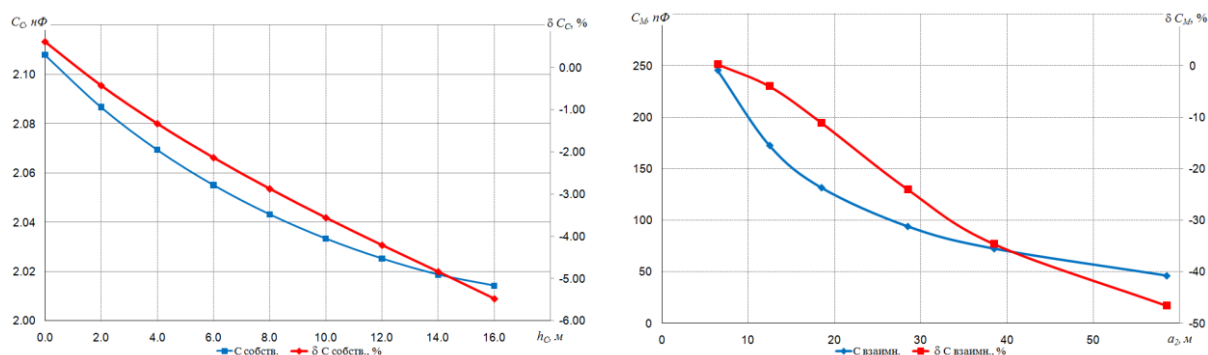


Рис. 6: Погрешность аналитического расчета собственных и взаимных емкостей при вариации стрелы провиса и угла сближения проводов

Выявленная погрешность аналитического расчета электрических параметров схемы замещения неизбежно сказывается на достоверности определения места повреждения многопроводных ЛЭП. При этом погрешность численного расчета РМКЗ в большей степени обусловлена погрешностью исходных данных о собственных и взаимных продольных сопротивлениях ВЛ. Вопросы снижения погрешности численного расчета РМКЗ воздушных линий ОЭС Северо-Запада при их строгом математическом описании рассмотрены в следующем разделе.

3 СНИЖЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА РАССТОЯНИЯ ДО МЕСТА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТРОГОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ОЭС СЕВЕРО-ЗАПАДА

Анализ погрешности численного расчета РМКЗ производился применительно к воздушным линиям электропередачи 110 – 750 кВ ОЭС Северо-Запада (Ленинградская, Кольская, Карельская, Архангельская и Вологодская энергосистемы). Для исследования выбраны ВЛ (см. табл. 1), для которых величина приведенной (к общей длине) погрешности численного расчета РМКЗ составила более 2.5 %. Также дополнительным критерием отбора аварийных осциллограмм с переходными процессами, обусловленными короткими замыканиями ЛЭП, являлось наличие полных исходных данных по трассированию ВЛ.

Табл. 1: Результаты численного расчета РМКЗ при односторонней регистрации аварийного процесса

Энерго- объект	Название ВЛ, вид КЗ	Длина, км	Обход, км	Результаты численного расчета РМКЗ					
				обычная мат. модель			уточненное мат. описание		
				$l_{расч}, км$	$\Delta, км$	$\delta_{пр}, \%$	$l_{расч}, км$	$\Delta, км$	$\delta_{пр}, \%$
ПС 90	Л-389, В	255.60	206.90	175.70	-31.20	-12.21	194.37	-12.53	-4.90
	Л-389, А+С	255.60	150.00	141.70	-8.30	-3.25	143.90	-6.10	-2.39
	Л-389, С	255.60	66.30	55.50	-10.80	-4.23	65.61	-0.69	-0.27
	Л-389, В	255.60	186.70	171.60	-15.10	-5.91	190.98	4.28	1.67
ПС Ленин- градская	Л-374, С	172.08	102.30	95.20	-7.10	-4.13	107.69	5.39	3.13
	Л-374, В	172.08	44.60	38.20	-6.40	-3.72	46.74	2.14	1.24
	Л-374, В	172.08	88.50	76.60	-11.90	-6.92	94.66	6.16	3.58
	Л-389, В	255.60	107.40	98.70	-8.70	-3.40	106.22	-1.18	-0.46
	Л-389, В	255.60	94.70	104.50	9.80	3.83	90.94	-3.76	-1.47
ПС Окулов- ская	Л-361, В	134.30	34.70	22.00	-12.70	-9.46	34.16	-0.54	-0.40
ПС Велико- рецкая	Л-309, С	155.60	34.20	20.90	-13.30	-8.55	34.55	0.35	0.22

Обобщенный анализ табл. 1 позволяет установить взаимосвязь между погрешностью численного расчета расстояния до места короткого замыкания ВЛ и погрешностью

представления исходной информации о параметрах ее схемы замещения. В частности, согласно некоторым статистическим данным состояния проблемы расчета расстояния до места КЗ линий электропередачи 110 - 330 кВ ОЭС Северо-Запада (см. табл. 1) приведенная и относительная погрешность имеет отрицательное значение (расчетное расстояние меньше реального). Это объясняется недостоверным учетом взаимного влияния фазных проводов (проводов «сближенных» ЛЭП) и, как следствие этого, большим (по сравнению с действительным) удельным падением напряжения по длине ВЛ. Данный факт наиболее характерен для результатов расчета расстояния при однофазных КЗ ВЛ, поскольку электрические параметры взаимного влияния при использовании модальных преобразований входят в схему нулевой последовательности.

Следует также отметить, что применение строгого математического описания переходных процессов воздушных линий электропередачи позволяет существенно улучшить показатели погрешности численного расчета расстояния до места короткого замыкания. Наибольшее по модулю значение приведенной погрешности расчета с использованием уточненных параметров схемы замещения ВЛ составило около 5 % (при исходной величине более 12 %). В некоторых расчетных случаях (повреждения Л-389, Л-309) величина погрешности составляет менее 0.5 %.

4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показано, что аналитические методы расчета параметров электрической схемы замещения ВЛ обладают значительной погрешностью. Наибольшее влияние на величину погрешности численного расчета РМКЗ оказывает погрешность исходных данных о собственных и взаимных продольных сопротивлениях схемы замещения ВЛ.
2. Разработанное программное обеспечение DoACR, реализующее численное решение полевой пространственной задачи методом конечных элементов, должно применяться для паспортизации (актуализации) электрических параметров воздушных линий электропередачи.
3. Выявлена взаимосвязь погрешности представления исходной информации с погрешностью численного расчета расстояния до места КЗ. Установлено, что применение строгого математического описания переходных процессов ВЛ позволяет в значительной мере снизить величину приведенной погрешности до приемлемых значений (менее 2.5 %)

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Попов М. Г., Мякушин М. Ю. Основные аспекты определения мест коротких замыканий на высоковольтных линиях электропередачи // Энергетик. 2002. № 10. С. 44 – 45.
- [2] Попов М.Г. Определение мест коротких замыканий на высоковольтных линиях электропередачи // Энергетик. 2004. № 2. С. 44 – 45.
- [3] Бессолицын А.В., Новоселова О.А., Попов М.Г. Разработка методики численного расчета продольных параметров воздушной линии на основе трехмерной краевой задачи // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2010. № 2. С. 50 – 55.
- [4] Бессолицын А.В., Попов М.Г., Хорошина Е.Н. Использование численного расчета трехмерного электростатического поля для определения собственных и взаимных емкостей проводов воздушной линии // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2010. № 2. С. 55 – 59.
- [5] Руководящие указания по релейной защите. Вып. 11. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110 - 750 кВ. М.: Энергия. 1979.
- [6] Костенко М.В. Взаимные сопротивления между воздушными линиями с учетом поверхностного эффекта в земле // Электричество. 1955. №10. С. 29 – 34.
- [7] Михайлов М. И. и др. Электромагнитные влияния на сооружения связи. М. Связь. 1976.