

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.314

Применение имитационного моделирования ЛЭП 6–35 кВ для повышения точности определения расстояния до двойных замыканий на землю

А.Л. Куликов, М.Д. Обалин, В.Ю. Осокин, Т.Р. Шарафеев
ФГБОУВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексева»,
г. Нижний Новгород, Российская Федерация
E-mail: inventor61@mail.ru, obalinmd@gmail.com, osokin-v92@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Задача определения места повреждения линии электропередачи относится к сложным и наиболее длительным операциям по восстановлению поврежденных участков электросети. Существующие методы определения места повреждения по параметрам аварийного режима обладают существенной погрешностью, обусловленной, как правило, неполным их соответствием реальной физической энергосистеме. Целью исследования является повышение точности определения места повреждения на линиях электропередачи 6–35 кВ при двойных замыканиях на землю.

Материалы и методы: В целях компенсации отклонений расчетных расстояний от фактических за счет использования поправочного коэффициента предлагается применение математической модели сети для имитации двойных замыканий на землю. В процессе расчета и моделирования приняты следующие допущения: трехфазные элементы системы принимаются симметричными; не учитывается емкостная проводимость ЛЭП; переходное сопротивление носит чисто активный характер; подпитка точки короткого замыкания током нагрузки отсутствует.

Результаты: Предложен новый метод повышения точности определения места повреждения двойного замыкания на землю в сети 6–35 кВ с использованием имитационного моделирования, накопления статистической информации и компенсации погрешностей расчетов по результатам моделирования. Для представленного примера сокращение зоны обхода составляет 2 км, что соответствует 40 минутам пешего осмотра линии.

Выводы: Достигнуто повышение точности при определении места повреждения линий электропередачи 6–35 кВ при двойных замыканиях на землю. Предложенные методы позволяют снизить максимальную погрешность расчета расстояния до повреждения с 27 до 15 %, а зону обхода поврежденной линии с 35 до 15 % для ближней точки повреждения и с 19 до 13 % для дальней расчетной точки. Результаты исследований могут быть использованы при разработке и создании интеллектуальных устройств цифровой релейной защиты.

Ключевые слова: двойное замыкание на землю, определение места повреждения, сеть с изолированной нейтралью, имитационное моделирование.

Using simulation modelling of 6–35 kV power lines for improving the accuracy of double earth fault location

A.L. Kulikov, M.D. Obalin, V.Yu. Osokin, T.R. Sharafeev
«Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev», Nizhny Novgorod, Russian Federation
E-mail: inventor61@mail.ru, obalinmd@gmail.com, osokin-v92@mail.ru

Abstract

Background: The problem of fault location on transmission lines is among the most difficult and time-consuming technological operations for restoring damaged power line segments. Modern methods of fault location by the parameters of the emergency mode are rather inaccurate as they do not completely correspond to the conditions of real power lines. The aim of the research is to improve the accuracy of fault location on 6–35 kV overhead power lines at double earth faults.

Materials and methods: The authors have used a mathematical model of double earth faults to compensate for the deviations of the estimated distances from the actual values by applying a correction factor. The following assumptions are made for calculating and modeling: three phase elements of the system are assumed symmetrical; the capacitive conductance of the transmission line is not taken into account; the contact resistance has only the active component; the feeding short-circuit from the load is absent.

Results: A new method is proposed to improve the accuracy of double earth fault location in 6–35 kV networks by means of simulation, accumulation of statistical information and error compensation in calculations according to the

modeling results. For the presented example, the reduction zone is 2 km, which corresponds to 40 minutes of line inspection on foot.

Conclusions: The authors have increased the accuracy of fault location on 6–35 kV transmission lines at double earth faults. The methods reduce the maximum error of calculating the distance to the fault from 27 to 15% and the bypass area of the damaged line from 35 to 15% for the closest fault and from 19 to 13 % for the furthest one. The study results can be used to develop smart devices of digital relay protection.

Key words: Double earth fault, fault location, network with isolated neutral, simulation modeling.

DOI: 10.17588/2072-2672.2018.1.040-049

Введение. Обеспечение бесперебойного и надежного электроснабжения потребителей – важнейшая задача электросетевых компаний. Одной из ключевых проблем эксплуатации сетей среднего напряжения являются повреждения в сетях с изолированной нейтралью. Замыкание фазы на землю в сетях напряжения 6–35 кВ могут привести к следующим основным негативным последствиям [1–5]:

1) в сети появляются перенапряжения порядка 2,4–3,5 кратных по сравнению с фазным, возможны пробои изоляции неповрежденных фаз и переход однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) в двойные замыкания на землю, по своим характеристикам близкие к двухфазным коротким замыканиям (КЗ). Риск возникновения таких двойных замыканий заметно вырос в последнее время в связи со старением изоляции электрических машин и аппаратов многих энергетических объектов;

2) на воздушных ЛЭП ОЗЗ часто происходит при обрыве провода и падении его на землю. При этом возникает опасность поражения людей и животных электрическим током. Особенно велика такая опасность, если ЛЭП проходит по густонаселенным районам, например по городу;

3) перекрытие фазной изоляции на арматуру железобетонной опоры, если ЛЭП долго не отключается, может привести к разрушению бетона опоры в месте его соприкосновения с землей. В результате опора теряет свою механическую прочность. При длительном протекании тока ОЗЗ грунт возле опоры высыхает, возрастает его сопротивление и увеличивается опасность поражения людей шаговым напряжением или напряжением прикосновения;

4) если ОЗЗ длительно не отключается, существенно повышается вероятность возникновения пожаров, например, в ячейках КРУ, из-за высокотемпературной дуги в месте ОЗЗ.

Точное и оперативное определение места повреждения (ОМП) на воздушных линиях электропередачи непосредственно влияет на уменьшение ущерба от перерывов электроснабжения и снижения качества передаваемой электроэнергии.

В электрических сетях среднего напряжения применяются в основном методы ОМП, основанные на одностороннем замере параметров аварийного режима [5–11], которые

позволяют определить расстояния до междуфазных повреждений.

ОЗЗ возможно определить с помощью дорогостоящих специализированных индикаторов¹, указывающих направление протекания емкостного тока замыкания, методов активного зондирования [3, 12], волнового ОМП [13, 14]. Особенностью ОЗЗ являются малые токи замыкания на землю и возможность работы потребителей в данном режиме длительное время. Однако большинство однофазных замыканий в сетях с изолированной нейтралью переходят в двухфазные замыкания и в двойные замыкания на землю (ДвЗЗ), при этом ДвЗЗ являются наименее чувствительными для органов релейной защиты.

По статистике, двойные замыкания на землю чаще наблюдаются на участках распределительной сети с наиболее ослабленной изоляцией, причем вторая точка замыкания может располагаться как на линии, где уже произошло ОЗЗ, так и на другой линии, отходящей от шин распределительного устройства среднего напряжения.

Несмотря на многообразие предлагаемых программно-аппаратных средств, проблема ОМП при ДвЗЗ не имеет до настоящего времени общепризнанного решения [5–11], а современные методы, позволяющие рассчитать расстояние до мест замыканий, обладают большой погрешностью. В связи с этим задача ОМП при двойных замыканиях на землю является актуальной.

Ниже предложен новый метод повышения точности ОМП при двойных замыканиях на землю на одной линии в сети 6–35 кВ с использованием имитационного моделирования, накопления статистической информации и компенсации погрешностей реальных расчетов по результатам моделирования.

Методы исследования. В основе разработанного метода ОМП при ДвЗЗ лежит имитационное моделирование и последующая статистическая обработка результатов [16–18]. Ниже приведены параметры имитационной модели и разработанных методов ОМП. Расчет расстояний до мест повреждений при ДвЗЗ

¹ Геоинформационная система ОМП 6–35 кВ [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.releematika.ru (дата обращения: 17.07.2017) www.releematika.ru/produkty/6-35_kv/sistema_omp_6-35_kv.

на одной линии выполняется по схемам, изображенным на рис. 1, 2.

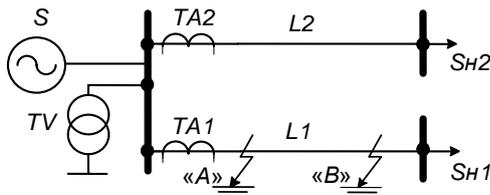


Рис. 1. Однолинейная электрическая схема сети при двойном замыкании на землю на одной линии

Составными частями переходного сопротивления R_n являются: сопротивление дуги; сопротивление посторонних предметов между проводом и землей или опорой; сопротивление заземления опоры.

В процессе расчета были приняты следующие допущения:

- 1) трехфазные элементы системы принимаются симметричными;
- 2) не учитывается емкостная проводимость ЛЭП;
- 3) переходное сопротивление носит чисто активный характер;
- 4) подпитка точки короткого замыкания током нагрузки отсутствует.

Решение схемы, представленной на рис. 2, в фазных координатах [18] позволяет получить выражения для определения расстояний до ближней и дальней точек повреждения.

Запишем второй закон Кирхгофа для контура фаза-земля при допущении, что подпитка точек КЗ током нагрузки отсутствует.

Тогда при коротких замыканиях фаз Ф1 и Ф2 напряжения поврежденных фаз на шинах подстанции определяются следующим образом:

$$\underline{U}_{\phi 1} = l_1 \underline{z}_n I_{\phi 1} + l_1 \underline{z}_{m2} I_{\phi 1} + l_1 \underline{z}_{m3} I_{\phi 1} + R_{n1} I_{\phi 1}; \quad (1)$$

$$\underline{U}_{\phi 2} = l_2 \underline{z}_n I_{\phi 2} + l_1 \underline{z}_{m1} I_{\phi 2} + l_1 \underline{z}_{m4} I_{\phi 2} + R_{n2} I_{\phi 2}, \quad (2)$$

где $\underline{z}_{m1} = \underline{z}_m \frac{I_{\phi 1}}{I_{\phi 2}}$; $\underline{z}_{m2} = \underline{z}_m \frac{I_{\phi 2}}{I_{\phi 1}}$; $\underline{z}_{m3} = \underline{z}_m \frac{I_{\phi 3}}{I_{\phi 1}}$;

$\underline{z}_{m4} = \underline{z}_m \frac{I_{\phi 3}}{I_{\phi 2}}$ – сопротивления взаимной индукции соответствующих фаз; \underline{z}_m – удельное сопротивление взаимной индукции; \underline{z}_n – удельное сопротивление линии; $I_{\phi 1}$ – ток поврежденной фазы, на которой находится ближняя точка повреждения; $I_{\phi 2}$ – ток поврежденной фазы, на которой находится дальняя точка повреждения; $I_{\phi 3}$ – ток неповрежденной фазы; $\underline{U}_{\phi 1}$ – напряжение поврежденной фазы, на которой находится ближняя точка повреждения; $\underline{U}_{\phi 2}$ – напряжение поврежденной фазы, на которой находится дальняя точка повреждения.

Расчетное сопротивление \underline{z}_ϕ пропорционально расстоянию до места повреждения и определяется по следующей формуле:

$$\underline{z}_\phi = \frac{U_\phi}{I_\phi}. \quad (3)$$

Расстояние до ближнего места повреждения l_1 определяется меньшим значением реактивного сопротивления поврежденных фаз. Тогда с учетом формул (1) и (3) расстояние до ближайшего места повреждения определяется как

$$l_1 = \frac{\underline{U}_{\phi 1} - R_{n1} I_{\phi 1}}{I_{\phi 1} (\underline{z}_n + \underline{z}_{m2} + \underline{z}_{m3})} = \frac{\underline{z}_{\phi 1} - R_{n1}}{(\underline{z}_n + \underline{z}_{m2} + \underline{z}_{m3})}. \quad (4)$$

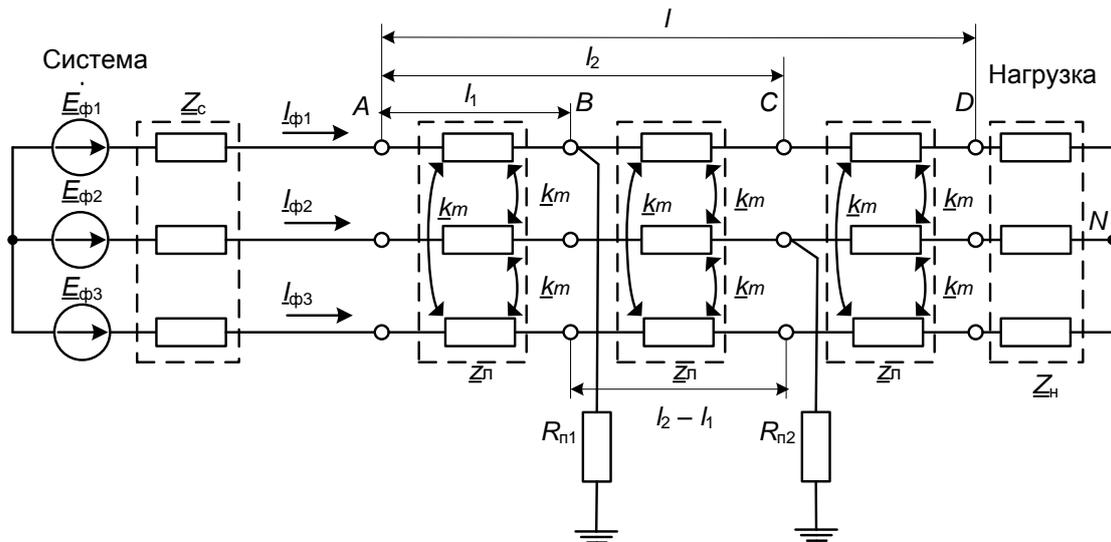


Рис. 2. Схема замещения сети в режиме двойного замыкания на землю фазы Ф1 на расстоянии l_1 и фазы Ф2 на расстоянии l_2 : $E_{\phi 1}$, $E_{\phi 2}$, $E_{\phi 3}$ – эквивалентные ЭДС системы; \underline{z}_c – эквивалентное сопротивление системы; \underline{z}_n – удельное сопротивление линии; k_m – коэффициент взаимной индукции; \underline{z}_n – эквивалентное сопротивление нагрузки; R_{n1} , R_{n2} – переходные сопротивления в местах замыканий; l_1 , l_2 – фактические расстояния до мест ближнего и дальнего замыканий на землю; TA – измерительные трансформаторы тока; TV – измерительный трансформатор напряжения

Расстояние до дальней точки повреждения l_2 с учетом формул (2) и (3) определяется как

$$l_2 = \frac{U_{\phi 2} - I_1 I_{\phi 2} (z_{m1} + z_{m4}) - R_{n2} I_{\phi 2}}{I_{\phi 2} z_n} = \frac{z_{\phi 2} - I_1 (z_{m1} + z_{m4}) - R_{n2}}{z_n} \quad (5)$$

Согласно (4) и (5), расстояние до повреждения зависит от активного переходного сопротивления, значение которого неизвестно.

Влияние активных переходных сопротивлений можно исключить путем выделения реактивной составляющей сопротивления, тогда расстояние до ближайшей точки повреждения определяется по следующей формуле:

$$l_1 = \frac{X_{\phi 1}}{(x_n + x_{m2} + x_{m3})} \quad (6)$$

Расстояние до дальней точки повреждения можно определить по следующей формуле:

$$l_2 = \frac{X_{\phi 2} - (x_{m1} + x_{m4}) l_1}{x_n} \quad (7)$$

где $x_{m1} = \text{Im} \left(z_m \frac{I_{\phi 1}}{I_{\phi 2}} \right)$; $x_{m2} = \text{Im} \left(z_m \frac{I_{\phi 2}}{I_{\phi 1}} \right)$;

$x_{m3} = \text{Im} \left(z_m \frac{I_{\phi 3}}{I_{\phi 1}} \right)$; $x_{m4} = \text{Im} \left(z_m \frac{I_{\phi 3}}{I_{\phi 2}} \right)$ – сопротив-

ления взаимной индукции соответствующих фаз; $X_{\phi 1}$, $X_{\phi 2}$ – расчетные индуктивные сопротивления, пропорциональные расстояниям до мест повреждений.

Расстояние до ближнего места повреждения l_1 определяется меньшим значением реактивного сопротивления поврежденных фаз.

Одним из методов повышения точности ОМП служит компенсация ошибки расчета с помощью введения поправочного коэффициента.

Для минимизации ошибки расчета расстояния до мест ДвЗЗ целесообразно использовать поправочные коэффициенты, значения которых можно сформировать путем имитационного моделирования повреждений. Полученная информация о расчетах при ОМП для таких видов замыканий позволит в дальнейшем использовать ее для компенсации ошибок.

Очевидно, что величина ошибки ОМП тем больше, чем больше значение переходного сопротивления. Для рассматриваемой схемы был проведен ряд имитационных экспериментов и определена зависимость поправочного коэффициента от величины переходного сопротивления. Поправочный коэффициент вводился на величину компенсации ошибки ОМП ЛЭП (отклонений фактических расстояний от расчетных) при заданном значении переходного сопротивления.

В результате имитационного моделирования двойных замыканий на землю, расположенных на разных удаленностях, при изменяемых значениях переходного сопротивления была определена соответствующая зависимость поправочного коэффициента (табл. 1).

Таблица 1. Зависимость поправочного коэффициента от переходного сопротивления

Для ближней точки повреждения		Для дальней точки повреждения	
R_{n1}	K_1	R_{n2}	K_2
0,5	-5,7505	0,5	-7,1507
1,0	6,641	1,0	31,8576
1,5	36,4153	1,5	68,2548
2,00	81,6403	2,00	103,0895
2,5	144,797	2,5	132,4199
3,00	215,5972	3,00	168,7586
3,5	304,2932	3,5	196,5279
4,0	405,5334	4,0	222,7267
4,50	518,0335	4,50	247,3703
5,0	643,7134	5,0	266,6257
5,50	774,0687	5,50	293,5175
6,0	914,7348	6,0	317,4544
6,5	1072,4734	6,5	326,2486
7,00	1230,6416	7,00	346,9796
7,5	1396,8777	7,5	365,6469
8,00	1566,9254	8,00	388,8475
8,5	1754,1066	8,5	392,9241
9,0	1935,8555	9,0	415,7504
9,50	2139,907	9,50	408,726
10,0	2336,6489	10,0	427,8461

Критерием выбора поправочного коэффициента служит значение переходного сопротивления, величина которого задается параметрами неповрежденной фазы и предварительными значениями расстояний до мест повреждений, полученными по формулам (1) и (2).

Переходное сопротивление в месте возникновения ближней точки повреждения ЛЭП рассчитывается по следующему выражению:

$$R_{n1} = \frac{U_{\phi 1} (z_1 + z_{n1} + z_1 l_1)}{I_{\phi 1} (z_1 + z_n) - U_{\phi 1} + U_n} - \frac{I_{\phi 1} z_1 l_1 (z_1 - z_1 l_1 + z_n)}{I_{\phi 1} (z_1 + z_n) - U_{\phi 1} + U_n} \quad (8)$$

где $z_1 = z_n + z_{m2} + z_{m3}$; l_1 – расстояние до ближней точки повреждения, полученное по формуле (6); U_n – напряжение в нейтральной точке нагрузки.

Аналогичным образом определяется переходное сопротивление в месте возникновения второй точки повреждения:

$$R_{n2} = \frac{\underline{U}_{\phi 2} (\underline{z}_2 + \underline{z}_{n1} + \underline{z}_2 I_2)}{I_{\phi 2} (\underline{z}_2 + \underline{z}_n) - \underline{U}_{\phi 2} + \underline{U}_n} - \frac{I_{\phi 2} \underline{z}_2 I_2 (\underline{z}_2 - \underline{z}_2 I_2 + \underline{z}_n)}{I_{\phi 2} (\underline{z}_2 + \underline{z}_n) - \underline{U}_{\phi 2} + \underline{U}_n}, \quad (9)$$

где $\underline{z}_2 = \underline{z}_1 + \underline{z}_{m1} + \underline{z}_{m4}$; l_2 – расстояние до дальней точки повреждения, полученное по формуле (7).

Рассчитав по формулам (6) и (7) значения переходного сопротивления, сопоставляем их с ближайшим значением R_{n1} и R_{n2} из табл. 1 и получаем соответствующие данным сопротивлениям значения поправочных (компенсирующих) коэффициентов.

Результаты исследования. Проверка предложенного способа ОМП при ДвЗЗ на одной линии проводилась по схеме, представленной на рис. 3, путем моделирования рассматриваемого аварийного режима в программном комплексе PSCad и Visual Basic.

Рассматриваемая схема имеет следующие параметры:

- напряжение сети 35 кВ;
- длина линии: $L_1 = 10$ км, $L_2 = 10$ км;

– удельные сопротивления фазы:

$$\underline{z}_1 = 0,079 + j0,697 \text{ Ом/км};$$

– удельные сопротивления взаимной индукции:

$$\underline{z}_m = 0,0451 + j0,3536 \text{ Ом/км};$$

– переходные сопротивления в местах замыканий определяются случайной величиной, распределенной по равномерному закону в диапазоне от 0 до 10 Ом;

– потребляемая мощность нагрузки:

$$\underline{S}_n = 9 + j2,5 \text{ МВА}.$$

Для набора статистики в пакете Visual Basic был разработан алгоритм, позволяющий получать параметры установившегося режима при ДвЗЗ. Результаты моделирования в пакете Visual Basic идентичны результатам, полученным в PSCad в условиях установившегося режима. При этом переходные сопротивления в местах замыкания и расстояния до точек повреждений задавались произвольным образом из заданного диапазона для каждого расчета. Результаты моделирования были обработаны в среде Mathcad и построены зависимости расчетных расстояний, полученных по формулам (6) и (7), от фактических значений (рис. 4, 5).

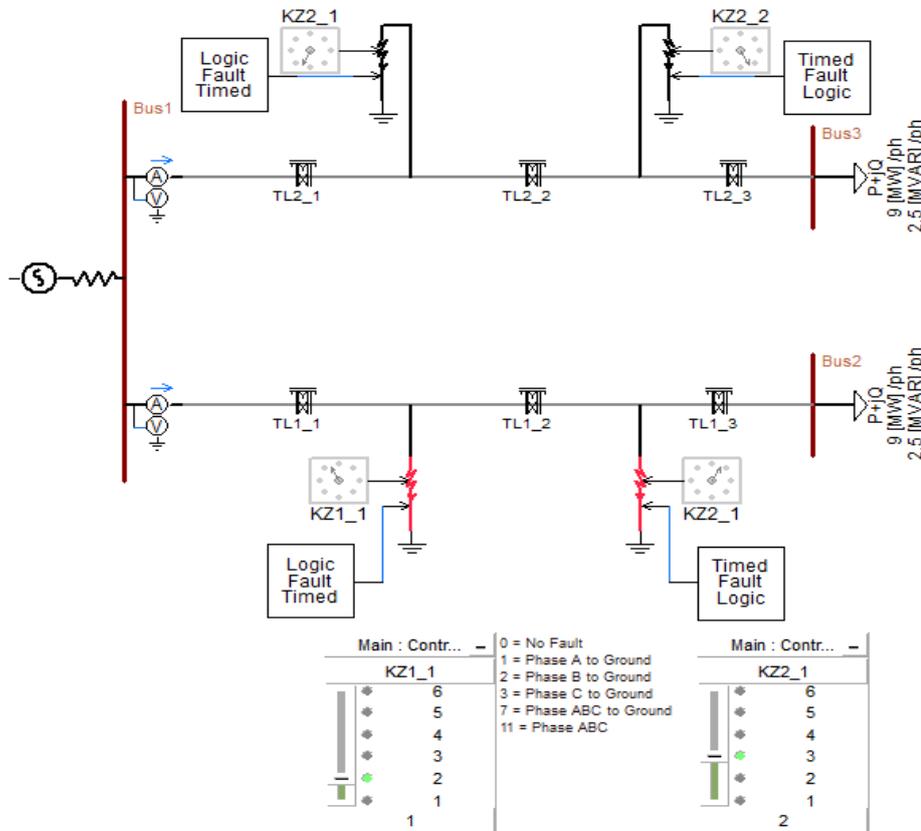


Рис. 3. Модель сети напряжением 35 кВ в PSCad при двойном замыкании на землю

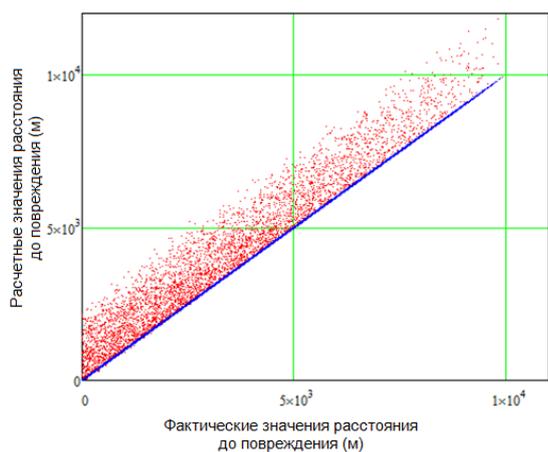


Рис. 4. Зависимость расчетных расстояний до ближней точки повреждения ЛЭП от фактических

Анализ полученных результатов (рис. 4) показывает, что расстояние до ближней точки повреждения определяется с относительной погрешностью до 27 %, а математическое ожидание полученной погрешности составило 7 %.

Аналогичный анализ результатов (рис. 5) показывает, что расстояние до дальней точки повреждения определяется с относительной погрешностью до 17 %, а математическое ожидание полученной погрешности составило 4 %.

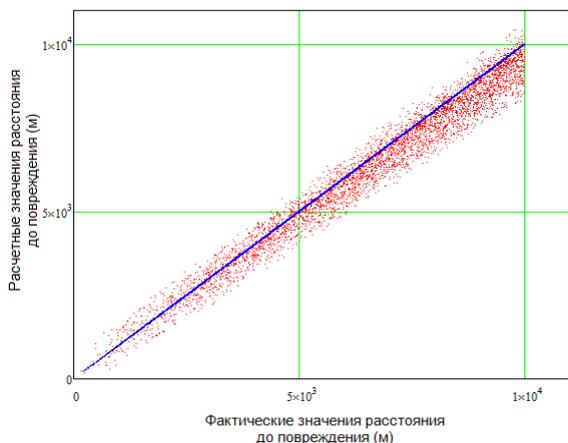


Рис. 5. Зависимость расчетных расстояний до дальней точки повреждения ЛЭП от фактических

Таким образом, представленный выше способ позволяет определить область возникновения ДвЗЗ на одной линии электропередачи путем установки измерительного органа сопротивления, включенного на фазный ток и фазное напряжение отходящих линий.

На рис. 6 представлена зависимость расчетных расстояний до ближней точки повреждения ЛЭП от фактических с учетом введения поправочного коэффициента K_1 .

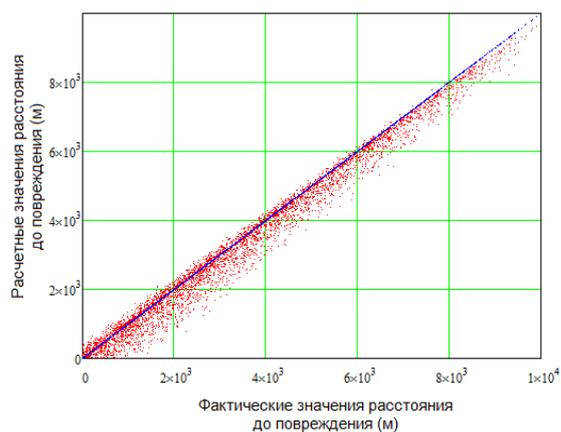


Рис. 6. Зависимость расчетных расстояний до ближней точки повреждения ЛЭП от фактических с учетом поправочного коэффициента K_1

Использование поправочного коэффициента позволило снизить максимальную погрешность расчета расстояния до места повреждения с 27 до 15 %, а математическое ожидание полученной погрешности с 7 до 2,5 %.

Введение поправочного коэффициента для минимизации ошибки расчета расстояния до дальней точки повреждения также дает существенное снижение погрешности. Подставив расчетные значения переходного сопротивления в табл. 1 и взяв соответствующие поправочные коэффициент, получаем более точное значение расстояния до дальней точки повреждения.

На рис. 7 приведена зависимость расчетных расстояний до дальней точки повреждения ЛЭП от фактических с учетом поправочного коэффициента K_2 .

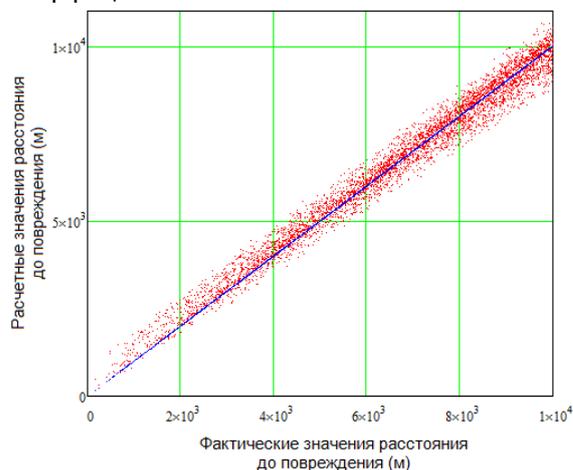


Рис. 7. Зависимость расчетных расстояний до дальней точки повреждения ЛЭП от фактических с учетом поправочного коэффициента K_2

Применение поправочного коэффициента позволило снизить максимальную погрешность расчета расстояния до места повреждения с 17 до 12 %, а математическое ожидание погрешности с 4 до 2,5 %.

В основе организации поиска места повреждения ЛЭП лежит понятие о зоне обхода. При решении задач ОМП важно определить не

только место замыкания, но и зону обхода линии. Именно от размера зоны обхода напрямую зависит время, необходимое для проведения восстановительных работ [15–17].

При наличии достаточно большого объема статистических данных о погрешностях ОМП можно определить плотность вероятности распределения ошибки относительно расчетного места повреждения и, задав доверительную вероятность, получить доверительный интервал, который будет задавать зону обхода ЛЭП.

Для формирования зоны обхода при двойном замыкании на землю на одной линии была определена плотность вероятности распределения абсолютных погрешностей расчета относительно расчетного места повреждения (РМП) для каждого из возможных мест замыканий (рис. 8, 9).

На рис. 8 представлены плотности вероятности распределения абсолютной погрешности относительно расчетного значения расстояния до ближней точки замыкания. По правилу трех сигм (3σ) был рассчитан доверительный интервал, который соответствует зоне обхода.

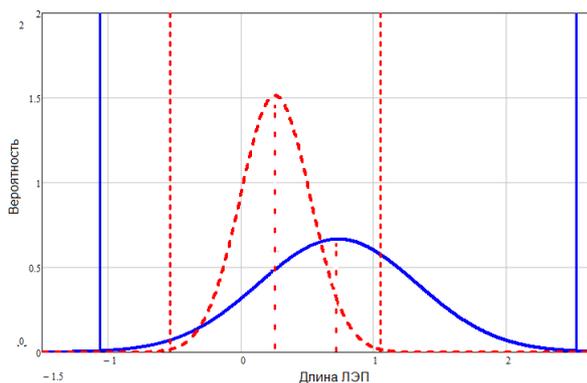


Рис. 8. Пример графика плотности вероятности распределения абсолютной погрешности относительно математического ожидания для ближней точки повреждения ЛЭП: сплошная линия – до введения поправочного коэффициента; штрихованная – после

Для точки замыкания (рис. 8), полученной до введения поправочного коэффициента, зона обхода составляла 3,5 км – 35 % от общей протяженности линии (–1 км до РМП и 2,5 км после РМП), а после введения поправочного коэффициента составила 1,5 км – 15 % от всей длины линии (–0,5 км до РМП и 1 км после РМП). Результаты расчетов зон обхода для примера (рис. 8) приведены в табл. 2.

Использование поправочного коэффициента для уточнения ближней точки повреждения позволило сократить зону обхода с 35 до 15 % и, следовательно, сократить время, необходимое для ликвидации повреждения.

Таблица 2. Результаты расчетов зон обхода при ДвЗЗ на одной линии (ближняя точка повреждения)

Зоны обхода	Левая граница зоны обхода, км	Правая граница зоны обхода, км	Общая протяженность зоны обхода, км	Общая протяженность зоны обхода, %
До введения поправочного коэффициента	–1	2,5	3,5	35
После введения поправочного коэффициента	–0,5	1	1,5	15

На рис. 9 представлены плотности вероятности распределения абсолютной погрешности относительно расчетного значения расстояния до дальней точки замыкания.

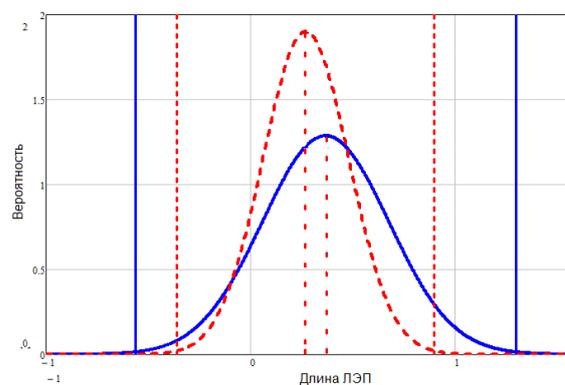


Рис. 9. Пример графика плотности вероятности распределения абсолютной погрешности относительно математического ожидания для дальней точки повреждения ЛЭП: сплошная линия – до введения поправочного коэффициента; штрихованная – после

Для точки замыкания (рис. 9), полученной до введения поправочного коэффициента, зона обхода составляла 1,9 км – 19 % от общей протяженности линии (–0,6 км до РМП и 1,3 км после РМП), а после введения поправочного коэффициента составила 1,3 км – 13 % от всей длины линии (–0,4 км до РМП и 0,9 км после РМП). Результаты расчетов зон обхода для примера (рис. 9) приведены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты расчетов зон обхода при ДвЗЗ на одной линии (дальняя точка повреждения)

Зоны обхода	Левая граница зоны обхода, км	Правая граница зоны обхода, км	Общая протяженность зоны обхода, км	Общая протяженность зоны обхода, %
До введения поправочного коэффициента	–0,6	1,3	1,6	19
После введения поправочного коэффициента	–0,4	0,9	1,3	13

Использование поправочного коэффициента для уточнения дальней точки повреждения позволило сократить зону обхода с 19 до 13 %.

Выводы. Предложенный метод повышения точности определения места повреждения при двойном замыкании на землю в сети 6–35 кВ с использованием имитационного моделирования, накопления статистической информации и компенсации погрешностей реальных расчетов по результатам моделирования позволяет ускорить поиск повреждений на линиях электропередачи.

Целесообразно использовать поправочные коэффициенты, полученные путем имитационного моделирования для снижения методической погрешности расчета расстояний до двойных замыканий на землю. Использование поправочных коэффициентов для рассмотренной схемы обеспечило уменьшение максимальной погрешности расчета расстояния до повреждения с 27 до 15 %, а математическое ожидание погрешности с 7 до 2,5 %.

Введение поправочных коэффициентов позволило сократить зону обхода поврежденной ЛЭП с 35 до 15 % для ближней точки повреждения и с 19 до 13 % для дальней расчетной точки. Для ближней расчетной точки снижение требуемой для осмотра зоны составило 2 км.

Предложенные алгоритмы обеспечивают существенное повышение точности ОМП и сокращение необходимой зоны обхода поврежденной линии, а также снижение затрат на проведение ремонтно-восстановительных работ на ЛЭП 6–35 кВ.

Список литературы

1. **Шуин В.А., Гусенков А.В.** Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ. – М.: НТФ «Энергопрогресс», «Библиотечка электротехника», 2001. – 104 с.
2. **Шалин А.И., Щеглов А.И.** Централизованная защита от замыканий на землю в сетях 35 кВ // Известия академии наук РФ. Энергетика. – 2002. – № 2. – С. 104–116.
3. **Куликов А.Л., Мисриханов М.Ш., Петрухин А.А.** Определение мест повреждений ЛЭП 6–35 кВ методами активного зондирования / под ред. В.А. Шуина. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 162 с.
4. **Диагностика** состояния воздушных линий электропередачи 10–110 кВ в нормальных и аварийных режимах: учеб. пособие / А.Н. Висящев, Л.А. Акишин, С.Г. Тигунцев и др.; под ред. А.Н. Висящева. – Иркутск: Изд-во ИргТУ, 2012. – 270 с.
5. **Информационные** параметры электрических величин переходного процесса для определения места замыкания на землю в распределительных кабельных сетях напряжением 6–10 кВ / Е.А. Воробьева, Д.И. Ганджаев, Г.А. Филатова, В.А. Шуин // Вестник ИГЭУ. – 2017. – Вып. 2. – С. 34–42.
6. **Гловацкий В.Г., Халидов А.Г.** Определение расстояния до мест двойных замыканий на землю в электрических сетях 35 кВ // Энергетик. – 1985. – № 9. – С. 31.
7. **Хакимзянов Э.Ф., Мустафин Р.Г., Федотов А.И.** Определение расстояний до мест двойных замыканий на землю на линии электропередачи распределительной сети среднего напряжения // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2015. – № 3–4. – С. 132–137.
8. **Иванов С.В., Кержаев Д.В.** Определение мест повреждения двойных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью // Сборник докладов Междунар. науч.-техн. конф. CIGRE «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем». – М., 2009. – С. 84–90.
9. **Diaz H., López M.** Fault location techniques for electrical distribution networks: a literature survey // Proc. the Fifth IASTED International Conference. – 2005, June 1–517. – P. 311–318.
10. **Lehtonen M.** Novel techniques for fault location in distribution networks // Proc. Power Quality and Supply Reliability Conference. – 2008, Aug. 27–29. – P. 1–6.
11. **An intelligent and efficient fault location and diagnosis scheme for radial distribution systems / S.-J. Lee, M.-S. Choi, S.-H. Kang et al. // IEEE Trans. Power Delivery. – Apr. 2004. – Vol. 19, no. 2. – P. 524–532.**
12. **Куликов А.Л.** Дистанционное определение повреждений ЛЭП методами активного зондирования. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 148 с.
13. **Моделирование** волновых процессов на линиях электропередачи для повышения точности определения места повреждения / А.Л. Куликов, В.Ф. Лачугин, В.В. Ананьев и др. // Электрические станции. – 2015. – № 7(1008). – С. 45–53.
14. **Лачугин В.Ф., Панфилов Д.И., Смирнов А.Н.** Реализация волнового метода определения места повреждения на линиях электропередачи с использованием статистических методов анализа

данных // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2013. – № 6. – С. 137–146.

15. **Беляков Ю.С.** Актуальные вопросы определения мест повреждения воздушных линий электропередачи // Библиотечка энергетика, приложение к журналу «Энергетик». – 2010. – № 11. – 80 с.

16. **Куликов А.Л., Обалин М.Д., Колобанов П.А.** Комплексные алгоритмы ОМП ЛЭП на базе статистических методов // Энергетик. – 2012. – № 1. – С. 7–9.

17. **Куликов А.Л., Обалин М.Д., Колобанов П.А.** Анализ и повышение точности при определении места повреждения линий электропередачи // Известия вузов. Электромеханика. – 2013. – № 5. – С. 57–62.

18. **Папков Б.В.** Токи короткого замыкания в электрических системах: учеб. пособие. – Н. Новгород: НГТУ, 2005. – 275 с.

References

1. Shuin, V.A., Gusenkov, A.V. *Zashchity ot zamykaniy na zemlyu v elektricheskikh setyakh 6–10 kV* [Ground fault protection in medium-voltage networks]. Moscow, NTF «Energoprogress», «Bibliotekha elektrotehnika», 2001. 104 p.

2. Shalin, A.I., Shcheglov, A.I. *Tsentralizovannaya zashchita ot zamykaniy na zemlyu v setyakh 35 kV* [Centralized protection against earth faults in 35 kV networks]. *Izvestiya akademii nauk RF. Energetika*, 2002, no. 2, pp. 104–116.

3. Kulikov, A.L., Misrikhanov, M.Sh., Petrukhin, A.A. *Opredelenie mest povrezhdeniy LEP 6–35 kV metodami aktivnogo zondirovaniya* [Fault location in 6–35 kV lines by active impulse testing]. Moscow, Energoatomizdat, 2009. 162 p.

4. Visyashchev, A.N., Akishin, L.A., Tiguntsev, S.G., Visyashchev, A.A., Mussonov, G.P., Plenkov, E.R. *Diagnostika sostoyaniya vozduzhnykh liniy elektroperedachi 10–110 kV v normal'nykh i avariynnykh rezhimakh* [Diagnostics of the state of 10–110 kV electric transmission lines in normal and emergency modes]. Irkutsk, Izdatel'stvo IrGTU, 2012. 270 p.

5. Vorobyova, E.A., Gandzhaev, D.I., Filatova, G.A., Shuin, V.A. *Informatsionnye parametry elektricheskikh velichin perekhodnogo protsessa dlya opredeleniya mesta zamykaniya na zemlyu v raspredelitel'nykh kabel'nykh setyakh napryazheniem 6–10 kV* [Information parameters of electric values of the transient process for determining the earth fault location in 6–10 kV distribution cable networks]. *Vestnik IGEU*, 2017, issue 2, pp. 34–42.

6. Glovatsky, V.G., Khalidov, A.G. *Opredelenie rasstoyaniya do mest dvoynykh zamykaniy na zemlyu v elektricheskikh setyakh 35 kV* [Determining the distance to double earth faults in 35 kV electrical networks]. *Energetik*, 1985, no. 9, p. 31.

7. Khakimzyanov, E.F., Mustafin, R.G., Fedotov, A.I. *Opredelenie rasstoyaniy do mest dvoynykh zamykaniy na zemlyu na linii elektroperedachi raspredelitel'noy seti srednego napryazheniya* [Determination of the distances to the places of double earth faults on the transmission lines of the medium voltage distribution

network]. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki*, 2015, no. 3–4, pp. 132–137.

8. Ivanov, S.V., Kerzhaev, D.V. *Opredelenie mest povrezhdeniya dvoynykh zamykaniy na zemlyu v setyakh s izolirovannoy neytral'yu* [Determination of double fault location in networks with isolated neutral]. *Sbornik dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii CIGRE «Sovremennye napravleniya razvitiya sistem releynoy zashchity i avtomatiki energosistem»* [Actual trends in development of Power System Relay Protection and Automation]. Moscow, 2009, pp. 84–90.

9. Diaz, H., López, M. *Fault location techniques for electrical distribution networks: a literature survey*. Proc. the Fifth IASTED International Conference, 2005, June 1–517, pp. 311–318.

10. Lehtonen, M. *Novel techniques for fault location in distribution networks*. Proc. Power Quality and Supply Reliability Conference, 2008, Aug. 27–29, pp. 1–6.

11. Lee S.-J., Choi M.-S., Kang S.-H., Jin B.-G., Lee D.-S., Ahn B.-S., Yoon N.-S., Kim H.-Y., Wee S.-B. *An intelligent and efficient fault location and diagnosis scheme for radial distribution systems*. IEEE Trans. Power Delivery, Apr. 2004, vol. 19, no. 2, pp. 524–532.

12. Kulikov, A.L. *Distsionnoe opredelenie povrezhdeniy LEP metodami aktivnogo zondirovaniya* [Remote detection of power line damage using active sensing methods]. Moscow, Energoatomizdat, 2006. 148 p.

13. Kulikov, A.L., Lachugin, V.F., Ananyev, V.V., Vukolov, V.Yu., Platonov, P.S. *Modelirovanie volnovykh protsessov na liniyakh elektroperedachi dlya povysheniya tochnosti opredeleniya mesta povrezhdeniya* [Modeling of wave processes on power lines to improve the accuracy of fault location]. *Elektricheskie stantsii*, 2015, no. 7(1008), pp. 45–53.

14. Lachugin, V.F., Panfilov, D.I., Smirnov, A.N. *Realizatsiya volnovogo metoda opredeleniya mesta povrezhdeniya na liniyakh elektroperedachi s ispol'zovaniem statisticheskikh metodov analiza dannykh* [Realization of the wave method for fault location on transmission lines by statistical methods of data analysis]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika*, 2013, no. 6, pp. 137–146.

15. Belyakov, Yu.S. *Aktual'nye voprosy opredeleniya mest povrezhdeniya vozduzhnykh liniy elektroperedachi* [Urgent issues of fault location on overhead transmission lines]. *Bibliotekha energetika, prilozhenie k zhurnal'nykh «Energetik»*, 2010, no. 11. 80 p.

16. Kulikov, A.L., Obalin, M.D., Kolobanov, P.A. *Kompleksnyye algoritmy OMP LEP na baze statisticheskikh metodov* [Complex algorithms of fault location based on statistic methods]. *Energetik*, 2012, no. 1, pp. 7–9.

17. Kulikov, A.L., Obalin, M.D., Kolobanov, P.A. *Analiz i povyshenie tochnosti pri opredelenii mesta povrezhdeniya liniy elektroperedachi* [Analysis and improvement of accuracy of fault location on power transmission lines]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2013, no. 5, pp. 57–62.

18. Papkov, B.V. *Toki korotkogo zamykaniya v elektricheskikh sistemakh* [Short circuit currents in electrical systems]. N. Novgorod, NGTU, 2005. 275 p.

Куликов Александр Леонидович,

ФГБОУВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева»,
доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики, электроснабжения и силовой электроники,
адрес: 603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24,
телефон +7 (831) 432-91-85,
e-mail: inventor61@mail.ru

Kulikov Aleksandr Leonidovich,

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
Doctor of Engineering Sciences (Post-Doctoral Degree), Professor of the Department of Electrical Power Engineering,
Electric Supply and Power Electronics,
address: No. 24 Minina St., Nizhny Novgorod, Russia, 603905,
telephone +7 (831) 432-91-85,
e-mail: inventor61@mail.ru

Обалин Михаил Дмитриевич,

ФГБОУВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева»,
кандидат технических наук, инженер кафедры электроэнергетики, электроснабжения и силовой электроники,
адрес: 603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24,
телефон +7 (831) 432-91-85,
e-mail: obalinmd@gmail.com

Obalin Mikhail Dmitrievich,

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
Candidate of Engineering Sciences (PhD), Engineer of the Department of Electrical Power Engineering, Electric Supply
and Power Electronics,
address: No. 24 Minina St., Nizhny Novgorod, Russia, 603905,
telephone +7 (831) 432-91-85,
e-mail: obalinmd@gmail.com

Осокин Владислав Юрьевич,

ФГБОУВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева»,
магистр кафедры электроэнергетики, электроснабжения и силовой электроники,
адрес: 603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24,
e-mail: osokin-v92@mail.ru

Osokin Vladislav Yuryevich,

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
Master-Program Student of the Department of Electrical Power Engineering, Electric Supply and Power Electronics,
address: No. 24 Minina St., Nizhny Novgorod, Russia, 603905,
e-mail: osokin-v92@mail.ru

Шарафеев Тимур Рамилевич,

ФГБОУВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева»,
магистр кафедры электроэнергетики, электроснабжения и силовой электроники,
адрес: 603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24,
e-mail: sharafeev-94@mail.ru

Sharafeyev Timur Ramilevich,

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
Master-Program Student of the Department of Electrical Power Engineering, Electric Supply and Power Electronics,
address: No. 24 Minina St., Nizhny Novgorod, Russia, 603905,
e-mail: sharafeev-94@mail.ru