

УДК 621.316.925

Константин Сергеевич Алешин

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

Наталья Владимировна Кузьмина

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

Алексей Александрович Семушкин

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: tanya-vinokurova@mail.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: rza@rza.ispu.ru

Мультичастотная направленная защита от замыканий на землю в некомпенсированных сетях 6–10 кВ

Авторское резюме

Состояние вопроса. Для выполнения селективной защиты от однофазных замыканий на землю в некомпенсированных сетях напряжением 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью или с высокоомным резистивным заземлением нейтрали, наиболее широкое применение получили максимальные токовые и токовые направленные защиты нулевой последовательности. Более высокое техническое совершенство (селективность и устойчивость функционирования) обеспечивают токовые направленные защиты от однофазных замыканий на землю. Практически все известные современные цифровые исполнения токовых направленных защит нулевой последовательности различных фирм-производителей основаны на контроле фазных соотношений составляющих основной частоты напряжения и тока нулевой последовательности, что обеспечивает повышение их селективности, но не всегда достаточную чувствительность при наиболее опасных для сети и поврежденного присоединения дуговых перемежающихся однофазных замыканий на землю. В связи с этим актуальной является задача создания токовых направленных защит нулевой последовательности, обладающих высоким техническим совершенством, как при устойчивых, так и при дуговых однофазных замыканиях на землю. Такие исполнения токовых направленных защит нулевой последовательности, на наш взгляд, могут быть получены на основе мультичастотного подхода, предполагающего использование для действия защиты как составляющих основной частоты, так и высших гармонических составляющих установившегося и переходного режимов однофазных замыканий на землю в сетях 6–10 кВ.

Материалы и методы. Учитывая сложность переходных процессов при дуговых замыканиях на землю в электрических сетях среднего напряжения и алгоритмов функционирования устройств релейной защиты, основанных на использовании электрических величин переходных процессов в электроэнергетических объектах, в качестве основного метода исследований использовано математическое моделирование с применением имитационных моделей кабельных и воздушных сетей 6–10 кВ с изолированной нейтралью или с высокоомным резистивным заземлением нейтрали и модели алгоритма функционирования мультичастотной направленной защиты от однофазных замыканий на землю, выполненных с применением прикладной программы Simulink и библиотеки блоков SimPowerSystems программного комплекса Matlab.

Результаты. Обоснованы принципы выполнения мультичастотной направленной защиты от однофазных замыканий на землю в кабельных и воздушных сетях напряжением 6–10 кВ и разработан алгоритм ее функционирования. Представлены результаты функциональных испытаний на имитационных моделях кабельных и воздушных сетей 6–10 кВ, работающих как с изолированной нейтралью, так и с заземлением нейтрали через высокоомный резистор, подтвердившие эффективность разработанных принципов выполнения и алгоритма функционирования мультичастотной направленной защиты при всех учитываемых видах однофазных замыканий на землю.

Выводы. Предлагаемое техническое решение реализует мультичастотный принцип выполнения направленной защиты от однофазных замыканий на землю в кабельных и воздушных распределительных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью и с высокоомным заземлением нейтрали, обеспечивающий более высокую селективность и чувствительность по сравнению с традиционными токовыми направленными защитами, основанными на использовании только составляющих основной частоты, как при устойчивых, так и при наиболее опасных для сети дуговых перемежающихся замыканиях на землю.

Ключевые слова: некомпенсированные сети 6–10 кВ, однофазные замыкания на землю, мультимастотная направленная 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

Nataliya Vladimirovna Kuzmina

Ivanovo State Power Engineering University, Assistant of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: rza@rza.ispu.ru

Alexey Alexandrovich Semushkin

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

Multi-frequency directional protection against earth faults in uncompensated 6–10 kV networks

Abstract

Background. For selective protection against single-phase earth faults in uncompensated 6–10 kV networks with isolated neutral or high-resistance resistive neutral grounding, maximum current and current directional zero-sequence protections are most widely used. Higher technical perfection (selectivity and stability of operation) is provided by current directional protection against single-phase earth faults. Almost all known modern digital designs of directional current zero-sequence protections of various manufacturers are based on monitoring the phase ratios of the components of the fundamental frequency of voltage and current of zero-sequence. It ensures an increase of their selectivity, but not always sufficient sensitivity in the most dangerous for the network and damaged connection arc intermittent earth faults. Therefore, the task to develop current directional zero-sequence protection with high technical perfection, both for stable and arc earth faults, is relevant. In our opinion, such designs of directional current zero-sequence protection can be obtained on the basis of a multi-frequency approach. It assumes the use of both the fundamental frequency components and the higher harmonic components of the steady-state and transient modes of single-phase earth faults in 6–10 kV networks.

Materials and methods. Considering the complexity of transient processes during arc earth faults in medium-voltage electric networks and the algorithms of the operation of relay protection devices based on the use of electrical quantities of transient processes in electric power facilities, the main research method is mathematical modeling using simulation models of 6–10 kV cable and overhead networks with an isolated neutral or with high-resistance resistive grounding of the neutral, and a model of the algorithm for the operation of multi-frequency directional protection against earth faults. They are implemented using the Simulink application program and the SimPowerSystems block library of the Matlab software package.

Results. The principles of implementation of multi-frequency directional protection against single-phase earth faults in cable and overhead networks with voltage of 6–10 kV are substantiated and an algorithm of its operation is developed. The results of the functional tests on simulation models of cable and overhead 6–10 kV networks, operating both with an isolated neutral and with neutral grounding through a high-ohm resistor, confirmed the efficiency of the developed principles of implementation and the algorithm of operation of multi-frequency directional protection for all considered types of single-phase earth faults.

Conclusions. The proposed technical solution implements a multi-frequency principle of directional protection against single-phase earth faults in 6–10 kV cable and overhead distribution networks with isolated neutral and high-resistance neutral grounding. It provides higher selectivity and sensitivity compared to traditional directional current protection based on the use of only fundamental frequency components, both for stable and for the most dangerous arc intermittent earth faults for the network.

Key words: 6–10 kV uncompensated networks, single-phase earth faults, multi-frequency directional earth fault protection

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.5.039-049

Введение. Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) – характерный вид повреждений в сетях напряжением 6–10 кВ (75–90 % всех электрических повреждений), часто являются первопричиной аварийных отключений кабельных и

воздушных линий, сопровождающихся значительным экономическим ущербом [1]. Надежность электроснабжения потребителей распределительных сетей 6–10 кВ в значительной мере определяется техническим совершенством

(селективностью и устойчивостью функционирования [2]) защиты от ОЗЗ, действующей, как правило, на сигнал или, если это требуется, на отключение и обеспечивающей быстрое селективное определение поврежденного присоединения, участка или элемента защищаемой сети.

В России ~78 % кабельных сетей 6–10 кВ работают с изолированной нейтралью, ~2 % – с высокоомным резистивным заземлением нейтрали и остальные ~20 % – с компенсацией емкостного тока ОЗЗ. Практически все воздушные сети 6–10 кВ работают с изолированной нейтралью. Для выполнения селективной защиты от ОЗЗ в некомпенсированных сетях 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью или с высокоомным резистивным заземлением нейтрали, наиболее широкое применение получили максимальные токовые и токовые направленные защиты нулевой последовательности (ТЗНП и ТНЗНП), основанные на использовании составляющих промышленной частоты [2–4]. Более высокое техническое совершенство обеспечивают ТНЗНП, селективность функционирования которых, в отличие от ТЗНП, не зависит от емкостных токов сети и защищаемого присоединения.

Современные цифровые исполнения ТНЗНП, как правило, основаны на контроле фазных соотношений составляющих основной частоты напряжения $3u_0$ и тока $3i_0$ нулевой последовательности. Такой подход обеспечивает повышение их селективности, но не всегда достаточную чувствительность при наиболее опасных для сети и поврежденного присоединения дуговых перемежающихся ОЗЗ (ДПЗЗ). Под ДПЗЗ принято понимать дуговые прерывистые замыкания, сопровождающиеся эскалацией напряжения на поврежденной фазе, амплитуд бросков переходных токов и перенапряжений в сети при повторных зажиганиях заземляющей дуги. Гашение дуги происходит, как правило, при переходе через нуль тока собственных колебаний или составляющей рабочей частоты, повторное зажигание – вследствие пробоя дугового промежутка во время восстановления напряжения на нем до первого максимума. Основным фактором, определяющим возможность возникновения указанной выше эскалации, является величина интервалов времени Δt между повторными зажиганиями дуги. При увеличении интервалов времени Δt между повторными пробоями изоляции среднеквадратичное значение (RMS) тока $3i_0$ в защите от ОЗЗ и, соответственно, ее чувствительность уменьшаются. В то же время доля дуговых замыканий в сетях 6–10 кВ, прежде всего в начальной стадии развития повреждения изоляции, может достигать 60–80 % от общего числа замыканий на землю [5].

На рис. 1 в качестве примера приведены расчетные осциллограммы тока $3i_0$ в поврежденном присоединении и RMS его составляющих при дуговом замыкании, переходящем в

устойчивое ОЗЗ (УЗЗ), полученные на имитационной модели кабельной сети 6 кВ с суммарным емкостным током $I_{C\Sigma} \approx 5$ А.

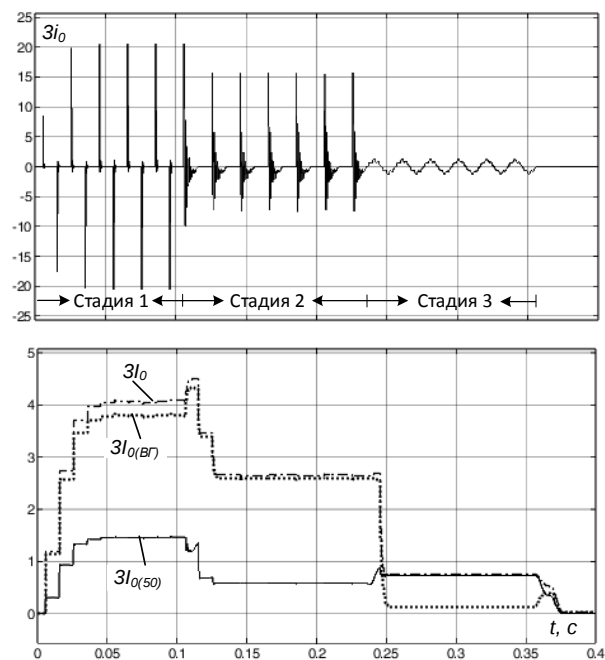


Рис. 1. Изменение RMS тока $3i_0$ в поврежденном присоединении и его составляющих на разных стадиях ОЗЗ: стадия 1 – ДПЗЗ по теории W. Petersen'a ($\Delta t = \sim 10$ мс) [1]; стадия 2 – ДПЗЗ по теории J.F. Peters'a и J. Slepian'a ($\Delta t = \sim 20$ мс) [1]; стадия 3 – УЗЗ; $3i_0$ – ток в поврежденном присоединении; $3i_0$ – RMS тока $3i_0$; $3i_{0(BF)}$ – RMS суммы высших гармонических составляющих тока $3i_0$; $3i_{0(50)}$ – RMS составляющей основной частоты 50 Гц тока $3i_0$

Анализ осциллограмм, приведенных на рис. 1, показывает, что RMS составляющей $3i_{0(50)}$ имеет наибольшее значение при ДПЗЗ по классической теории W. Petersen'a (стадия 1, $\Delta t = \sim 10$ мс). При увеличении интервалов времени Δt между повторными зажиганиями дуги RMS составляющей $3i_{0(50)}$ уменьшается. Например, при ДПЗЗ по теории J.F. Peters'a и J. Slepian'a (рис. 1, стадия 2 $\Delta t = \sim 20$ мс) значение $3i_{0(50)}^{\text{ДПЗЗ}}$ может быть даже меньше значения тока в защите в установившемся режиме ОЗЗ $3i_{0(50)}^{\text{УЗЗ}}$. В реальных сетях 6–10 кВ на условия гашения и зажигания заземляющей дуги при ДПЗЗ могут оказывать влияние множество факторов (переходное сопротивление в месте повреждения, давление в зоне горения дуги, возможность ее растяжения, интенсивность охлаждения и др. [6]), поэтому интервалы времени Δt при повторных пробоях изоляции могут быть существенно больше классических 10–20 мс. По данным [7], полученным на основе исследований на имитационных моделях, дуговые прерывистые ОЗЗ в сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью могут сопровождаться эскалацией перенапряжений при значениях Δt до ~60 мс. При значениях $\Delta t \approx 60$ мс RMS составляющей основной частоты

$3I_{0(50)}^{ДПЗЗ}$ в 3–4 раза меньше, чем RMS составляющей $3I_{0(50)}^{УЗЗ}$ при УЗЗ, что приводит к пропорциональному уменьшению действительной чувствительности токовых и токовых направленных защит при ДПЗЗ по сравнению с ее расчетным значением [8].

С учетом изложенного для электрических сетей 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью, актуальной является задача создания ТНЗНП, обеспечивающих высокую чувствительность не только при УЗЗ, но и при дуговых замыканиях на землю. Анализ зависимостей, приведенных на рис. 1, показывает, что в дуговой стадии ОЗЗ всегда выполняется соотношение $3I_{0(ВГ)} > 3I_{0(50)}$, при этом отношение $3I_{0(ВГ)} / 3I_{0(50)}$ увеличивается при возрастании интервалов Δt между повторными зажиганиями заземляющей дуги. В установившемся режиме ОЗЗ (рис. 1, стадия УЗЗ) наоборот – всегда $3I_{0(ВГ)} < 3I_{0(50)}$ [8]. Отметим, что аналогичный характер соотношений между $3I_{0(ВГ)}$ и $3I_{0(50)}$ на стадиях ДПЗЗ и УЗЗ сохраняется и для сетей 6–10 кВ, работающих с высокоомным заземлением нейтрали. Изложенное позволяет сделать вывод, что высокая чувствительность ТНЗНП и ТНЗНП как при дуговых, так и при устойчивых ОЗЗ может быть обеспечена только при использовании для действия защиты не только составляющей основной частоты $3I_{0(50)}$, но и высших гармонических составляющих $3I_{0(ВГ)}$. Такой подход к выполнению защиты от ОЗЗ в электрических сетях среднего напряжения, предложенный в ABB Oy Medium Voltage Products (Finland), принято называть мультисоставной [10, 11].

Степень разработанности проблемы. Обоснование направления исследований. На основе мультисоставного подхода в ABB Oy Medium Voltage Products (Finland) для электрических сетей среднего напряжения разработана направленная адмитансная защита, в которой комплексная проводимость нулевой последовательности защищаемого присоединения определяется как сумма фазовых векторов (фазов) проводимости нулевой последовательности для всех гармоник, включая составляющую основной частоты [10, 11]:

$$\underline{Y}_{0\text{sum}} = \operatorname{Re}\{\underline{Y}_0^1\} + j \operatorname{Im}\left\{\underline{Y}_0^1 + \sum_{k=2}^n \underline{Y}_0^k\right\}, \quad (1)$$

где $\underline{Y}_0^1$ – вектор комплексной проводимости нулевой последовательности для 1-й гармоники тока $3I_0$ и напряжения $3U_0$; $\underline{Y}_0^k$ – фазор комплексной проводимости нулевой последовательности для k -й гармоники тока $3I_0$ и напряжения $3U_0$.

В целях повышения устойчивости функционирования защиты в переходных режимах при ДПЗЗ используется накопительный (кумулятив-

ный) метод вычислений текущего вектора проводимости нулевой последовательности последовательным суммированием векторов, вычисленных по (1) для заданных моментов времени t_k :

$$\underline{Y}_{0\text{sum}_k} = \sum_{i(t_0)}^{n(t_k)} \operatorname{Re}\{\underline{Y}_{0\text{sum}}(i)\} + j \sum_{i(t_0)}^{n(t_k)} \operatorname{Im}\{\underline{Y}_{0\text{sum}}(i)\}. \quad (2)$$

Недостатком предложенной мультисоставной направленной адмитансной защиты является использование для замера проводимости на основе (1) и (2) ограниченного числа n высших гармонических составляющих. Такой подход эффективен только при устойчивых ОЗЗ, в спектре тока $3I_0$ которых практически всегда содержатся 3, 5, 7, 11, 13 и некоторые другие значимые гармоники [7]. В переходных режимах при замыканиях через перемежающуюся дугу спектр высших гармонических составляющих тока ОЗЗ имеет сплошной (непрерывный) характер, а частота и амплитуда преобладающих в нем гармоник зависит от множества случайных факторов (параметров сети и поврежденной линии, удаленности места ОЗЗ от шин, переходного сопротивления в месте повреждения и др.). Поэтому при использовании для действия мультисоставной защиты от ОЗЗ ограниченного числа заранее заданных гармоник возможны погрешности замера векторов проводимости отдельных гармонических составляющих и трудности с обеспечением высокой устойчивости ее функционирования при ДПЗЗ.

Указанные проблемы предложенной в [10, 11] мультисоставной направленной защиты от ОЗЗ обусловлены, на наш взгляд, прежде всего применением в ней традиционного для релейной защиты векторного представления и преобразований основной и высших гармонических составляющих тока и напряжения нулевой последовательности. Следует, однако, отметить, что векторное преобразование сигналов, применяемое в данной защите, является хотя и основным, но не единственным способом формирования сравниваемых величин, используемым в современной релейной защите. В устройствах релейной защиты, и в частности защитах от ОЗЗ на основе переходных процессов, рекомендуется применять алгоритмы функционирования, использующие непосредственно соотношения мгновенных значений сравниваемых величин [4, 12]. Такой подход позволяет исключить влияние на замер воздействующей величины защиты от ОЗЗ изменений текущего спектра входных величин как в переходных, так и в установившихся режимах замыкания.

С учетом изложенного предметом настоящего исследования являются принципы выполнения мультисоставной направленной защиты от ОЗЗ на основе контроля соотношений мгновенных значений тока $3I_0$ и напряжения $3U_0$ нулевой последовательности для электрических сетей 6–10 кВ,

работающих с изолированной нейтралью или с высокоомным заземлением нейтрали.

Материалы и методы. Наиболее эффективным методом исследований сложных динамических и установившихся режимов функционирования устройств релейной защиты является математическое имитационное моделирование. Учитывая сложность переходных процессов при дуговых ОЗЗ в электрических сетях среднего напряжения и алгоритмов функционирования устройств релейной защиты, основанных на использовании электрических величин переходных процессов в электроэнергетических объектах, для исследований селективности и устойчивости функционирования разработанной мультимастотной направленной защиты от ОЗЗ и проведения ее функциональных испытаний использовались имитационные модели кабельных и воздушных сетей 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью или с высокоомным резистивным заземлением нейтрали, и модели алгоритма функционирования мультимастотной направленной защиты от ОЗЗ, выполненные с применением прикладной программы Simulink и библиотеки блоков SimPowerSystems программного комплекса Matlab.

Соотношения мгновенных значений тока $3i_0$ и напряжения $3u_0$ в некомпенсированных сетях 6–10 кВ. В сетях с изолированной нейтралью ток $3i_{03}$ в месте повреждения и напряжение $3u_0$ на шинах 6–10 кВ центра питания (ЦП) в установившемся и переходном режимах ОЗЗ связаны следующим соотношением [13]:

$$3i_{03}(t) = i_3^{(1)}(t) = 3C_{0\Sigma} \frac{du_0(t)}{dt} = 3C_{0\Sigma} u_0'(t), \quad (3)$$

где $3C_{0\Sigma}$ – суммарная емкость фаз сети на землю.

Соотношение (3) справедливо в диапазоне частот тока ОЗЗ, при которых входные сопротивления кабельных и воздушных линий сети по отношению к земле имеют практически чисто емкостный характер. В [7] показано, что в сетях 6–10 кВ данное допущение справедливо при частотах до ~1,5–2 кГц. С учетом этого в указанном диапазоне частот при всех разновидностях ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью для токов неповрежденного и поврежденного присоединений и напряжения нулевой последовательности выполняются следующие соотношения [13]:

$$3i_{0\text{неп.}i}(t) = 3C_{0\text{собс.}i} \cdot u_0'(t); \quad (4)$$

$$3i_{0\text{пов.}k}(t) = -(3C_{0\Sigma} - 3C_{0\text{собс.}k}) u_0'(t), \quad (5)$$

где $3C_{0\text{собс.}i}$, $3C_{0\text{собс.}k}$ – собственные емкости фаз на землю i -го и k -го присоединений.

Из (4) и (5) следует, что в диапазоне частот до ~1,5–2 кГц как при УЗЗ, так и в переходных режимах при дуговых замыканиях гармонический состав тока в любом из неповрежденных присоединений $3i_{0\text{пов.}i}(t)$ и тока в поврежденном присоединении $3i_{0\text{пов.}k}(t)$ определяется только

гармоническим составом производной напряжения $u_0'(t)$. При этом фазовые соотношения (полярности) кривых совокупности гармоник тока $3i_{0\text{неп.}i}(t)$ и производной $u_0'(t)$ совпадают, а фазовые соотношения (полярности) кривых совокупности гармоник тока $3i_{0\text{пов.}k}(t)$ и производной $u_0'(t)$ противоположны.

Достаточно точное непосредственное сравнение знаков мгновенных значений токов $3i_{0\text{неп.}i}(t)$ и $3i_{0\text{пов.}k}(t)$ и производной $u_0'(t)$ затруднительно из-за влияния временных сдвигов между указанными сигналами, обусловленных угловыми погрешностями первичных преобразователей тока и напряжения нулевой последовательности. Известно [14, 15], что в условиях влияния различного рода погрешностей, а также воздействия гауссовых шумов (помех) для оценки связи (сходства) между двумя различными сигналами используется взаимная корреляционная функция (ВКФ). Для периодических сигналов $s_1(t)$ и $s_2(t)$ с периодом, равным T , ВКФ может быть представлена следующим выражением [14]:

$$B(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T s_1(t) s_2(t + \tau) dt, \quad (6)$$

где T – время усреднения произведения сигналов, равное периоду функций $s_1(t)$ и $s_2(t)$; τ – величина временного сдвига сигналов.

При сравнении сигналов $3i_0(t)$ и $u_0'(t)$ как в установившемся режиме ОЗЗ, так и при дуговых замыканиях ВКФ целесообразно записать в следующей форме:

$$\begin{aligned} B(\tau) &= \frac{1}{T_{\text{уср}}} \int_t^{t+T_{\text{уср}}} C u_0'(t) 3i_0(t + \tau) dt = \\ &= \frac{C}{T_{\text{уср}}} \int_t^{t+T_{\text{уср}}} u_0'(t) 3i_0(t + \tau) dt, \end{aligned} \quad (7)$$

где $T_{\text{уср}}$ – время усреднения произведения сигналов $3i_0(t)$ и $u_0'(t)$; $C = \text{const}$ – масштабирующий коэффициент для $u_0'(t)$ (емкость в Фарадах).

При сравнении сигналов $3i_0(t)$ и $u_0'(t)$ в режиме УЗЗ время усреднения их произведения $T_{\text{уср}}$ принимается равным (или, при необходимости, кратным) периоду T_{50} составляющей основной частоты $f = 50$ Гц токов $3i_0(t)$ и напряжения $u_0(t)$. При ДПЗЗ ток $3i_0(t)$ в поврежденном и неповрежденных присоединениях и производная $u_0'(t)$ представляют собой последовательность (в общем случае непериодическую) коротких импульсов с изменяющейся скважностью (например, рис. 1). При такой форме сравниваемых сигналов $3i_0(t)$ и $u_0'(t)$ для обеспечения непрерывности сигнала на выходе коррелятора, что необходимо для повышения надежности срабатываний

при действии защиты от ОЗЗ на отключение, $T_{\text{уср}}$ должно выбираться из условия

$$T_{\text{уср}} \geq \Delta t_{\text{макс}}, \quad (8)$$

где $\Delta t_{\text{макс}}$ – максимальное значение интервалов времени между повторными зажиганиями заземляющей дуги при ДПЗЗ (можно принять равным $3T_{50} \approx 60$ мс [7]).

С учетом изложенного выше при оценке степени сходства между сигналами $3i_0(t)$ и $u_0'(t)$ как при УЗЗ, так и при ДПЗЗ в (7) $T_{\text{уср}} = 3T_{50} \approx 60$ мс.

ВКФ двух подобных сигналов $u_0'(t)$ и $3i_0(t)$ при отсутствии указанных выше погрешностей, шумов и помех достигает максимума при $\tau = 0$. Известно, что в защитах от ОЗЗ электрических сетей 6–10 кВ в качестве первичных преобразователей тока и напряжения нулевой последовательности, как правило, применяются электромагнитные кабельные трансформаторы тока нулевой последовательности (ТТНП) и трансформаторы напряжения нулевой последовательности (ТННП). Экспериментальный анализ и исследования на имитационных моделях частотных характеристик электромагнитных трансформаторов тока и напряжения, выполненные в [16], показали, что в диапазоне частот до 1,5–2 кГц угловые погрешности кабельных ТТНП, работающих с небольшой вторичной нагрузкой ($R_n < 1$ Ом), как в установившихся, так и в переходных режимах ОЗЗ не превышают нескольких градусов, а угловая погрешность ТННП 6–10 кВ при номинальной нагрузке – одного градуса. С учетом этого для сетей 6–10 кВ с изолированной нейтралью величину временного сдвига сравниваемых сигналов τ в (6) приближенно можно принять равной нулю.

Из (7) при $\tau \approx 0$ с учетом (4) и (5) получим:

$$B(0)_{\text{неп. } i} \approx \frac{C}{T_{\text{уср}}} \int_t^{t+T_{\text{уср}}} u_0'(t) 3i_{0 \text{ неп. } i}(t) dt = \quad (9)$$

$$= \frac{C \cdot 3C_{0 \text{ собс. } i}}{T_{\text{уср}}} \int_t^{t+T_{\text{уср}}} u_0'^2(t) dt > 0;$$

$$B(0)_{\text{пов. } k} \approx \frac{C}{T_{\text{уср}}} \int_t^{t+T_{\text{уср}}} u_0'(t) 3i_{0 \text{ пов. } k}(t) dt = \quad (10)$$

$$= -\frac{C \cdot 3(C_{0\Sigma} - C_{0 \text{ собс. } k})}{T_{\text{уср}}} \int_t^{t+T_{\text{уср}}} u_0'^2(t) dt < 0.$$

Согласно (9) и (10), при принятых допущениях ВКФ для неповрежденного присоединения всегда положительна, а для поврежденного присоединения – всегда отрицательна. Используя указанные соотношения, в сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью можно выполнить мультичастотную направленную защиту, действующую как при устойчивых, так и при дуговых ОЗЗ.

В сетях с высокоомным заземлением нейтрали в поврежденном присоединении кроме емкостной составляющей тока ОЗЗ протекает также и активная составляющая, обусловленная заземляющим резистором R_N в нейтрали. С учетом этого для токов $3i_0$ неповрежденных и поврежденного присоединений выполняются следующие соотношения:

$$3i_{0 \text{ неп. } i}(t) = 3C_{0 \text{ собс. } i} \cdot u_0'(t); \quad (11)$$

$$3i_{0 \text{ пов. } k}(t) = -3(C_{0\Sigma} - C_{0 \text{ собс. } k}) u_0'(t) - \frac{u_N}{R_N} = \quad (12)$$

$$= -3(C_{0\Sigma} - C_{0 \text{ собс. } k}) u_0'(t) - \frac{u_0}{R_N},$$

где $u_N = u_0$ – напряжение на нейтрали сети.

Применяя для сети с высокоомным заземлением нейтрали, как и для сети с изолированной нейтралью, в качестве поляризующей величины производную $u_0'(t)$, из (9) и (10) с учетом (11) и (12) получим:

$$B(0)_{\text{неп. } i} \approx \frac{C \cdot 3C_{0 \text{ собс. } i}}{T_{\text{уср}}} \int_t^{t+T_{\text{уср}}} u_0'^2(t) dt; \quad (13)$$

$$B(0)_{\text{пов. } k} \approx -\frac{C \cdot 3(C_{0\Sigma} - C_{0 \text{ собс. } k})}{T_{\text{уср}}} \int_t^{t+T_{\text{уср}}} u_0'^2(t) dt - \quad (14)$$

$$-\frac{C}{T_{\text{уср}} R_N} \int_t^{t+T_{\text{уср}}} u_0(t) u_0'(t) dt.$$

Сравнение выражений (9) и (13) показывает, что ВКФ $B(0)_{\text{неп. } i}$ для неповрежденных присоединений в сети с высокоомным заземлением нейтрали определяется таким же выражением и имеет всегда положительное значение, как и в сети с изолированной нейтралью. Вторая составляющая в выражении (14) для $B(0)_{\text{пов. } k}$ представляет собой интеграл произведения двух ортогональных функций $u_0'(t)$ и $u_0(t)$ и на интервале интегрирования, равном или кратном периоду составляющей основной частоты T_{50} , всегда равна нулю. Поэтому при использовании в качестве поляризующей величины производной $u_0'(t)$ ВКФ $B(0)_{\text{пов. } k}$ для поврежденного присоединения в сети с высокоомным заземлением нейтрали не зависит от активной составляющей тока $3i_{0 \text{ пов. } k}(t)$ и будет иметь такое же значение, как и в сети с изолированной нейтралью.

Недостатком такого подхода к выполнению направленной мультичастотной защиты является то, что активная составляющая тока $3i_{0 \text{ пов. } k}(t)$ не используется в целях повышения чувствительности схемы сравнения фаз (уровня сигнала на выходе коррелятора). Для повышения указанной чувствительности в схему можно ввести второй коррелятор, в котором в качестве поляризующей величины используется не производная $u_0'(t)$, а непосредственно напряжение

$u_0(t)$ или ток $u_0(t)/R_N$. В этом случае выражения (13) и (14) примут вид:

$$B_2(0)_{\text{неп. } i} \approx \frac{C \cdot 3C_{0 \text{ собс. } i}}{T_{\text{уср}} R_N} \int_t^{t+T_{\text{уср}}} u_0(t) u_0'(t) dt; \quad (15)$$

$$B_2(0)_{\text{пов. } k} \approx -\frac{C \cdot 3(C_{0 \Sigma} - C_{0 \text{ собс. } k})}{T_{\text{уср}} R_N} \int_t^{t+T_{\text{уср}}} u_0(t) u_0'(t) dt - \frac{C}{T_{\text{уср}} R_{\text{уср}}^2} \int_t^{t+T_{\text{уср}}} u_0^2(t) dt. \quad (16)$$

Выражения (15) и (16) содержат интегралы от произведения двух ортогональных функций $u_0(t)$ и $u_0'(t)$, равные нулю на интервале интегрирования $T_{\text{уср}}$, кратном периоду составляющей основной частоты T_{50} . Поэтому ВКФ $B_2(0)_{\text{неп}}$ и первая составляющая $B_2(0)_{\text{пов}}$ равны нулю. Вторая составляющая ВКФ $B_2(0)_{\text{пов}}$ не равна нулю, всегда отрицательна и определяет выходной сигнал на выходе второго коррелятора в сети с высокоомным заземлением нейтрали. Так как сигналы на выходах первого и второго корреляторов для поврежденного присоединения имеют вещественный характер и одинаковые знаки, в сетях с высо-

коомным заземлением нейтрали можно увеличить выходной сигнал и, соответственно, чувствительность фазосравнивающей схемы их суммированием.

Общая структурная схема мультичастотной направленной защиты от ОЗЗ с применением двух корреляторов. Структурная схема мультичастотной направленной защиты для некомпенсированных сетей 6–10 кВ, выполненная на основе изложенных выше принципов (рис. 2), включает:

1) схему формирования сравниваемых величин на основе входных сигналов:

- вторичного тока $3i_0$, получаемого от ТТНП (или первичного преобразователя тока нулевой последовательности другого типа);
- вторичного напряжения $3u_0$ от ТННП;

2) измерительную часть, включающую:

- пусковые органы (ПО) по току $3i_0$ и по напряжению U_0 нулевой последовательности;
- мультичастотный орган направления мощности (ОНМ) на основе двух корреляторов, использующих в качестве поляризующей величины соответственно $C u_0'(t)$ и $u_0(t)/R_N$;

– логику формирования выходных сигналов защиты на основе сигналов от ПО и ОНМ.

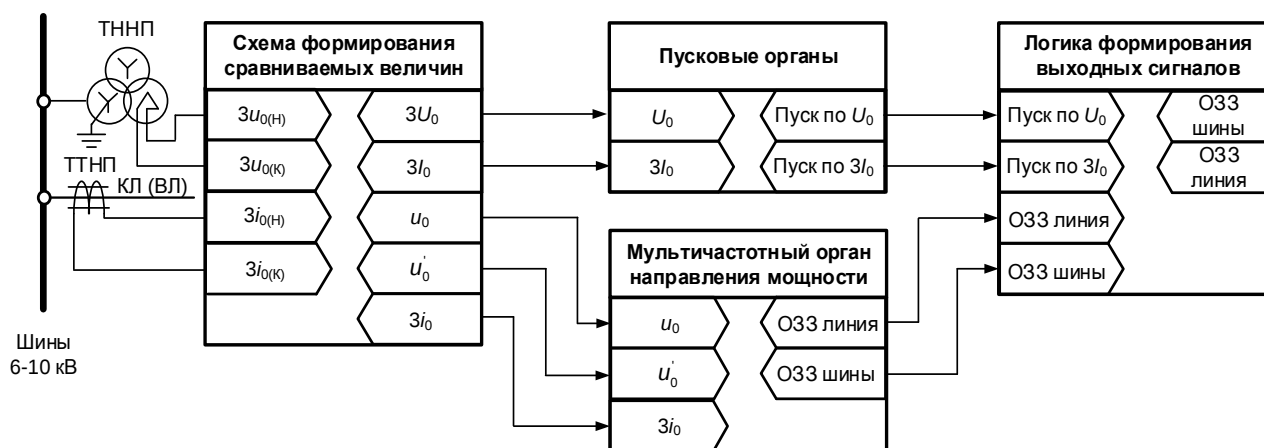


Рис. 2. Общая структурная схема мультичастотной направленной защиты от ОЗЗ для некомпенсированных сетей напряжением 6–10 кВ

Схема формирования сравниваемых величин (СФСВ). СФСВ обеспечивает формирование из входных сигналов величин, используемых в измерительной части защиты, – ПО и ОНМ. Входными сигналами для СФСВ являются вторичное напряжение $3u_0$ от ТННП и вторичный ток $3i_0$ от ТТНП (или первичного преобразователя другого типа), подаваемые на соответствующие входы (рис. 3). СФСВ содержит вторичные преобразователи тока и напряжения нулевой последовательности (ВПТ и ВПН), аналого-цифровые преобразователи (АЦП), цифровые фильтры низких частот (ФНЧ), осуществляющие подавление во входных сигналах $3u_0(t)$ и $3i_0(t)$ составляющих с частотой выше 1,5–2 кГц, блоки RMS для вычисления

текущих среднеквадратичных значений тока $3i_0$ и напряжения U_0 и дифференциатор (D/Dt) для формирования производной $u_0'(t)$.

Для обеспечения непрерывности действия ПО при ДПЗЗ с достаточно большими интервалами времени Δt между повторными зажиганиями заземляющей дуги время усреднения $T_{\text{уср}}$ при вычислении среднеквадратичных значений тока $3i_0$ и напряжения U_0 в блоках RMS принято равным $3T_{50} = 60$ мс.

Оцифрованные сигналы $U_0(t)$, $3i_0(t)$, $u_0(t)$, $u_0'(t)$ и $3i_0(t)$ подаются на соответствующие входы блоков, реализующих алгоритмы ПО и мультичастотного ОНМ защиты.

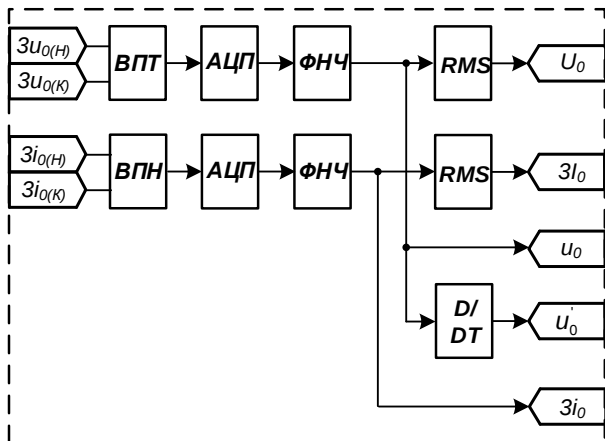


Рис. 3. Схема формирования сравниваемых величин

Измерительная часть мультимастотной направленной защиты от ОЗЗ. Измерительная часть направленной защиты от ОЗЗ, как уже отмечалось выше, включает пусковые органы по напряжению и току нулевой последовательности (рис. 4) и мультимастотный ОНМ (рис. 5).

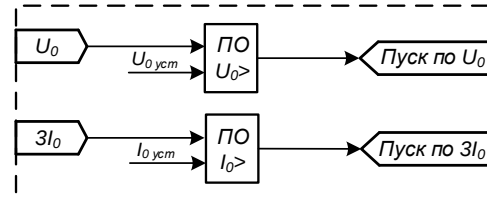


Рис. 4. Структурно-функциональная схема ПО мультимастотной направленной защиты

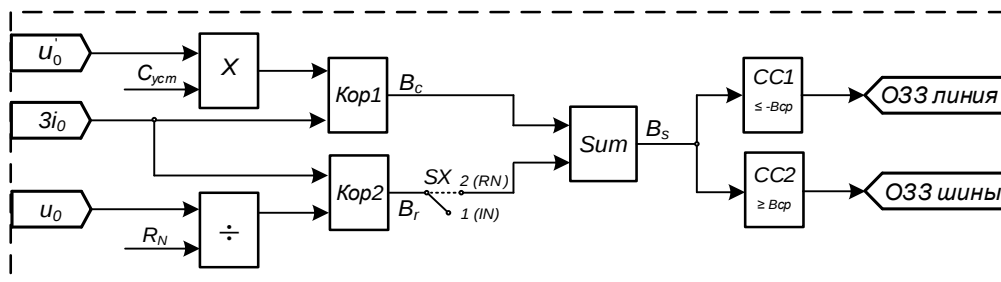


Рис. 5. Структурно-функциональная схема мультимастотного ОНМ

ПО максимального напряжения U_0 обеспечивает отстройку направленной защиты от влияния на ее работу небалансов $U_{0\text{ нб}}$, обусловленных несимметрией нагрузки ТННП и несимметрией емкостей фаз сети на землю, а также от напряжения нулевой последовательности, появляющегося в сети 6–10 кВ при коммутационных переключениях, при КЗ или замыканиях на землю в сети высшего (среднего) напряжения, вследствие электромагнитных наводок во вторичных цепях $3u_0$ и др. ПО максимального тока $3I_0$ предназначен для отстройки от влияния на работу защиты небаланса кабельных ТННП, электромагнитных наводок и шумов во вторичных цепях тока $3i_0$.

Мультимастотный ОНМ предназначен для применения как в сетях с изолированной нейтралью, так и в сетях с резистивным заземлением нейтрали и выполнен с использованием двух корреляторов Кор1 и Кор2 (рис. 5). Кроме корреляторов схема ОНМ включает блок перемножения X , блок деления «÷», сумматор Sum и две схемы сравнения значения входной величины с заданным значением (уставкой) $CC1$ и $CC2$.

В корреляторе Кор1 в качестве поляризующей используется величина $Cu_0(t)$, поэтому выходной сигнал коррелятора B_c определяется, как было показано выше, емкостной составляющей входного тока $3i_0(t)$. С учетом этого в сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью используется только коррелятор Кор1, а коррелятор Кор2 выведен из работы программным переключателем

SX , установленным в положение 1 (IN – изолированная нейтраль). В этом случае суммарный выходной сигнал фазосравнивающей схемы B_s определяется только выходным сигналом первого коррелятора, т.е. $B_s = B_c$.

Коррелятор Кор2 вводится в работу переключателем SX (переключатель в положении 2 R_N) только в сети с высокоомным резистивным заземлением нейтрали. В Кор2 поляризующей является величина $u_0(t)/R_N$, поэтому выходной сигнал коррелятора определяется только активной составляющей входного тока $3i_0(t)$. В сетях с высокоомным заземлением нейтрали ток ОЗЗ и ток $3i_{0\text{повр}}$ поврежденного присоединения содержат как емкостную, так и активную составляющие, поэтому выходной сигнал фазосравнивающей схемы определяется суммой выходных сигналов первого и второго корреляторов, т.е. $B_s = B_c + B_r$, что обеспечивает повышение чувствительности защиты.

Для поврежденного присоединения, как было показано выше, B_c и B_r и их сумма $B_s = B_c + B_r$ всегда отрицательны, а для любого неповрежденного присоединения – положительны. Поэтому при внутренних ОЗЗ срабатывает схема сравнения $CC1$, формируя выходной сигнал ОНМ «ОЗЗ линия», при внешних замыканиях срабатывает схема сравнения $CC2$, формируя сигнал «ОЗЗ шины».

Логика формирования выходных сигналов. На основе значений входных дискретных сигналов, полученных от ОНМ и пусковых

органов, логический блок защиты обеспечивает формирование выходных сигналов (с выдержкой или без выдержки времени на срабатывание), визуальное отображение выходной информации о возникновении внутреннего или внешнего ОЗЗ и фиксацию срабатывания защиты.

Функциональные испытания мультичастотной направленной защиты от ОЗЗ на имитационной модели кабельно-воздушной сети 6 кВ. Для проведения функциональных испытаний использовались имитационные модели кабельно-воздушной сети 6 кВ и разработанная на основе схем по рис. 2–4 имитационная модель мультичастотной направленной за-

щиты от ОЗЗ, выполненные с применением прикладной программы Simulink и библиотеки блоков SimPowerSystems программного комплекса Matlab. Имитационная модель обеспечивала возможность исследования алгоритмов функционирования направленной защиты при всех разновидностях ОЗЗ и работе сети 6 кВ как с изолированной нейтралью, так и с заземлением нейтрали через высокоомный резистор.

На рис. 6 и 7 в качестве примеров приведены расчетные осциллограммы, иллюстрирующие работу алгоритма функционирования основного узла – мультичастотного ОНМ направленной защиты при внутренних и внешних ОЗЗ.

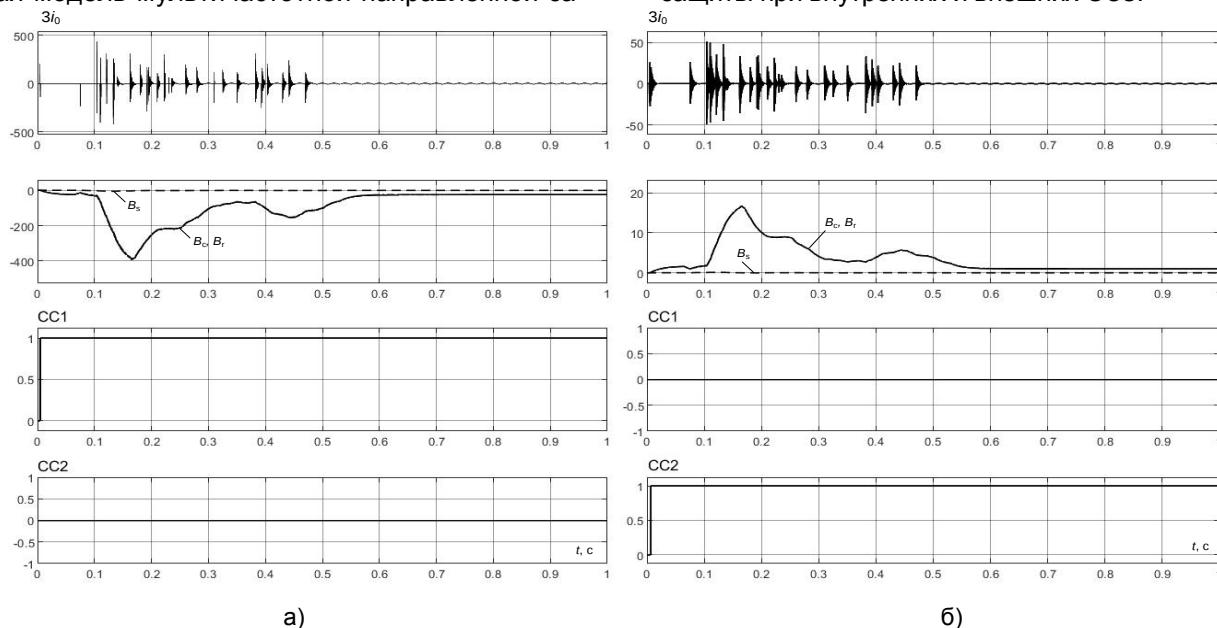


Рис. 6. Расчетные осциллограммы, иллюстрирующие функционирование ОНМ мультичастотной ТНЗНП в сети 6 кВ с изолированной нейтралью при сложном ДПЗЗ, переходящем в УЗЗ: а – внутреннее ОЗЗ; б – внешнее ОЗЗ; $3I_0$ – ток в поврежденном (а) и неповрежденном (б) присоединениях; B_r, B_c, B_s – сигналы на выходах корреляторов Кор1, Кор2 и сумматора Sum; CC1, CC2 – сигналы на выходах схем сравнения

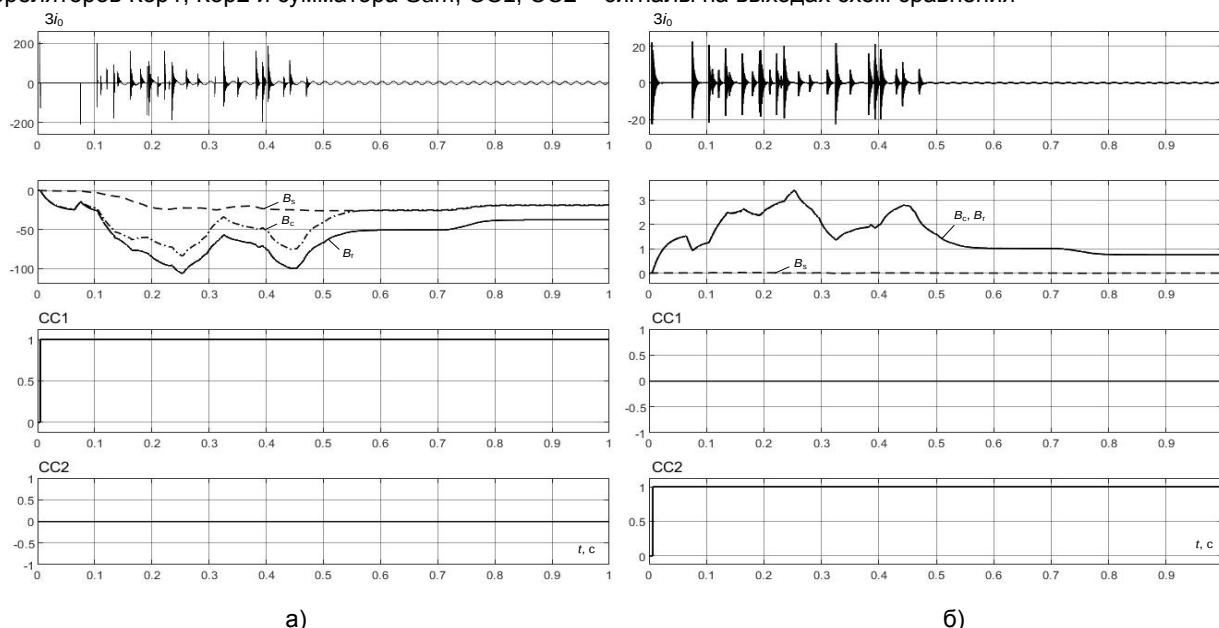


Рис. 7. Расчетные осциллограммы, иллюстрирующие функционирование ОНМ мультичастотной ТНЗНП в сети 6 кВ с высокоомным заземлением нейтрали при сложном ДПЗЗ, переходящем в УЗЗ: а – внутреннее ОЗЗ; б – внешнее ОЗЗ; $3I_0$ – ток в поврежденном (а) и неповрежденном (б) присоединениях; B_r, B_c, B_s – сигналы на выходах корреляторов Кор1, Кор2 и сумматора Sum; CC1, CC2 – сигналы на выходах схем сравнения

Функциональные испытания на имитационной модели кабельно-воздушной некомпенсированной сети напряжением 6 кВ подтвердили эффективность разработанных принципов выполнения и алгоритма функционирования мультичастотной направленной защиты как при устойчивых, так и при дуговых замыканиях на землю.

Результаты. Обоснованы возможность и принципы выполнения мультичастотной направленной защиты от ОЗЗ в некомпенсированных кабельных и воздушных сетях напряжением 6–10 кВ, обеспечивающей высокую селективность и чувствительность как при устойчивых, так и при наиболее опасных для защищаемого объекта замыканиях через перемежающуюся дугу.

Разработаны структурно-функциональные схемы основных функциональных блоков мультичастотной направленной защиты от ОЗЗ для некомпенсированных сетей 6–10 кВ.

Функциональные испытания на комплексной имитационной модели «кабельно-воздушная некомпенсированная сеть 6 кВ – мультичастотная направленная защита от ОЗЗ» подтвердили высокую селективность и устойчивость функционирования принятой архитектуры устройства при всех учитываемых режимах заземления нейтрали и видах замыканий на землю.

Выводы. Разработанное техническое решение реализует перспективный мультичастотный принцип выполнения направленной защиты от ОЗЗ в кабельных и воздушных распределительных сетях 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью или с высокоомным заземлением нейтрали, обеспечивающий более высокую селективность и чувствительность по сравнению с традиционными токовыми направленными защитами, основанными на использовании только составляющих основной частоты, как при устойчивых, так и при наиболее опасных для сети дуговых перемежающихся замыканиях на землю.

Список литературы

1. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1971. – 152 с.
2. Федосеев А.М. Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 560 с.
3. Шабад М.А. Расчеты релейной защиты и автоматизации распределительных сетей. – СПб.: ПЭИПК, 2003. – 350 с.
4. Шуин В.А., Гусенков А.В. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2001. – 104 с.
5. Дударев Л.Е., Запороженко С.И., Лукьянцев Н.М. Дуговые замыкания на землю в кабельных сетях // Электрические станции. – 1971. – № 8. – С. 64–66.
6. Защита сетей 6–35 кВ от перенапряжений / Ф.Х. Халилов, Г.А. Евдокунин, В.С. Поляков и др. – СПб.: Энергоатомиздат, 2002. – 272 с.

7. Шадрикова Т.Ю. Разработка комплексной многофункциональной защиты от однофазных замыканий на землю кабельных сетей 6–10 кВ: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. – Иваново, 2016. – 204 с.

8. Оценка чувствительности токовых защит от замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ / В.А. Шуин, М.С. Аль-Хомиди, О.А. Добрыгина и др. // Вестник ИГЭУ. – 2016. – Вып. 3. – С. 50–55.

9. Вайнштейн В.Л. Исследование высших гармоник тока замыкания на землю // Промышленная энергетика. – 1986. – № 1. – С. 39–40.

10. Ольшовец П. Адмитансные защиты – эффективное средство охраны сетей СН от замыканий на землю // Релейная защита и автоматизация. – 2017. – № 3(28). – С. 56–59.

11. Wahlroos A., Altonen J. Multifrequency admittance protection // Wiadomości Elektrotechniczne. – 2016. – Vol. 12.

12. Попов И.Н., Лачугин В.Ф., Соколова Г.В. Релейная защита, основанная на контроле переходных процессов. – М.: Энергоатомиздат, 1986.

13. 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.

14. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Сов. радио, 1977.

15. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. – М.: Радио и связь, 1981.

16. Филатова Г.А. Разработка и исследование способов и алгоритмов определения места однофазного замыкания на землю в кабельных сетях 6–10 кВ по параметрам переходного процесса: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. – Иваново, 2017.

References

1. 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.
2. Fedoseev, A.M. *Releynaya zashchita elektroenergeticheskikh sistem. Releynaya zashchita setey* [Relay protection of electrical systems. Relay protection of networks]. Moscow: Energoatomizdat, 1984. 560 p.
3. 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.
4. 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: NTF «Energoprogress», 2001. 104 p.
5. Dudarev, L.E., Zaporozhchenko, 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.
6. Khalilov, F.Kh., Evdokunin, G.A., Polyakov, V.S. *Zashchita setey 6–35 kV ot perenapryazheniy* [Protection of 6–35 kV networks from overvoltage]. Saint-Petersburg: Energoatomizdat, 2002. 272 p.
7. Shadrikova, T.Yu. *Razrabotka kompleksnoy mnogofunktsional'noy zashchity ot odnofaznykh zamykaniy na zemlyu kabel'nykh setey 6–10 kV*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Development of principles for the imple-

mentation of complex multifunctional protection against single phase groundfaults of 6–10 kV cable networks. Cand. tech. sci. diss.]. Ivanovo, 2016. 204 p.

8. Al'-Khomidi, M.S., Dobryagina, O.A., Shagurina, E.S., Shadrikova, T.Yu., Shuin, V.A. Otsenka chuvstvitel'nosti tokovykh zashchit ot zamykaniy na zemlyu v kabel'nykh setyakh 6–10 kV [Evaluation of sensitivity of current protection against earth faults in 6–10 kV cable networks]. *Vestnik IGEU*, 2016, issue 3, pp. 50–55.

9. 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.

10. Ol'shovets, P. Admittansnye zashchity – effektivnoe sredstvo okhrany setey SN ot zamykaniy na zemlyu [Admittance protection – an effective means of protecting low voltage networks from ground faults]. *Relay'naya zashchita i avtomatizatsiya*, 2017, no. 3(28), pp. 56–59.

11. Wahlroos, A., Altonen, J. Multifrequency admittance protection. *Wiadomości Elektrotechniczne*, 2016, vol. 12.

12. Popov, I.N., Lachugin, V.F., Sokolova, G.V. *Relay'naya zashchita, osnovannaya na kontrole perekhodnykh protsessov* [Relay protection based on transient process monitoring]. Moscow: Energoatomizdat, 1986.

13. Shuin, V.A. Nachal'nye fazovye sootnosheniya elektricheskikh velichin perekhodnogo protsessa pri zamykaniyakh na zemlyu v kabel'nykh setyakh 6–10 kV [Initial phase relationships of electrical quantities of the transient process during ground faults in 6–10 kV cable networks]. *Elektrichestvo*, 1991, no. 10, pp. 58–61.

14. Gonorovskiy, I.S. *Radiotekhnicheskie tsepi i signaly* [Radio engineering circuits and signals]. Moscow: Sovetskoe radio, 1977.

15. Shirman, Ya.D., Manzhos, V.N. *Teoriya i tekhnika obrabotki radiolokatsionnoy informatsii na fone pomekh* [Theory and technology of processing radar information against the background of interference]. Moscow: Radio i svyaz', 1981.

16. Filatova, G.A. *Razrabotka i issledovanie sposobov i algoritmov opredeleniya mesta odnofaznogo zamykaniya na zemlyu v kabel'nykh setyakh 6–10 kV po parametram perekhodnogo protsessa*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Development and study of methods and algorithms for determining the location of a single-phase ground fault in 6–10 kV cable networks based on the parameters of the transient process. Cand. tech. sci. diss.]. Ivanovo, 2017.