



ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ КЛАРК ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ

Куликов А.Л., Старшов И.С.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
г. Нижний Новгород, Россия
ivanstarsh@yandex.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Однофазные замыкания на землю остаются одними из самых часто встречающихся повреждений в распределительных электрических сетях с изолированной нейтралью. Серьезную опасность для электрооборудования энергосистемы представляют дуговые перемежающиеся однофазные замыкания на землю, в связи с переходными процессами, протекающими в сети при таких повреждениях. Длительное протекание токов однофазного замыкания на землю в кабельной линии вызывает нагрев и переход в междуфазное короткое замыкание. Разработка быстродействующей и селективной релейной защиты позволит предотвратить ущерб и обеспечит надёжное электроснабжение потребителей. **ЦЕЛЬ.** Для повышения быстродействия защиты применяется преобразование Кларк, позволяющее объединить мгновенные значения трех фазных токов для получения информационного признака повреждения. Необходима разработка пускового органа релейной защиты от однофазных замыканий на землю с использованием преобразования Кларк и определение свойств получившегося пускового органа. **МЕТОДЫ.** Программный комплекс Matlab с пакетом расширения Simulink был применён для имитационного моделирования осциллограмм токов в различных режимах электрической сети с изолированной нейтралью. Результаты моделирования позволили разработать пусковой орган защиты, использующий преобразование Кларк и обладающий повышенным быстродействием. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Разработана упрощенная структурно-функциональная схема пускового органа защиты от однофазных замыканий на землю. Проведено оценочное сравнение по чувствительности с используемой в сетях релейной защитой. Чувствительность разработанного органа защиты при дуговых перемежающихся однофазных замыканиях на землю превышает аналогичные существующие технические решения. **ВЫВОДЫ.** Результаты исследования перспективны для создания новой защиты от однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью, использующей преобразование Кларк.

Ключевые слова: защита от замыкания на землю; изолированная нейтраль; преобразование Кларк; дуговое перемежающееся однофазное замыкание на землю; однофазное замыкание на землю.

Для цитирования: Куликов А.Л., Старшов И.С. Применение преобразования Кларк для защиты от однофазных замыканий на землю // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 2. С. 122-133. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-2-122-133.

USING THE CLARKE TRANSFORM FOR PROTECTION AGAINST SINGLE- PHASE-TO-GROUND FAULTS

Kulikov A.L., Starshov I.S.

Nizhny Novgorod State Technical University R.E. Alekseev (NNSTU)
Nizhny Novgorod, Russia
ivanstarsh@yandex.ru

Abstract: *RELEVANCE.* Single-phase-to-ground faults remain one of the most common types of damage in distribution networks with isolated neutral. Arc-ing, intermittent single-phase-to-ground faults pose a serious threat to the power system's electrical equipment due to the transient processes occurring in the network during such faults. The prolonged flow of single-phase-to-ground fault currents in a cable line causes heating and can lead to a phase-to-phase short circuit. The development of high-speed and selective relay protection will prevent damage and ensure a reliable power supply to consumers. *PURPOSE.* To improve protection speed, the Clarke transform is applied, which combines the instantaneous values of the three phase currents to obtain an informational feature of a fault. It is necessary to develop a starting unit for single-phase-to-ground fault protection using the Clarke transform and to determine the properties of the resulting starting unit. *METHODS.* The Matlab software suite with the Simulink extension package was used for simulation modeling of current oscillograms under various operating conditions of an electrical network with an isolated neutral. The simulation results allowed for the development of a protection starting unit that utilizes the Clarke transform and features increased speed. *RESULTS.* A simplified structural and functional diagram of a starting unit for protection against single-phase-to-ground faults has been developed. A comparative sensitivity assessment was conducted with relay protection currently used in networks. The sensitivity of the developed protection unit during arc-ing intermittent single-phase-to-ground faults exceeds that of existing similar technical solutions. *CONCLUSIONS.* The research results are promising for creating new protection against single-phase-to-ground faults in networks with an isolated neutral, utilizing the Clarke transform.

Keywords: Earth fault protection; isolated neutral; Clarke transform; intermittent arcing single-phase-to-ground fault; single-phase-to-ground fault.

For citation: Kulikov A.L., Starshov I.S. Using the Clarke transform for protection against single-phase-to-ground faults. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (2): 122-133. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-2-122-133.

Введение (Introduction)

Преобладающее количество повреждений в электрических сетях с изолированным типом заземления нейтрали вызвано однофазными замыканиями на землю (ОЗЗ). Хотя электрическая сеть с изолированной нейтралью и сохраняет возможность обеспечить бесперебойное электроснабжение потребителей при ОЗЗ, существует угроза повреждения электрооборудования, травмирования людей. ОЗЗ может стать причиной межфазных коротких замыканий. Особенно опасны дуговые перемежающиеся ОЗЗ, так как сопровождаются перенапряжениями, вызванными происходящими в электрической сети переходными процессами. По указанным причинам, вопросу быстрого и селективного выявления ОЗЗ посвящено большое количество научных работ, и тема не теряет своей актуальности [1-3,6-18].

Одной из самых часто используемых в практике защит является токовая защита нулевой последовательности (ТЗНП) [2]. Принцип работы основан на контроле величины действующего значения тока нулевой последовательности с использованием специального трансформатора тока нулевой последовательности. Применение действующего значения тока снижает быстродействие защиты, поэтому в моменты дуговых перемежающихся ОЗЗ, когда ток нулевой последовательности скачкообразно возрастает и быстро затухает через небольшой промежуток времени, такой тип защиты не обеспечивает достаточной селективности и чувствительности.

Важным этапом развития ТЗНП стало интегрирование органа направления мощности нулевой последовательности для определения пути протекания тока нулевой последовательности, что улучшило свойства защиты, но не разрешило проблему обеспечения чувствительности в моменты появления переходных процессов, вызванных дуговыми перемежающимися ОЗЗ [2]. Возникла и новая проблема контроля цепей напряжения нулевой последовательности для правильной работы защиты.

На сегодняшний день развитие микропроцессорной техники позволяет использовать напряжение нулевой последовательности не только для определения направления мощности, но и для получения проводимостей нулевой последовательности [3] путем нахождения отношения действующей величины тока к напряжению нулевой последовательности. Такой показатель обеспечивает лучшую динамическую устойчивость при дуговых перемежающихся ОЗЗ, но сохраняет недостаток в виде

сниженного быстродействия.

Улучшить свойства защиты от ОЗЗ может переход от действующих значений токов к мгновенным значениям, объединение сразу нескольких информационных признаков в единый показатель [4]. Все эти свойства характерны для преобразования Кларк.

Своё активное применение преобразование находит, например, в теории управления электроприводами, так как удобно позволяет уменьшить размерность системы фазных токов электрического двигателя. Одним из возможных способов применения преобразования Кларк стала оценка качества электрической энергии [5], так как в трехфазной системе токов электрической системы с изолированной нейтралью приблизительно равномерное распределение нагрузки по фазам.

Цель исследования заключается в разработке алгоритма нового пускового органа релейной защиты от ОЗЗ для повышения ее быстродействия и чувствительности, а также проверке свойств пускового органа с использованием имитационного моделирования.

Научная значимость исследования состоит в анализе возможности применения преобразования Кларк для цели организации защиты от ОЗЗ.

Практическая значимость исследования заключается в возможности создания устройств релейной защиты от ОЗЗ на основе разработанного пускового органа в том числе многопараметрической защиты.

Материалы и методы (Materials and methods)

Рассмотрим схему замещения электрической сети с изолированной нейтралью в момент ОЗЗ (рис. 1), на которой изображены:

- повреждённое присоединение с местом ОЗЗ;
- неповреждённое присоединение, через которое протекает собственный емкостной ток линии;
- эквивалентированная сеть, представляющая собой совокупность емкостных проводимостей на землю всех участков электрической сети, неуказанных на схеме.

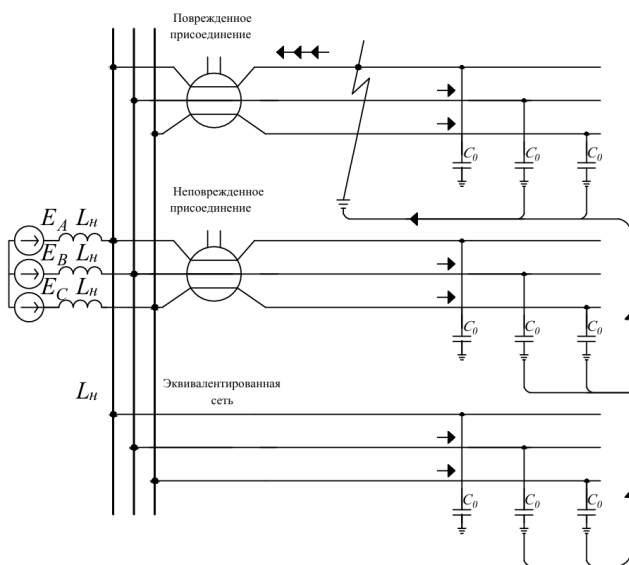


Рис. 1. Схема сети с изолированной нейтралью и контур протекания тока нулевой последовательности. Fig. 1. Network diagram with isolated neutral and zero-sequence current flow path.

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

В качестве положительного направления протекания токов принимаем направление из шин в линию.

В нормальном режиме через присоединение кабельной линии протекают индуктивные токи нагрузки, векторные диаграммы которых изображены на рис. 2 а. В связи с наличием в сети проводимости фаза-земля, в токе нагрузки присутствует и емкостная составляющая, векторные диаграммы емкостных токов в нормальном режиме приведены на рис. 2 б. Для каждой из фаз, индуктивные токи в линии отстают от фазных напряжений, а емкостные токи линии опережают фазные напряжения.



Рис. 2. Векторные диаграммы токов и напряжений кабельной линии в нормальном режиме. а) Напряжения и емкостные токи в нормальном режиме; б) Напряжения и индуктивные токи нагрузки в нормальном режиме

Fig. 2. Vector diagrams of currents and voltages for a cable line under normal operating conditions. a) Voltages and capacitive currents under normal operating conditions; b) Voltages and load inductive currents under normal operating conditions

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

При ОЗЗ происходит смещение нейтрали относительно центра треугольника напряжений, возникает напряжение нулевой последовательности [15]. Изменения, происходящие с фазными токами исследуемых присоединений при ОЗЗ в фазе А, приведены на (рис. 3).

Для неповреждённого присоединения (рис. 3 а), ток нулевой последовательности $3I_0$ состоит из суммы емкостных токов фаз $I_{бемк}$ и $I_{сэмк}$, опережает $3U_0$ на 90° . Как видно из рис. 3 а, вектор тока нулевой последовательности совпадает по направлению с вектором индуктивного тока фазы А (I_A).

Для повреждённого присоединения (рис. 3 б), ток $3I_0$ состоит из суммарного емкостного тока всей сети ($-I_{сз}$) и тока собственного присоединения ($I_{ссоб}$). Как видно из рис. 3 б ток отстаёт от напряжения $3U_0$ на 90° . Направление вектора $3I_0$ противоположно вектору тока I_A .

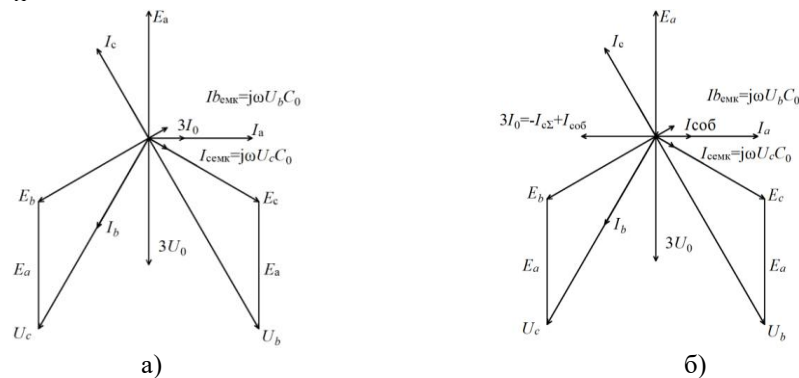


Рис. 3. Векторные диаграммы токов и напряжений кабельной линии при ОЗЗ. а) Напряжения и емкостные токи при ОЗЗ; б) Напряжения и индуктивные токи нагрузки при ОЗЗ

Fig. 3. Vector diagrams of currents and voltages for a cable line during a single line-to-ground fault. a) Voltages and capacitive currents during the fault; b) Voltages and inductive load currents during the fault

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

Таким образом, индуктивные токи нагрузки линии и емкостные токи замыкания на землю могут совпадать по направлению или могут различаться по направлению. Их результирующее значение вызывает искажения величины фазных токов, протекающих через присоединение (I_a, I_b, I_c). Для оценки глубины искажения синусоидальной формы токов целесообразно использовать преобразование Кларк.

Для реализации пускового органа релейной защиты используются мгновенные значения трёх фазных токов, защищаемого присоединения. В дискретной форме каждый из токов можно записать следующим образом:

$$ia(n) = I_a \sin(2\pi fnt_\delta + \varphi); \quad (1)$$

$$ib(n) = I_b \sin(2\pi fnt_\delta + \varphi - \frac{2\pi}{3}); \quad (2)$$

$$ic(n) = I_c \sin(2\pi fnt_\delta + \varphi + \frac{2\pi}{3}), \quad (3)$$

где I_a, I_b, I_c – амплитудные значения каждой из синусоидальных составляющих напряжения;

n – дискретный момент времени;

t_0 – интервал дискретизации;

φ – начальная фаза;

f – промышленная частота.

Дискретные токи можно объединить в единый признак, найдя пространственный вектор (ПВ) [5]. Для приведённой выше трехфазной системы дискретных токов $i_a(n), i_b(n), i_c(n)$ формула ПВ задается следующим образом:

$$is(n) = \frac{2}{3}(i_a(n) + a \cdot i_b(n) + a^2 i_c(n)), \quad (4)$$

где $a = j \cdot \frac{2\pi}{3}$.

В комплексной форме записи ПВ может быть представлен как:

$$is(n) = \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\right)[i\alpha(n) + j \cdot i\beta(n)] = A(n) + j \cdot B(n), \quad (5)$$

где реальная составляющая $i\alpha(n)$ и мнимая составляющая $j \cdot i\beta(n)$ являются компонентами преобразования Кларк:

$$\begin{pmatrix} i\alpha(n) \\ i\beta(n) \end{pmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_a(n) \\ i_b(n) \\ i_c(n) \end{pmatrix}$$

Вектор прямого вращения A и вектор обратного вращения B , входящие в состав выражения (5) можно выразить путём следующих преобразований:

$$\begin{aligned} i\alpha(n) &= \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}(i_a(n) - \frac{1}{2} \cdot i_b(n) - \frac{1}{2} i_c(n)) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}(I_a \sin(x + \varphi) - \frac{1}{2} \cdot I_b \sin(x - \frac{2\pi}{3}) - \frac{1}{2} I_c \sin(x + \frac{2\pi}{3})) = \\ &= \frac{1}{2} I_c (\sin(x) \cos(\frac{2\pi}{3}) + \sin(\frac{2\pi}{3}) \cos(x)) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}((I_a + \frac{I_b + I_c}{4}) \sin(x) + (\frac{\sqrt{3}I_b}{4} - \frac{\sqrt{3}I_c}{4}) \cos(x)) = \\ &= \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}((I_a + \frac{I_b + I_c}{4})(\frac{e^{jx} - e^{-jx}}{2j})); \end{aligned} \quad (6)$$

$$i\beta(n) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_b(n) - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_c(n)) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}((\frac{\sqrt{3}(I_b - I_c)}{4})(\frac{e^{jx} - e^{-jx}}{2j}) + (\frac{3(I_b - I_c)}{4})(\frac{e^{jx} + e^{-jx}}{2})), \quad (7)$$

где $x = 2\pi fnt_0 + \varphi$.

После подстановки выражений (6) и (7) в формулу (5), определяются компоненты вращения прямой последовательности A и обратной последовательности B , получаемые согласно равенствам:

$$A = \frac{-j \cdot \sqrt{6}}{6}(I_a + I_b + I_c); \quad (8)$$

$$B = \frac{\sqrt{2}}{4}(I_b - I_c) + \frac{j\sqrt{6}}{12}(2I_a - I_b - I_c). \quad (9)$$

Для реализации защиты можно применить величину N , определяемую выражением (10):

$$N = \left| \frac{B}{A^*} \right| = \left| \frac{B}{A} \right|, \quad (10)$$

где A^* – сопряженный комплекс вектора прямой последовательности.

В качестве метода исследования использовалось имитационное моделирование распределительной сети, что позволило получить статистические данные о токах и напряжениях при ОЗЗ.

В ходе работы применена модель, подробно описанная в источниках. [7-11]. Модель реализована в *SimPowerSystems* и *Simulink*, и состоит из кабельной сети с активно-индуктивной нагрузкой. Схема замещения модели представлена на рис. 4.

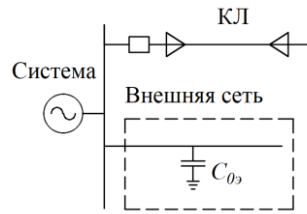


Рис. 4 Однолинейная схема замещения Fig. 4. Single-line equivalent circuit of a network with isolated (ungrounded) neutral

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

Параметры сети (рис. 4) представлены в таблицах 1, 2 и 3.

Таблица 1
Table 1

Параметры эквивалентированной части системы
Parameters of the equivalent part of the system

Диапазон значений	C_m , Ф	C_0 , Ф	R_m , Ом	R_0 , Ом	$R_{1э}$, Ом	$L_{1э}$, Гн	$R_{0э}$, Ом	$L_{0э}$, Гн
Начальное значение	$7 \cdot 10^{-7}$	$2,1 \cdot 10^{-6}$	$6,98 \cdot 10^4$	$1,51 \cdot 10^4$	$3,29 \cdot 10^{-1}$	$1,13 \cdot 10^{-4}$	$7,86 \cdot 10^{-1}$	$4,03 \cdot 10^{-4}$
Конечное значение	$1,44 \cdot 10^{-6}$	$4,34 \cdot 10^{-6}$	$3,38 \cdot 10^4$	$7,34 \cdot 10^3$	$3,29 \cdot 10^{-1}$	$1,13 \cdot 10^{-4}$	$7,86 \cdot 10^{-1}$	$4,03 \cdot 10^{-4}$

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

Таблица 2
Table 2

Параметры кабельных линий
Parameters of cable lines

Сечение участка	R_1 , Ом/км	R_0 , Ом/км	L_1 , Гн/км	L_0 , Гн/км	C_1 , Ф/км	C_0 , Ф/км
Характеристики линии						
3x240	0,549	1,31	$1,879 \cdot 10^{-4}$	$6,720 \cdot 10^{-4}$	$2,919 \cdot 10^{-7}$	$9,719 \cdot 10^{-8}$
3x95	0,405	2,1	$1,815 \cdot 10^{-4}$	$2,525 \cdot 10^{-3}$	$2,919 \cdot 10^{-7}$	$9,719 \cdot 10^{-8}$
3x50	0,769	2,6	$1,911 \cdot 10^{-4}$	$3,067 \cdot 10^{-3}$	$2,919 \cdot 10^{-7}$	$9,719 \cdot 10^{-8}$

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

Таблица 3
Table 3

Параметры нагрузки
Load Parameters

Диапазон значений	Активная мощность, Вт	Реактивная мощность (индуктивная нагрузка), ВАР
Начальное значение	$896 \cdot 10^3$	$672 \cdot 10^3$
Конечное значение	0	0

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

Обобщённая блок-схема процесса исследования с применением имитационной модели (рис. 4) представлена на рисунке 5.

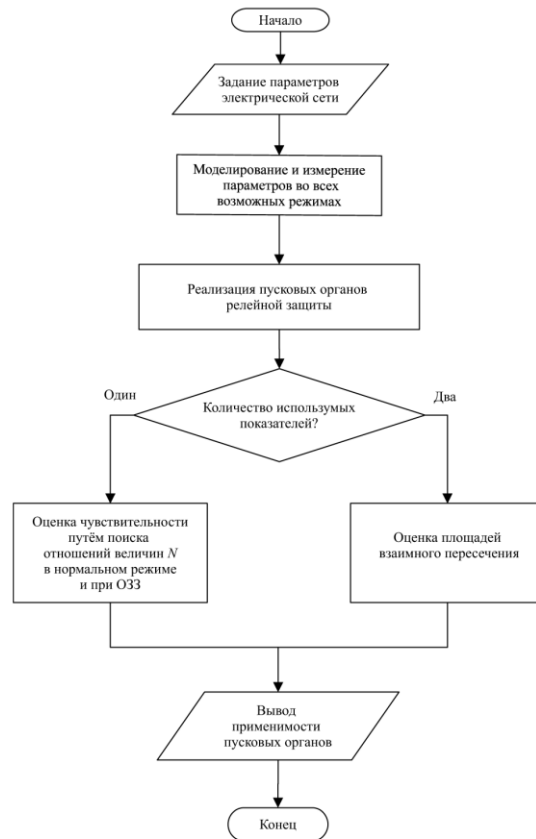


Рис. 5 Обобщённая блок-схема процесса исследования имитационной модели. *Fig. 5 A flowchart of the simulation model research process.*

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

Результаты (Results)

Главной частью релейной защиты является пусковой орган. Рассмотрим защитные свойства пускового органа, контролирующего скалярную величину N (рис. 6.)



Рис. 6 Упрощенная структурно-функциональная схема пускового органа защиты на основе вектора N *Fig. 6. Simplified functional block diagram of the starting element based on vector N*

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

Основные составляющие схемного решения (рис. 6) включают блоки:

- преобразования Кларк, на вход которого поступают мгновенные значения фазных токов защищаемого присоединения. Блок вычисляет величину вектора N по выражениям (8),(9) и (10);
- определения максимального значения за период, обеспечивающий устойчивое срабатывание пускового органа в моменты быстро протекающих переходных процессов при перемежающихся ОЗЗ;
- сравнения с уставкой, в котором сопоставляется текущее значение N с заданным уставочным значением. Блок выдает сигнал «откл.» при превышении уставочного значения.

Результаты имитационного моделирования дугового перемежающегося замыкания на землю в электрической сети на разных присоединениях (собственное и соседнее) позволили провести сравнение осциллограмм для выявления ОЗЗ на основе измерения величины N . В ходе исследований использована модель наиболее опасной разновидности дугового перемежающегося ОЗЗ, в котором бестоковые паузы между повторными пробоями изоляции минимальны, что соответствует теории Петерса и Слепяна [19].

Осциллограммы представлены на рис.7. Они наглядно показывают изменение величины N в режиме ОЗЗ на собственной линии и в нормальном режиме, а также при ОЗЗ на соседнем присоединении.

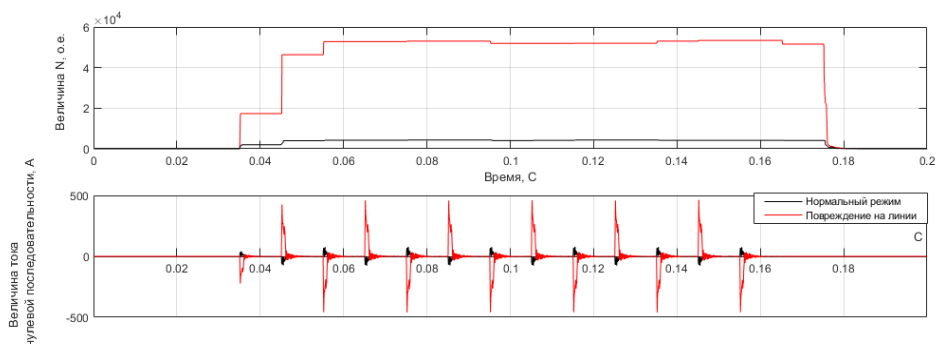


Рис. 7. Осциллограммы, иллюстрирующие изменение величины тока нулевой последовательности и N в двух режимах

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

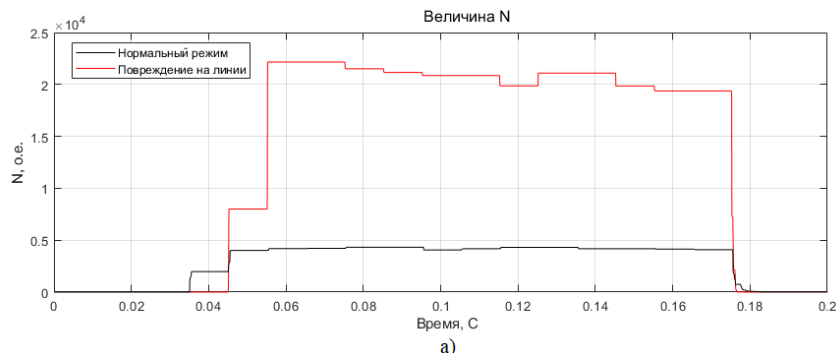
Из рисунка 7 видно, в обоих режимах (ОЗЗ на собственном и ОЗЗ соседнем присоединении) значение N (красная линия) начинает возрастать при протекании тока нулевой последовательности, а через некоторое время N достигает своего максимального значения.

Максимальная величина N при ОЗЗ на собственном присоединении существенно больше, чем при ОЗЗ на соседнем присоединении. Это позволяет найти величину уставочного значения N , при превышении которого будет происходить срабатывание пускового органа релейной защиты. Принцип задания уставки N заключается в отстройке от максимально возможного значения (для всех возможных режимов) величины N при повреждении на соседнем присоединении, чтобы предотвратить излишнее срабатывания релейной защиты и обеспечить селективность.

Важным свойством релейной защиты является связанная с ее чувствительностью возможность распознавать повреждение. Для разрабатываемого пускового органа нормальный режим отличается от ОЗЗ величиной N . Для ТЗНП нормальный режим отличается от ОЗЗ величиной действующего значения тока нулевой последовательности. Таким образом, целесообразно сопоставить отношение указанных характеризующих величин для различных защит в различных режимах.

Для одного и того же опыта дугового перемежающегося ОЗЗ (рис 8) найдём величину, характеризующую распознающую способность ТЗНП и разработанного пускового органа (рис.6). При этом рассчитаем отношение соответствующей максимальной величины в режиме ОЗЗ на линии к аналогичной величине в нормальном режиме.

С целью учёта влияния нагрузки на значение N нормальный режим (рис. 8) был представлен осциллограммой в условиях наибольшей нагрузки собственного присоединения и при максимально возможном емкостном токе ОЗЗ, поскольку в этом случае N достигает максимального значения. Осциллограмма дугового перемежающегося ОЗЗ приведена в режиме холостого хода собственного присоединения и минимальном токе ОЗЗ.



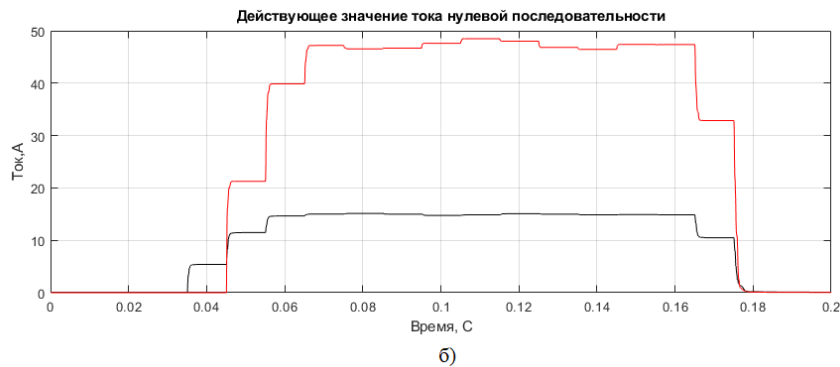


Рис. 8. Зависимости от времени при нормальном режиме и ОЗЗ для информационного признака N (а) и действующего значения тока нулевой последовательности (б)

Fig. 8. Time dependences under normal conditions and during SGF for the information attribute N (a) and the RMS value of the zero-sequence current (b)

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

Отметим, что сопоставление для одного и того же опыта величин, характеризующих распознающую способность ТЗНП и предлагаемой защиты от ОЗЗ, позволяет сравнить их по чувствительности.

Анализ рисунка 8 показывает:

Максимальное действующее значение тока нулевой последовательности (красная линия на рис. 8.б) превышает минимальное действующее значение тока нулевой последовательности (черная линия на рис.8.б) в 3,3 раза;

Максимальное значение параметра N (красная линия на рис.8.а) превышает минимальное значение параметра N (черная линия на рис.8.а) в 5,2 раза.

Таким образом, можно сделать вывод, что разработанный пусковой орган в режиме дугового перемежающегося ОЗЗ чувствительнее ТЗНП в 1,6 раза.

Обсуждение (Discussions)

– в ходе исследования установлена целесообразность применения в релейной защите пускового органа (рис.б), селективно различающего нормальный режим и режим дугового перемежающегося ОЗЗ на защищаемом присоединении с использованием преобразования Кларк;

– опыты имитационного моделирования показали, что пусковой орган релейной защиты (рис.б) обладает в 1,6 раза большей чувствительностью по сравнению с используемой в эксплуатационной практике защитой ТЗНП при дуговых перемежающихся ОЗЗ. Это объясняется свойством преобразования Кларк объединять несколько информационных показателей в один, а также применением мгновенных величин токов вместо исторически используемых действующих значений;

– разработанный пусковой орган предлагается применять в составе многопараметрической релейной защиты в качестве дополнительного для распознавания в сети с изолированной нейтралью режима дугового перемежающегося ОЗЗ.

Заключение (Conclusions)

1. Для улучшения распознающих свойств релейной защиты от ОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью целесообразно использовать в качестве информационного признака величину, представляющую собой модуль отношения комплекса обратной последовательности к сопряженному комплексу прямой последовательности преобразования Кларк системы трехфазных токов.

2. Анализ результатов имитационного моделирования кабельной сети 10 кВ показал, что разработанный пусковой орган с использованием преобразования Кларк обладает в 1,6 раза большей чувствительностью по сравнению с применяемой на практике ТЗНП при дуговых перемежающихся замыканиях на землю.

3. Реализация предложенного пускового органа планируется в составе микропроцессорного устройства многопараметрической релейной защиты от ОЗЗ.

Литература

1. Федотов А.И., Ахметвалеева Л.В., Басыров Р.Ш., и др. Нормирование амплитуды высших гармоник при определении фидера с однофазным замыканием на землю //

Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. №1. С.58-68.

2. Шуин В.А., Шадрикова Т.Ю., Кузьмина Н.В., и др. Многопараметрическая токовая защита от замыканий на землю в сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью // Вестник ИГЭУ. 2025. №1. С. 40-46.

3. Шуин В.А., Воробьева Е.А., Добрягина О.А., и др. Способ повышения эффективности функционирования адмитансной защиты от замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью // Вестник ИГЭУ. 2018. №4. С.58-68.

4. Куликов А.Л., Мисриханов М.Ш. Введение в методы цифровой релейной защиты высоковольтных ЛЭП. Учеб. пособие. –М.: Энергоатомиздат, 2007. –198 с.

5. Куликов А.Л., Севостьянов А.А., Ильюшин П.В. Оценка искажений напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий // Электричество. 2024 №5. С. 32-48.

6. Федотов А.И., Вагапов Г.В., Абдуллазянов А.Ф., и др. Цифровая система мониторинга повреждений на линиях электропередачи // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021; Т.23. №1. С.146-155.

7. Шуин В.А. Начальные фазовые соотношения электрических величин переходного процесса при замыканиях на землю в кабельных сетях 6-10 кВ // Электричество. 1991, № 10. С.58-61.

8. Шуин В.А., Кутумов Ю.Д., Кузьмина Н.В., и др. Моделирование кабельных линий напряжением 6–10 кВ при расчетах переходных процессов при замыканиях на землю // Вестник ИГЭУ. 2021. №5. С. 30-40.

9. Куликов А.Л., Старшов И.С. Исследование диагностических параметров режима однофазных замыканий на землю в электросетях 10 кВ // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2025. Т.27 №4. С.42-55.

10. Воробьева Е.А., Шуин В.А. Анализ достоверности эквивалентных моделей кабельных сетей 6-10 кВ для расчета переходных процессов при однофазных замыканиях на землю // Материалы международной научно-технической конференции: (XVIII Бенардосовские чтения); 27–29 мая 2015 г., Иваново. Иваново: ИГЭУ. С. 456–460.

11. Воробьева Е.А., Шуин В.А. Оценка точности эквивалентных моделей кабельных сетей 6 - 10 кВ для расчета переходных процессов при однофазных замыканиях на землю // Труды VI международной научно-технической конференции. Том 2. 09–13 ноября 2015 г., Иваново. Иваново: ИГЭУ. С. 63–66.

12. Achitavev A.A., Suslov K.V., Volkova I.O., et al. Development of an algorithm for identifying single-phase ground fault conditions in cable and overhead lines in the networks with isolated neutral // Energy Reports. 2023. Vol. 9. pp. 1079-1086.

13. Toader D., Solea C., Vesa D., et al. Analysis of the possibilities of selective detection of a single line-to-ground fault in a medium voltage network with isolated neutral // Energies. 2021. Vol. 14. N21. pp. 7019.

14. Kachesov V., Lebedev A., Kitova E. Monitoring in 6–35 kV power networks, location of single-phase ground fault and detection of fault feeder // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2023. Vol. 152. pp. 109271-109271.

15. Шуин В.А., Гусенков А.В. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2001. 104 с.

16. Kuliński K., Heyduk A. Ground fault in medium-voltage power networks with an isolated neutral point: spectral and wavelet analysis of selected cases in an example industrial network modeled in the atp-empt package // Energies. 2024. Vol. 17. N 7. pp. 1532.

17. Борухман, В.А. Об эксплуатации селективных защит от замыканий на землю в сетях 6-10 кВ и мероприятиях по их совершенствованию // Энергетик. 2000, № 1. С. 20–22.

18. Maksimova M.N., Antonov V.I., Soldatov A.V., et al. Conversion of intermittent arc fault currents to information signals for phase-to-ground fault protection // Power Technology and Engineering. 2022. Vol. 56. N2. pp. 290-294.

19. Лихачёв Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. М.: Энергия, 1971. 152 с.

Авторы публикации

Куликов Александр Леонидович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» Нижегородского государственного технического университета (НГТУ) им. Р.Е. Алексеева. E-mail: inventor61@mail.ru.

Старшов Иван Сергеевич – аспирант Нижегородского государственного технического университета (НГТУ) им. Р.Е. Алексеева. E-mail: ivanstarsh@yandex.ru.

References

1. Fedotov A.I., Akhmetvaleeva L.V., Basyrov R.S., et al. Rating of amplitudes of high harmonics in determining feeder with single-phase ground fault. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020; 22(1):58-68. (In Russ.) doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-1-58-68
2. Shuin V.A., Shadrikova T.YU., Kuz'mina N.V., et al. Mnogoparametricheskaya tokovaya zashchita ot zamykaniy na zemlyu v setyakh 6–10 kV s izolirovannoi neutral'yu// *Vestnik IGEU*. 2025. 1:40–46. (In Russ). doi: 10.17588/2072-2672.2018.4.020-030
3. Shuin V.A., Vorobyova E.A., Dobryagina O.A., et al. A way to increase the operating efficiency of admittance earth fault protection in 6–10 kV cable networks with isolated neutral. *Vestnik IGEU*. 2018; 4:20–22. (In Russ). doi: 10.17588/2072-2672.2018.4.020-030
4. Kulikov A.L., Misrikhanov M.Sh. *Vvedenie v metody tsifrovoy releinoi zashchity vysokovolnykh LEP*. Moscow: NTF «Energoatomizdat», 2007. (In Russ).
5. Kulikov A.L., Sevost'yanov A.A., Il'yushin P.V. Assessment of Voltage Distortions in Power Supply Systems of Industrial Enterprises. *Elektrichestvo*. 2024; 5:32–48. (In Russ). doi:10.24160/0013-5380-2024-5-32-48
6. Fedotov A.I., Vagapov G.V., Abdullazyanov A.F., et al. Digital power lines faults monitoring system. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(1):146-155. (In Russ.) https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-1-146-155
7. Shuin V.A. Nachal'nye fazovye sootnosheniya elektricheskikh velichin perekhodnogo protsessa pri zamykaniyakh na zemlyu v kabel'nykh setyakh 6-10 kV. *Elektrichestvo*. 1991;10:58-61.
8. Shuin V.A., Kutumov Yu.D., Kuzmina N.V., et al. Simulation study of 6–10 kV cable lines for transient processes calculation during earth faults. *Vestnik IGEU*. 2021; 5:30-40. (In Russ). doi: 10.17588/2072-2672.2021.5.030-040
9. Kulikov A.L., Starshov I.S. Study of mode recognition in 10 kV cable networks for organizing protection against single-phase ground faults. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025;27(4):42-55. (In Russ.). doi:10.30724/1998-9903-2025-27-4-42-55
10. Vorobyova E.A., Shuin V.A. Analiz dostovernosti ekvivalentnykh modelei kabel'nykh setei 6-10 kV dlya rascheta perekhodnykh protsessov pri odnofaznykh zamykaniyakh na zemlyu. In: *Mezhdunarodnyi nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya: (XVIII Benardosovskie chteniya)*; 27–29 May 2015; Ivanovo, Russia. Ivanovo Publ.,2015. pp.456–460. (In Russ).
11. Vorobyova E.A., Shuin V.A. Otsenka tochnosti ekvivalentnykh modelei kabel'nykh setei 6 - 10 kV dlya rascheta perekhodnykh protsessov pri odnofaznykh zamykaniyakh na zemlyu In: *VI mezhdunarodno nauchnaya-tekhnicheskaya konferentsiya*. Tom 2; 09–13 Nov 2015; Ivanovo, Russia. Ivanovo Publ.,2015. pp.63–66. (In Russ).
12. Achitaev A.A., Suslov K.V., Volkova I.O., et al. Development of an algorithm for identifying single-phase ground fault conditions in cable and overhead lines in the networks with isolated neutral. *Energy Reports*. 2023;9:1079-1086. doi:10.1016/j.egy.2023.01.046
13. Toader D., Solea C., Vesa D., et al. Analysis of the possibilities of selective detection of a single line-to-ground fault in a medium voltage network with isolated neutral. *Energies*. 2021;14(21):7019. doi:10.3390/en14217019
14. Kachesov V., Lebedev A., Kitova E. Monitoring in 6–35 kV power networks, location of single-phase ground fault and detection of fault feeder. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2023;152:109271-109271. doi:10.1016/j.ijepes.2023.109271
15. Shuin V.A., Gusenkov A.V. *Zashchity ot zamykaniy na zemlyu v elektricheskikh setyakh 6–10 kV*. Moscow: NTF «Energoprogress», 2001. (In Russ).
16. Kuliński K., Heyduk A. Ground fault in medium-voltage power networks with an isolated neutral point: spectral and wavelet analysis of selected cases in an example industrial network modeled in the atp-empt package. *Energies*. 2024;17(7):1532. doi:10.3390/en17071532
17. Borukhman, V.A. Ob ekspluatatsii selektivnykh zashchit ot zamykaniy na zemlyu v setyakh 6-10 kV i meropriyatiyakh po ikh sovershenstvovaniyu. *Energetik*. 2000; 1:20–22. (In Russ).
18. Maksimova M.N., Antonov V.I., Soldatov A.V., et al. Conversion of intermittent arc fault currents to information signals for phase-to-ground fault protection. *Power Technology and*

Authors of the publication

Alexander L. Kulikov – Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev (NNSTU).

Ivan S. Starshov – Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev (NNSTU).

Шифр научной специальности: 2.4.3. Электроэнергетика.

Получено **20.12.2025 г.**

Отредактировано **18.02.2026 г.**

Принято **17.03.2026 г.**