

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311

Константин Сергеевич Алёшин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: alyoshin@rza.ru

Алексей Александрович Сёмушкин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: siomushkin@rza.ru

Татьяна Юрьевна Шадрикова

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: rza@rza.ispu.ru

Владимир Александрович Шуин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: vshuin@mail.ru

Универсальная централизованная защита от однофазных замыканий на землю в кабельных сетях напряжением 6–10 кВ

Авторское резюме

Состояние вопроса. Селективная защита от однофазных замыканий на землю в распределительных кабельных сетях напряжением 6–10 кВ может выполняться с применением как индивидуальных (на одно присоединение), так и централизованных устройств, охватывающих все присоединения защищаемого объекта. Преимуществами централизованных устройств является уменьшение удельных (на одно присоединение) расходов на выполнение защиты, упрощение ее эксплуатации и проектирования. Известные технические решения в части централизованных устройств защиты от данного вида повреждений не всегда обеспечивают их универсальность (возможность применения при различных режимах заземления нейтрали кабельных сетей 6–10 кВ) и высокое техническое совершенство (селективность и устойчивость функционирования). В связи с этим актуальным является разработка универсальной централизованной защиты от однофазных замыканий на землю, обеспечивающей высокое техническое совершенство при всех учитываемых видах замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали.

Материалы и методы. Для исследований селективности и устойчивости функционирования разработанных принципов выполнения и алгоритмов централизованной защиты от однофазных замыканий на

землю использована комплексная имитационная модель «кабельная сеть – устройство защиты», выполненная в SimPowerSystems и Simulink. Конфигурация и параметры модели кабельной сети выбраны с учетом основных особенностей распределительных кабельных сетей 6–10 кВ систем промышленного и городского электроснабжения.

Результаты. Разработана универсальная централизованная защита от всех видов однофазных замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали. Представлены результаты функциональных испытаний на имитационной модели, подтверждающие эффективность разработанных алгоритмов функционирования централизованной защиты при всех учитываемых видах замыканий на землю, как в некомпенсированных, так и в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ.

Выводы. Предлагаемое техническое решение реализует многофункциональную многопараметрическую централизованную защиту от однофазных замыканий на землю, обладающую такими свойствами, как универсальность, селективность и высокая устойчивость функционирования при всех видах замыканий на землю, распознавание разновидностей однофазных замыканий на землю, непрерывность действия при устойчивых и наиболее опасных дуговых перемежающихся замыканиях на землю.

Ключевые слова: кабельные сети 6–10 кВ, однофазные замыкания на землю, универсальная многофункциональная централизованная защита от замыканий на землю

Konstantin Sergeevich Aleshin

Ivanovo State Power Engineering University, Post-graduate Student of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: alyoshin@rza.ru

Alexey Alexandrovich Syomushkin

Ivanovo State Power Engineering University, Post-graduate Student of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: siomushkin@rza.ru

Tatyana Yurievna Shadrikova

Ivanovo State Power Engineering Energy University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: rza@rza.ispu.ru

Vladimir Alexandrovich Shuin

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: vshuin@mail.ru

Universal centralized protection against single phase earth faults in 6–10 kV cable networks

Abstract

Background. Selective protection against single phase earth faults in distribution 6–10 kV cable networks can be performed both with the use of individual (per connection) and centralized devices covering all connections of the protected object. The advantages of centralized devices are reduction of specific (per connection) costs of protection, simplification of its operation and design. Well-known technical solutions in terms of centralized protection devices against this type of damage do not always provide versatility (the possibility to use neutral cables of 6–10 kV in various grounding modes) and high technical perfection (selectivity and stability of operation). Thus, it is relevant to develop a universal centralized protection against single-phase earth faults, ensuring high technical perfection for all types of earth faults in 6–10 kV cable networks with different neutral grounding modes.

Materials and methods. The authors have used a comprehensive simulation model "cable network – protection device" to study the selectivity and stability of the developed principles of implementation and algorithms for centralized protection against earth faults. The model is designed in SimPowerSystems and Simulink software. The configuration and parameters of the cable network model have been selected considering the key features of 6–10 kV distribution cable networks of industrial and urban power supply systems.

Results. A universal centralized protection against all types of earth faults in 6–10 kV cable networks with various neutral grounding modes has been developed. The results of functional tests on the simulation model have confirmed the effectiveness of the developed algorithms of the developed centralized protection for all types of earth faults both in uncompensated and compensated cable networks of 6–10 kV.

Conclusions. The proposed technical solution implements a multifunctional multiparametric centralized protection against earth faults. It has such properties as versatility, selectivity, and high stability of operation for all types of earth faults, recognition of types of single-phase earth faults, continuity of action in stable and most dangerous arc intermittent earth faults.

Key words: 6–10 kV cable networks, single phase earth faults, universal multifunctional centralized earth fault protection

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.4.041-052

Введение. Более половины вырабатываемой в стране электроэнергии распределяется потребителям по кабельным сетям напряжением 6–10 кВ. Аварии в кабельных сетях 6–10 кВ составляют около 70 % всех нарушений электроснабжения потребителей, при этом первопричиной большей части аварийных отключений кабельных линий (КЛ) и других элементов (например, высоковольтных электродвигателей) являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ), составляющие 75–90 % от общего числа электрических повреждений в указанных сетях. Надежность электроснабжения потребителей зависит от быстроты определения и отключения поврежденного элемента или участка КЛ с ОЗЗ, т.е. от селективности и устойчивости функционирования (технического совершенства [1]) защиты от данного вида повреждений.

Трудности создания защиты от ОЗЗ, обладающей высоким техническим совершенством (ТС), обусловлены, прежде всего, применением в кабельных сетях 6–10 кВ различных режимов заземления нейтрали (изолированная нейтраль, резонансное заземление нейтрали через дугогасящий реактор (ДГР), высокоомное резистивное заземление нейтрали, комбинированное заземление нейтрали через ДГР и высокоомный резистор и др.). В целях повышения селективности и чувствительности для действия защиты от ОЗЗ, как правило, используются токи и напряжение нулевой последовательности или их составляющие [1, 2]. Режим нейтрали определяет величину тока ОЗЗ, его гармонический состав, соотношения токов нулевой последовательности в поврежденном и неповрежденных присоединениях, фазовые соотношения токов и напряжения нулевой последовательности, а следовательно, и принципы выполнения защиты от замыканий на землю. Наиболее существенно принципы выполнения защиты от ОЗЗ различаются в компенсированных и некомпенсированных сетях.

Дополнительной причиной трудностей создания защиты, обладающей высоким ТС, является многообразие видов замыканий на землю, учитываемых при выполнении защиты от данного вида повреждений в кабельных сетях 6–10 кВ: устойчивые ОЗЗ

(УОЗЗ), дуговые перемежающиеся ОЗЗ (ДПОЗЗ), дуговые прерывистые ОЗЗ (ДПрОЗЗ), кратковременные самоустраняющиеся ОЗЗ (КрОЗЗ) [3]. При наиболее опасных видах замыканий (УОЗЗ и ДПОЗЗ) защита должна обладать непрерывностью действия и в необходимых случаях выполняться с действием на отключение.

С учетом изложенного выше разработчики современных микропроцессорных терминалов релейной защиты и автоматики (РЗА) для электрических сетей среднего напряжения вынуждены предусматривать в них несколько функций индивидуальной защиты от ОЗЗ, основанной на различных принципах, каждая из которых предназначена для применения только при определенных режимах нейтрали или видах замыканий на землю. Так, в кабельных сетях 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью или с резистивным заземлением нейтрали, наиболее широкое применение получила токовая защита нулевой последовательности (ТЗНП) и токовая направленная защита нулевой последовательности (ТНЗНП) [4–6]. В компенсированных сетях, как правило, применяются максимальные токовые защиты на основе высших гармоник. Анализ опыта эксплуатации в России указанных защит, проведенный ОРГРЭС [7], выявил не всегда достаточную их селективность и чувствительность, особенно при дуговых ОЗЗ. В то же время известно, что большая часть ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ в начальной стадии развития повреждения имеет дуговой перемежающийся характер [8].

Опыт разработки, внедрения и эксплуатации показал, что централизованные защиты от ОЗЗ, кроме указанных выше преимуществ (уменьшение удельных расходов на выполнение защиты сети, упрощение ее эксплуатации и проектирования), как правило, обеспечивают также повышение ТС. Централизованные устройства защиты от ОЗЗ актуальны, прежде всего, в распределительных кабельных сетях 6–10 кВ систем промышленного и городского электроснабжения.

Степень разработанности проблемы. Обоснование направления исследований. В 60–80-е годы XX в. в компенсированных и некомпенсированных кабельных

сетях 6–10 кВ получили применение токовые централизованные устройства сигнализации ОЗЗ (ЦУСЗ), основанные на использовании способа относительного замера амплитуд бросков переходных токов нулевой последовательности $3i_0$ в присоединениях защищаемого объекта (например, устройства «Земля», «Феррит» и «СЗВИ» [9–11]). Устройства защиты на основе переходных процессов обладают независимостью от режима заземления нейтрали сети и возможностью фиксации всех разновидностей замыканий (устойчивых и дуговых), включая КрОЗЗ, информация о которых может быть использована для диагностирования состояния изоляции КЛ и других элементов сети.

Применение упомянутых выше ЦУСЗ позволило существенно снизить остроту проблемы селективной сигнализации ОЗЗ, прежде всего в компенсированных кабельных сетях. Однако защиты, основанные на данном принципе, имели недостатки, а именно:

- отсутствие непрерывности действия при УОЗЗ, необходимой при поиске поврежденного участка линии методом оперативных переключений в сети и при выполнении защиты с действием на отключение;

- сложность расчетов с приемлемой точностью соотношений амплитуд бросков переходных токов $3i_0$ в поврежденном и неповрежденных присоединениях, необходимых для оценки селективности и чувствительности защит данного типа;

- неселективная работа при замыканиях на шинах защищаемого объекта или питающей линии (вводе), не подключенной к ЦУСЗ;

- ограничение области применения при малых кратностях амплитуд бросков переходных токов в поврежденном и неповрежденных присоединениях из-за погрешностей кабельных трансформаторов тока (ТТНП) в переходных режимах ОЗЗ.

Разработанные в 80-е годы XX в. централизованные направленные устройства сигнализации от ОЗЗ (ЦНУСЗ) позволили обеспечить повышение ТС по сравнению с токовыми ЦУСЗ относительного замера значений переходных токов. Принцип действия ЦНУСЗ (например, устройства «Импульс» [2, 12]) основан на контроле фазных соотношений (соотношений начальных знаков) переходных токов $3i_0$ в присоединениях защищаемого объекта и опорной (поляризующей) величины. Преимуществами ЦНУСЗ

по сравнению с токовым ЦУСЗ являются отсутствие ограничений области применения по соотношению емкостных токов присоединений, более высокая чувствительность к переходным токам, возможность получения селективного сигнала при ОЗЗ на шинах, упрощение проектирования и эксплуатации защиты от замыканий на землю.

Основными недостатками ЦНУСЗ являются отсутствие непрерывности действия при УОЗЗ и невозможность применения на объектах, не оборудованных трансформаторами напряжения для измерения напряжения нулевой последовательности. Для обеспечения непрерывности действия при УОЗЗ в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ получили применение токовые ЦУСЗ относительного замера, основанные на сравнении уровней высших гармоник (ВГ) в токах $3i_0$ присоединений защищаемого объекта. Из устройств, основанных на данном принципе, наиболее широкое применение получило устройство типа УСЗ-3М [2], подключаемое «вручную» поочередно к кабельным трансформаторам тока нулевой последовательности (ТТНП) присоединений защищаемого объекта. В УСЗ-3М применен фильтр, обеспечивающий достаточно высокую степень подавления во входных токах $3i_0$ составляющих промышленной частоты, что делает возможным его применение не только в компенсированных кабельных сетях, но и в сетях, работающих с изолированной нейтралью. Основные недостатки устройства заключаются в невозможности четкой фиксации поврежденного присоединения при КрОЗЗ и дуговых прерывистых замыканиях, включая наиболее опасные ДПОЗЗ, а также в необходимости участия оперативного персонала в работах по определению поврежденного присоединения, что увеличивает время поиска и отключения поврежденного присоединения, т. е. в невозможности автоматического формирования сигнала срабатывания защиты и выполнения ее с действием на отключение.

Современные микропроцессорные исполнения централизованных устройств защиты от ОЗЗ (ЦУЗЗ) в кабельных сетях 6–10 кВ также не всегда обеспечивают высокое ТС в кабельных сетях 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали при всех видах ОЗЗ, содержат множество функций и настроек, усложняющих эксплуатацию устройств защиты, имеют ограниченную универсальность в части возможного примене-

ния как в компенсированных, так и в некомпенсированных сетях. В связи с этим дальнейшее совершенствование принципов выполнения микропроцессорных ЦУЗЗ является актуальной задачей.

Требования к централизованным устройствам защиты от ОЗЗ. При разработке требований к современным исполнениям ЦУЗЗ необходимо учитывать указанные выше особенности объекта исследований, обусловленные применением в кабельных сетях 6–10 кВ различных режимов заземления нейтрали и многообразием видов замыканий, учитываемых при выполнении защиты от данного вида повреждений. С учетом указанных особенностей условий функционирования ЦУЗЗ для кабельных сетей 6–10 кВ должны обеспечивать выполнение следующих основных требований:

- универсальность, т.е. возможность применения защиты как в некомпенсированных, так и в компенсированных сетях;
- селективное определение поврежденного присоединения при всех учитываемых разновидностях ОЗЗ, включая КрОЗЗ;
- селективность при ОЗЗ на шинах защищаемого объекта;
- непрерывность действия при УОЗЗ и наиболее опасных для сети ДПОЗЗ;
- распознавание разновидностей ОЗЗ (ДПОЗЗ, ДПрОЗЗ, УОЗЗ, КрОЗЗ) в целях выбора наиболее эффективного способа действия защиты (сигнал или отключение).

Анализ изложенных выше требований позволяет сделать вывод, что эффективное универсальное техническое решение в части ЦУЗЗ как для компенсированных, так и для некомпенсированных кабельных сетей 6–10 кВ, обеспечивающее высокое ТС при всех учитываемых видах ОЗЗ, возможно только на основе многофункциональных устройств, реализующих несколько различных способов определения поврежденного присоединения с использованием электрических величин как установившегося режима, так и переходного процесса, возникающего при пробое изоляции фазы сети на землю. Техническая реализация такого многофункционального ЦУЗЗ возможна только на цифровой микропроцессорной базе.

Методы исследования. Наиболее эффективным методом исследований сложных динамических и установившихся режимов функционирования устройств релейной

защиты является математическое имитационное моделирование. Для исследований селективности и устойчивости функционирования разработанных алгоритмов централизованной защиты от ОЗЗ и проведения ее функциональных испытаний использовалась комплексная имитационная модель «кабельная сеть – устройство защиты», выполненная в SimPowerSystems и Simulink. Конфигурация и параметры модели кабельной сети выбираются с учетом основных особенностей распределительных кабельных сетей 6–10 кВ систем промышленного и городского электроснабжения.

Обоснование состава функций ЦУЗЗ.

Для выполнения сформулированных выше требований в ЦУЗЗ для кабельных сетей 6–10 кВ, на наш взгляд, должны быть реализованы следующие функции защиты от ОЗЗ:

1) централизованная токовая защита (ЦТЗЗ) относительного замера, обеспечивающая селективное определение поврежденного присоединения и непрерывность действия при УОЗЗ и ДПОЗЗ, основанная на сравнении:

- среднеквадратичных значений полных токов I_0 для сетей, работающих с изолированной нейтралью или с высокоомным резистивным заземлением нейтрали;

- среднеквадратичных значений высших гармонических составляющих токов I_0 для компенсированных сетей;

2) централизованная импульсная направленная защита (ЦИНЗЗ) для компенсированных и некомпенсированных сетей, основанная на контроле начальных фазных соотношений электрических величин переходного процесса при ОЗЗ, обеспечивающая выполнение дополнительных функций, которые не могут быть реализованы на основе алгоритма ЦТЗЗ:

- распознавание замыканий на шинах при всех видах ОЗЗ;

- селективная фиксация КрОЗЗ на присоединениях и на шинах;

- резервирование ЦТЗЗ за счет селективной фиксации первоначального пробоя изоляции, возникающего при всех видах ОЗЗ;

3) общая неселективная защита максимального напряжения нулевой последовательности (контроль изоляции сети).

Разработанная структурная схема ЦУЗЗ, включающая описанные выше функции защиты от ОЗЗ, приведена на рис. 1.

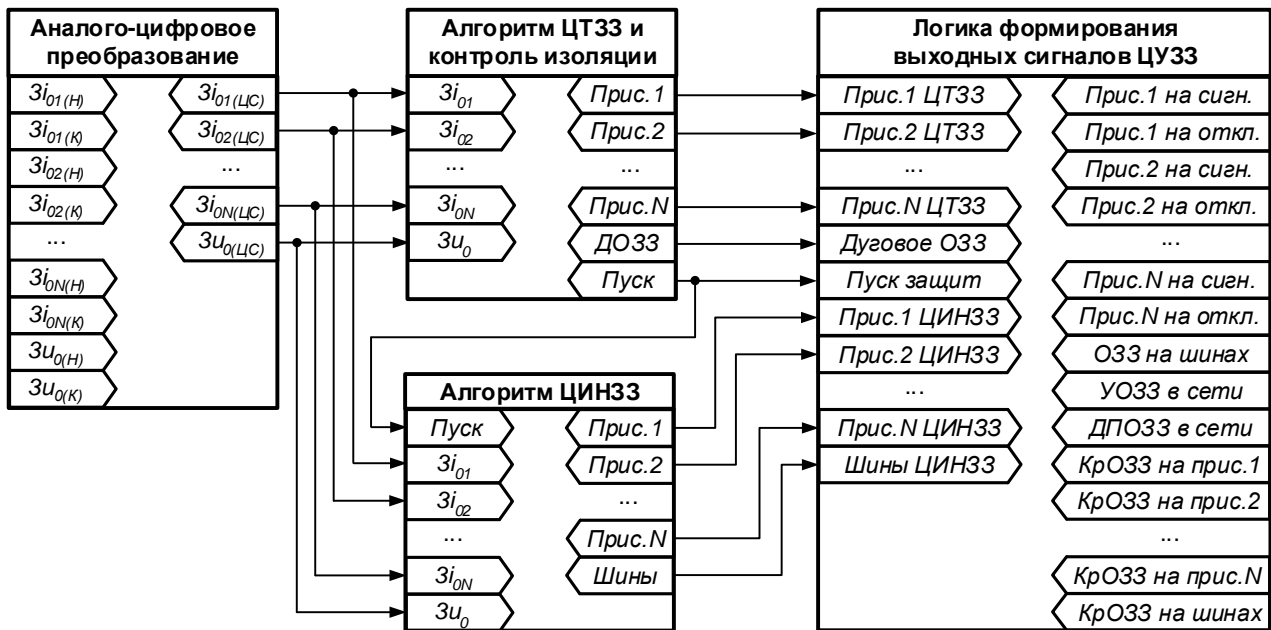
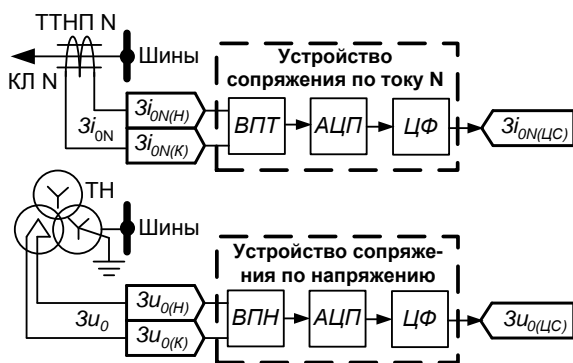


Рис. 1. Общая структурная схема ЦУЗЗ

Модуль аналого-цифрового преобразования входных сигналов ЦУЗЗ. При возникновении ОЗЗ в защищаемой сети напряжение нулевой последовательности Zu_0 от трансформатора напряжения (ТН) и токи нулевой последовательности Zi_0 от ТТНП (по числу присоединений N) подаются на соответствующие входы модуля аналого-цифрового преобразования входных сигналов ЦУЗЗ (рис. 2).

Рис. 2. Модуль аналого-цифрового преобразования входных сигналов ЦУЗЗ Zi_0 и Zu_0

Устройства сопряжения по току и напряжению, содержащие, соответственно, последовательно включенные вторичные преобразователи тока (ВПТ) и напряжения (ВПН), аналого-цифровые преобразователи (АЦП) и цифровой фильтр (ЦФ), осуществляют формирование цифровых сигналов и подавление в них высокочастотных составляющих с частотой выше 1,5–2 кГц. Оцифрованные сигналы тока и напряжения $Zi_0(ЦС)$

и $Zu_0(ЦС)$ подаются на соответствующие входы блоков, реализующих алгоритмы ЦТЗЗ и ЦИНЗЗ. На основе результатов работы алгоритмов ЦТЗЗ и ЦИНЗЗ блок логики формирует выходные сигналы ЦУЗЗ.

Алгоритм ЦТЗЗ. Алгоритм ЦТЗЗ сравнивает среднеквадратичные значения входных токов Zi_0 и по наибольшему из них определяет поврежденное присоединение. С учетом влияния погрешностей измерений входных токов условие устойчивости функционирования ЦТЗЗ (селективности в реальных условиях функционирования) можно записать в следующем виде:

$$\frac{Zi_{0 \text{ пов}}}{Zi_{0 \text{ неп. макс}}} \geq K_{\text{ч}} K_{\text{отс}}, \quad (1)$$

где $Zi_{0 \text{ пов}}$ – ток нулевой последовательности в поврежденном присоединении; $K_{\text{ч}} = 1,25–1,5$ и $K_{\text{отс}} = 1,3–1,5$ – коэффициенты чувствительности и отстройки, учитывающие погрешности функционирования ЦТЗЗ, соответственно уменьшающие замер тока в поврежденном присоединении $Zi_{0 \text{ пов}}$ и увеличивающие замер тока в неповрежденном присоединении $Zi_{0 \text{ неп. макс}}$ по сравнению с их расчетными значениями.

Из (1) следует, что принцип действия ЦТЗЗ можно рассматривать как принцип действия максимальной токовой защиты нулевой последовательности, уставка которой по току срабатывания определяется значением $Zi_{0 \text{ неп. макс}}$.

При малых уровнях высших гармоник (ВГ) в фазных напряжениях ток УОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью, содержит практически только емкостную составляющую основной частоты 50 Гц (активная составляющая основной частоты, как правило, не превышает ~3–5 % от емкостной составляющей [13]). Емкостный ток нулевой последовательности в месте ОЗЗ равен суммарному емкостному току сети $I_{c\Sigma}$ и распределяется между неповрежденными присоединениями пропорционально собственным емкостям фаз на землю $3C_{0i}$, а в поврежденном равен сумме (взятой с обратным знаком) емкостных токов всех неповрежденных присоединений [2]. В рассматриваемом случае для расчетных среднеквадратичных значений токов $3I_0$ в неповрежденном i -м и поврежденном j -м присоединениях получим:

$$3I_{0 \text{ расч. неп. } i} = I_{\Sigma} \frac{3C_{0i}}{3C_{0\Sigma}} = I_{c \text{ собс. } i}; \quad (2)$$

$$3I_{0 \text{ расч. пов. } j} = \sum_{i=1}^N I_{c \text{ собс. } i} - I_{c \text{ собс. } j} = I_{c\Sigma} - I_{c \text{ собс. } j}, \quad (3)$$

где $I_{c \text{ собс. } i}$, $I_{c \text{ собс. } j}$ – собственные емкостные токи i -го и j -го присоединений.

Из (2) и (3) для расчетной минимальной кратности первичных токов $3I_0$ в поврежденном и неповрежденном присоединениях следует

$$\frac{3I_{0 \text{ пов. расч.}}}{3I_{0 \text{ неп. макс. расч.}}} = \frac{I_{c\Sigma} - I_{c \text{ собс. пов.}}}{I_{c \text{ собс. неп. макс.}}} \quad (4)$$

Примем, что значения собственных емкостных токов присоединений упорядочены следующим образом:

$$I_{c \text{ собс. } 1} \geq I_{c \text{ собс. } 2} \geq I_{c \text{ собс. } 3} \geq \dots \geq I_{c \text{ собс. } N}. \quad (5)$$

С учетом (4) и (5) условие селективности ЦТЗЗ (1) в реальных условиях функционирования можно записать в следующем виде:

$$\frac{1 - I_{c \text{ собс. } 2^*}}{I_{c \text{ собс. } 1^*}} \geq K_{\text{ч}} K_{\text{отс}}, \quad (6)$$

где $I_{c \text{ собс. } 1^*} = I_{c \text{ собс. } 1} / I_{c\Sigma}$, $I_{c \text{ собс. } 2^*} = I_{c \text{ собс. } 2} / I_{c\Sigma}$ – относительные значения собственных емкостных токов присоединений 1 и 2.

По данным оценок гармонического состава тока ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, полученных на основе экспериментальных измерений и исследований на имитацион-

ных моделях [14–16], относительный уровень ВГ в токе ОЗЗ в диапазоне частот до ~1,5 кГц может достигать 40–50 % от значения $I_{c\Sigma}$. Поэтому в целях повышения чувствительности в сетях с изолированной нейтралью для действия ЦТЗЗ целесообразно использовать сумму первой и высших гармоник (т.е. так называемый мультичастотный принцип). Известно [15], что в диапазоне частот до 1,5–2 кГц как в установившихся, так и в переходных режимах ОЗЗ входные сопротивления неповрежденных КЛ 6–10 кВ по отношению к земле имеют практически чисто емкостный характер. Поэтому соотношения для среднеквадратичных значений входных токов $3i_0$ (2)–(4) и условие селективности ЦТЗЗ (6) справедливы для всех высших гармонических составляющих тока ОЗЗ, а также суммы первой гармоники и ВГ в указанном диапазоне частот. Как уже отмечалось выше, в ЦТЗЗ рабочий диапазон частот ограничен «сверху» частотой ~1,5–2 кГц с помощью цифровых фильтров, входящих в состав устройств сопряжения по току (рис. 2).

В компенсированных кабельных сетях для действия ЦТЗЗ используется только сумма ВГ в диапазоне частот до 1,5–2 кГц, среднеквадратичное значение которой $3I_{0(\text{ВГ})}$ вычисляется по соотношению

$$3I_{0(\text{ВГ})} = \sqrt{(3I_0)^2 - (3I_{0(50)})^2}, \quad (7)$$

где $3I_0$ – среднеквадратичное значение входного тока $3i_0$; $3I_{0(50)}$ – среднеквадратичное значение первой гармоники тока $3i_0$.

В кабельных сетях 6–10 кВ с высокоомным заземлением нейтрали при УОЗЗ заземляющий резистор увеличивает значение тока $3I_{0 \text{ пов}}$ и, соответственно, чувствительность ЦТЗЗ также увеличивается примерно в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с сетями, работающими с изолированной нейтралью [2]. Однако при дуговых прерывистых замыканиях, когда в токе ОЗЗ преобладают емкостные высшие гармонические составляющие, условия селективности ЦТЗЗ, как и в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостного тока, определяются соотношением (6).

Таким образом, в некомпенсированных кабельных сетях 6–10 кВ при устойчивых замыканиях селективность и высокая чувствительность ЦТЗЗ обеспечивается за счет использования мультичастотного принципа, при дуговых замыканиях – в основном

за счет использования для действия защиты суммы высших гармонических составляющих переходных токов $3i_0$. В компенсированных кабельных сетях как при устойчивых, так и при дуговых замыканиях селективность ЦТЗЗ обеспечивается за счет использования для действия защиты только суммы ВГ входных токов $3i_0$.

Структурно-функциональная схема ЦТЗЗ, реализующая рассмотренный алгоритм сравнения значений входных токов $3i_0$ в кабельных сетях 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали, приведена на рис. 3.

Схема ЦТЗЗ включает формирователи параметров входных токов $3i_0$ по числу присоединений N , формирователь параметров входного напряжения $3U_0$, схему сравнения значений входных токов, логику фиксации сигналов срабатывания, узел блокировки алгоритма сравнения токов при гашении заземляющей дуги (ГЗД), пусковой орган по напряжению $3U_{0(50)}$ и блок распознавания дуговых замыканий (ДОЗЗ).

Формирователи параметров входных токов $3i_0$ обеспечивают вычисление среднеквадратичных значений полного тока $3I_0$ (блок RMS), его первой гармоники $3I_{0(50)}$ (блок цифрового преобразования Фурье DFT) и суммы высших гармонических составляющих $3I_{0(ВГ)}$ (блок ВГ). Программные переключатели SX обеспечивают переключение режима работы схемы сравнения в

зависимости от режима нейтрали защищаемой сети (1 – сеть с изолированной нейтралью или с высокоомным заземлением нейтрали, 2 – компенсированная сеть). Формирователь параметров входного напряжения $3U_0$ обеспечивает вычисление среднеквадратичных значений входного напряжения и его составляющих $3U_0$, $3U_{0(50)}$ и $3U_{0(ВГ)}$.

В [15] показано, что в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью кратность дуговых перенапряжений $K_n = U_{пер.макс}/U_{т.ф.ном}$ за счет эскалации напряжения смещения нейтрали сети при повторных зажиганиях заземляющей дуги достигает опасных значений 2,6–2,7 и более, если интервалы времени Δt между повторными пробоями изоляции не превышают ~ 3 -х периодов промышленной частоты (~ 60 мс). Опасные ДПОЗЗ с кратностью перенапряжений $K_n > 2,7$ могут возникать также и в компенсированных сетях при возможных в реальных условиях эксплуатации значительных расстройках компенсации $\pm 20\%$ и более [16]. При таких опасных ДПОЗЗ защита должна обладать свойством непрерывности действия, обеспечивающим четкую фиксацию опасного дугового замыкания и возможность ее выполнения при необходимости с действием на отключение.

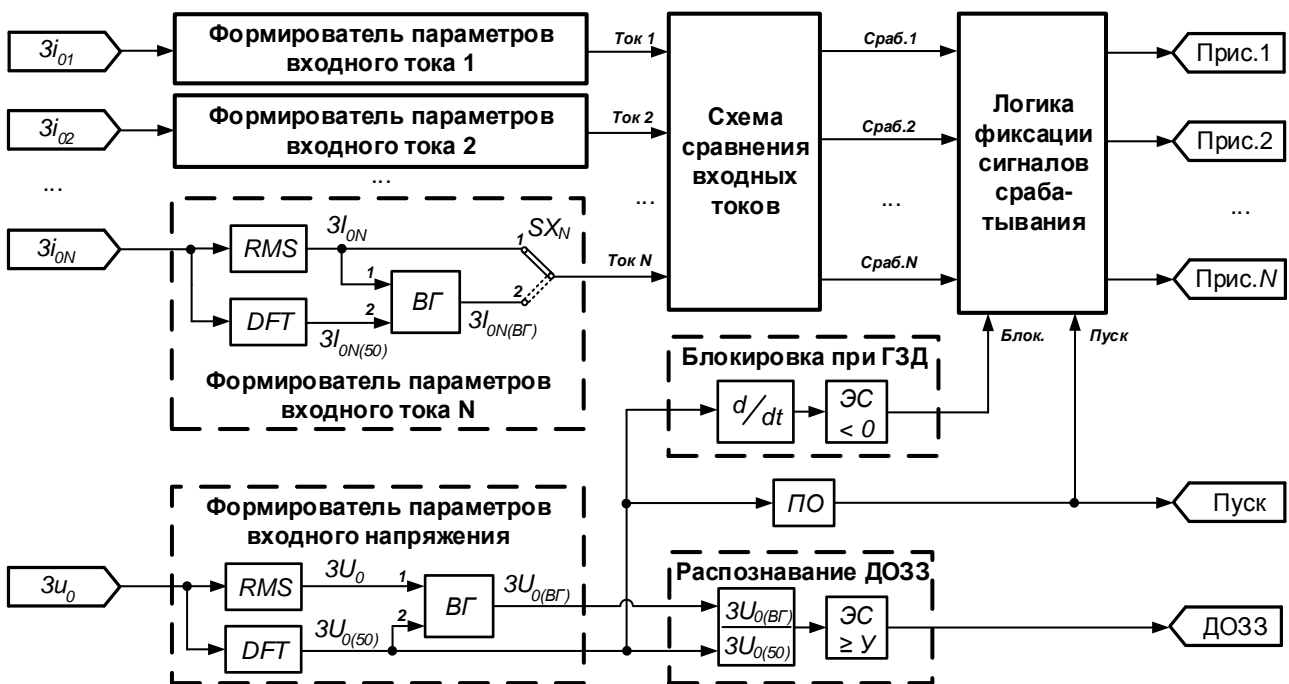


Рис. 3. Структурно-функциональная схема ЦТЗЗ

Непрерывность действия ЦТЗЗ при ДПОЗЗ обеспечивается соответствующим выбором времени усреднения $T_{уср} = 3T_{50} = 60$ мс при вычислении среднеквадратичного значения входного тока $3I_0$ и его составляющих $3I_{0(50)}$ и $3I_{0(ВГ)}$, а также выбором времени срабатывания защиты $t_{сраб.мин} > T_{уср}$. При $t_{сраб.мин} > T_{уср}$ алгоритм ЦТЗЗ фиксирует только ДПОЗЗ и УОЗЗ, а не представляющие особой опасности для сети и поврежденного присоединения ДПрОЗЗ ($\Delta t > 60$ мс) фиксируются алгоритмом ЦИНЗЗ как кратковременные самоустраниющиеся пробой изоляции (КрОЗЗ).

Распознавание устойчивых и дуговых ОЗЗ (ДОЗЗ) осуществляется специальным блоком (рис. 3, блок распознавания ДОЗЗ). Принцип действия блока ДОЗЗ основан на контроле отношения уровня высших гармонических составляющих к уровню составляющей первой гармоники в напряжении $3U_0$, т.е. отношения $3U_{0(ВГ)*} = 3U_{0(ВГ)}/(3U_{0(50)})$. При устойчивых ОЗЗ относительный уровень высших гармонических составляющих в напряжении $3U_0$ не превышает 0,05–0,08 (согласно ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения»), а при дуговых ОЗЗ значительно увеличивается. Сигнал с выхода блока используется в логической части ЦУЗЗ (см. рис. 2) для выбора наиболее эффективного способа действия защиты при данной разновидности ОЗЗ (отключение или сигнализация).

В целях повышения достоверности определения поврежденного присоединения схема сравнения значений входных токов (рис. 4) не только определяет присоединение с максимальным значением входного тока, но и оценивает достоверность определения поврежденного присоединения по условию селективности (1).

В отношении токов (1) поврежденному присоединению будет соответствовать присоединение с максимальным током $3I_{0(1max)}$, а неповрежденному – со вторым по величине током $3I_{0(2max)}$. Значения $3I_{0(1max)}$ и $3I_{0(2max)}$ с номерами соответствующих присоединений N_{1max} и N_{2max} определяются в максиселекторах MAX 1(2). В случае выполнения условия (1) как поврежденное определяется присоединение N_{1max} с наибольшим значением входного токов $3I_{0(1max)}$ и на соответствующем выходе схемы сравнения появляется

логический сигнал «1». Если условие (1) не выполняется, схема сравнения определяет два присоединения N_{1max} и N_{2max} с наибольшими значениями входных токов $3I_{0(1max)}$ и $3I_{0(2max)}$. В последнем случае поврежденное присоединение определяется по результатам работы резервного алгоритма ЦИНЗЗ.

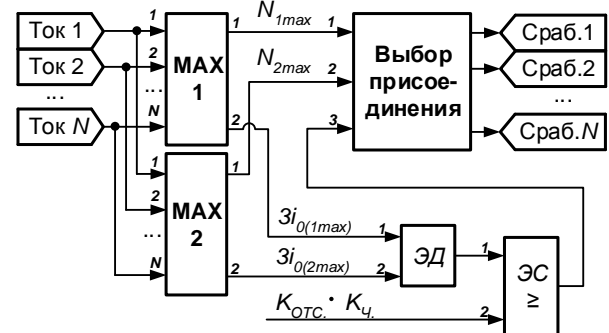


Рис. 4. Схема сравнения значений входных токов ЦТЗЗ

Для исключения ложных срабатываний при высокой чувствительности ЦТЗЗ от токов переходного процесса, возникающего после гашения заземляющей дуги (ГЗД) или отключения ОЗЗ и сопровождающегося медленным процессом разряда емкостей фаз сети, предусмотрена ее блокировка (см. рис. 3). Принцип действия блокировки основан на контроле знака и величины производной текущего среднеквадратичного значения первой гармоники напряжения нулевой последовательности $3U_{0(50)}$ (в момент гашения дуги производная $3U'_{0(50)}(t_{гаш})$ становится отрицательной).

Пусковой орган максимального напряжения нулевой последовательности (см. рис. 3, ПО) выполняет функцию пускового органа ЦТЗЗ и ЦИНЗЗ, обеспечивая их отстройку от режимов без ОЗЗ (например, коммутационных переключений в сети, электромагнитных наводок во вторичных цепях тока и напряжения нулевой последовательности и др.), а также реализует общую неселективную защиту от замыканий на землю (контроль изоляции сети).

Фиксация срабатывания схемы сравнения входных токов осуществляется с помощью блока логики (см. рис. 3) при наличии пускового сигнала от ПО и отсутствии блокирующего сигнала от блока ГЗД.

Алгоритм ЦИНЗЗ. ЦИНЗЗ (см. рис. 1) выполнена на основе принципа контроля начальных фазных соотношений электрических величин переходного процесса, возникающего при пробое изоляции сети на землю. В качестве поляризующей величины

в импульсной направленной защите используется производная напряжения u_0 .

Известно [3, 9], что в переходном режиме, возникающем при пробое изоляции сети на землю при любом режиме заземления нейтрали, для неповрежденного и поврежденного присоединений выполняются соотношения:

$$3i_{0\text{неп}}(t) = 3C_{0\text{собс.неп}} u_0'(t); \quad (8)$$

$$3i_{0\text{пов}}(t) = -3(C_{0\Sigma} - C_{0\text{собс.пов}}) u_0'(t). \quad (9)$$

Согласно (8) и (9), в неповрежденных присоединениях начальные знаки переходного тока $3i_{0\text{неп}}(t)$ и производной напряжения нулевой последовательности $u_0'(t)$ всегда совпадают, а в поврежденном присоединении начальные знаки $3i_{0\text{пов}}(t)$ и $u_0'(t)$ всегда противоположны. Сравнивая начальные знаки переходного тока $3i_0(t)$ и производной напряжения $u_0'(t)$, можно определить поврежденное присоединение. Использование в направленной импульсной защите на основе переходных процессов в качестве поляризующей величины производной напряжения $u_0'(t)$ обеспечивает повышение селективности в условиях возможных искажений начального знака напряжения $u_0(t)$ в момент зажигания заземляющей дуги за счет смещения нейтрали сети (например, вследствие несимметрии емкостей фаз сети или при ДПОЗЗ), а также правильные действия защиты при возникновении пробоя изоляции в момент перехода напряжения поврежденной фазы через нулевое значение. При использовании в защите фильтров, ограничивающих рабочий диапазон частот до 1,5–2 кГц (см. рис. 2), соотношения (8) и (9) выполняются практически на всем интервале времени существования переходных токов (в кабельных сетях 6–10 кВ переходные токи ОЗЗ полностью затухают через 3–5 мс [13]). С учетом этого в разработанной ЦИНЗЗ в целях повышения ее чувствительности фиксация соотношений знаков сравниваемых величин, в отличие от аналогов [2, 12], синхронизирована с моментом перехода через первый максимум производной $u_0'(t)$, достаточно точно совпадающим с моментами перехода через максимум первых полувольт переходных токов $3i_{0\text{пов}}(t)$ и $3i_{0\text{неп}}(t)$. Фиксация результатов сравнения знаков первых полувольт поляризующей величины $u_0'(t)$ и токов $3i_{0\text{пов}}(t)$ и

$3i_{0\text{неп}}(t)$ осуществляется только при срабатывании ПО по напряжению $3U_{0(50)}$ (см. рис. 3).

Логика формирования выходных сигналов. На основе значений входных дискретных сигналов, полученных от ЦТЗЗ и ЦИНЗЗ, логический блок (см. рис. 1) обеспечивает формирование выходных сигналов и визуальное отображение выходной информации о возникновении замыкания на землю в защищаемой сети, зоне повреждения (отходящее от шин присоединение или сборные шины защищаемого объекта), виде замыкания (УОЗЗ, ДПОЗЗ, КрОЗЗ) и сработавших функциях защиты от ОЗЗ.

Выводы. Разработанные на основе сформулированных требований схема и алгоритмы функционирования многофункциональной централизованной защиты от ОЗЗ для распределительных кабельных сетей 6–10 кВ обеспечивают:

- универсальность, т.е. возможность применения защиты как в некомпенсированных, так и в компенсированных кабельных сетях;
- селективное определение поврежденного присоединения при всех разновидностях замыканий на землю (ДПОЗЗ, УОЗЗ, КрОЗЗ);
- селективное определение ОЗЗ на шинах защищаемого объекта;
- распознавание разновидностей ОЗЗ в целях выбора наиболее эффективного способа действия защиты (сигнал или отключение);
- непрерывность действия при устойчивых и наиболее опасных дуговых перемежающихся ОЗЗ.

Функциональные испытания на комплексной имитационной модели «кабельная сеть 6–10 кВ – ЦУЗЗ» подтвердили высокую селективность и устойчивость функционирования принятой архитектуры устройства при всех учитываемых режимах заземления нейтрали и видах замыканий на землю [17].

Разработанное техническое решение повышает эффективность функционирования защиты от ОЗЗ в распределительных кабельных сетях 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали за счет универсальности алгоритмов определения поврежденного присоединения, уменьшения удельных расходов на выполнение защиты, упрощения ее эксплуатации и проектирования.

Список литературы

1. **Федосеев А.М.** Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. **Шуин В.А., Гусенков А.В.** Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ. – М.: НТФ «Энергопрогресс»; «Энергетик», 2001.
3. **Шалин А.И.** Замыкания на землю в линиях электропередачи 6–35 кВ. Особенности возникновения и приборы защиты [Электронный ресурс] // Новости ЭлектроТехники. – 2005. – № 1(31). – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/31/15.php>.
4. **Андреев В.А.** Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. – М.: Высш. шк., 2006. – 639 с.
5. **Шабад М.А.** Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. – СПб.: ПЭИПК, 2003. – 350 с.
6. **Шалин А.И.** Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. Достоинства и недостатки различных защит [Электронный ресурс] // Новости ЭлектроТехники. – 2005. – № 3(33). – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/33/13.php>.
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. **Дударев Л.Е., Запорожченко С.И., Лукьянцев Н.М.** Дуговые замыкания на землю в кабельных сетях // Электрические станции. – 1971. – № 8. – С. 64–66.
9. **Борухман В.А., Иоэльсон В.И.** Центральное устройство селективной сигнализации замыканий на землю типа «Земля» // Наладочные и экспериментальные работы ОРГРЭС. Вып. 35. – М.: Энергия, 1968. – С. 316–324.
10. **Лебедев О.В., Шуин В.А.** О защите от замыканий на землю компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ с использованием принципа сравнения амплитуд переходных токов // Электричество. – 1973. – № 12. – С. 12–17.
11. **Бухтояров В.Ф., Поляков В.Е., Зырянов А.Н.** Централизованное устройство селективной сигнализации замыканий на землю типа СЗВИ // Электрические станции. – 1968. – № 11. – С. 78–80.
12. **Шуин В.А., Гусенков А.В., Дроздов А.И.** Централизованное направленное устройство сигнализации однофазных замыканий на землю с использованием переходных процессов // Электрические станции. – 1993. – № 9. – С. 53–57.
13. **Лихачев Ф.А.** Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1971. – 152 с.
14. **Вайнштейн В.Л.** Исследование высших гармоник тока замыкания на землю // Промышленная энергетика. – 1986. – № 1. – С. 39–40.
15. **Шадрикова Т.Ю.** Разработка принципов выполнения комплексной многофункциональной защиты от однофазных замыканий на

землю кабельных сетей 6–10 кВ: автореф. дис. ... канд. техн. наук. 05.14.02. – Иваново, 2016. – 22 с.

16. **Кутумов Ю.Д.** Повышение эффективности компенсации токов однофазного замыкания на землю в кабельных сетях 6–10 кВ в условиях влияния на ток повреждения высших гармонических составляющих: автореф. дис. ... канд. техн. наук. 05.14.02. – Иваново, 2022. – 20 с.

17. **Алёшин К.С., Сёмушкин А.А.** Исследование алгоритма универсальной централизованной защиты от замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ // Тезисы докладов XVIII Всерос. (X Междунар.) науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых ученых «ЭНЕРГИЯ-2023», посвященной 75-летию теплоэнергетического факультета. В 7 т. Т. 3. Электроэнергетика, Иваново, 16–18 мая 2023 г. – Иваново, 2023. – С. 45.

References

1. Fedoseev, A.M. *Releynaya zashchita elektroenergeticheskikh sistem. Releynaya zashchita setey* [Relay protection of electrical power systems. Relay protection of networks]. Moscow: Energoatomizdat, 1984. 560 p.
2. Shuin, V.A., Gusenkov, A.V. *Zashchity ot zamykaniy na zemlyu v elektricheskikh setyakh 6–10 kV* [Protection against groundfaults in 6–10 kV electrical networks]. Moscow: Energoprogress; Energetik, 2001. 104 p.
3. Shalin, A.I. *Zamykaniya na zemlyu v liniyakh elektroperedachi 6–35 kV. Osobennosti vzniknoveniya i pribory zashchity* [Earth faults in networks 6–35 kV. Features of occurrence and protection devices]. *Novosti ElektroTehniki*, 2005, vol. 1(31). Available at: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/31/15.php>
4. Andreev, V.A. *Releynaya zashchita i avtomatika sistem elektrosnabzheniya* [Relay protection and automation of power supply systems]. Moscow: Vysshaya shkola, 2006. 639 p.
5. Shabad, M.A. *Raschety releynoy zashchity i avtomatiki raspredelitel'nykh setey* [Calculations of relay protection and automation of distribution networks]. Saint-Petersburg: PEIPK, 2003. 350 p.
6. Shalin, A.I. *Zamykaniya na zemlyu v setyakh 6–35 kV. Dostoinstva i nedostatki razlichnykh zashchit* [Earth faults in networks 6–35 kV. Advantages and disadvantages of various protections]. *Novosti ElektroTehniki*, 2005, vol. 3(33). Available at: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/33/13.php>
7. Borukhman, V.A. *Ob ekspluatatsii selektivnykh zashchit ot zamykaniy na zemlyu v setyakh 6–10 kV i meropriyatiyakh po ikh sovershenstvovaniyu* [On the operation of selective protection against groundfaults in 6–10 kV networks and measures for their improvement]. *Energetik*, 2000, vol. 1, pp. 20–22.
8. Dudarev, L.E., Zapozhchenko, S.I., Luk'yantsev, N.M. *Dugovye zamykaniya na zemlyu v kabel'nykh setyakh* [Arc groundfault in cable networks]. *Elektricheskie stantsii*, 1971, no. 8, pp. 64–66.

9. Borukhman, V.A., Ioel'son, V.I. Tsentral'noe ustroystvo selektivnoy signalizatsii zamykaniy na zemlyu tipa «Zemlya» [The central device for selective signaling of groundfaults of the "Earth" type]. *Naladochnye i eksperimental'nye raboty ORGRES*. Moscow: Energiya, 1968, vol. 35, pp. 316–324.

10. Lebedev, O.V., Shuin, V.A. O zashchite ot zamykaniy na zemlyu kompensirovannykh kabel'nykh setey 6–10 kV s ispol'zovaniem printsipa sravneniya amplitud perekhodnykh tokov [On groundfault protection of compensated cable networks of 6–10 kV using the principle of comparing the amplitudes of transient currents]. *Elektrichestvo*, 1973, no. 12, pp. 12–17.

11. Bukhtoyarov, V.F., Polyakov, V.E. Zyryanov, A.N. Tsentralizovannoe ustroystvo selektivnoy signalizatsii zamykaniy na zemlyu tipa SZVI [Centralized device for selective signaling of ground faults of the SSVI type]. *Elektricheskie stantsii*, 1968, vol. 11, pp. 78–80.

12. Shuin, V.A., Gusenkov, A.V., Drozdov, A.I. Tsentralizovannoe napravlennoe ustroystvo signalizatsii odnofaznykh zamykaniy na zemlyu s ispol'zovaniem perekhodnykh protsessov [Centralized directional alarm device for single phase groundfaults using transients]. *Elektricheskie stantsii*, 1993, no. 9, pp. 53–57.

13. Likhachev, F.A. Zamykaniya na zemlyu v setyakh s izolirovannoy neytral'yu i s kompensatsiey emkostnykh tokov [Groundfaults in networks with isolated neutral and with capacitive currents compensation]. Moscow: Energiya, 1971. 152 p.

14. Vaynshteyn, V.L. Issledovanie vysshikh garmonik toka zamykaniya na zemlyu [Investigation of the higher harmonics of the groundfault current]. *Promyshlennaya energetika*, 1986, no. 1, pp. 39–40.

15. Shadrikova, T.Yu. *Razrabotka printsipov vpolneniya kompleksnoy mnogofunktsional'noy zashchity ot odnofaznykh zamykaniy na zemlyu kabel'nykh setey 6–10 kV*. Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Development of principles for the implementation of complex multifunctional protection against single phase groundfaults of 6–10 kV cable networks. Abstr. cand. tech. sci. diss.]. Ivanovo, 2016. 22 p.

16. Kutumov, Yu.D. *Povyshenie effektivnosti kompensatsii tokov odnofaznogo zamykaniya na zemlyu v kabel'nykh setyakh 6–10 kV v usloviyakh vliyaniya na tok povrezhdeniya vysshikh garmonicheskikh sostavlyayushchikh*. Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Improving the efficiency of compensation of single phase groundfault currents in 6–10 kV cable networks under conditions of influence of higher harmonic components on the fault current. Abstr. cand. tech. sci. diss.]. Ivanovo, 2022. 20 p.

17. Aleshin, K.S., Semushkin, A.A. Issledovanie algoritma universal'noy tsentralizovannoy zashchity ot zamykaniy na zemlyu v kabel'nykh setyakh 6–10 kV [Investigation of the algorithm of universal centralized groundfault protection in 6–10 kV cable networks]. *Tezisy dokladov XVIII Vserossiyskoy (X Mezhdunarodnoy) nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh «ENERGIYA-2023», posvyashchennoy 75-letiyu teploenergeticheskogo fakul'teta. V 7 t. T. 3. Elektroenergetika, Ivanovo, 16–18 maya 2023 g.* [Abstracts of the XVIII All-Russian (X International) scientific and technical conference of students, post-graduate students, and young scientists "ENERGY-2023" dedicated to the 75th anniversary of the Thermal Power Engineering Department. In 7 vols., vol. 3. Electric Power Industry, Ivanovo, May 16–18, 2023]. Ivanovo, 2023. P. 45.