

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА



УДК 621.31

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-1-97-104

АЛГОРИТМ ФИЛЬТРАЦИИ АПЕРИОДИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ В СИГНАЛЕ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Бурянина¹ Н.С., Лесных² Е.В., Лесных³ А.С., Суслов^{4,5} К.В., Артемьева⁶ М.Л.

¹Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова,
г. Якутск, Россия

²Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск, Россия

³Сибирский государственный университет водного транспорта,
г. Новосибирск, Россия

⁴Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия

⁵Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

⁶Чукотский филиал Северо-Восточного федерального университета имени М.К.
Аммосова, г. Анадырь, Россия
ml.koryakina@s-vfu.ru

Резюме: Предложен алгоритм исключения аperiodических составляющих из токов коротких замыканий (КЗ). Реализуется алгоритм вычислительной техникой и позволяет определять место КЗ и обрыва фазы за 0,5 – 0,6 миллисекунды. За такой интервал времени не возникает насыщение магнитопроводов трансформаторов тока (ТТ), и в микропроцессор цифровой релейной защиты поступает неискаженная информация от ТТ. Для реализации алгоритма достаточно четырех измерений мгновенных значений токов, разделенных одинаковыми временными интервалами (интервалами дискретизации). Исключение аperiodических составляющих повышает точность определения места КЗ. Алгоритм может использоваться для определения места разрыва фаз. Также данный алгоритм можно применить в цифровых релейных защитах, основанных на измерении токов и напряжений.

Ключевые слова: искажение вторичных токов при насыщении магнитопроводов трансформаторов тока; фильтрация свободной составляющей тока; интервал дискретизации; алгоритмы определения текущих значений синусоидальных составляющих токов; постоянная времени затухания свободной составляющей тока; определение мест повреждений (ОМП) на линиях электропередачи.

Для цитирования: Бурянина Н.С., Лесных Е.В., Лесных А.С., Суслов К.В., Артемьева М.Л. Алгоритм фильтрации аperiodической составляющей в сигнале тока короткого замыкания // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 2. С. 97-104. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-97-104.

ON THE QUESTION OF DETERMINING THE LOCATION OF A SHORT CIRCUIT ON A POWER TRANSMISSION LINE

Buryanina ¹ N.S., Lesnykh ² E.V., Lesnykh ³ A.S., Suslov^{4,5} K.V., Artemyeva⁶ M.L.

¹North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

²Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

³Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russia

⁴Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

⁵National Research University MPEI, Moscow, Russia

⁶Chukotka branch of North-Eastern Federal University, Anadyr, Russia
ml.koryakina@s-vfu.ru

Abstract: An algorithm for eliminating aperiodic components from short circuit (SC) currents is proposed. The algorithm is implemented by computer technology and allows you to determine the location of a short circuit and phase loss in 0.5 - 0.6 milliseconds. During such a time interval, saturation of the magnetic circuits of current transformers (CTs) does not occur, and the processors receive undistorted information from the CTs. To implement the algorithm, four measurements of instantaneous current values, separated by equal time intervals (sampling intervals), are sufficient. Elimination of aperiodic components increases the accuracy of determining the location of the fault. The algorithm can be used to determine the location of phase failure, and in digital relay protection based on measuring currents and voltages.

Keywords: distortion of secondary currents when magnetic circuits of current transformers are saturated; filtering of the free current component; sampling interval; algorithms for determining the current values of sinusoidal current components; attenuation time constant of the free current component; determination of fault locations on power lines.

For citation: Buryanina NS., Lesnykh EV., Lesnykh AS., Suslov KV., Artemyeva ML. On the question of determining the location of a short circuit on a power transmission line. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (2): 97-104. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-97-104.

Введение (Introduction)

Исторически сложилось так, что в СССР, а затем и в России существовала система, где при проектировании релейной защиты и автоматизации воздушных линий электропередач в качестве основной защиты брали дифференциальную защиту, так как она играет особую роль и ей присваивается абсолютная селективность для воздушных линий электропередачи 110-750 кВ. Высокоскоростная дифференциальная фазовая защита с высокочастотным каналом связи и надлежащим функционированием во многом определяет надежность работы единой энергетической системы [10].

В настоящее время повсеместно аналоговые релейные защиты, автоматика (РЗА) и устройства определения мест повреждений (ОМП) заменяются цифровыми. Цифровое управление расширяет возможности РЗА, позволяет использовать информацию для РЗ не только в месте установки защищаемого объекта, но и удаленную [3, 8, 9]. Например, направленные защиты генераторов могут использовать напряжения других генераторов, трансформаторов и даже линий электропередачи, удаленных от места установки генераторов, но имеющих электрическую связь с поврежденными генераторами. Цифровое управление позволяет фильтровать синусоидальные составляющие токов и напряжений, вычислять мощности, сопротивления на выходе измерительных органов РЗ (ИОРЗ), фиксируя параметры режима в начальном периоде КЗ (0,2 – 0,25 миллисекунды) [1, 2, 4, 11, 14, 15].

В отличие от аналоговых защит, выполняемых электромеханическими и электронными реле и получаемыми режимную информацию непрерывно, цифровые защиты реагируют на дискретные параметры, разделенные равными интервалами времени, называемые интервалами дискретизации. Поэтому очень важно из дискретных и часто несинусоидальных параметров режима выделить синусоидальные составляющие.

Существенные преимущества цифровых защит перед аналоговыми проявляются в дифференциальных защитах генераторов, трансформаторов, шин. Применяемые аналоговые защиты имеют время срабатывания 40 – 50 мс. Разработчики цифровых РЗ за рубежом и в России предложили использовать информацию на участках достаточно точной трансформации, что позволило разработать алгоритмы с временем фиксации КЗ в 2 – 3 мс. Т.е., интервал точной трансформации в 3 мс достаточен для измерительного органа цифровой РЗ [5, 6, 7, 12].

Подстанции и линии электропередачи Северных электрических сетей разбросаны по обширной территории. Для анализа проблемы работы устройств РЗА, в частности работы ЦРЗА и ОМП, стоит начать с качественного и количественного состава оборудования, используемого на объектах электроэнергетики. Например, исходя из данных группы компаний ПАО «Россети» на 01.01.2022 на объектах электроэнергетического хозяйства в эксплуатации находится около 1,8 миллионов устройств РЗА. Распределение устройств РЗА по составу элементной базы приведено на рисунке 1 [13]. Так, филиал «Северные электрические сети» ОАО «Чукотэнерго» снабжают электроэнергией Чаунский и Билибинский районы Чукотского автономного округа, а также Нижнеколымский улус Якутии. Центральная база и управление Северных электрических сетей расположена в городе Билибино. Основные структурные

подразделения предприятия: служба линий электропередачи, служба ПС и ТП, оперативно-диспетчерская служба, автотранспортный цех, служба РЗАИ, служба СДТУ, Чаунский район электрических сетей в г. Певек и Зеленомысский участок электрических сетей в п. Черский Республики Саха (Якутия).



Рис.1. Распределение устройств РЗА по составу элементной базы Fig.1. Distribution of relay protection devices by element base composition

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Следовательно, точность определения места повреждения на линиях электропередачи изолированных территорий Крайнего Севера играет важную роль.

Научная значимость исследования состоит в повышении точности определения места короткого замыкания на линиях электропередачи за счет фильтрации помех в виде апериодической (свободной) составляющей тока короткого замыкания. Практическая значимость исследования заключается в том, что предложенный алгоритм может использоваться и для определения места разрыва фаз, и в цифровых релейных защитах, основанных на измерении токов и напряжений, он может быть внедрен в измерительный орган микропроцессорных устройств РЗА в качестве цифрового фильтра.

Материалы и методы (Materials and methods)

Рассмотрим ситуацию, когда магнитопроводы трансформаторов тока насыщаются через 3,0 – 4,0 мс. Алгоритм, исключая апериодические составляющие токов КЗ, предлагается ниже.

Ток КЗ равен сумме апериодической и синусоидальной составляющих:

$$i_{\text{КЗ}}(t) = I_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi - \varphi) - I_{\text{ма}} \cdot \sin(\psi - \varphi) \cdot e^{\frac{-t}{T}} \quad (1)$$

где $i_{\text{КЗ}}(t)$ – мгновенное значение тока КЗ в момент времени t , I_m – амплитудное значение тока, φ – угол между током и напряжением, $I_{\text{ма}}$ – значение апериодической составляющей тока КЗ в начальный момент времени, ω – угловая частота, ψ – начальный угол тока КЗ, T – постоянная времени, t – текущее время.

$$i_1(t) = \frac{2 \cdot i(2 \cdot \Delta t) - i(\Delta t) - i(3 \cdot \Delta t)}{4 \cdot \sin(\omega \cdot \Delta t / 2)^2}, \quad i_2(t) = \frac{2 \cdot i(3 \cdot \Delta t) - i(2 \cdot \Delta t) - i(4 \cdot \Delta t)}{4 \cdot \sin(\omega \cdot \Delta t / 2)^2} \quad (2)$$

Постоянная времени апериодической слагающей тока КЗ определим, как:

$$T_r = \frac{-\Delta t}{\ln \frac{i_2 - i(3 \cdot \Delta t)}{i_1 - i(2 \cdot \Delta t)}} \quad (3)$$

Угол φ_r определим через угловую частоту и вычисленную постоянную времени:

$$\varphi_r = \text{acrtg}(T_r \cdot \omega) \quad (4)$$

Апериодическая составляющая определится как:

$$i_A(t) = I_m \cdot [-\sin(\psi - \varphi)] \cdot e^{-t/T_r} \quad (5)$$

Синусоидальная составляющая равна:

$$i_{\text{sin}}(t) = i_{\text{КЗ}}(t) - i_A(t) \quad (6)$$

Комплексные значения напряжения и тока в момент времени t равны:

$$\dot{u}(t) = \sqrt{u(t) \cdot \sin(\omega t + \psi + \varphi)^2 + u(t) \cdot \sin(\omega t + \psi - \varphi)^2} \cdot e^{j\varphi_r} \quad (7)$$

Алгоритм написан на программе MathCAD и переведен на язык

программирования C++. Ниже приводится часть листинга программы (рис. 2).

```
#define PI 3.14159268
// Задается амплитуда тока, частота, круговая частота, угол напряжения, время затухания
// тока, шаг по времени и фазовый угол в единицах СИ
double I0=10.0, nu0=50, w0=2*PI*nu0, ksi0=PI/2.0, Tau0=1.0/nu0, dt=Tau0/50.0,
phi0=atan(Tau0*w0);
// Создаются переменные для определения параметров расчетной кривой тока
double I1, nu1, ksi1, phi1, Tau1, w1;
// Определяются массивы
const int N = 100;
double iE[N], iP[N], it[N];
```

Рис. 2. Фрагмент листинга программы алгоритма исключения аperiodической составляющей

Fig. 2. Program listing fragment of the algorithm for aperiodic component elimination

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты (Results)

В качестве примера рассмотрим короткое замыкание на шинах генератора (рис. 3) с параметрами: мощность генераторов – 120 МВт, номинальное напряжение – 10,5 кВ, $\cos \varphi = 0,85$, $X_d'' = 0,189$, $X_2 = 0,23$. Постоянная времени обмоток статора составляет 0,01 с. Параметры трехобмоточного трансформатора: ТДЦ-250/220: Мощность – 250 МВА, номинальное напряжение высшей обмотки – 242 кВ, среднего напряжения – 37,5 кВ, низшего напряжения – 10,5 кВ, $U_{kv-c} = 11\%$, $U_{kv-n} = 24\%$, $U_{k-c-n} = 36\%$, $\Delta P_{kz} = 0,6$ МВт, $\Delta P_{xx} = 0,207$ МВт, обмотки высшего напряжения заземлены. Параметры линии: $L = 100$ км, $R = 0,33$ ом/км, $X = 0,36$ ом/км.

Амплитуда периодической составляющей составляет 23,7 кА. Четыре измерения с момента возникновения короткого замыкания: интервал отсчета 0,625 мс: $i(\Delta t) = 0,468$ кА, $i(2\Delta t) = 1,82$ кА, $i(3\Delta t) = 3,939$ кА, $i(4\Delta t) = 6,702$ кА. Согласно (1 – 5) постоянная времени с точностью до 5 символов составляет $T = 0,00955$ с.

Расчетные токи и мощности во времени приведены на рисунках 3 и 4.

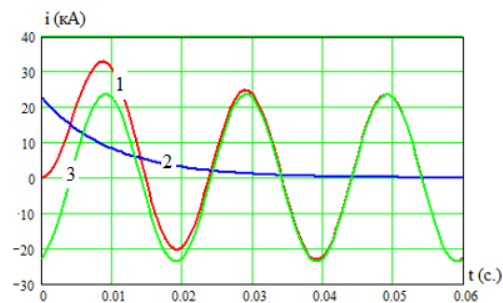


Рис. 3. Ток короткого замыкания (1), вычисленные аperiodическая (2) и периодическая составляющие

Fig. 3. Short-circuit current (1), calculated aperiodic (2) and periodic components

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

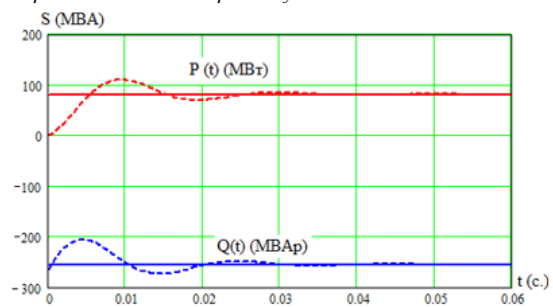


Рис. 4. Расчетная мощность. Пунктирная линия - произведение напряжения на сопряженный комплекс тока без исключения аperiodической составляющей, сплошная линия – произведение напряжения на сопряженный комплекс тока с исключенной аperiodической составляющей (согласно предложенному алгоритму)

Fig. 4. Calculated power. Dotted line - voltage product on the conjugate current complex without excluding the aperiodic component, solid line - voltage product on the conjugate current complex with excluded aperiodic component (according to the proposed algorithm)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Обсуждение (Discussions)

Учитывая тот факт, что разработанный алгоритм позволяет рассчитывать параметры режима в «будущем» времени, можно определить мгновенные значения синусоидальных составляющих токов, в том числе токов прямой, обратной и нулевой

последовательностей в любое время и определить их комплексные значения по мгновенным значениям. Мгновенные значения токов прямой и обратной последовательностей можно рассчитать с помощью фазных токов без нулевых составляющих как:

$$i_1(t) = \left[\left(i_A(\omega t) + i_B(\omega t + \frac{\pi}{2}) - i_C(\omega t + \frac{\pi}{2}) \right) / \sqrt{3} \right] / 2 \quad (8)$$

$$i_2(t) = \left[\left(i_A(\omega t) - i_B(\omega t + \frac{\pi}{2}) - i_C(\omega t + \frac{\pi}{2}) \right) / \sqrt{3} \right] / 2 \quad (8a)$$

Учитывая тот факт, достоинство предложенного алгоритма является использование всего четырех измерений мгновенных значений токов КЗ. При этом вычисляются мгновенные значения апериодической и синусоидальной периодической составляющих, амплитудные значения и аргументы токов КЗ, активные и реактивные мощности в элементах электрической сети в течении, по крайней мере, двух – трех периодов частоты электрической сети, когда затухание апериодической составляющей тока КЗ незначительно. Предложенный алгоритм позволяет создать быстродействующие защиты с временем идентификации КЗ в течении четверти периода частоты электрической сети. Можно создать алгоритмы всех защит, использующих токи и алгоритмы определения мест повреждений на линиях электропередачи. На точность определения мест КЗ современными ОМП существенное влияние оказывает наличие в токах КЗ апериодических составляющих. На точность выделения из токов КЗ синусоидальных составляющих предложенным алгоритмом не влияет насыщение магнитопроводов трансформаторов тока, по крайней мере, до 0,2 секунды.

Исключение апериодических составляющих из измеренных мгновенных значений токов КЗ позволяет повысить точность определения места КЗ на линии электропередачи. При двухстороннем определении места повреждения, в частном случае КЗ, можно воспользоваться уравнениями вычисления модуля напряжения на линии в прямой и обратной последовательности с двух сторон линии:

$$\left| \dot{U}_k \right| = ch(\gamma \cdot L \cdot k) \cdot \dot{U}_1 - Z_c \cdot sh(\gamma \cdot L \cdot k) \cdot \dot{I}_1 \quad (9)$$

$$\left| \dot{U}_n \right| = ch(\gamma \cdot L \cdot n) \cdot \dot{U}_2 - Z_c \cdot sh(\gamma \cdot L \cdot n) \cdot \dot{I}_2 \quad (10)$$

где $\left| \dot{U}_k \right|$ – модуль вычисляемого напряжения в точке линии, отстоящей на расстоянии k от начала линии, $\left| \dot{U}_n \right|$ – модуль вычисляемого напряжения в точке линии, отстоящей на расстоянии n от конца линии. Место короткого замыкания будет в точке, в которой вычисленные $\left| \dot{U}_k \right|$ и $\left| \dot{U}_n \right|$ будут равны.

На рисунке 5 иллюстрированы уравнения (8) и (8a). Однофазное КЗ находится на расстоянии 90 км от начала линии длиной 150 км. Прямые 1 и 2 соответствуют напряжениям прямой последовательности, 3 и 4 – напряжениям обратной последовательности.

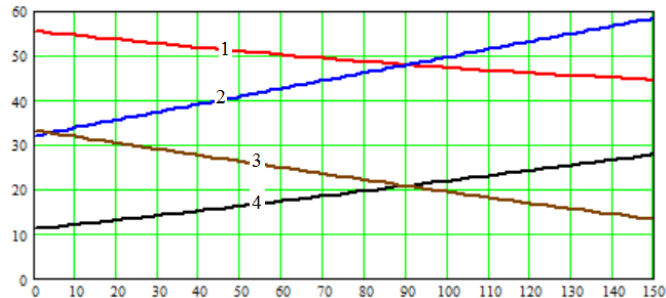


Рис. 5. Изменение рассчитанных напряжений согласно уравнениям (8) и (8a) при определении однофазного КЗ на расстоянии 90 км от начала линии длиной 150 км

Fig. 5. Variation of calculated voltages according to equations (9) and (9a) when determining a single-phase short-circuit at a distance of 90 km from the beginning of a 150 km long line

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

При разрыве одной фазы сумма токов прямой, обратной и нулевой последовательностей равна нулю. На рисунке 6 приведены зависимости этой суммы при однофазном КЗ, сопровождаемом обрывом фазы.

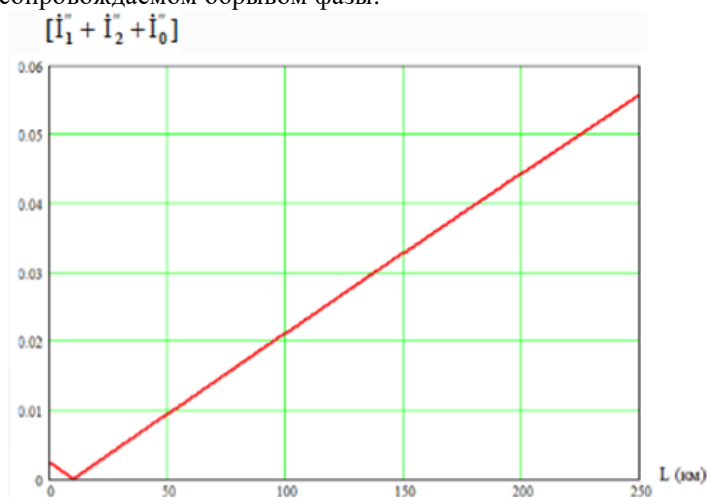


Рис. 6. Изменение величины суммы токов прямой, обратной и нулевой последовательностей при однофазном коротком замыкании, сопровождаемом обрывом фазы на расстоянии 10 км от начала линии. (длина линии 250 км)

Fig. 6. Variation of the sum of forward, reverse and zero-sequence currents in a single-phase short circuit accompanied by phase failure at a distance of 10 km from the beginning of the line. (line length 250 km)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Заключение (Conclusions)

1. Разработан алгоритм, позволяющий выбирать периодические составляющие токов короткого замыкания из токов, равных сумме периодической и аperiodической составляющих.
2. Алгоритм, использует всего четыре измерения мгновенных значений токов КЗ, разделенных интервалом дискретизации 0.625 мс, что позволяет не учитывать возможность насыщения магнитопроводов трансформаторов тока.
3. Алгоритм позволяет в любой момент, не охваченный сканированием («будущее» время), рассчитать токи прямой, обратной и нулевой последовательностей и любых их комбинаций, сопротивление, мощностей, используемых в релейной защите и аварийном управлении, измерив всего четыре величины мгновенных значений токов КЗ в пределах 2,0 - 2,5 мс.
4. Использование алгоритма повышает точность определения мест повреждений на линиях электропередачи.

Литература

1. Evans F.J., Wells G. Use of Sampling to Detect Transient Saturation in Protective Current Transformers // IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, vol. im-19, no 3, august 1970, pp. 144-147.
2. Haeg H., Forster M. Elektronischer Sammelschienenschutz // Brown Boveri Mitteilungen: Bd. 53, Nr 4/5/ 1965, pp. 326-339.
3. Iamandi A., et al. Distance Protection Scheme for a Digital Substation. In: 2020 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR), Cluj-Napoca, Romania, 2020 pp. 1-6. doi: 10.1109/AQTR49680.2020.9129913.
4. Li L., Fan H. and Yu J. Data sharing and distribution security protection strategy for the electric power industry. In 2021 4th International Conference on Advanced Electronic Materials, Computers and Software Engineering (AEMCSE), Changsha, China, 2021 pp. 96-101. doi: 10.1109/AEMCSE51986.2021.00027
5. Ninghui H., Haibin X., et al. Sequence Coordination of Power Network Protection Based on Fault Current Limiting Equipment Action. In 2020 International Conference on Urban Engineering and Management Science (ICUEMS), Zhuhai, China, 2020 pp. 278-282. doi: 10.1109/ICUEMS50872.2020.00067
6. Shunxin L., et al., Power mechanism and strategy of digital transformation in power grid industry - Take State Grid Jibei Electric Power Company Limited as an example. In 2020 International Conference on

Computer Science and Management Technology (ICCSMT), Shanghai, China, 2020 pp. 340-345. doi: 10.1109/ICCSMT51754.2020.00077

7. Булычев А. В., Васильев Д. С., Козлов Б. Н., Силанов Д. Н. Релейная защита в распределительных сетях 110/35/10 кВ в условиях цифровой трансформации электроэнергетических систем // Релейная защита и автоматизация. 2019. № 1(34). С. 71-77.

8. Бурянина Н.С., Васильева К.П., Королук Ю.Ф., Лесных Е.В., Суслов К.В. Определение места короткого замыкания на линиях электропередачи 110 кВ и выше по мгновенным значениям токов и напряжений // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2017. № 3-4. С. 117 – 128.

9. Бурянина Н.С., Королук Ю.Ф., Лесных Е.В. Способ определения мгновенных значений параметров (токов и напряжений) прямой и обратной последовательностей. Патент РФ на изобретение № 2016137597. 21.03.2018. Бюл. № 09. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41033283>

10. Коновалова, Е.В. О работе дифференциально-фазных защит в ЕНЭС // Релейная защита и автоматизация. 2013. №02. С. 21.

11. Кужеков С.Л., Нудельман Г.С. v2009. № 4. С. 12-19.

12. Куликов, А. Л. Методы совершенствования дифференциальной релейной защиты / А. Л. Куликов, А. А. Колесников // Библиотека электротехника. – 2021. – № 2(266). – С. 1-96.

13. Лоскутов, А. Б., Куликов А. Л., Илюшин П. В. От плана ГОЭЛРО к цифровизации электроэнергетического комплекса страны // Электричество. 2020. № 12. С. 14-30.

14. Румянцев Ю. В., Романюк Ф. А., Румянцев В. Ю., Новаш И. В. Реализация цифровых фильтров в микропроцессорных устройствах релейной защиты // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 5. С. 397-417.

15. Царев, Н. В., Пинчуков П. С. Классификация цифровых устройств релейной защиты и автоматики // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2019. Т. 1. С. 49-54.

Авторы публикации

Бурянина Надежда Сергеевна – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Электроснабжение» Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова.

Лесных Елена Владимировна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Физика, электротехника, диагностика и управление в технических системах» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Лесных Алексей Станиславович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрооборудование и автоматика» Сибирского государственного университета водного транспорта.

Сулов Константин Витальевич – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Электроснабжение и электротехника» Иркутского национального исследовательского технического университета, профессор кафедры «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии» Национального исследовательского университета «МЭИ».

Артемьева Майя Леонидовна – старший преподаватель кафедры «Общие дисциплины» Чукотского филиала Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова.

References

1. Evans F.J., Wells G. Use of Sampling to Detect Transient Saturation in Protective Current Transformers. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement. 1970;19(3):144-3. doi: 10.1109/TIM.1970.4313884

2. Haeg H., Forster M. Elektronischer Sammelschienenenschutz. Brown Boveri Mitteilungen. 1965;53(5, Pt 4):326-13.

3. Iamandi A., et al. Distance Protection Scheme for a Digital Substation. 2020 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR); 2020; Cluj-Napoca, Romania. 2020. pp. 1-6. doi: 10.1109/AQTR49680.2020.9129913.

4. Li L., Fan H. and Yu J. Data sharing and distribution security protection strategy for the electric power industry. In 2021 4th International Conference on Advanced Electronic Materials, Computers and Software Engineering (AEMCSE); 2021; Changsha, China. 2021. pp. 96-101. doi: 10.1109/AEMCSE51986.2021.00027

5. Ninghui H., Haibin X., et al. Sequence Coordination of Power Network Protection Based on Fault Current Limiting Equipment Action. In 2020 International Conference on Urban Engineering and

Management Science (ICUEMS); 2020; Zhuhai, China. 2020. pp. 278-282. doi: 10.1109/ICUEMS50872.2020.00067

6. Shunxin L., et al., *Power mechanism and strategy of digital transformation in power grid industry - Take State Grid Jibei Electric Power Company Limited as an example. In 2020 International Conference on Computer Science and Management Technology (ICCSMT)*; 2020; Shanghai, China. 2020 pp. 340-345. doi: 10.1109/ICCSMT51754.2020.00077

7. Bulychev A.V., Vasilev D.S., Kozlov V.N., et al. Relay protection in distribution networks 110/35/10 kV in the conditions of digital transformation of electric power systems. *Releynaya zashita i avtomatizaciya*. 2019; 34(1):71-77. (In Russ).

8. Burjanina N.S., Vasil'eva K.P., Koroljuk J.F., Lesnykh E.V., Suslov K.V. DEFINITION OF THE PLACE OF SHORT CIRCUITS ON POWER LINES OF 110 KV AND ABOVE ON INSTANTANEOUS VALUES OF CURRENTS AND VOLTAGES. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2017;19(3-4):107-118. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-3-4-107-118>

9. Buryanina NS, Korolyuk YuF, Lesnykh EV. Sposob opredeleniya mgnovennykh znacheniy parametrov (tokov i napryazheniy) pryamoy i obratnoy posledovatel'nostey. Patent RUS №2016137597. 03.21.2018. Byul. №09. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41033283>. (In Russ).

10. Konvalova, E.V. O rabote differentsialno-faznykh zashchit v ENES. *Releynaya zashita i avtomatizaciya*. 2013; 02:21. (In Russ).

11. Kuzhekov S.L., Nudelman G.S. Obespecheniye pravilnoy raboty mikroprotssessornykh ustroystv differentsialnoy zashchity pri nasyshchenii transformatorov toka. *Izvestiya VUZov «Elektromekhanika»*. 2009; 4:12-19. (In Russ).

12. Kulikov, A. L., Kolesnikov A.A. Method of improvement for differential relay. *Bibliotchnaya elektrotehnika*. 2021; 266(2):1-96. (In Russ).

13. Loskutov A. B., Kulikov A. L., Ilyushin P. V. From the GOELRO plan to digitalization of russia's electric power complex. *Electrichestvo*. 2020; 12:14-30. (In Russ). doi: 10.24160/0013-5380

14. Rumiantsev Yu.V., Romaniuk F.A., Rumiantsev V.Yu., Novash I.V. DIGITAL FILTERS IMPLEMENTATION IN MICROPROCESSOR-BASED RELAY PROTECTION. *ENERGETIKA. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*. 2016;59(5):397-417. (In Russ.) <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-5-397-417>

15. Tsarev, N.V., Pinchukov P.S. Klassifikatsiya tsifrovyykh ustroystv releynoy zashchity i avtomatiki // *Nauchno-tekhnicheskoye i ekonomicheskoye sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke*. 2019; 1:49-54. (In Russ).

Authors of the publication

Nadejda S. Buryanina – North Eastern Federal University, Yakutsk, Russia.

Elena V. Lesnykh – Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

Aleksey S. Lesnykh – Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russia

Konstantin V. Suslov – Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. National Research University MPEI, Moscow, Russia.

Maya L. Artemyeva – Chukotka branch of North Eastern Federal University, Anadyr, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.3 Электроэнергетика

Получено

20.11.2023 г.

Отредактировано

09.01.2024 г.

Принято

01.02.2024 г.