

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.316.925.1

EDN BCLBRA

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ДВОЙНЫХ
ЗАМКЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ
СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ****А.Л. Куликов**ORCID: 0000-0003-1092-7136 e-mail: inventor61@mail.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***В.Ю. Осокин**ORCID: 0000-0002-0213-1421 e-mail: osokin-v92@mail.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Быстрое нахождение повреждений при двойных замыканиях на землю и восстановление работоспособности сети является актуальной задачей для эксплуатирующих организаций. Отсутствие возможности осуществления многосторонних замеров в сетях с изолированной нейтралью накладывает определенные ограничения на реализацию алгоритмов определения места повреждения, при этом технические решения ограничиваются использованием односторонних замеров параметров аварийных величин. В статье рассматриваются алгоритмы, предполагающие использование параметров аварийного и нормального режимов. Исследуемые алгоритмы основываются на решении схемы при двойных замыканиях на землю в фазных координатах, введении поправочного коэффициента, применении итерационного уточнения, а также использовании метода наложения. Применение алгоритмов обосновывается результатами имитационного моделирования и позволяет осуществлять расчет расстояний до предполагаемых мест повреждений с высокой точностью.

Ключевые слова: двойное замыкание на землю, итерационный метод, метод наложения, определение места повреждения, сеть с изолированной нейтралью.

Для цитирования: Куликов А.Л., Осокин В.Ю. Определение местоположения двойных замыканий на землю в распределительных сетях с изолированной нейтралью // Интеллектуальная Электротехника. 2024. № 1. С. 58-69. EDN BCLBRA

DETERMINING THE LOCATION OF DOUBLE GROUND FAULTS IN DISTRIBUTION NETWORKS WITH ISOLATED NEUTRAL

A.L. Kulikov

ORCID: **0000-0003-1092-7136** e-mail: **inventor61@mail.ru**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

V.Yu. Osokin

ORCID: **0000-0002-0213-1421** e-mail: **osokin-v92@mail.ru**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Quickly finding faults locations during double ground faults and restoring network functionality is an urgent task for operating organizations. The inability to carry out multilateral measurements in networks with an isolated neutral imposes certain restrictions on the implementation of algorithms for determining the location of a fault, while technical solutions are limited to the use of one-way measurements of the parameters of emergency quantities. The paper presents algorithms that involve the use of emergency and normal mode parameters. The algorithms are based on solving the circuit for double ground faults in phase coordinates, introducing a correction factor, applying iterative refinement, and using the superposition method. The use of algorithms is proving by the results of simulation modeling and allows calculating distances to the expected fault locations with high accuracy.

Keywords: double ground fault, fault location, insulated neutral network, iteration recalculation, superposition method.

For citation: A.L. Kulikov and V.Yu. Osokin, “Finding the location of double ground faults in distribution networks with isolated neutral”, *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 58-69, 2024. EDN BCLBRA

I. Введение

Значительную часть электроэнергетической системы России составляют распределительные сети 6-35 кВ. В таких сетях применение изолированного заземления нейтрали позволяет не нарушать электроснабжение потребителей при самом распространенном повреждении, которым является однофазное замыкание (ОЗЗ) [1, 2]. Из-за возникающих перенапряжений неповрежденных фаз при ОЗЗ в местах с ослабленной изоляцией довольно часто возникают пробой, которые, как правило, располагаются на некоторой удаленности от первоначального замыкания, а повреждение принимает более опасный характер и переходит в двойное замыкание на землю (ДВЗЗ).

Проблема перехода ОЗЗ в многоместные замыкания в связи с высоким износом распределительных сетей 6-35 кВ является достаточно актуальной. Быстрое отыскание и ликвидация повреждений является главным условием восстановления нормального режима работы такой электрической сети [3]. Особенности функционирования, произвольная конфигурация электрических сетей, а также отсутствие возможности осуществления многосторонних замеров накладывают определенные ограничения на разработку универсальных алгоритмов определения мест повреждения (ОМП) при ДвЗЗ.

II. Анализ алгоритмов ОМП при ДвЗЗ

Известные алгоритмы ОМП, использующие метод симметричных составляющих [4, 5], а также фазные координаты (ФК) [6], основываются на принятой гипотезе о резистивном характере цепи замыкания. По своей точности они незначительно отличаются друг от друга, а благодаря универсальности, не позволяют учесть в формульных соотношениях имеющуюся несимметрию, влияние нагрузки и величину переходного сопротивления. Однако использование указанных алгоритмов в устройствах ОМП в некоторой степени дает возможность эксплуатирующему персоналу судить о зоне возникновения повреждений и сократить время на поиск бригадой мест замыканий.

Накопление статистических данных по мере использования алгоритма с учетом ДвЗЗ на конкретной линии позволяет эксплуатационному персоналу производить корректировку расчетов и более точно определять место повреждения. Очевидно, что формирование корректирующих коэффициентов можно произвести на основании результатов множественного имитационного моделирования замыканий на конкретной линии. Полученные в результате моделирования выборки позволяют сформировать сводную таблицу поправочных коэффициентов, использование которой обеспечивает снижение погрешностей расчета расстояния до места повреждения [6].

Еще более точный расчет расстояний до мест повреждений при ДвЗЗ можно достичь за счет введения итерационных процедур и проведения поэтапного уточнения параметров поврежденной линии.

Алгоритмы, основанные на итерационном уточнении [7], а также на проведении множественного имитационного моделирования рассматриваемого участка электрической сети, обладают высокой точностью, однако в силу своей специфики имеют определенные ограничения. Во многом такие ограничения могут быть устранены за счет использования информации о предшествующем режиме.

Аварийные составляющие сигнала содержат в себе компоненты не только аварийного, но и доаварийного (нормального) режимов [8-10]

(рис. 1). Фиксация аварийного режима производится с учетом апериодической составляющей и высших гармоник, которые, благодаря алгоритмам цифровой обработки сигналов, можно исключить и получить в неискаженном виде периодические составляющие токов и напряжений.

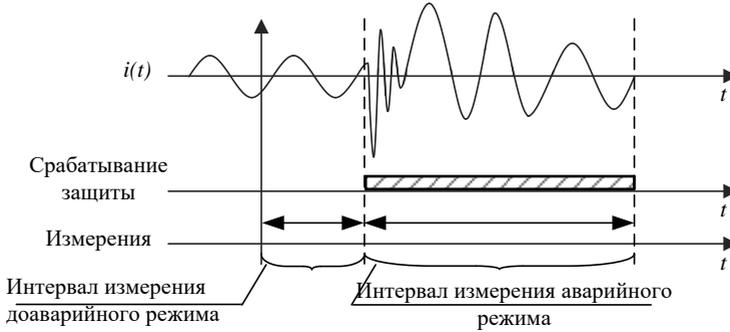


Рис. 1. Фиксация предшествующего и аварийного режимов

Fig. 1. Fixing the previous and emergency modes

Целесообразно разделение аварийного режима на нагрузочную и чисто аварийную составляющие за счет применения метода наложения, суть которого заключается в уравнивании количества ветвей в электрической сети до и после повреждения [11-13].

Пример использования метода наложения поясняет рис. 2, на котором участок распределительной электрической сети представлен в виде активных и пассивных (не содержащих источников ЭДС) многополюсников (рис. 2, а).

Для получения чисто аварийной схемы рассматривают схемы замещения нормального и аварийного режимов. В схеме замещения нормального режима (рис. 2, б) в месте предполагаемого повреждения подключается фиктивная ветвь ЭДС, равная напряжению в точке замыкания и не изменяющая токораспределения линии. При этом аварийная схема (рис. 2, в), напротив, не содержит ЭДС в месте предполагаемого повреждения. Вычитая из уравнений аварийного, уравнения доаварийного режима, получают выражения чисто аварийного режима и схему (рис. 2, г). При этом схема (рис. 2, г) содержит одну ЭДС, расположенную в месте замыкания и представляющую в неискаженном виде всю необходимую информацию для распознавания повреждения.

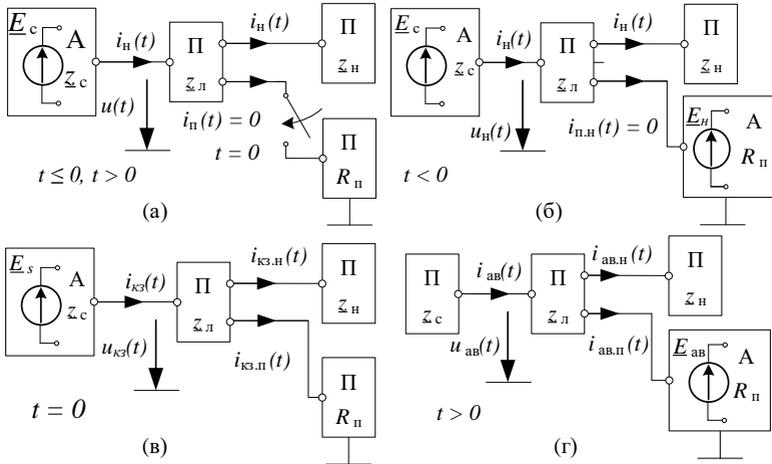


Рис. 2. Пояснение к применению метода наложения: наблюдаемая система (а); нормальный режим (б); аварийный режим (в); чисто аварийный режим (г)

Fig. 2. Explanation of the superposition method: observed system (a); normal mode (b); emergency mode (в); pure emergency mode (г)

III. Результаты исследования

Для оценки преимуществ и недостатков алгоритмов ОМП при ДвЗЗ с применением и без применения метода наложения, разработанных в [6, 7, 13], проводилось имитационное моделирование участка распределительной сети 35 кВ в программном комплексе *Matlab* с использованием среды моделирования *Simulink*. Постоянные и переменные параметры схемы замещения участка сети 35 кВ отображены на рис. 3. Путем имитации повреждений на различных линиях и различных удалениях от шин 35 кВ обеспечивался анализ точности каждого из методов ОМП при ДвЗЗ.

В ходе моделирования в программном комплексе *Matlab* осуществлялось численное решение системы уравнений, характеризующих режим участка сети 35 кВ, с заданной частотой дискретизации. В результате формировалась совокупность мгновенных значений параметров режима на заданном временном интервале. В процессе моделирования принимались следующие допущения: трехфазные элементы системы считались симметричными; переходное сопротивление выбиралось чисто активным; вид повреждения и поврежденные фазы известны.

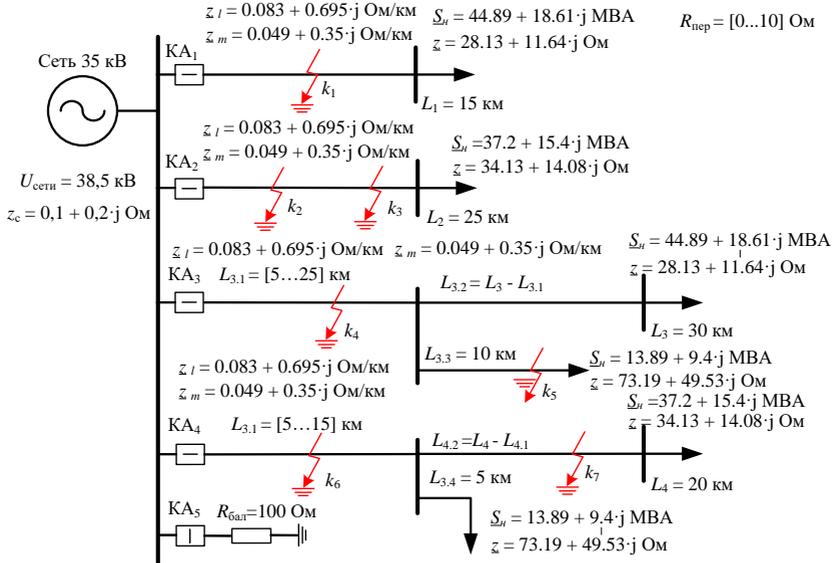


Рис. 3. Рассматриваемая схема участка электрической сети

Fig. 3. The simulated circuit of the electrical network section

Для исследования точности алгоритмов ОМП по параметрам аварийного режима реализовывались расчетные соотношения, полученные решением схем в ФК [13].

Поиск места повреждения на одной линии производился по (Ошибка! Источник ссылки не найден.):

$$l_1 = \frac{\text{Im} \left(\frac{U_{\text{пов.1_кз}}}{I_{\text{пов.1,3_кз}}} \right)}{\text{Im} \left(\underline{z}_l + \frac{(I_{\text{пов.2,3_кз}} + I_{\text{неп.3_кз}}) \cdot \underline{z}_m}{I_{\text{пов.1,3_кз}}} \right)}; \quad (1)$$

$$l_2 = \frac{\text{Im} \left(\frac{U_{\text{пов.2_кз}}}{I_{\text{пов.2,3_кз}}} \right) - \text{Im} \left(\frac{I_{\text{пов.1,3_кз}}}{I_{\text{пов.2,3_кз}}} \cdot \underline{z}_m \right) \cdot l_1}{\text{Im} \left(\underline{z}_l + \frac{I_{\text{неп.3_кз}}}{I_{\text{пов.2,3_кз}}} \cdot \underline{z}_m \right)}; \quad (2)$$

где $\underline{U}_{пов.у.кз}$ – фазное напряжение на шинах; $\underline{I}_{х.пов.у.з.кз}$ – ток в месте установки защиты; $\underline{I}_{х.пов.у.п.кз}$ – ток в месте повреждения; индекс «х» – обозначает анализируемую линию (1 соответствует линии $L1$, 2 – линии $L2$); $\underline{z}_{м.х}$ – удельное сопротивление взаимной индукции; $\underline{z}_{л.х}$ – удельное сопротивление линии; индекс «у» – указывает фазу (1 – поврежденная фаза анализируемой линии, 2 – поврежденная фаза соседней линии).

Отыскание замыканий на разных линиях осуществлялось согласно равенству:

$$l_x = \frac{\operatorname{Im}\left(\frac{\underline{U}_{пов.у.кз}}{\underline{I}_{х.пов.1.з.кз}}\right)}{\operatorname{Im}\left(\underline{z}_{л.х} + \underline{z}_{м.х} \cdot \frac{(\underline{I}_{х.пов.2.з.кз} + \underline{I}_{х.неп.з.кз})}{\underline{I}_{х.пов.1.з.кз}}\right)}. \quad (3)$$

Для формирования корректировочной таблицы коэффициентов ОМП при ДвЗЗ, использовалось множественное имитационное моделирование при заданном значении переходного сопротивления $R_{п}$ [6]. В первом приближении определялись местоположения предполагаемых повреждений, используя (1)-(3). Для определения переходного сопротивления задействовался неповрежденный контур, содержащий сопротивление нагрузки. Переходное сопротивление для первой точки повреждения определялось по выражению:

$$R_{п1} = \left| \frac{\underline{U}_{пов.1.з.кз} \cdot ((1-l_1) \cdot \underline{z}_1 + \underline{z}_н) - \underline{I}_{пов.1.з.кз} \cdot \underline{z}_1 \cdot l_1 \cdot (\underline{z}_1 - \underline{z}_1 \cdot l_1 + \underline{z}_н)}{\underline{I}_{пов.1.з.кз} \cdot (\underline{z}_1 + \underline{z}_н) - \underline{U}_{пов.1.з.кз} + \underline{U}_{N_{кз}}} \right|, \quad (4)$$

где $\underline{z}_н$ – эквивалентное сопротивление нагрузки; $\underline{U}_{N_{кз}}$ – напряжения в нейтральной точке N со стороны нагрузки, полученное по (5), при условии использования метода преобразования цепей для перехода из «треугольника» в эквивалентную «звезду»:

$$\underline{U}_{N_{кз}} = \underline{U}_{неп.з.кз} - \underline{I}_{L1_{неп.з.кз}} \cdot (\underline{z}_1 \cdot L_1 + \underline{z}_н) - (\underline{I}_{L1_{пов.1.з.кз}} + \underline{I}_{L1_{пов.2.з.кз}}) \cdot l_1 \cdot \underline{z}_м. \quad (5)$$

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

$$R_{п2} = \left| \frac{\underline{U}_{пов.2.з.кз} \cdot ((1-l_2) \cdot \underline{z}_2 + \underline{z}_н) - \underline{I}_{пов.2.з.кз} \cdot \underline{z}_2 \cdot l_2 \cdot (\underline{z}_2 - \underline{z}_2 \cdot l_2 + \underline{z}_н)}{\underline{I}_{пов.2.з.кз} \cdot (\underline{z}_2 + \underline{z}_н) - \underline{U}_{пов.2.з.кз} + \underline{U}_{N_{кз}}} \right|. \quad (6)$$

Итерационное уточнение результатов производилось на основании расчетов по (1)-(3), а в качестве данных использовались осциллограммы токов и напряжений аварийного режима [6]. Далее определялись напряжения в нейтральных точках нагрузки, согласно (6), и значения переходных сопротивлений, по (4) и (5). Последующие расчеты расстояний l_1 и l_2 реализовались уже с учетом вычисленных параметров, а для определения местоположения повреждений решалась схема замещения, содержащая рассчитанные величины. Многократный последовательный пересчет неизвестных параметров участка сети 35 кВ производился до тех пор, пока итерационный процесс не сходил к окончательному результату.

Применение метода наложения при оценке параметров аварийного и нормального режимов при замыканиях на землю позволило получить расчетные соотношения, снижающие влияние топологии электрической сети [13] на точность ОМП.

Для ДвЗЗ на одной линии местоположения повреждений определяются для ближней точки повреждения по выражению:

$$l_1 = \frac{\operatorname{Im}\left(\frac{U_{\text{пов.1.з.ав}} + U_{\text{пов.1.п.н}}}{I_{\text{пов.1.п.ав}}}\right)}{\operatorname{Im}\left(\left(\frac{I_{\text{пов.1.п.ав}} + I_{\text{нсп.з.ав}} + I_{\text{х.пов.2.з.н}} + I_{\text{нсп.з.н}}}{I_{\text{пов.1.п.ав}}}\right) z_m + \left(1 + \frac{I_{\text{пов.1.з.н}}}{I_{\text{пов.1.п.ав}}}\right) z_l\right)}. \quad (7)$$

Для дальней точки повреждения расстояние определяется как:

$$l_2 = \frac{\operatorname{Im}\left(\frac{U_{\text{пов.2.з.ав}} + U_{\text{пов.2.з.н}}}{I_{\text{пов.2.з.ав}}}\right) - \operatorname{Im}\left(\frac{I_{\text{пов.1.з.ав}} + I_{\text{пов.1.з.н}}}{I_{\text{пов.2.з.ав}}} \cdot z_m \cdot l_1\right)}{\operatorname{Im}\left(\frac{I_{\text{пов.2.з.ав}} + I_{\text{пов.2.з.н}}}{I_{\text{пов.2.з.ав}}} \cdot z_l + \frac{I_{\text{нсп.з.ав}} + I_{\text{нсп.з.н}}}{I_{\text{пов.2.з.ав}}} \cdot z_m\right)}. \quad (8)$$

Для ОМП при ДвЗЗ на разных линиях используется выражение:

$$l_x = \frac{\operatorname{Im}\left(\frac{U_{\text{пов.1.ав}} + U_{\text{пов.1.н}}}{I_{\text{х.пов.1.з.ав}}}\right)}{\operatorname{Im}\left(\left(\frac{I_{\text{х.пов.2.з.ав}} + I_{\text{х.нсп.з.ав}} + I_{\text{х.пов.2.з.н}} + I_{\text{х.нсп.з.н}}}{I_{\text{х.пов.1.з.ав}}}\right) z_m + \left(\frac{I_{\text{х.пов.1.з.н}}}{I_{\text{х.пов.1.з.ав}}} + 1\right) z_l\right)}. \quad (9)$$

Результаты моделирования с указанием преимуществ и недостатков каждого из методов ОМП при ДвЗЗ сведены в табл. 1.

Таблица 1.
Результаты моделирования разработанных алгоритмов ОМП при ДвЗЗ

Table 1.
Simulation results of the developed finding fault location algorithms

Вид ДвЗЗ		Погрешность расчета / зона обхода (% / %)		Преимущества	Недостатки		
ОМП в ФК [6]	на одной линии	ближ. КЗ: 27 / 36		– простота реализации; – возможность учета несимметрии сети; – возможность уточнения.	– низкая точность; – неприменимость при ответвлениях; – неучет проводимости линии.		
		дальн. КЗ: 16 / 20					
	на разных ЛЭП	12 / 26					
Коррект. табл. [6]	на одной ЛЭП	ближ. КЗ: 15 / 15		– приемлемая точность;	– необходимость предварительного моделирования; – неприменимость при ответвлениях.		
		дальн. КЗ: 12 / 14					
	на разных ЛЭП	10 / 10					
Играя расчет [7]	на одной ЛЭП	ближ. КЗ: 2,2 / 2		– высокая точность расчета;	– невозможность ручной реализации; – наличие больших вычисл. мощност. ; – неприменимость при ответвлениях.		
		дальн. КЗ: 2,3 / 2					
ОМП с учетом чисто аварийной схемы [13]	на одной линии	Ответвления	ближ. КЗ: 13 / 16		– приемлемая точность; – учет нагрузки и несимметрии сети; – снижение влияния нагрузки и ответвлений на точность ОМП.	– неучет проводимости линии; – допущения, снижающие точность расчета при эквивалентировании схем с ответвлениями.	
			до ДвЗЗ	ближ. КЗ: 14 / 16			
			между ДвЗЗ	дальн. КЗ: 10 / 14			
			после ДвЗЗ	ближ. КЗ: 16 / 14			
	на разных линиях		дальн. КЗ: 17 / 16				
			ближ. КЗ: 17 / 16				
			дальн. КЗ: 15 / 18				
			ближ. КЗ: 10 / 12				
		дальн. КЗ: 10 / 11					
		ответв. до ДвЗЗ: 10 / 16					
		ответв. после ДвЗЗ: 10/14					

IV. Заключение

Практическая реализация предложенных методов ОМП при ДвЗЗ не представляет технических трудностей и возможна на базе современных терминалов релейной защиты. Применение разработанных алгоритмов совместно с индикаторами обнаружения места повреждения, установленными на ответвлениях, позволит ремонтной бригаде безошибочно определить поврежденный участок сети. По результатам моделирования можно судить о преимуществах и недостатках каждого из алгоритмов. Целесообразно применение алгоритма, основанного на использовании метода наложения и параметров нормального режима. Этот алгоритм обладает приемлемой точностью даже на линиях с ответвлениями.

Для более ответственных линий рациональным будет рассмотреть возможность предварительного множественного моделирования участка сети при заданном значении переходного сопротивления и получения таблицы корректирующих коэффициентов, которую можно использовать совместно с универсальным алгоритмом. Когда линия не имеет ответвлений, то применение алгоритма, основанного на итерационном уточнении параметров, даст максимально точный результат.

© Куликов А.Л., 2024

© Осокин В.Ю., 2024

Поступила в редакцию 21.02.2024

Принята к публикации 27.02.2024

Received 21.02.2024

Accepted 27.02.2024

Библиографический список

- [1] Шалыт Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях. М.: Энергоиздат, 1982. – 312 с.
- [2] Беляков Ю.С. Актуальные вопросы определения мест повреждения воздушных линий электропередачи // Библиотечка электротехника. 2010. № 11. С. 1-76.
- [3] Папков Б.В., Вуколов В.Ю. Электроэнергетические системы и сети. Токи короткого замыкания. М.: Юрайт, 2018. – 353 с.
- [4] 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 высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. № 3-4. С. 132-137.
- [5] Гловацкий В.Г., Халидов А.Г. Определение расстояния до мест двойных замыканий на землю в электрических сетях 35 кВ // Энергетик. 1985. № 9. С.31.
- [6] Куликов А.Л., Обалин М.Д., Осокин В.Ю., Шарафеев Т.Р. Применение имитационного моделирования ЛЭП 6-35 кВ для повышения точности определения расстояния до двойных замыканий на землю // Вестник ИГЭУ. 2018. № 1. С. 40-49. DOI: 10.17588/2072-2672.2018.1.040-049
- [7] Куликов А.Л., Осокин В.Ю., Обалин М.Д. Повышение точности алгоритмов определения места повреждения ЛЭП 6-35 кВ при двойных замыканиях на

- землю с помощью введения итерационных процедур // Электроэнергия. Передача и распределение. 2019. № 1 (52). С. 78-83.
- [8] Шуин В.А., Филатова Г.А. Воробьева Е.А., Ганджаев Д.И. Информационные параметры электрических величин переходного процесса для определения места замыкания на землю в распределительных кабельных сетях напряжением 6-10 кВ // Вестник ИГЭУ. 2017. № 2. С. 34-42. DOI: 10.17588/2072-2672.2017.2.034-042
- [9] Лачугин В.Ф., Куликов А.Л., Платонов П.С., Вуколов В.Ю. Методика и результаты расчета токов и напряжений в цепях измерительного органа устройства защиты линии электропередачи, основанного на контроле переходных процессов // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2017. № 2. С. 117-127.
- [10] Куликов А.Л., Колобанов П.А., Обалин М.Д. Применение методов определения места повреждения в цифровой дистанционной защите линии электропередач // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2014. № 1. С. 83-87.
- [11] Иванов С.В., Кержаев Д.В. Определение мест повреждения двойных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью // Межд. науч.-тех. конф. CIGRE «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем», Сентябрь 07-10, 2009, Москва, Россия. М.: 2009. С. 84-89.
- [12] Убасева М.В., Петров В.С., Наумов В.А., Антонов В.И., Федоров А.О. Определение мест двойного замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью // Релейная защита и автоматизация. 2021. № 4 (45). С. 40-46.
- [13] Куликов А.Л., Осокин В.Ю., Бездушный Д.И., Лоскутов А.А. Применение метода наложения для решения задачи определения места повреждения в сетях среднего напряжения // Электричество. 2021. № 9. С. 38-44. DOI: 10.24160/0013-5380-2021-9-38-44

References

- [1] G.M. Shalyt, *Opređenje mest povrezhdeniya v elektricheskikh setyah [Determination of damage sites in electrical networks]*. Moscow: Energoizdat, 1982 (in Russian).
- [2] Yu.S. Belyakov, "Aktual'nye voprosy opredeleniya mest povrezhdeniya vozduzhnykh linij elektroperedachi [Current issues in determining locations of damage to overhead power lines]", *Bibliotekha elektrotekhnika [Library of Electrical Engineering]*, no. 11, pp. 1-76, 2010 (in Russian).
- [3] B.V. Papkov and V.Yu. Vukolov, *Elektroenergeticheskie sistemy i seti. Toki korotkogo zamykaniya [Electric power systems and networks. Short-circuit currents]*. Moscow: Urait, 2018 (in Russian).
- [4] E.F. Khakimzyanov, R.G. Mustafin and A.I. Fedotov, "Determination of the distance to the double earth fault on the power line of medium voltage distribution network", *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, no. 3-4, pp. 132-17, 2015 (in Russian).
- [5] V.G. Glovackij and A.G. Halidov, "Opređenje rasstoyaniya do mest dvoynykh замыканий na zemlyu v elektricheskikh setyah 35 kV [Determination of the distance to places of double ground faults in 35 kV electrical networks]", *Energetik*, no. 9, pp. 31, 1985 (in Russian).
- [6] A.L. Kulikov, M.D. Obalin, V.Yu. Osokin and T.R. Sharafiev, "Using simulation modelling of 6-35 kV power lines for improving the accuracy of double earth fault

- location”, *Bulletin of Ivanovo State Power Engineering University*, no. 1, pp. 40-49, 2018. DOI: 10.17588/2072-2672.2018.1.040-049
- [7] A.L. Kulikov, V.Yu. Osokin and M.D. Obalin, “Accuracy improving the fault location algorithms of 6-35 kV transmission lines for double earth faults with applying the iteration methods”, *Electric Power. Transmission and Distribution*, vol. 1, no. 52, pp. 78-83, 2019 (in Russian).
- [8] V.A. Shuin, G.A. Filatova, E.A. Vorob`eva and D.I. Gandzhaev, “Information parameters of transient electrical quantities for earth fault location in 6-10 kV distribution cable lines”, *Bulletin of Ivanovo State Power Engineering University*, no. 2, pp. 34-42, 2017. DOI: 10.17588/2072-2672.2017.2.034-042
- [9] V.F. Lachugin, A.L. Kulikov, P.S. Platonov and V.Yu. Vukolov, “The methodology and results of calculation of currents and voltages in transmission line protection device measuring element circuit based on transients”, *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, no. 2, pp. 117-127, 2017.
- [10] A.L. Kulikov, P.A. Kolobanov and M.D. Obalin, “Primenenie metodov opredeleniya mesta povrezhdeniya v cifrovoj distancionnoj zashchite linii elektroperedach [Application of methods for determining the location of damage in digital distance protection of power lines]”, *Russian Electromechanics*, no. 1, pp. 83-87, 2014 (in Russian).
- [11] S.V. Ivanov and D.V. Kerzhaev, “Opredelenie mest povrezhdeniya dvoynnyh замыканиj na zemlyu v setyah s izolirovannoju nejtural’yu [Determination of damage locations of double ground faults in networks with isolated neutral]”, in proc. *Int. scientific-technical conf. CIGRE “Sovremennye napravleniya razvitiya sistem relejnoj zashchity i avtomatiki energosistem [Modern directions in the development of relay protection systems and automation of power systems]”*, Sep. 07-10, 2009, Moscow, Russia, pp. 84-89 (in Russian).
- [12] M.V. Ubaseva, V.S. Petrov, V.A. Naumov, V.I. Antonov and A.O. Fedorov, “Determining locations of a double ground fault in networks with isolated neutral”, *Relay Protection and Automation*, vol. 4, no. 45, pp. 40-46, Dec. 2021.
- [13] A.L. Kulikov, V.Yu. Osokin, D.I. Bezdushnyy and A.A. Loskutov, “Application of the superposition method for fault location in medium voltage networks”, *Elektrichestvo*, no. 9, pp. 38-44, 2021. DOI: 10.24160/0013-5380-2021-9-38-44

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Куликов Александр Леонидович, доктор технических наук, профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Осокин Владислав Юрьевич, ведущий инженер Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Aleksandr L. Kulikov, D. Sci. (Eng.), professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Vladislav Yu. Osokin, leading engineer of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.