

Определение места повреждения линии электропередачи по мгновенным значениям осциллограмм аварийных событий¹

А.Л. Куликов, И.А. Лукичева
ФГБОУВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»,
г. Нижний Новгород, Российская Федерация
E-mail: Lukicheva.ir@gmail.com

Авторское резюме

Состояние вопроса: Широко известные методы определения места повреждения линии электропередачи используют комплексы токов и напряжений при формировании математических выражений расчета расстояния до места повреждения. Переход к мгновенным значениям токов и напряжений приводит к необходимости дополнительной реализации процедур фильтрации сигналов в условиях аperiodической составляющей и высокочастотных помех. Характеристики фильтрации существенным образом влияют на точность определения места повреждения линии электропередачи. Целью исследования является разработка метода определения места повреждения, обладающего повышенной точностью в условиях аperiodической составляющей и высокочастотных помех в сигналах токов и напряжений.

Материалы и методы: В программном комплексе Matlab Simulink применено имитационное моделирование анализируемых методов определения места повреждения линии электропередачи. Использована более точная для длинных линий математическая модель линии электропередачи с распределенными параметрами.

Результаты: Разработан новый метод определения места повреждения линии электропередачи, основанный на модели ЛЭП с распределенными параметрами, использующий мгновенные значения аварийных осциллограмм, обладающий повышенной точностью при наличии в аварийных токах и напряжениях аperiodической и высокочастотных составляющих. Для сопоставительного анализа известных методов и предлагаемого метода произведены расчеты относительной ошибки определения места повреждения линии электропередачи. Достоверность результата подтверждена теоретическими расчетами.

Выводы: Новый метод имеет малые ошибки расчета расстояния до повреждения и может быть реализован в современных программных и аппаратных средствах определения места повреждения линии электропередачи без существенных доработок.

Ключевые слова: определение места повреждения, дискретное преобразование Фурье, преобразование Кларк, фильтрация, мгновенные значения токов и напряжений, модель линии с распределенными параметрами, гармонические составляющие.

Fault location in power transmission lines by instantaneous values of alarm oscillograms

A.L. Kulikov, I.A. Lukicheva
Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russian Federation
E-mail: Lukicheva.ir@gmail.com

Abstract

Background: Widely-used methods of fault location in power transmission lines use current and voltage complexes to derive mathematical expressions for calculating the distance to the fault point. The transition to instantaneous values of current and voltage requires additional filtering procedures under aperiodic component and high-frequency noise conditions. Filtering characteristics significantly affect the accuracy of fault location in power transmission lines. The aim of the study was to develop a method of fault location with a high accuracy in conditions of aperiodic component and high-frequency interference in current and voltage signals.

Materials and methods: The analyzed method of fault location in power transmission lines was simulated in Matlab Simulink. The simulation employed a mathematical model that is more accurate for long-distance power transmission lines with distributed parameters.

Results: A new method of fault location in power transmission lines has been developed based on a model of power transmission lines with distributed parameters. The method uses instantaneous values of alarm oscillograms and is highly accurate in the presence of aperiodic and high frequency components in fault currents and voltages. To compare the known and the proposed methods, we calculated the relative error of fault location in power transmission lines. The reliability of the result was confirmed by theoretical calculations.

Conclusions: The new method has minute errors in calculating the distance to the fault and can be implemented in modern software and hardware of fault location tools without significant improvements.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение № 14.577.21.0124 о предоставлении субсидии от 20.10.2014. Уникальный идентификатор проекта RFMEFI57714X0124)

Key words: fault location, discrete Fourier transformation, Clark transformation, filtering, instantaneous current and voltage values, model of a line with distributed parameters, harmonical component.

DOI: 10.17588/2072-2672.2016.5.016-021

Состояние вопроса. Повреждения линий электропередачи приводят к недоотпуску электроэнергии потребителям и нарушению режимов работы энергообъединений [1]. Значительную часть времени восстановления поврежденной линии электропередачи (ЛЭП) занимает процесс определения места повреждения (ОМП). Особенно важную роль ОМП играет в условиях труднопроходимой местности, слабого развития дорожной сети и при наличии ЛЭП большой протяженности. Успешное ОМП ускоряет процесс выявления и ликвидации повреждения. Известен способ определения места короткого замыкания на воздушной линии электропередачи по массивам мгновенных значений осциллограмм токов и напряжений [2]. Однако в условиях наличия в мгновенных значениях токов и напряжений высокочастотных и апериодической составляющих, указанный способ дает высокую погрешность.

В связи с этим актуальна разработка метода ОМП ЛЭП высокой точности с использованием мгновенных значений осциллограмм аварийных событий в условиях апериодической и высокочастотных составляющих.

Известны различные методы ОМП: дистанционные и топографические; односторонние, двусторонние и многосторонние; использующие мгновенные значения токов и напряжений, комплексные величины или набор гармонических составляющих; использующие модель линии с сосредоточенными или распределенными параметрами и проч. [1, 3].

Методы ОМП по параметрам аварийного режима (ПАР) основаны на измерениях параметров аварийного режима и, в зависимости от установки измерительных устройств по концам поврежденной линии, подразделяются на одно- и двусторонние. Под параметрами аварийного режима понимают составляющие или комбинации токов и напряжений промышленной частоты в аварийном режиме, по которым можно вычислить расстояние до места КЗ.

Двусторонние методы ОМП по ПАР, основанные на теории многополюсников, предполагают наличие полной и синхронизированной информации с двух концов линии. Для этого необходимы: установка фиксирующих приборов с двух концов поврежденной линии; использование средств или методов синхронизации; наличие каналов связи.

Двусторонние методы ОМП по ПАР являются наиболее точными. Однако они обладают рядом существенных недостатков: их техническая реализация требует значительных капитальных вложений, а надежность зависит от правильной работы фиксирующих приборов с

двух концов линии, средств синхронизации показаний этих приборов и каналов связи [4].

Материалы и методы. Масштабное распространение микропроцессорной техники и широкое применение цифровых регистраторов аварийных процессов позволяет реализовывать методы ОМП, основанные на использовании первичной информации в форме мгновенных значений токов и напряжений. В методе ОМП используется модель ЛЭП с распределенными параметрами, которая более подходит для длинных (магистральных) линий. Модель с сосредоточенными параметрами не использовалась, так как она является упрощением и может приводить к дополнительным методическим погрешностям.

Для получения аналитических выражений метода ОМП воспользуемся уравнениями линии с распределенными параметрами [5]. Применение гиперболических функций приводит к следующим равенствам:

$$\underline{U}_{II} = \underline{U}_I \operatorname{ch}(\gamma l) - I_I \underline{Z}_B \operatorname{sh}(\gamma l); \quad (1)$$

$$\underline{I}_{II} = -\underline{U}_I \underline{Z}_B \operatorname{sh}(\gamma l) + I_I \operatorname{ch}(\gamma l), \quad (2)$$

где γ – коэффициент распространения электромагнитной волны по линии; \underline{Z}_B – волновое сопротивление; l – длина линии; \underline{U}_I – напряжение в начале линии; I_I – ток в начале линии.

На рис. 1 схематично представлено короткое замыкание на линии на расстоянии $l_1 = L_1$ от ее начала.

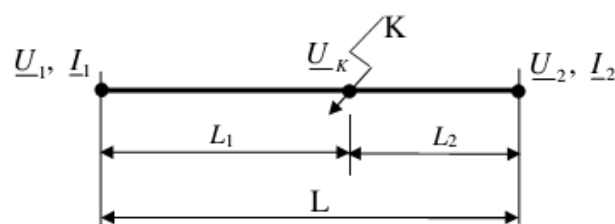


Рис. 1. Упрощенная схема поврежденной ЛЭП

Напряжение в точке КЗ относительно начала линии находится по выражению

$$\underline{U}_K = \underline{U}_1 \operatorname{ch}(\gamma_0 L_1) - I_{1,1} \underline{Z}_B \operatorname{sh}(\gamma_0 L_1), \quad (3)$$

а напряжение в точке КЗ относительно конца линии по выражению

$$\underline{U}_K = \underline{U}_2 \operatorname{ch}(\gamma_0 L_2) + I_{2,2} \underline{Z}_B \operatorname{sh}(\gamma_0 L_2). \quad (4)$$

Перепишем уравнения (2) и (3) для прямой последовательности особой фазы (фазы А) с учетом того, что $L_2 = L - L_1$:

$$\underline{U}_{A1,K} = \underline{U}_{A1,1} \operatorname{ch}(\gamma_0 L_1) - I_{A1,1} \underline{Z}_B \operatorname{sh}(\gamma_0 L_1); \quad (5)$$

$$\underline{U}_{A1,K} = \underline{U}_{A1,2} \operatorname{ch}(\gamma_0 (L - L_1)) - I_{A1,2} \underline{Z}_B \operatorname{sh}(\gamma_0 (L - L_1)), \quad (6)$$

где $\underline{U}_{A1,K}$ – напряжение прямой последовательности фазы А в точке КЗ.

Приравняв левые части уравнений (5) и (6) и выполнив ряд математических преобразований, приходим к соотношению для определения расстояния до места КЗ линии:

$$l_1 = \frac{1}{\gamma_0} \operatorname{arth} \left(\frac{\underline{U}_{A1,1} - \underline{U}_{A1,2} \operatorname{ch}(\gamma_0 L) - \underline{I}_{A1,2} \underline{Z}_B \operatorname{sh}(\gamma_0 L)}{\underline{I}_{A1,1} \underline{Z}_B - \underline{U}_{A1,2} \operatorname{sh}(\gamma_0 L) - \underline{I}_{A1,2} \underline{Z}_B \operatorname{ch}(\gamma_0 L)} \right), \quad (7)$$

где $\underline{I}_{A1,1}$ – векторное значение тока прямой последовательности фазы А в начале линии; $\underline{U}_{A1,1}$ – векторное значение напряжения прямой последовательности фазы А в начале линии; $\underline{I}_{A1,2}$ – векторное значение тока прямой последовательности фазы А в конце линии; $\underline{U}_{A1,2}$ – векторное значение напряжения прямой последовательности фазы А в конце линии.

Выражение (7) может быть использовано для любого вида КЗ. При однократном несимметричном КЗ расстояние L_1 определяется через параметры прямой последовательности, при трехфазном КЗ используются фазные напряжения и токи, которые также можно считать параметрами прямой последовательности. Векторные значения напряжений и токов прямой последовательности фазы А, используемые в формуле (7), определяются из векторных значений токов и напряжений фаз А, В, С с помощью известного способа разложения несимметричной тройки векторов F_A, F_B, F_C на симметричные составляющие прямой F_{A1} , обратной F_{A2} и нулевой F_{A0} последовательностей, осуществляемого через операторы поворота $a = e^{j120^\circ}$, $a^2 = e^{j240^\circ}$ по следующим формулам:

$$\underline{E}_{A1} = \frac{1}{3} (\underline{E}_A + a \underline{E}_B + a^2 \underline{E}_C); \quad (8)$$

$$\underline{E}_{A2} = \frac{1}{3} (\underline{E}_A + a^2 \underline{E}_B + a \underline{E}_C); \quad (9)$$

$$\underline{E}_{A0} = \frac{1}{3} (\underline{E}_A + \underline{E}_B + \underline{E}_C). \quad (10)$$

Определение векторных значений токов и напряжений по мгновенным значениям реализуется в соответствии с равенствами:

$$\underline{U}_{A1} = \sqrt{2} U_{A1} e^{-j\varphi_{U_{A1}}}; \quad (11)$$

$$U_{A1} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N u_{A1}^2(t_j); \quad (12)$$

$$\varphi_{U_{A1}} = \arccos \left(\frac{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (u_{A1}(t_j) \cdot f(t_j))}{U_{A1} F} \right), \quad (13)$$

где u_{A1} – мгновенное значение напряжение фазы А в начале линии; $f(t) = 1 \cdot \sin(\omega t)$ – массив, совмещенный с осью отсчета; $F = \frac{\sqrt{2}}{2}$ – действующее значение массива.

Недостатком изложенного способа ОМП является высокая погрешность определения

расстояния до места повреждения на ЛЭП в условиях наличия в мгновенных значениях токов и напряжений апериодической и высокочастотных составляющих. Существенно более высокой точности ОМП ЛЭП можно достигнуть производя предварительную фильтрацию мгновенных значений напряжений и токов с применением дискретного преобразования Фурье и получением комплексных составляющих фазных напряжений и токов, зафиксированных в начале и конце линии. В этом случае векторные значения токов и напряжений определяются на основе следующих соотношений:

$$\underline{I}_{A1} = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i_{A1n} e^{-j\omega t_n}; \quad (14)$$

$$\underline{U}_{A1} = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u_{A1n} e^{-j\omega t_n}. \quad (15)$$

Получить формулу для определения места КЗ можно и с применением преобразования Кларк, которое является полезным инструментом анализа повреждений [6]. Выражения для комплексов токов принимают следующий вид:

$$I_{A1} = \frac{1}{2} (I_\alpha + j I_\beta); \quad (16)$$

$$I_{A2} = \frac{1}{2} (I_\alpha - j I_\beta), \quad (17)$$

где I_{A1} – ток прямой последовательности фазы А, I_{A2} – ток обратной последовательности фазы А;

$$I_\alpha = \frac{1}{3} (2 \cdot I_A + I_B + I_C); \quad (18)$$

$$I_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}} (I_B - I_C), \quad (19)$$

где I_α и I_β – компоненты преобразования Кларк. Аналогично преобразование выглядит и для напряжения.

Таким образом, после ряда математических преобразований формула для определения места КЗ выглядит следующим образом:

$$l_1 = \frac{1}{2\gamma_0} \ln \left(\frac{(\sqrt{3}i - 1) (\underline{Z}_B [\underline{I}_{B1} + \underline{I}_{B2} e^{L\gamma_0}] + (\sqrt{3}i - 1) (\underline{Z}_B [\underline{I}_{B1} + \underline{I}_{B2} e^{-L\gamma_0}] + \frac{+\underline{U}_{B1} - \underline{U}_{B2} e^{L\gamma_0} -}{+\underline{U}_{B1} + \underline{U}_{B2} e^{-L\gamma_0} -} - (\sqrt{3}i + 1) (\underline{Z}_B [\underline{I}_{C1} + \underline{I}_{C2} e^{L\gamma_0}] + -(\sqrt{3}i + 1) (\underline{Z}_B [\underline{I}_{C1} + \underline{I}_{C2} e^{-L\gamma_0}] - \frac{+\underline{U}_{C1} - \underline{U}_{C2} e^{L\gamma_0} +}{-\underline{U}_{C1} + \underline{U}_{C2} e^{-L\gamma_0} +} + 2 (\underline{Z}_B [\underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2} e^{L\gamma_0}] + + 2 (\underline{Z}_B [\underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2} e^{-L\gamma_0}] - \frac{+\underline{U}_{A1} - \underline{U}_{A2} e^{L\gamma_0})}{-\underline{U}_{A1} - \underline{U}_{A2} e^{-L\gamma_0})} \right)}{(\sqrt{3}i - 1) (\underline{Z}_B [\underline{I}_{B1} + \underline{I}_{B2} e^{L\gamma_0}] + (\sqrt{3}i - 1) (\underline{Z}_B [\underline{I}_{B1} + \underline{I}_{B2} e^{-L\gamma_0}] + \frac{+\underline{U}_{B1} - \underline{U}_{B2} e^{L\gamma_0} -}{+\underline{U}_{B1} + \underline{U}_{B2} e^{-L\gamma_0} -} - (\sqrt{3}i + 1) (\underline{Z}_B [\underline{I}_{C1} + \underline{I}_{C2} e^{L\gamma_0}] + -(\sqrt{3}i + 1) (\underline{Z}_B [\underline{I}_{C1} + \underline{I}_{C2} e^{-L\gamma_0}] - \frac{+\underline{U}_{C1} - \underline{U}_{C2} e^{L\gamma_0} +}{-\underline{U}_{C1} + \underline{U}_{C2} e^{-L\gamma_0} +} + 2 (\underline{Z}_B [\underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2} e^{L\gamma_0}] + + 2 (\underline{Z}_B [\underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2} e^{-L\gamma_0}] - \frac{+\underline{U}_{A1} - \underline{U}_{A2} e^{L\gamma_0})}{-\underline{U}_{A1} - \underline{U}_{A2} e^{-L\gamma_0})} \right)}, \quad (20)$$

где $I_{A1}, I_{B1}, I_{C1}, I_{A2}, I_{B2}, I_{C2}, U_{A1}, U_{B1}, U_{C1}, U_{A2}, U_{B2}$ – комплексы токов и напряжений фаз A, B, C в начале и конце линии соответственно.

Способ ОМП с применением двусторонних измерений позволяет более точно определять место КЗ за счет учета распределенности параметров ЛЭП и использования в качестве исходных данных массивов мгновенных значений токов и напряжений, измеренных на обоих концах линии, что исключает влияние переходного сопротивления в месте короткого замыкания на точность определения места повреждения. Применение дискретного преобразования Фурье обеспечивает выделение сигнала основной час-

тоты и уменьшение искажающего влияния аperiodической и высокочастотных гармонических составляющих.

Для обоснования преимуществ разработанного способа ОМП ЛЭП проводилось моделирование в программном комплексе MatLab Simulink. Построена математическая модель воздушной линии электропередачи с проводом марки AC-500/64 длиной 600 км. На расстояниях 100, 200, 300, 400 и 500 км от начала ВЛ имитировалось однофазное короткое замыкание (рис. 2).

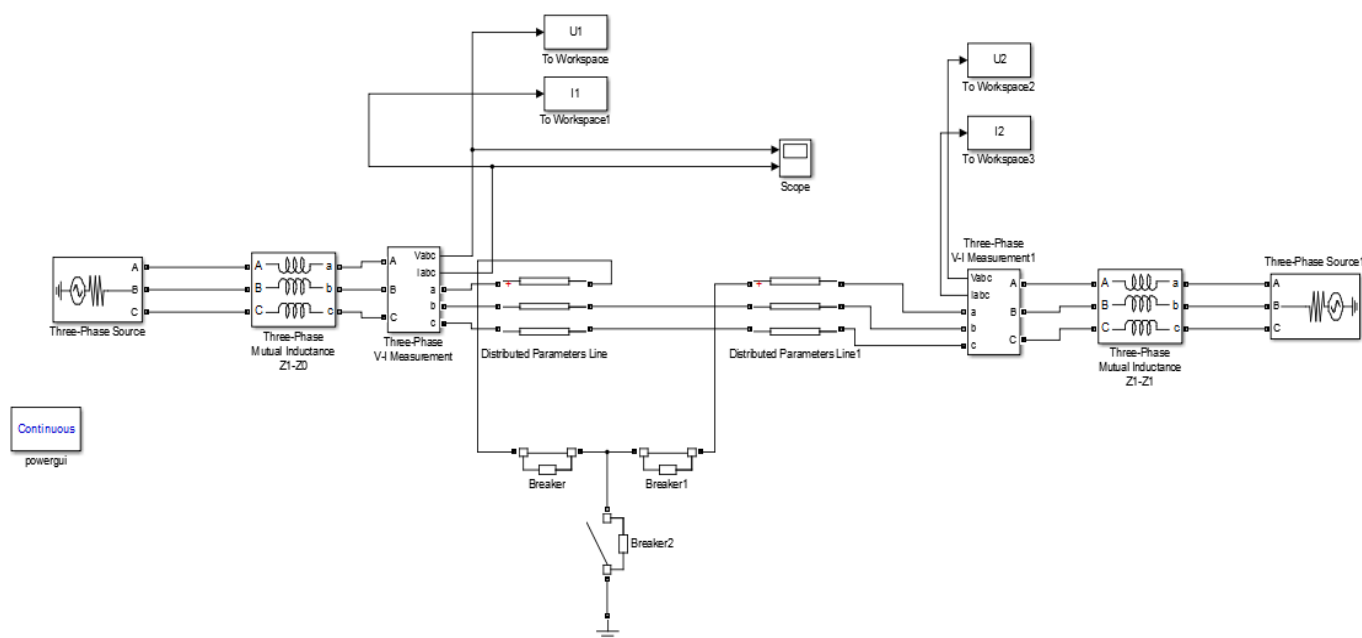


Рис. 2. Модель ЛЭП 500 кВ в MatLab Simulink

В ходе имитационного моделирования в начале и конце линии производилась регистрация мгновенных значений токов и напряжений в каждой фазе в одни и те же моменты времени с частотой дискретизации 64 отсчета на период промышленной частоты. Получение мгновенных значений аварийных токов и напряжений выполнялось для двух случаев: в условиях аperiodической составляющей с интенсивностью 100 % от значения амплитуды сигнала основной ($f = 50$ Гц) частоты, а также при наличии высокочастотных составляющих, когда в состав сигналов токов и напряжений входила третья гармоника интенсивностью 20 % от значения амплитуды основной частоты и пятая гармоника интенсивностью 15 % от значения амплитуды основной частоты.

Далее полученные мгновенные значения токов и напряжений использовались для определения расчетного места КЗ. Затем расчетное место КЗ сравнивалось по его удаленности с принятым местом КЗ.

Результаты ОМП исходным и предлагаемым способами для первого случая показаны на рис. 3, для второго – на рис. 4.

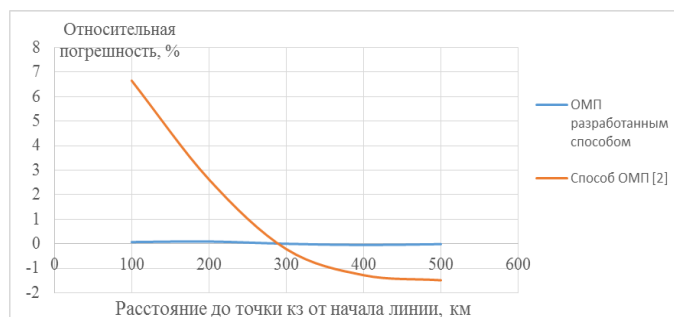


Рис. 3. Зависимость относительной погрешности ОМП от места повреждения при наличии аperiodической составляющей в сигнале тока

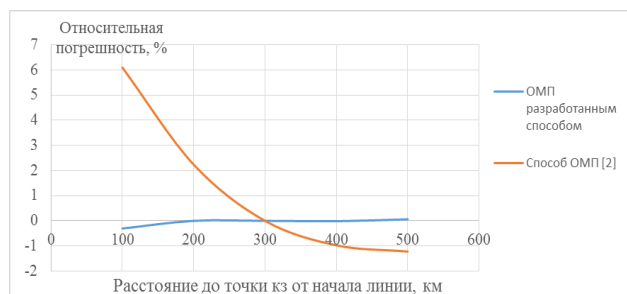


Рис. 4. Зависимость относительной погрешности ОМП от места повреждения при наличии высокочастотных составляющих в сигналах тока и напряжения

Анализ полученных зависимостей (рис. 3, 4) показывает, что ошибки расчета расстояния для разработанного метода ОМП ЛЭП в условиях наличия апериодической составляющей и высокочастотных помех не зависят от места повреждения и практически сохраняют свое значение вдоль всей длины линии. Выигрыш в точности ОМП, по сравнению с методом [2], имеет различные значения на разных участках ЛЭП и может достигать 6–7 раз.

Выводы. Разработанный новый метод ОМП ЛЭП, использующий уравнение линии с распределенными параметрами и мгновенные значения осциллограмм аварийных событий (в состав вычислительных процедур включены дискретное преобразование Фурье и преобразование Кларк), в условиях апериодической составляющей и высокочастотных помех в сигналах токов и напряжений обеспечивает до 6 раз более высокую точность по сравнению с вариантом, приведенным в [2].

Предложенный метод обладает повышенной точностью в сравнении с исходным методом.

Новый метод может быть реализован в современных программных и аппаратных средствах ОМП ЛЭП без существенных доработок.

Список литературы

1. Шалыт Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях: учеб. для вузов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 312 с.
2. Пат. 2504792 Российская Федерация G01R31/08. Способ определения места короткого замыкания на воздушной линии электропередачи по массивам мгновенных значений токов и напряжений / Ю.В. Хрущев, Н.Л. Бацева, Л.В. Абрамочкина, А.В. Панкратов. Опубл. 20.01.2014, Бюл. № 2.
3. Куликов А.Л., Обалин М.Д., Петрова В.А. Применение цифровой обработки сигналов в задаче

повышения точности ОМП ЛЭП по параметрам аварийного режима // Электрические станции. – 2016. – № 4. – С. 39-44.

4. Аржаников Е.А., Лукоянов В.Ю., Мисриханов М.Ш. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи / под ред. В.А. Шуина. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 272 с.

5. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В. Теоретические основы электротехники: в 2 т. – СПб.: Питер, 2009. – 432 с.

6. Fault Locator Approach for High-Impedance Grounded or Ungrounded Distribution Systems using Synchrophasors: conference paper «Fault Locator Approach for High-Impedance Grounded or Ungrounded Distribution Systems using Synchrophasors» / D. Patynowski, J. Cardenas, D. Menendez, J.M. Roca, J.G. Germain, A.Y. Huete, C. Canales, A. Martinez, J.A. Rosendo, J.M. Roldán, J. Montañez. – Sochi, 2015. – 8 p.

References

1. Shalyt, G.M. *Opredelenie mest povrezhdeniya v elektricheskikh setyakh* [Fault location in power grids], Moscow: Energoizdat, 1982. 312 p.
2. Khrushchev, Yu.V., Batseva, N.L., Abramochkina, L.V., Pankratov, A.V. *Sposob opredeleniya mesta korotkogo замыкания na vozduшной линии электропередачи по массивам мгновенных значений токов и напряжений* [A method of short circuit location in overhead power lines by instantaneous current and voltage value arrays]. Patent RF, no. 2504792, 2014.
3. Kulikov, A.L., Obalin, M.D., Petrova, V.A. *Primenenie tsifrovoy obrabotki signalov v zadache povysheniya tochnosti OMP LEP po parametram avariynogo rezhima* [Use of digital signal processing for accuracy improvement of fault location in power transmission lines using parameters of emergency operation]. *Elektricheskie stantsii*, 2016, no. 4, pp. 39–44.
4. Arzhanikov E.A., Lukoyanov V.Yu., Misrikanov M.Sh. *Opredelenie mesta korotkogo замыкания na vysokovol'tnykh liniyakh электропередачи* [Short-circuit location in power transmission lines]. Moscow, Energoatomizdat, 2003. 272 p.
5. Demirchyan, K.S., Neyman, L.R., Korovkin, N.V. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki v 2 t.* [Theoretical foundations of electrical engineering in 2 vol.]. Saint-Petersburg, 2009. 432 p.
6. Patynowski, D., Cardenas, J., Menendez, D., Roca, J.M., Germain, J.G., Huete, A.Y., Canales, C., Martinez, A., Rosendo, J.A., Roldán, J.M., Montañez, J. *Fault Locator Approach for High-Impedance Grounded or Ungrounded Distribution Systems using Synchrophasors*. Conference paper «Fault Locator Approach for High-Impedance Grounded or Ungrounded Distribution Systems using Synchrophasors». Sochi, 2015. 8 p.

Куликов Александр Леонидович,
ФГБОУВО «Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева»,
доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики, электроснабжения и силовой электроники,
e-mail: inventor61@mail.ru

Лукичева Ирина Александровна,
ФГБОУВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»,
аспирант кафедры электроэнергетики, электроснабжения и силовой электроники,
e-mail: lukicheva.ir@gmail.com