



ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В ЭЛЕКТРОСЕТЯХ 10 КВ

Куликов А.Л., Старшов И.С.

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

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Распределительные электрические сети обладают наибольшей протяженностью в энергосистеме России, при этом самым распространённым типом повреждения в них является однофазное замыкание на землю. Селективное выявление повреждённой кабельной линии поможет избежать перетекания однофазного замыкания на землю в двухфазное и трёхфазное, что повысит надёжность электроснабжения потребителей. *ЦЕЛЬ.* Многопараметрический способ защиты от однофазных замыканий на землю использует несколько параметров электрических величин для определения режима сети, что позволяет сделать защиту селективной и более чувствительной. Разные параметры электрических величин могут представлять различную ценность для задачи распознавания режима. *Целью исследования* является изучение параметров токов и напряжений, которые могут быть использованы для релейной защиты от однофазных замыканий на землю, а также анализ возможности распознавания режима сети по различным информационным параметрам. *МЕТОДЫ.* Для получения статистики о возможных режимах использовалось имитационное моделирование кабельной сети 10 кВ в программном комплексе Matlab в пакете расширения Simulink. Полученные в результате моделирования значения токов и напряжений нулевой последовательности обрабатывались с применением дискретного преобразования Фурье с целью фильтрации гармоник и получения их квадратурных составляющих. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Предложены упрощённые структурно-функциональные схемы пусковых органов защиты от однофазных замыканий на землю. Установлено, что зависимости параметров электрических величин на графиках отображают области, различные для внутренних и внешних установившихся однофазных замыканий на землю и дуговых перемежающихся однофазных замыканий на землю. Дополнительно выявлено, что области существования различных режимов имеют взаимные пересечения. *ВЫВОДЫ.* Результаты исследования могут быть использованы для реализации многопараметрической защиты в распределительных сетях 6–35 кВ.

Ключевые слова: защита от замыкания на землю; изолированная нейтраль; многопараметрическая защита; дискретное преобразование Фурье; дуговое перемежающееся однофазное замыкание на землю; однофазное замыкание на землю; распознавание режима.

Для цитирования: 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. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-42-55.

STUDY OF MODE RECOGNITION IN 10 KV CABLE NETWORKS FOR ORGANIZING PROTECTION AGAINST SINGLE-PHASE 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.* Distribution networks account for the largest share of Russia's power grid. The most common fault type in these networks is a single-phase ground fault. Selective identification of the faulty cable line can prevent its escalation into a three-phase fault, improving power supply reliability. *PURPOSE.* A multiparameter method of ground fault protection uses several electrical quantities to determine the network mode. This method makes the protection selective and more sensitive. Different electrical quantities are of different value for the mode recognition task. The goal of the research is to study the parameters of current and voltage that are used for relay protection. Investigation of the ability to recognize network mode based on this parameters. *METHODS.* We obtained statistics by using simulation modeling of the cable network in the Matlab software package in the Simulink expansion package in all possible modes. And then we used discrete Fourier transform of the full period to obtain filtered harmonics and quadrature components of the values of zero-sequence currents and voltages. *RESULTS.* The article describes the block and functional diagrams of measuring elements that uses the dependencies of electrical quantities are proposed. The article determines the areas formed by electrical quantities on the graph in different modes such as internal and external steady-state single-phase ground faults and arc intermittent single-phase ground faults. The graph consists of the dependence of two electrical quantities. It was also revealed that the areas of different modes have mutual intersections. *CONCLUSIONS.* The results of the study are suitable for the implementation of multiparameter protection.

Keywords: *ground fault protection; isolated neutral; multiparameter protection; discrete Fourier transform; intermittent arc single-phase ground fault; single-phase ground fault; mode recognition.*

For citation: 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. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-42-55.

Введение (Introduction)

Проблемы защит от замыканий на землю (ОЗЗ) в сетях 6–35 кВ в России обуславливается историческим развитием сетей указанного класса напряжения в первой половине XX века. В целях обеспечения бесперебойности электроснабжения активно применялись сети с изолированной нейтралью, что позволяло сохранять в работе электроустановки потребителей при возникновении ОЗЗ.

Однако длительная работа кабельных распределительных сетей 6–10 кВ при ОЗЗ недопустима, из-за риска их перехода в многофазные короткие замыкания. Несмотря на большое количество работ [1-15], связанных с реализацией защит от ОЗЗ, проблема распознавания режимов распределительных сетей с изолированной нейтралью при различных ОЗЗ остается актуальной.

Наибольшее распространение получили токовые направленные и ненаправленные защиты нулевой последовательности, используемые в сетях с изолированной нейтралью. Недостатком токовой ненаправленной защиты нулевой последовательности (ТЗНП) является ограниченная селективность и чувствительность в режиме дуговых перемежающихся однофазных замыкания на землю (ДПОЗЗ) [6, 7]. Ненаправленные защиты могут применяться не на всех присоединениях, так как существует ограничение по собственному емкостному току присоединения. Поэтому используются токовые направленные защиты нулевой последовательности, имеющие меньшую эксплуатационную надёжность [8]. Основной недостаток защит, использующих проводимость нулевой последовательности, состоит в их неустойчивости при дуговых ОЗЗ, что уменьшает чувствительность и область их применения [9].

В эксплуатационной практике распределительных электрических сетей также применяются защиты, основанные на контроле высших гармоник в токе нулевой последовательности. Но на их эффективность сильное влияние оказывают стабильность состава и уровень высших гармоник в токе нулевой последовательности [7, 15].

Таким образом, существующие решения защит от ОЗЗ имеют ряд недостатков таких, как ограничения по области применения, а также в некоторых случаях недостаточные чувствительность и селективность при дуговых перемежающихся замыканиях на землю.

Следует отметить, что каждая из защит использует лишь один информативный параметр токов (напряжений) для выявления ОЗЗ. Для улучшения характеристик защиты

предлагается одновременное использование нескольких параметров, то есть переход к многопараметрической защите. Причем, некоторые параметры обладают большей информативностью для распознавания режима распределительной сети, что должно быть учтено в логике защиты при ее технической реализации. Целесообразно использование имитационного моделирования сложных переходных процессов, возникающих в результате различных видов ОЗЗ в распределительной сети, с последующим накоплением и анализом данных для распознавания ее режимов.

Целью статьи является исследование распознаваемости режимов в условиях различных ОЗЗ и определение информативности отдельных признаков, характеризующих ОЗЗ.

Научная значимость исследования состоит в анализе параметров электрических величин, пригодных для распознавания режима распределительной сети при ОЗЗ. Практическая значимость исследования заключается в том, что в дальнейшем эти параметры могут быть использованы для организации многопараметрической защиты, которая перспективна при реализации в составе микропроцессорного устройства релейной защиты сетей 6–35 кВ.

Материалы и методы (Materials and methods)

Исследование проводилось с использованием имитационного моделирования кабельной сети 10 кВ. Модель реализована в программном комплексе *Matlab* в пакете расширения *Simulink*.

При ОЗЗ в кабельной сети возникает сложный переходный процесс, который можно разделить на две стадии, связанные с разрядом емкостей поврежденной фазы на землю, сопровождающийся перезарядом междуфазных емкостей, и зарядом емкостей неповрежденных фаз соответственно. Параметры основных частотных составляющих (зарядной и разрядной) определяются практически только суммарными емкостями и проводимостями фаз сети на землю и между фазами неповрежденной части сети, параметрами поврежденной линии на участке от шин до точки ОЗЗ и переходным сопротивлением в месте повреждения [10]. На величину токов в установившемся режиме в основном влияют емкости фаз сети на землю [11].

Формирование имитационной модели требует некоторых упрощений, так как реальная кабельная сеть содержит множество линий. Использование для всех линий модели с распределенными параметрами, приведет к решению систем дифференциальных уравнений высокого порядка и потребует длительных расчетов, а также большой вычислительной мощности. Для уменьшения количества расчетов имитационная модель максимально упрощается, путём представления кабельной сети как одного элемента, а исследуемого кабельного присоединения, как кабельной линии с распределенными параметрами.

На рисунке 1 изображена расчетная схема замещения распределительной сети и содержит следующие обозначения: $R_{\text{л}}, R_{\text{лэ}}$ – активные сопротивления линий; $L_{\text{л}}, L_{\text{лэ}}$ – индуктивности линий; $G_0, G_{0э}$ – активные проводимости изоляции фаз относительно земли; $C_0, C_{0э}$ – емкости фаз относительно земли; $G_m, G_{mэ}$ – междуфазные активные проводимости изоляции фаз; $C_m, C_{mэ}$ – междуфазные емкости фаз.

Так как переходные токи ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ в диапазоне частот до 1,5–2 кГц сохраняют практически емкостный характер [12], в качестве упрощенного эквивалента внешней сети можно принять схему замещения, состоящую из емкостей и активных проводимостей фаз на землю $C_{0э}$ и $G_{0э}$, а также емкостей и активных проводимостей между фазами $C_{mэ}$ и $G_{mэ}$. Значения частот, выходящие за указанный диапазон, не рассматриваются, так как обладают меньшей информативностью [9].

Выбор емкостных и активных проводимостей фаз на землю $C_{0э}$ и $G_{0э}$ в эквивалентной схеме производится так, чтобы суммарный емкостный ток сети I_{Σ} и его активная составляющая $I_{\text{аэ}}$ не изменились, а значения междуфазных емкостей и проводимостей принимаются такими, чтобы соотношения $C_{0э}/C_{mэ}$ и $G_{0э}/G_{mэ}$ были равны соответствующим соотношениям в полной схеме сети [13].

Схема замещения для моделирования переходного процесса в однолинейном виде представлена на рисунке 2а. Внешняя сеть в ней представлена в эквивалентном виде на рисунке 2б.

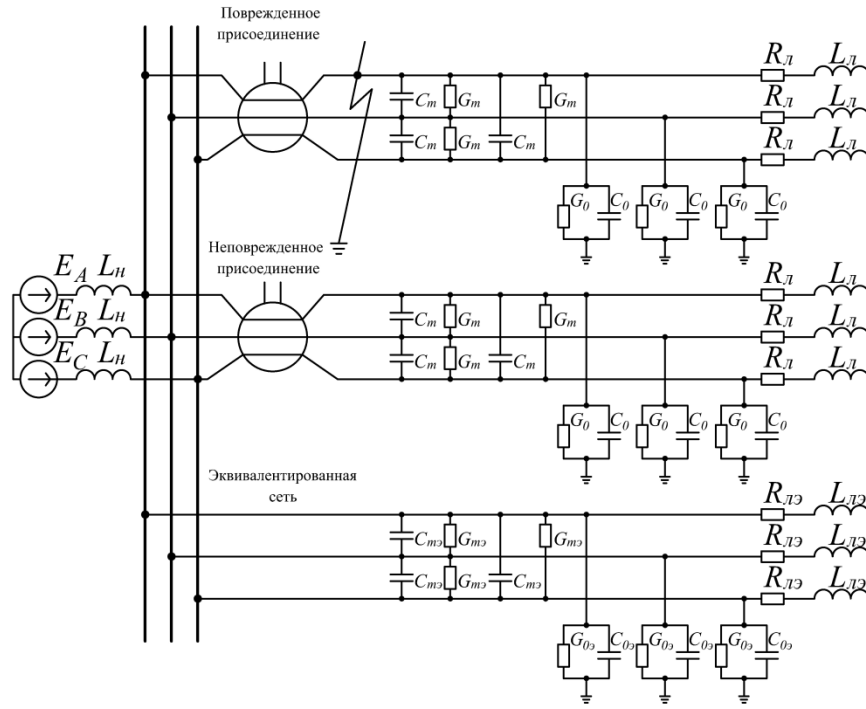


Рис. 1. Расчетная схема замещения сети

Fig. 1. Equivalent circuit of the network

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

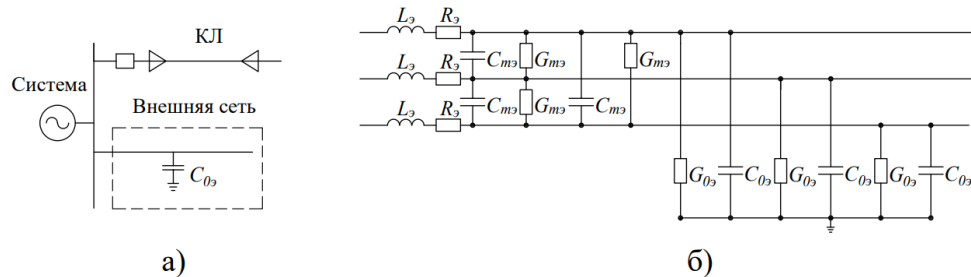


Рис. 2. Эквивалентирование кабельной сети 10 кВ для исследования переходных процессов при ОЗЗ:

Fig. 2. Equivalence of a 10 kV cable network for the study of single-phase ground faults:

а) однолинейная схема сети;

a) single-line network layout;

б) схема замещения внешней сети

b) the equivalent circuit of the external network

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

Имитационная модель сети составлена из следующих функциональных компонентов:

1) Эквивалентированная часть системы задавалась с использованием блоков трёхфазных сопротивлений *Three-Phase Parallel RLC Branch* для задания емкостей и активных проводимостей фаз на землю, а также емкостей и активных проводимостей между фазами, и блока трёхфазного индуктивного сопротивления с взаимной индуктивной связью между фазами *Three-Phase Mutual Inductance Z1-Z0* для задания индуктивного сопротивления кабельной сети. Параметры сети, заданные в соответствии с техническими характеристиками кабелей с бумажно-масляной изоляцией, представлены в таблице 1.

В связи с тем, что эквивалентная емкость при параллельном соединении конденсаторов суммируется, общая емкость для схемы замещения определяется, согласно рисунке 2, как

$$C_{03} = \sum C_0,$$

где C_0 – емкости фаз относительно земли кабельной линии; C_{03} – эквивалентная емкость фаз относительно земли.

Токи, вызванные активными проводимостями фаз сети на землю, задавались,

исходя из условия, что они не должны превышать 2-6% емкостных токов [6].

Таблица 1
Table 1

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

Диапазон значений	Cm, Ф	C0, Ф	Rm, Ом	R0, Ом	R1э, Ом	L1э, Гн	R0э, Ом	L0э, Гн
Начальное значение	$4,56 \cdot 10^{-7}$	$2,10 \cdot 10^{-6}$	$6,98 \cdot 10^4$	$1,51 \cdot 10^4$	$3,29 \cdot 10^{-1}$	$1,13 \cdot 10^{-4}$	$7,86 \cdot 10^{-1}$	$4,03 \cdot 10^{-4}$
Конечное значение	$9,41 \cdot 10^{-7}$	$4,34 \cdot 10^{-6}$	$3,38 \cdot 10^4$	$7,34 \cdot 10^3$	$3,29 \cdot 10^{-1}$	$1,13 \cdot 10^{-4}$	$7,86 \cdot 10^{-1}$	$4,03 \cdot 10^{-4}$

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

2) Моделирование линий осуществлялось с использованием стандартного блока линии с распределёнными параметрами *Distributed Parameters Line* пакета *SimPowerSystem*. Параметры линий представлены в таблице 2.

Таблица 2
Table 2

Параметры кабельных линий
Parameters of cable lines

Сечение участка	R1, Ом/км	R0, Ом/км	L1, Гн/км	L0, Гн/км	C1, Ф/км	C0, 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.

3) Система представлена блоком *Three-Phase source* с межфазным напряжением 10 кВ.

4) Для создания точки ОЗЗ использовался элемент *Breaker*. Он позволяет совершать коммутации в заданные моменты времени. При моделировании устойчивого замыкания на землю реализовалась однократная коммутация элемента *Breaker*. Дополнительно учитывалось возникновение электрической дуги, которая влияет на гармонический состав тока ОЗЗ. Для реализации дуги в цепь протекания тока ОЗЗ были включены два параллельно-встречно включенных диода. Противоположно-ЭДС моделировалась напряжением отсечки диода, а активное сопротивление дуги – динамическим сопротивлением диода [10].

Для моделирования перемежающегося замыкания на землю, коммутации осуществлялись через небольшие промежутки времени, что позволяет имитировать вероятностный характер возникновения дуги при ОЗЗ.

Гашения заземляющей дуги происходили при первом переходе через нулевое значение зарядной (среднечастотной) составляющей переходного тока ОЗЗ. Повторные зажигания дуги выполнялись через минимальные интервалы времени, равные половине периода рабочей частоты [9].

На рисунке 3 представлена осциллограмма тока наиболее опасного вида дугового перемежающегося ОЗЗ. Пробои происходят через интервалы времени, равные 20 и 10 мс. Затем замыкание переходит в устойчивое однофазное замыкание на землю.

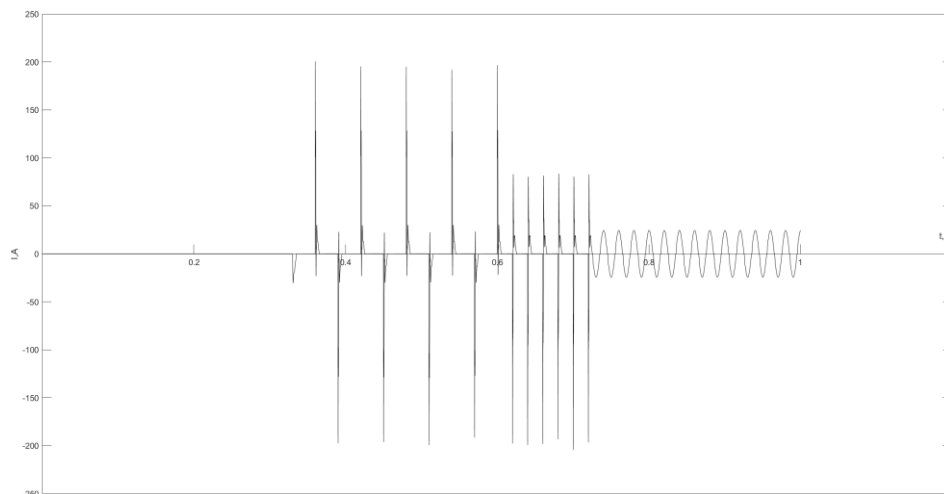


Рис. 3. Осциллограмма тока дугового перемежающегося ОЗЗ Fig. 3. The oscillogram of arc single-phase ground fault

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

Для проведения моделирования выбрана сеть 10 кВ, применяемая при испытаниях микропроцессорных устройств релейной защиты¹. Используемая сеть с изолированной нейтралью представлена пятью радиальными распределительными линиями, отходящими от одной из секций шин.

Имитационная модель эквивалентированной кабельной сети 10 кВ в программном комплексе *Matlab* представлена на рисунке 4.

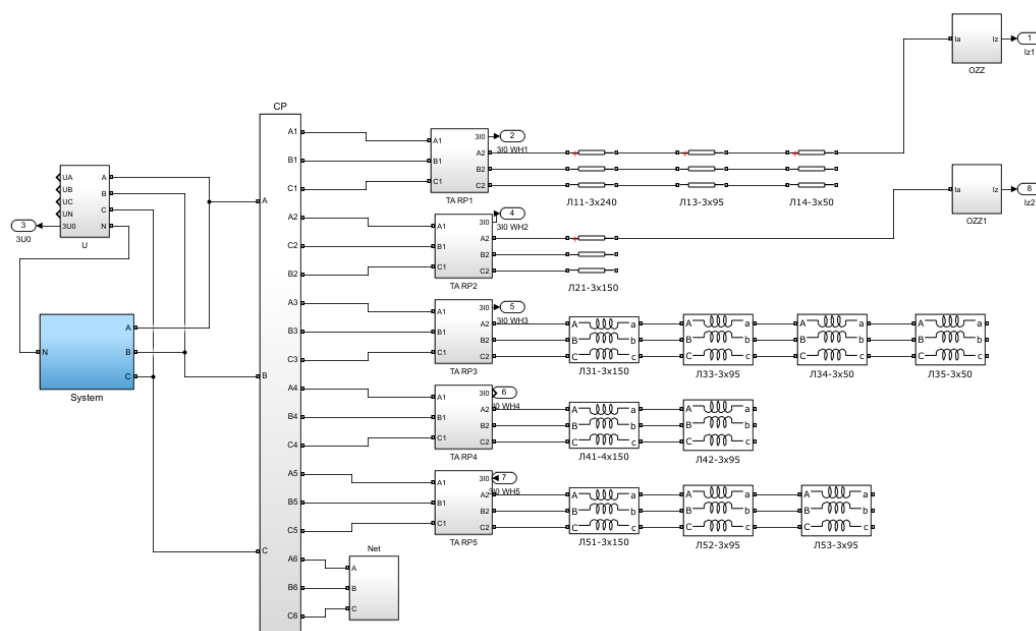


Рис. 4. Имитационная модель эквивалентированной кабельной сети в программном комплексе *Matlab* Fig. 4. Simulation model of an equivalent cable network in the Matlab software package

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

В отличие от защит, использующих действующие значения токов и напряжений [6, 9], в многопараметрической защите для расширения информационной базы предполагается применение их комплексных значений, а также различных функций (активные и реактивные проводимости, мощности и др.), в том числе полученные в заданных частотных диапазонах. Формирование требуемых для защиты от ОЗЗ параметров выполнялось с помощью дискретного преобразования Фурье (ДПФ) с

¹СТО 56947007- 29.120.70.241-2017 «Технические требования к микропроцессорным устройствам РЗА» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.rosseti.ru/upload/iblock/bc9/wgavy1h2g4grcll6x2rmxfltcjatlcfk.pdf> (дата обращения 28.12.2024 г.)

последующей реализацией расчетных алгоритмов цифровой обработки сигналов (ЦОС) [14, 16]. В процессе имитационного моделирования и последующей ЦОС была задана частота дискретизации, соответствующая 256 отсчетам на период промышленной частоты и требованиям стандарта МЭК 61850.

Обобщённая блок-схема процесса исследования имитационной модели представлена на рисунке 5.

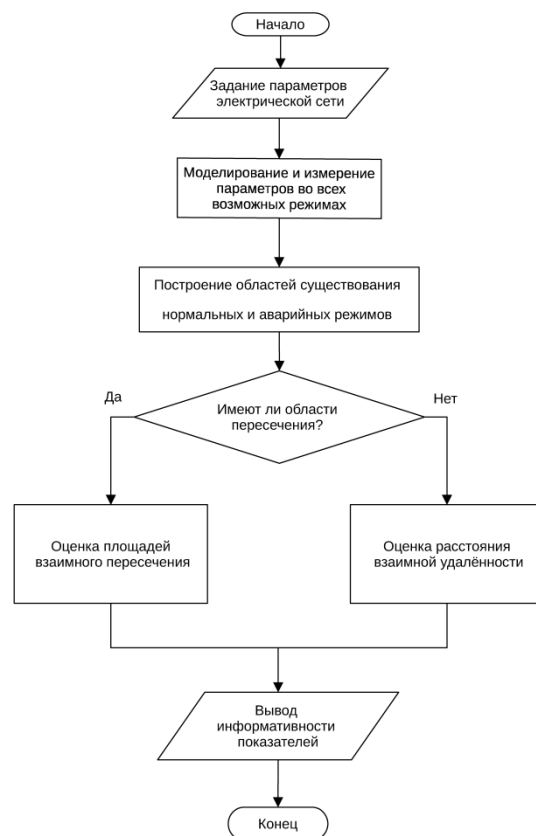


Рис. 5. Обобщённая блок-схема процесса исследования имитационной модели

Fig. 5. A flowchart of the simulation model research process

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

Результаты (Results)

Для накопления статистических данных о режимах проведено имитационное моделирование дуговых перемежающихся и установившихся ОЗЗ при различных параметрах электрической сети и ее конфигурациях, что учитывалось путём изменения характеристик модели в диапазоне параметров сети (табл. 2) и явилось главным фактором при исследовании однофазных замыканий на землю.

Хотя ток ОЗЗ протекает через все неповреждённые присоединения сети, но в интересах организации релейной защиты проводилась оценка электрических параметров на анализируемом присоединении при внутренних и внешних замыканиях на землю. Результаты имитационного моделирования отражены в виде зависимостей параметров режимов на рисунках 7, 9, 11, 13, 15.

Для определения параметров режима по активной (g_0) и реактивной (b_0) проводимости нулевой последовательности использованы нечётные гармоники частотой от 50 Гц до 1,5 кГц. Применение алгоритмов фильтрации сигнала на основе ДПФ позволило выделить квадратурные составляющие тока и напряжения. Проводимости получены путём деления комплекса тока на комплекс напряжения. Упрощенная структурная схема пускового органа защиты представлена на рисунке 6.

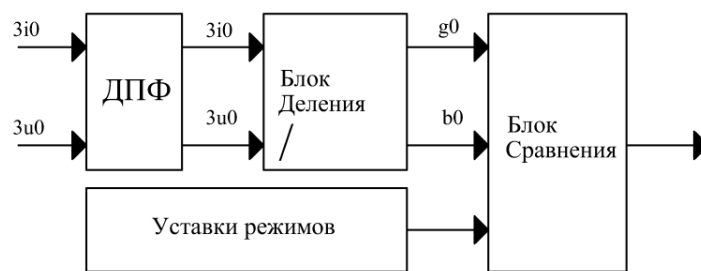


Рис. 6. Упрощенная структурно-функциональная схема пускового органа защиты на основе проводимостей

Fig. 6. The simplified structural and functional scheme of the starting element of protection based on conductivity

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

Результаты моделирования кабельной сети (рис. 4) при различных режимах и конфигурации для параметров активной и реактивной проводимостей приведены на рисунке 7.

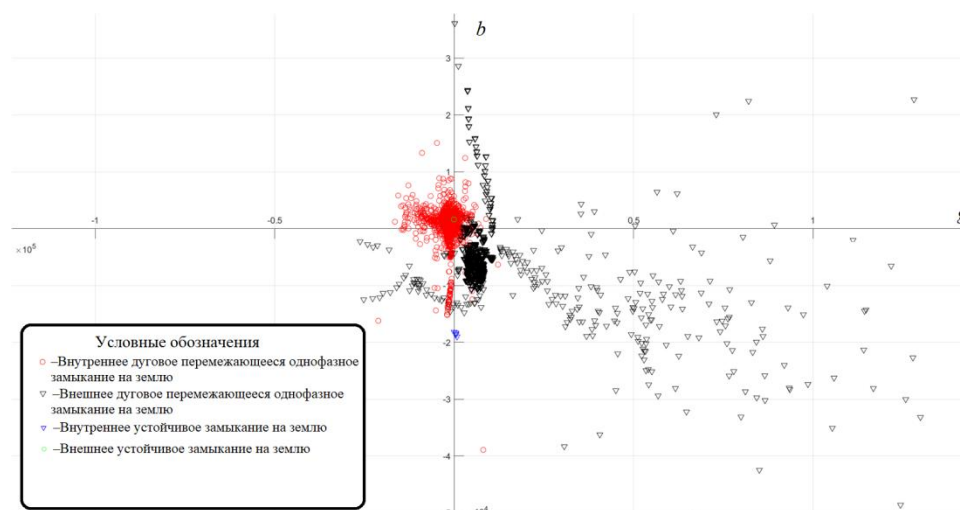


Рис. 7. График зависимости активных и реактивных проводимостей в различных режимах распределительной сети

Fig. 7. The dependency graph of active and reactive conductivities in different network modes

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

Для распознавания режимов по активной (p_0) и реактивной (q_0) мощностей нулевой последовательности использованы гармоники частотой от 50 Гц до 1,5 кГц. Выделялись квадратурные составляющие тока и напряжения. Мощности получены путём умножения комплекса тока на сопряженный комплекс напряжения. Упрощенная структурная схема пускового органа защиты представлена на рисунке 8. Здесь ДПФ – фильтр для выделения из тока $3i_0$ и напряжения $3u_0$ суммы составляющих основной частоты 50 Гц и высших гармонических составляющих в диапазоне до 1,5 кГц.

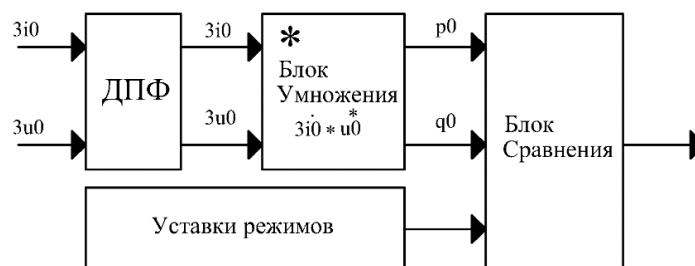


Рис. 8. Упрощенная структурно-функциональная схема пускового органа защиты на основе активной и реактивной мощностей

Fig. 8. The simplified structural and functional scheme of the starting element of protection based on electric power

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

Результаты моделирования кабельной сети (рис. 4) при различных режимах и конфигурации в параметрах активной и реактивной мощности приведены на рисунке 9.

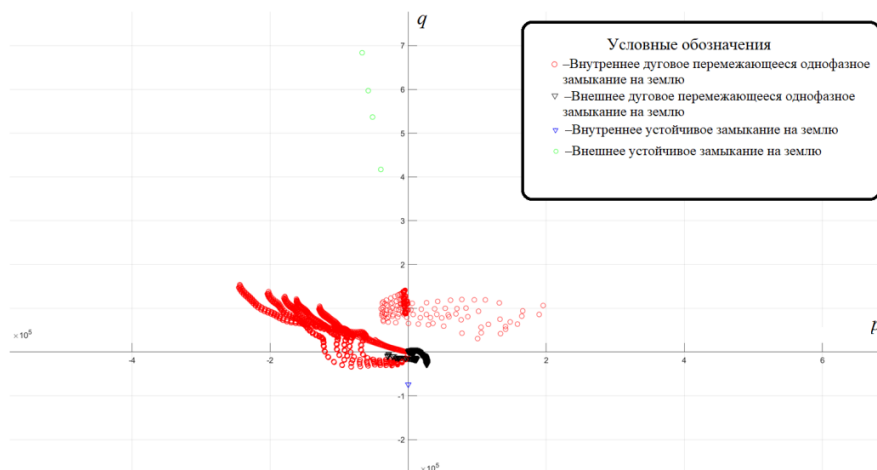


Рис. 9. График зависимости активных и реактивных мощностей в различных режимах распределительной сети

Fig. 9. The dependency graph of active and reactive electric powers in different network modes

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

Упрощенная структурная схема пускового органа защиты, обеспечивающей распознавание режимов сети (рис. 4) по току рабочей частоты и токам высших гармоник нулевой последовательности, представлена на рисунке 10. ДПФ фильтр используется для выделения из тока $3i_0$ компоненты промышленной частоты и суммы составляющих нечётных гармоник от третьей до тридцатой.



Рис. 10. Упрощенная структурно-функциональная схема пускового органа защиты на основе токов гармоник

Fig. 10. The simplified structural and functional scheme of the starting element of protection based on harmonics of currents

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

Результаты моделирования кабельной сети (рис. 4) при различных режимах и конфигурации в параметрах тока промышленной частоты и токам высших гармоник нулевой последовательности приведены на рисунке 11.

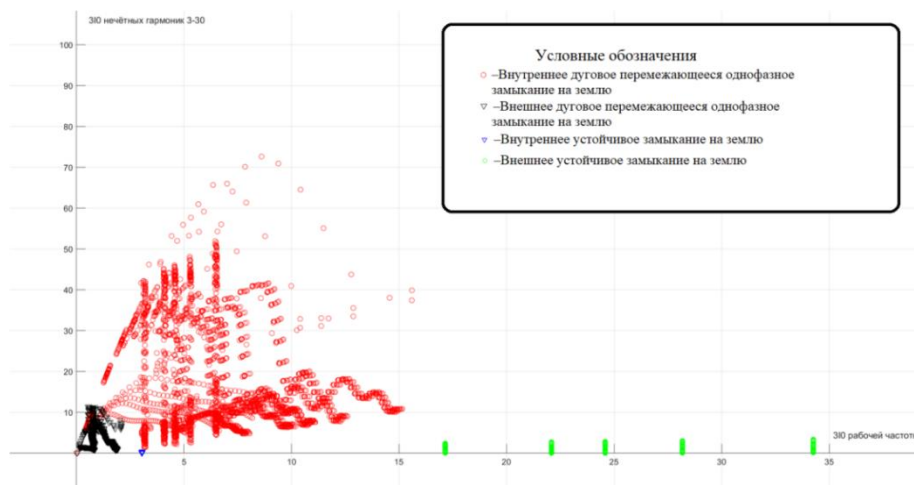


Рис. 11. График зависимости тока промышленной частоты от токов высших гармоник в различных режимах сети

Fig. 11. The dependency graph of operating frequency current from higher harmonic currents in different network modes

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

На рисунках 12 и 14 изображены аналогичные ранее приведенным упрощенные структурно-функциональные схемы пусковых органов защит соответственно на основе составляющих тока нулевой последовательности, а также на основе амплитудных значений токов и напряжений нулевой последовательности. Графики на рисунках 13 и 15 характеризуют области существования режимов кабельной сети 10 кВ (рис. 4) для различных видов ОЗЗ. Координаты, используемые на рисунках 13 и 15, соответствуют входным величинам (параметрам) защит (рис. 12 и 14).

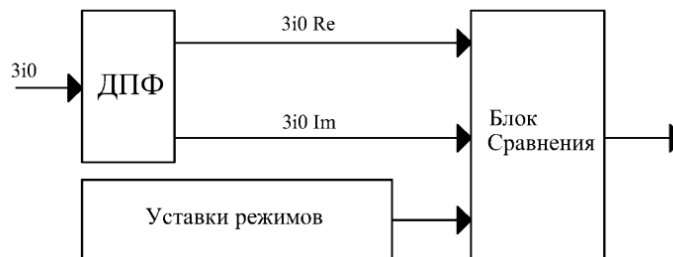


Рис. 12. Упрощенная структурно-функциональная схема пускового органа защиты на основе составляющих тока нулевой последовательности

Fig. 12. The simplified structural and functional scheme of the starting element of protection based on real and imaginary components of the current

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

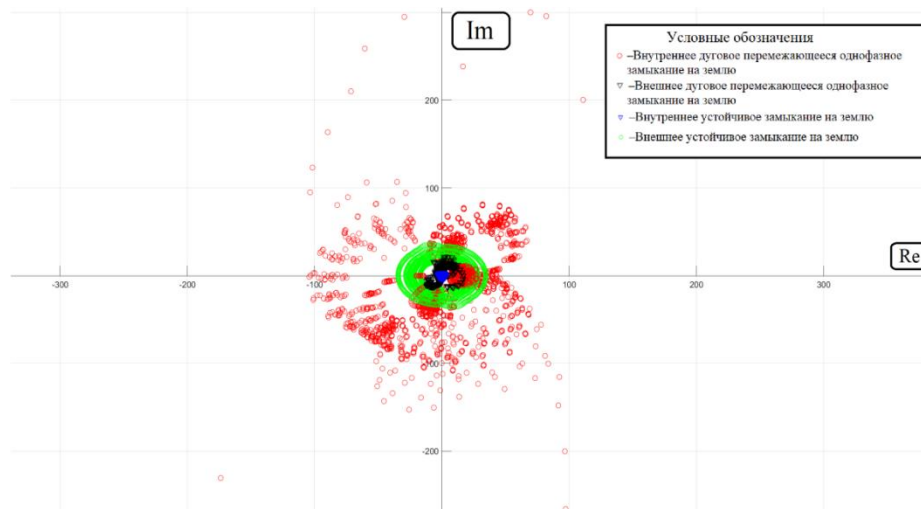


Рис. 13. График зависимости действительной и мнимой составляющей комплекса тока нулевой последовательности в различных режимах сети

Fig. 13. The dependency graph of real and imaginary components of the current in different network modes

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



Рис. 14. Структурно-функциональная схема пускового органа защиты на основе токов и напряжений нулевой последовательности

Fig. 14. The simplified structural and functional scheme of the starting element of protection based on currents and voltages

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

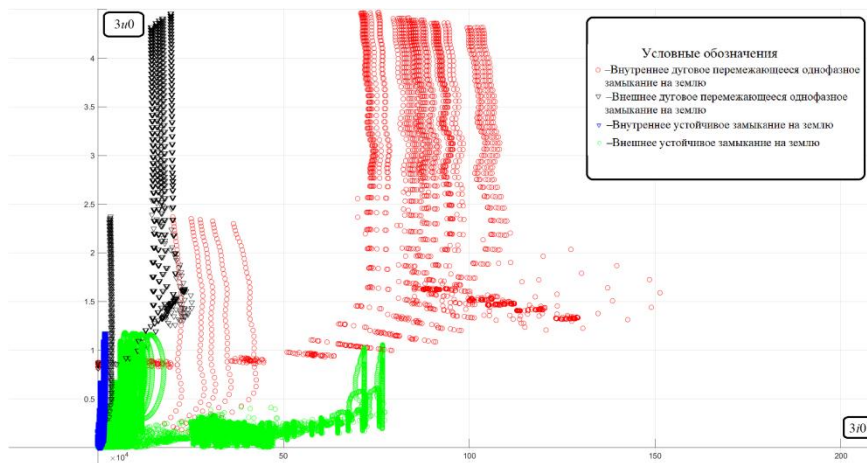


Рис. 15. График зависимости напряжения от тока нулевой последовательности в различных режимах сети

Fig. 15. The dependency graph of currents and voltages in different network modes

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

Обсуждение (Discussions)

Анализ рисунков 6-15 показал:

– моделирование электроэнергетической системы позволило получить обширную выборку данных о потенциальных состояниях, в которых она может находиться;

– не все исследуемые параметры токов и напряжений кабельной сети 10 кВ имеют физический смысл, но они сохраняют ценность для задачи классификации режимов ОЗЗ, так как группируются в различаемые области. При этом характер распределения зависимостей не оказывает существенного влияния на определение режима из-за учёта всех возможных состояний системы, в том числе и крайне редких. Области существования режимов ОЗЗ целесообразно задавать граничными значениями параметров токов и напряжений и использовать их в качестве параметров срабатывания (уставок) защиты;

– при использовании разных координатных параметров для рисунков 7, 9, 11, 13, 15 получено, что области существования режимов имеют различные размеры, удаленность друг от друга и зоны пересечения. Таким образом, применение различных параметров токов и напряжений при организации защиты от ОЗЗ обладает отличающейся информационной ценностью;

– пример (рис. 10) характеризует условия функционирования кабельной сети 10 кВ, при которых содержание высших гармоник в токах нулевой последовательности резко увеличивается в моменты дуговых замыканий на землю, что обеспечивает высокую информативность этого параметра в случае перемежающихся замыканий на землю, и уменьшается, имеет низкую информативность при устойчивых ОЗЗ;

– информационную ценность параметров для распознавания режимов можно определять различными способами. Например, целесообразно воспользоваться соотношением областей распознаваемых режимов. Если области удалены друг от друга, то для формирования уставочных границ необходимо учитывать расстояние между ними. Если между областями существуют зоны взаимного пересечения, то при нахождении параметров в этих зонах невозможно сделать однозначный вывод о существующем режиме. В таком случае решение на срабатывании защиты принимается, исходя из недопустимости отключения нормального режима, причем уставка должна соответствовать граничным значениям параметров между нормальным и аварийным режимом. В частности, оценка информативности исследуемых параметров может быть сформирована по отношению площадей области неопределённости к области нормальных режимов, то есть как процент их взаимного пересечения. При этом чем больше отношение площадей в процентном выражении, тем менее информативными являются параметры;

– сопоставление областей существования режимов кабельной сети на рисунках 7, 9, 11, 13, 15 свидетельствует о существовании их взаимных пересечений, в которых невозможно сделать однозначный вывод о характере присутствующего ОЗЗ. Оценка информативности параметров, выраженная отношением областей существования режимов, представлена в таблице 3.

Таблица 3
Table 3Оценка информативности параметров
Assessment of the informative value of indicators

Зависимость	$g_0; b_0$	$p_0; q_0$	$3i_0$ и сумма гармоник $3i_0$	$3i_0 \text{ Re};$ $3i_0 \text{ Im};$	$3i_0; 3u_0$
Взаимное пересечение, %	1,6	30	42	100	17

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

Следовательно, для организации многопараметрической защиты требуются различные способы объединения параметров токов и напряжений с использованием различных пусковых, а также измерительных органов;

– поскольку на размерность, ситуационное расположение и взаимное пересечение областей существования режимов кабельной сети оказывают влияние ошибки измерения параметров токов и напряжений, необходимы исследования и разработка алгоритмов ЦОС, обеспечивающих разделение областей существования режимов ОЗЗ с целью достижения селективности и высокой чувствительности защиты;

– при организации многопараметрической защиты от ОЗЗ целесообразно использование методов уменьшения признакового пространства (количества параметров токов и напряжений) без существенного снижения чувствительности с целью уменьшения требований в производительности вычислительных средств и стоимости защиты.

Заключение (Conclusions)

1. Для увеличения распознаваемости режимов защитами распределительных сетей 6–35 кВ в условиях различных ОЗЗ целесообразен переход к многопараметрическим защитами. Такие защиты используют большое число параметров токов и напряжений, а также позволяют однозначно классифицировать режимы ОЗЗ.

2. Анализ результатов имитационного моделирования кабельной сети 10 кВ показал, что различные параметры токов и напряжений обладают разной степенью информационной ценности для классификации режимов ОЗЗ. Поэтому при разработке многопараметрических защит необходима комбинация измерительных и пусковых органов для обеспечения лучшей распознаваемости режимов ОЗЗ.

3. Реализация многопараметрических защит от ОЗЗ перспективна в микропроцессорных устройствах релейной защиты распределительных электрических сетей и должна включать специальные алгоритмы цифровой обработки сигналов, обеспечивающие точность оценки величин токов и напряжений, а также организацию вычислений в реальном масштабе времени.

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. 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.
3. 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. Vol. 9. pp. 1079-1086.
4. 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.
5. 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.
6. Шуин В.А., Гусенков А.В. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2001. 104 с.
7. 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.
8. Андреев, В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. М.: Высшая школа, 2006. 639 с.

9. Воробьева Е.А., Добрягина О.А., Шадрикова Т.Ю. Способ повышения эффективности функционирования адмитансной защиты от замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью // Вестник ИГЭУ. №4. С.58–68.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. Куликов А.Л., Мисриханов М.Ш. Введение в методы цифровой релейной защиты высоковольтных ЛЭП. Учеб. пособие. –М.: Энергоатомиздат, 2007. – 198 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, г. Нижний Новгород, Россия. E-mail: inventor61@mail.ru

Старшов Иван Сергеевич – магистрант кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» Нижегородского государственного технического университета (НГТУ) им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия. 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. 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>
3. 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.egyr.2023.01.046
4. 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
5. 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
6. Shuin V.A., Gusenkov A.V. *Zashchity ot zamykanii na zemlyu v elektricheskikh setyakh 6–10 kV*. Moscow: NTF «Energoprogress», 2001. (In Russ).
7. Borukhman, V.A. Ob ekspluatatsii selektivnykh zashchit ot zamykanii na zemlyu v setyakh 6–10 kV i meropriyatiyakh po ikh sovershenstvovaniyu. *Energetik*. 2000; 1:20–22. (In Russ).
8. Andreev, V.A. *Releynaya zashchita i avtomatika sistem elektrosnabzheniya*. Moscow: Vysshaya shkola, 2006. (In Russ).
9. 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

10. Shuin V.A. Nachal'nye fazovye sootnosheniya elektricheskikh velichin perekhodnogo protsesssa pri zamykaniyakh na zemlyu v kabel'nykh setyakh 6–10 kV. *Elektrichestvo*. 1991;10:58–61.

11. 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. doi: 10.17588/2072-2672.2021.5.030-040

12. 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).

13 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).

14. 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;56(2):290–294. doi: 10.1007/s10749-023-01508-w

15. 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

16. Kulikov A.L., Misrikhanov M.Sh. *Vvedenie v metody tsifrovoi releinoi zashchity vysokovoltnykh LEP*. Moscow: NTF «Energoatomizdat», 2007. (In Russ).

Authors of the publication

Alexander L. Kulikov – Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev (NNSTU), Nizhny Novgorod, Russia. *E-mail: inventor61@mail.ru*

Ivan S. Starshov – Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev (NNSTU), Nizhny Novgorod, Russia. *E-mail: ivanstarsh@yandex.ru*

Шифр научной специальности: 2.4.3 Электроэнергетика

Получено

20.01.2025 г.

Отредактировано

08.05.2025 г.

Принято

18.06.2025 г.