

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311

Способ повышения эффективности функционирования адмитансной защиты от замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью¹

В.А. Шуйн, Е.А. Воробьева, О.А. Добрягина, Т.Ю. Шадрикова
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: shuin@rza.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Опыт эксплуатации выявил не всегда достаточное техническое совершенство – селективность и устойчивость функционирования – токовых защит от замыканий на землю, получивших наиболее широкое применение в распределительных кабельных сетях напряжением 6–10 кВ с изолированной нейтралью. Основной проблемой является обеспечение динамической устойчивости функционирования защит указанного типа в переходных режимах при дуговых прерывистых замыканиях на землю. В европейских и некоторых других странах практическое применение получили защиты от замыканий на землю, основанные на контроле проводимости нулевой последовательности защищаемого присоединения, называемые адмитансными. Адмитансные защиты, рассматриваемые в указанных выше странах как наиболее эффективное средство решения проблемы селективной защиты от замыканий на землю, в России в настоящее время не применяются. Исследования, выполненные на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ, показали, что классический принцип выполнения адмитансной защиты, основанный на использовании составляющих основной частоты тока и напряжения нулевой последовательности, не позволяет обеспечить высокую динамическую устойчивость функционирования в переходных режимах при дуговых замыканиях на землю. В связи с этим актуальной является задача разработки способов повышения динамической устойчивости функционирования адмитансных защит от замыканий на землю.

Материалы и методы: Учитывая сложность переходных процессов при дуговых замыканиях на землю в кабельных сетях 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью, в качестве основного метода анализа динамической устойчивости функционирования адмитансной защиты используется имитационное моделирование в Matlab. Для этого с применением пакетов расширения SimPowerSystem и Simulink разработаны имитационные модели кабельных сетей 6–10 кВ, учитывающие основные особенности их конфигурации и распределенный характер параметров кабельных линий, и имитационные модели исследуемых алгоритмов функционирования адмитансной защиты от замыканий на землю.

Результаты: Предложен новый способ выполнения ненаправленной адмитансной защиты, основанный на контроле емкости нулевой последовательности защищаемого присоединения с использованием как составляющих основной частоты, так и высших гармонических составляющих тока и напряжения нулевой последовательности, обеспечивающий высокую устойчивость функционирования защиты при всех разновидностях внешних и внутренних замыканий на землю в кабельных сетях с изолированной нейтралью.

Выводы: Предложенный способ выполнения адмитансной защиты от однофазных замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью обеспечивает повышение ее селективности и чувствительности и расширение области ее возможного применения.

Ключевые слова: кабельные сети 6–10 кВ, изолированная нейтраль, однофазные замыкания на землю, адмитансная защита от замыканий на землю.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в Ивановском государственном энергетическом университете в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» на тему «Разработка комплекса научно-технических решений по автоматической локализации однофазных замыканий на землю в распределительных кабельных сетях напряжением 6–10 кВ» (уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI57716X0215).

A way to increase the operating efficiency of admittance earth fault protection in 6–10 kV cable networks with isolated neutral

V.A. Shuin, E.A. Vorobyova, O.A. Dobryagina, T.Yu. Shadrikova
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: shuin@rza.ispu.ru

Abstract

Background: Operational experience in using the most common type of current protection against earth faults in 6–10 kV distribution cable networks with isolated neutral has shown that this type of protection has some drawbacks in its selectivity and operational stability. The main problem is ensurance of dynamic stability of operation of this type of protection in transient modes with intermittent arc earth faults. European and some other countries are currently applying earth fault protection based on monitoring of zero sequence conductivity of protected connection, called admittance protection. Admittance protection, considered to be the most effective means of solving the problem of selective protection against earth faults in the above countries, is not currently applied in Russia. Studies performed on imitation models of 6–10 kV cable networks have shown that the classical principle of performing admittance protection based on the use of fundamental frequency components of zero sequence current and voltage does not ensure high dynamic stability of operation in transient modes with arc earth faults. Therefore, an urgent problem to solve now is the development of a way to increase the dynamic stability of operation of earth fault protection.

Materials and Methods: In view of the complexity of transient processes at arc earth faults in 6–10 kV cable networks operating with isolated neutral, simulation modeling in Matlab was used as the main method for analysis of dynamic stability of admittance protection operation. To do this, we have developed simulation models of 6–10 kV cable networks, taking into account the main features of their configuration and distributed parameters of cable lines, and simulation models of investigated algorithms of operation of admittance earth fault protection using SimPowerSystem and Simulink.

Results: We have proposed a new method of implementing non-directional admittance earth fault protection based on monitoring zero-sequence capacitance of a protected connection using both fundamental frequency components and higher harmonics components of current and voltage. The method ensures high operation stability with all types of external and internal earth faults in cable networks with isolated neutral.

Conclusions: The proposed method of implementing admittance earth fault protection in 6–10 kV cable networks with isolated neutral significantly increases selectivity and sensitivity of such protection and extends its possible application area.

Key words: 6–10 kV cable networks, isolated neutral, single-phase earth faults, admittance earth fault protection.

DOI: 10.17588/2072-2672.2018.4.020-030

Введение. Для защиты от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) в распределительных кабельных сетях среднего напряжения 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью или с заземлением нейтрали через высокоомный резистор, основное применение получили токовые защиты нулевой последовательности (ТЗНП). Недостатком ТЗНП является значительное влияние на ее функционирование переходных токов нулевой последовательности $3I_0$ при дуговых перемежающихся ОЗЗ (ДПОЗЗ), ограничивающее селективность и чувствительность и, следовательно, область возможного применения защиты [1–3]. Условие применимости ТЗНП, т. е. селективности при внешних и чувствительности при внутренних ОЗЗ, определяется соотношением между собственным емкостным током защищаемого присоединения $I_{C \text{ собс}}$ и суммарным емкостным током сети $I_{C \Sigma}$ [2]:

$$I_{C \text{ собс}^*} = \frac{I_{C \text{ собс}}}{I_{C \Sigma}} \leq \frac{1}{1 + K_{\text{отс}} K_{\text{пер}} K_{\text{ч.мин}}}, \quad (1)$$

где $K_{\text{отс}} = 1,3$ – коэффициент отстройки, учитывающий влияние различных факторов, обуславливающих погрешности функционирования ТЗНП; $K_{\text{пер}}$ – коэффициент, учитывающий увеличение эффективного значения тока $3I_0$ в переходных режимах ДПОЗЗ; $K_{\text{ч.мин}} = 1,25$ –

минимально допустимое значение коэффициента чувствительности защиты.

При указанных значениях коэффициентов $K_{\text{отс}}$, $K_{\text{ч.мин}}$ и $K_{\text{пер}} = 2-3$ (для ТЗНП на микроэлектронной и микропроцессорной базе) [1] применение ТЗНП в соответствии с (1) в сетях с изолированной нейтралью возможно на присоединениях, собственный емкостный ток которых $I_{C \text{ собс}}$ не превышает ~15–20 % от $I_{C \Sigma}$. Доля таких присоединений на центрах питания (ЦП) распределительных кабельных сетей среднего напряжения от общего числа присоединений, подключенных к шинам защищаемого объекта, в среднем не превышает 50–70 % [4]. На присоединениях, для которых $I_{C \text{ собс}^*} > 0,15-0,2$, должны применяться токовые направленные защиты нулевой последовательности, имеющие меньшую эксплуатационную надежность по сравнению с ненаправленными из-за возможных в реальных условиях эксплуатации ошибок в полярности подключения вторичных цепей тока и напряжения нулевой последовательности.

Влияние переходных процессов на селективность и чувствительность ТЗНП в сетях с заземлением нейтрали через высокоомный резистор несколько меньше, чем в сетях с изолированной нейтралью, что также ограничива-

ет область возможного применения защиты от ОЗЗ данного типа.

В европейских и некоторых других странах для защиты от ОЗЗ кабельных сетей среднего напряжения достаточно широкое применение получили защиты, основанные на контроле проводимости нулевой последовательности защищаемого присоединения, называемые, как правило, адмитансными [5–8]. В [5] отмечается высокая эффективность функционирования адмитансной защиты по сравнению с ТЗНП, в частности более высокая чувствительность к замыканиям через переходное сопротивление при устойчивых ОЗЗ (УОЗЗ). Однако в указанных источниках не приводятся оценки эффективности функционирования адмитансной защиты при ДПОЗЗ, являющихся наиболее опасной для сети и поврежденного присоединения разновидностью замыканий в кабельных сетях с изолированной нейтралью.

В связи с этим предлагается анализ эффективности функционирования «классического» алгоритма ненаправленной максимальной адмитансной защиты при ДПОЗЗ и способ ее повышения.

Материалы и методы. Учитывая сложность переходных процессов при дуговых замыканиях на землю в кабельных сетях 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью, в качестве основного метода анализа динамической устойчивости функционирования адмитансной защиты используется имитационное моделирование в системе Matlab. Для этого с применением пакетов расширений Sim Power System и Simulink разработаны имитационные модели кабельных сетей 6–10 кВ, учитывающие основные особенности их конфигурации и распределенный характер параметров кабельных линий, и имитационные модели исследуемых алгоритмов функционирования адмитансной защиты от замыканий на землю.

Принцип действия максимальной адмитансной защиты от ОЗЗ и условия ее применимости. Воздействующей величиной в адмитансной защите от ОЗЗ является отношение тока $3I_0$ защищаемого присоединения к напряжению нулевой последовательности U_0 , т.е. проводимость нулевой последовательности [5–8]:

$$Y_0 = 3I_0 / U_0 = G_0 + jB_0, \quad (2)$$

где Y_0 – комплексный вектор (фазор) полной проводимости нулевой последовательности; G_0 и B_0 – активная и реактивная составляющие проводимости Y_0 соответственно.

Принцип действия ненаправленной максимальной адмитансной защиты основан на сравнении измеренного значения полной проводимости (замера) $Y_0 = |Y_0|$ с уставкой срабатывания, выбранной из условия отстройки от внешних ОЗЗ.

Упрощенная структурно-функциональная схема максимальной адмитансной защиты от ОЗЗ, основанной на контроле величины про-

водимости нулевой последовательности, для кабельных сетей 6–10 кВ с изолированной нейтралью приведена на рис. 1.

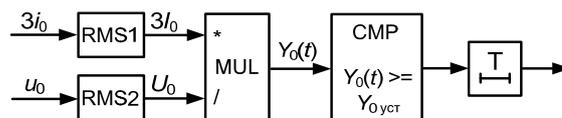


Рис. 1. Структурно-функциональная схема максимальной адмитансной защиты для сетей с изолированной нейтралью

Схема защиты (рис. 1) включает следующие основные функциональные узлы и элементы: RMS1, RMS2 – блоки вычисления среднеквадратичного значения тока $3i_0$ и напряжения u_0 нулевой последовательности; MUL – блок деления; CMP – блок сравнения значений двух величин; T – элемент временной задержки на срабатывание.

При внешних УОЗЗ проводимость на зажимах защиты определяется собственной проводимостью на землю защищаемого присоединения и рассчитывается как

$$Y_0 = 3G_{0 \text{ собс}} + j3\omega C_{0 \text{ собс}}, \quad (3)$$

где $3G_{0 \text{ собс}}$ и $3C_{0 \text{ собс}}$ – активная проводимость и емкость фаз на землю защищаемого присоединения соответственно; $\omega = 2\pi \cdot 50$ – угловая частота рабочего напряжения сети.

Для обеспечения несрабатываний при внешних УОЗЗ уставка максимальной адмитансной защиты должна выбираться из условия

$$Y_{0 \text{ уст}} \geq K_{\text{отс}} |Y_0| = K_{\text{отс}} |3G_{0 \text{ собс}} + j3\omega C_{0 \text{ собс}}|, \quad (4)$$

где $K_{\text{отс}}$ – коэффициент отстройки, учитывающий погрешности функционирования (погрешности измерений воздействующей величины, расчета значений $3C_{0 \text{ собс}}$ и др.).

В кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью активная составляющая проводимости нулевой последовательности $3G_{0 \text{ собс}}$, как правило, составляет несколько процентов от реактивной емкостной проводимости $3\omega C_{0 \text{ собс}}$, т.е. $3\omega C_{0 \text{ собс}} \gg 3G_{0 \text{ собс}}$. Поэтому с достаточной точностью уставка срабатывания определяется по выражению

$$Y_{0 \text{ уст}} \geq K_{\text{отс}} 3\omega C_{0 \text{ собс}}. \quad (5)$$

При внутренних ОЗЗ в электрической сети с изолированной нейтралью замер защиты Y_0 определяется взятой с обратным знаком проводимостью внешней сети:

$$Y_0 = \left| -3(G_{0\Sigma} - G_{0 \text{ собс}}) - j3\omega(C_{0\Sigma} - C_{0 \text{ собс}}) \right| \approx 3\omega(C_{0\Sigma} - C_{0 \text{ собс}}), \quad (6)$$

где $G_{0\Sigma}$ и $C_{0\Sigma}$ – суммарная активная проводимость и емкость фаз сети соответственно.

Чувствительность максимальной адмитансной защиты при внутренних УОЗЗ определяется отношением величины Y_0 по (6) к уставке $Y_{0 \text{ уст}}$ по (5):

$$K_{\text{ч}} = \frac{Y_0}{Y_{0 \text{ уст}}} = \frac{C_{0\Sigma} - C_{0 \text{ собс}}}{K_{\text{отс}} C_{0 \text{ собс}}} \geq K_{\text{ч.мин}}, \quad (7)$$

где $K_{\text{ч.мин}}$ – минимально допустимое значение коэффициента чувствительности (может быть принято таким же, как и для ТЗНП в (1)).

Условие выбора уставки срабатывания по (5) справедливо только для устойчивых замыканий. В переходных режимах при дуговых ОЗЗ, являющихся основной разновидностью замыканий на землю в кабельных сетях среднего напряжения, в токах $3i_0$ поврежденного и неповрежденных присоединений преобладают свободные составляющие с частотами $f_{\text{св}} = \omega_{\text{св}}/2\pi$ от сотен герц до нескольких десятков килогерц, что приводит к увеличению реактивной (емкостной) составляющей проводимости на зажимах защиты $3\omega_{\text{св}}C_{0 \text{ собс}}$. Поэтому для обеспечения селективности несрабатываний в переходных режимах при дуговых ОЗЗ уставка срабатывания максимальной адмитансной защиты в общем случае должна выбираться из условия

$$Y_{0 \text{ уст}} \geq K_{\text{отс}} K_{\text{пер}} \omega C_{0 \text{ собс}}, \quad (8)$$

где $K_{\text{пер}}$ – коэффициент, учитывающий увеличение реактивной составляющей проводимости B_0 и, соответственно, полной проводимости $Y_0 \approx B_0$ в переходных режимах ДПОЗЗ, аналогичный коэффициенту $K_{\text{пер}}$ в (1).

При выборе уставки срабатывания $Y_{0 \text{ уст}}$ по (8) условие селективности максимальной адмитансной защиты при внешних и чувствительности при внутренних ОЗЗ, т.е. условие применимости защиты в сетях с изолированной нейтралью, как и для ТЗНП, будет определяться соотношением между собственной емкостью фаз на землю защищаемого присоединения $3C_{0 \text{ собс}}$ и суммарной емкостью сети $3C_{0\Sigma}$:

$$3C_{0 \text{ собс}}^* = \frac{3C_{0 \text{ собс}}}{3C_{0\Sigma}} = I_{\text{C собс}}^* \leq \frac{1}{1 + K_{\text{отс}} K_{\text{пер}} K_{\text{ч.мин}}}, \quad (9)$$

которое полностью аналогично соотношению (1) для ТЗНП и отличается от последнего только значением коэффициента $K_{\text{пер}}$.

Согласно (8), (9), увеличение воздействующей величины Y_0 в переходных режимах при дуговых ОЗЗ, учитываемое коэффициентом $K_{\text{пер}}$, может существенно ограничить чувствительность максимальной адмитансной защиты при УОЗЗ и область ее возможного применения в сетях с изолированной нейтралью.

Анализ влияния переходных процессов при ДПОЗЗ на эффективность функционирования максимальной адмитансной защиты. Эффективность функционирования максимальной адмитансной защиты от ОЗЗ при ДПОЗЗ исследовалась на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ в системе Matlab. На рис. 2 в качестве примера приведены полученные на имитационной модели кабельной сети расчетные осциллограммы входных величин и сигналов на выходах основных функциональных блоков

максимальной адмитансной защиты, выполненной на основе схемы рис. 1, при внешнем ДПОЗЗ, переходящем в УОЗЗ. В качестве расчетных видов ДПОЗЗ рассматривались наиболее опасные разновидности дуговых прерывистых замыканий, развивающиеся по теории W. Petersen [9] или J.F. Peters, J. Slepian [10], в соответствии с которыми повторные зажигания заземляющей дуги возникают через минимальные интервалы времени $\Delta t = 10\text{--}20$ мс.

Анализ осциллограмм (рис. 2) показывает, что при выборе уставки $Y_{0 \text{ уст}}$ по (5) несрабатывания защиты обеспечиваются только на стадии УОЗЗ.

Анализ результатов вычислительных экспериментов на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ с изолированной нейтралью показал, что для обеспечения устойчивых несрабатываний рассматриваемой защиты при внешних ДПОЗЗ, протекающих в соответствии с теориями W. Petersen или J.F. Peters, J. Slepian, значение уставки $Y_{0 \text{ уст}}$, выбранной по (5), должно быть увеличено в 3–4 раза, т.е. в (8) значение $K_{\text{пер}}$ следует принимать равным $\sim 3\text{--}4$. С учетом этого из (9) при $K_{\text{отс}} = 1,3$, $K_{\text{пер}} = 3\text{--}4$ и $K_{\text{ч.мин}} = 1,25$ получим, что обеспечение селективности несрабатываний при внешних ДПОЗЗ и чувствительности при внутренних УОЗЗ для рассматриваемой адмитансной защиты возможно только на присоединениях, имеющих относительное значение собственного емкостного тока

$$I_{\text{C собс}}^* \leq \frac{1}{1 + 1,3 \cdot (3 - 4) \cdot 1,25} \approx 0,17 - 0,13,$$

что существенно ограничивает область ее применения. Например, по данным [4], на центрах питания кабельных сетей среднего напряжения – шинах 6–10 кВ понизительных подстанций и ГРУ ТЭЦ – доля присоединений, имеющих $I_{\text{C собс}}^* < 0,13$, не превышает 50 %.

Способ повышения динамической устойчивости функционирования адмитансной защиты. Известны различные способы повышения отстроенности устройств защиты от ОЗЗ от влияния переходных процессов при дуговых ОЗЗ. К таким способам относятся, в частности: применение фильтров во входных цепях тока, подавляющих составляющие с частотами выше 50 Гц (применяются в большинстве современных микропроцессорных исполнений ТЗНП); ограничение амплитуды вторичных сигналов в переходных режимах ОЗЗ при токах, превышающих ток срабатывания защиты на основной частоте 50 Гц (например, используется в высокочувствительном реле тока типа РТЗ-51 [11]); быстрый возврат измерительного органа защиты в исходное состояние в бестоковую паузу при дуговых прерывистых ОЗЗ (например, используется в реле защиты от ОЗЗ на основе высших гармоник (ВГ) типа УСЗ-2/2 и его аналогах [12]).

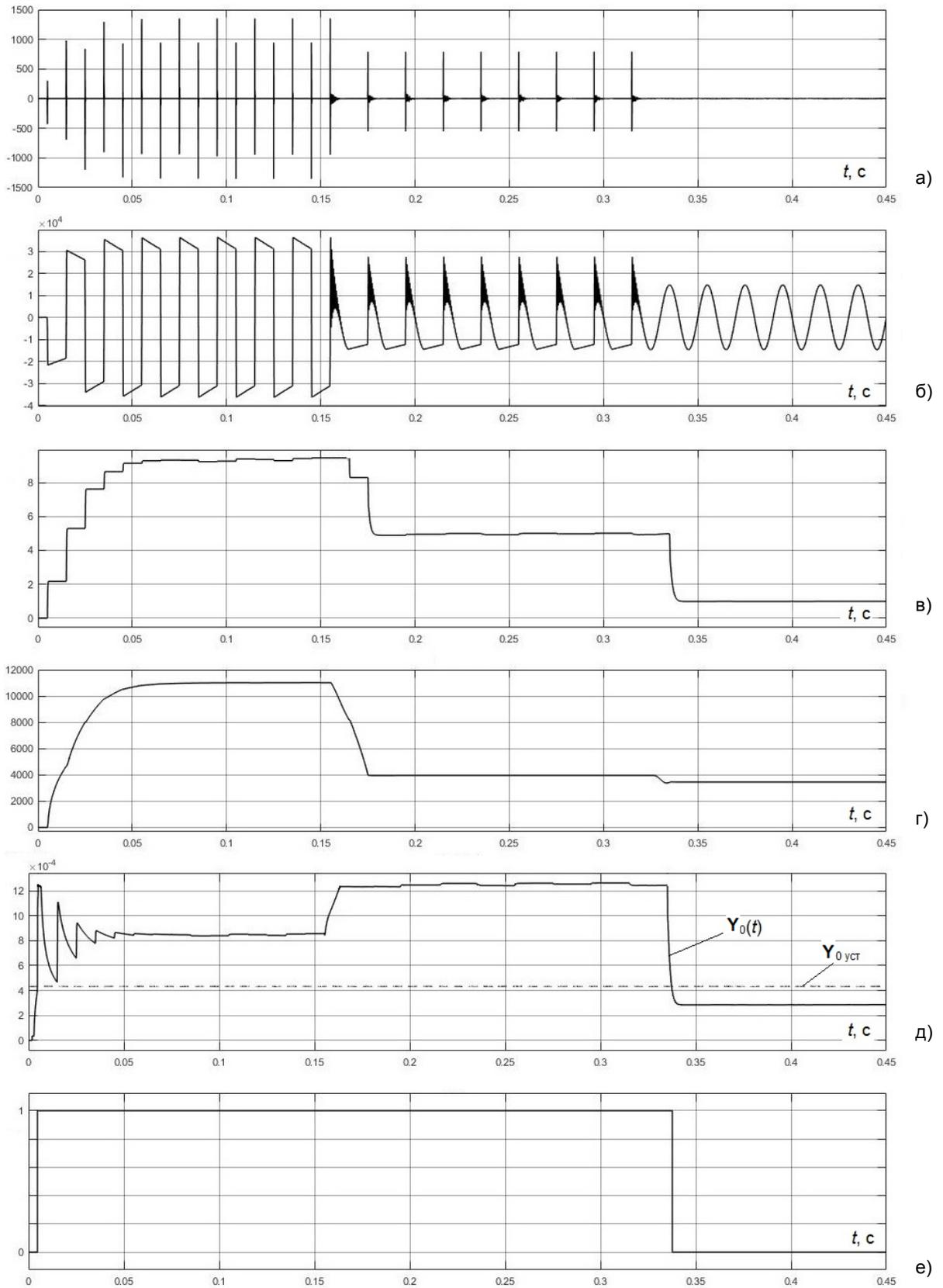


Рис. 2. Работа максимальной адмитансной защиты при внешнем ДПОЗЗ, переходящем в УОЗЗ, в кабельной сети с изолированной нейтралью с $U_{ном} = 6$ кВ, $I_{C\Sigma} = 5$ А: а – ток $3i_0(t)$; б – напряжение $3u_0(t)$; в – текущее значение $3I_0(t)$ на выходе блока RMS1; г – текущее значение $3U_0(t)$ на выходе блока RMS2; д – текущее значение $Y_0(t)$ на выходе блока MUL (сплошная линия) и уставка $Y_{0уст}$ по (5) при $K_{пер} = 1$ (пунктирная линия); е – сигнал на выходе защиты (при задержке на срабатывание $T_{ср} = 0$)

Однако отстройка защиты от ОЗЗ от влияния переходных процессов указанными или подобными им способами приводит не только к повышению динамической устойчивости функционирования при внешних ДПОЗЗ, но и одновременно к значительному загроблению или полным отказам ее срабатываний при внутренних дуговых замыканиях.

Обеспечить повышение динамической устойчивости функционирования при внешних ДПОЗЗ без одновременного загробления защиты при внутренних ДПОЗЗ позволяет разработанный способ выполнения максимальной адмитансной защиты, основанный не на контроле проводимости, а непосредственно на емкости нулевой последовательности защищаемого присоединения, величина которой не зависит от частоты составляющих тока Z_{i_0} в переходных режимах ОЗЗ. В предложенном способе используются соотношения между мгновенными значениями тока Z_{i_0} и производной du_0/dt напряжения нулевой последовательности.

При внешних ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью, при указанном выше допущении ($\omega C_0 \gg G_0$) для тока нулевой последовательности Z_{i_0} в неповрежденном присоединении выполняется соотношение [2]

$$Z_{i_{0\text{неп}}} = C_{0\text{собс}} \frac{d(u_A + u_B + u_C)}{dt} = 3C_{0\text{собс}} u'_0. \quad (10)$$

При внутренних ОЗЗ ток Z_{i_0} в поврежденном присоединении определяется емкостями фаз на землю внешней сети:

$$Z_{i_{0\text{пов}}} = -3(C_{0\Sigma} - C_{0\text{собс}}) u'_0. \quad (11)$$

В кабельных сетях, работающих с изолированной нейтралью или с компенсацией емкостного тока ОЗЗ, соотношения (10) и (11) с достаточной точностью выполняются также и для высших гармонических составляющих тока Z_{i_0} как в установившемся, так и в переходных режимах ОЗЗ [13, 14]. Практически это имеет место, если входное сопротивление нулевой последовательности неповрежденных линий для данной частотной составляющей сохраняет емкостный характер. Расчеты и исследования на имитационных моделях показывают, что при известных параметрах и реальных длинах кабельных и воздушных линий электрических сетей среднего напряжения это условие выполняется в диапазоне частот до 1,5–2 кГц. Согласно (10) и (11), в указанном диапазоне частот отношение мгновенных значений тока Z_{i_0} к мгновенным значениям производной напряжения u'_0 при внешних и при внутренних ОЗЗ соответственно равно:

$$Z_{i_{0\text{собс}}} / u'_0 = 3C_{0\text{собс}}; \quad (12)$$

$$Z_{i_{0\text{пов}}} / u'_0 = -3(C_{0\Sigma} - C_{0\text{собс}}). \quad (13)$$

На основе соотношений (12) и (13) в сетях с изолированной нейтралью можно осуществить максимальную защиту, контролирующую

величину емкости нулевой последовательности защищаемого присоединения как в установившемся, так и в переходных режимах ОЗЗ. Однако непосредственный контроль величины емкости нулевой последовательности защищаемого присоединения на основе соотношений мгновенных значений тока Z_{i_0} и мгновенных значений производной напряжения u'_0 на основе (12) и (13) практически осуществить трудно из-за возможных в процессе измерений временных сдвигов кривых $Z_{i_0}(t)$ и $u'_0(t)$, обусловленных угловыми погрешностями первичных преобразователей тока и напряжения нулевой последовательности, дифференциатора напряжения $u_0(t)$, частотных фильтров для подавления составляющих с частотами $f > 1,5\text{--}2,0$ кГц и других элементов схемы формирования сравниваемых величин. Наиболее просто компенсацию влияния указанных угловых погрешностей можно выполнить используя для сравнения не мгновенные, а средние интегральные значения величин $Z_{i_0}(t)$ и $u'_0(t)$, например среднеквадратичные (действующие) или средневыпрямленные.

Из (12) и (13) для отношения среднеквадратичных значений величин $Z_{i_0}(t)$ и $u'_0(t)$ для неповрежденного и поврежденного присоединений получим:

$$C_{0\text{неп}} = 3I_{0\text{собс}} / U'_0 = 3C_{0\text{собс}}; \quad (14)$$

$$C_{0\text{пов}} = 3I_{0\text{пов}} / U'_0 = 3(C_{0\Sigma} - C_{0\text{собс}}). \quad (15)$$

Аналогичные соотношения можно получить для средневыпрямленных значений величин $Z_{i_0}(t)$ и $u'_0(t)$.

В отличие от рассмотренной выше максимальной адмитансной защиты, основанной на контроле полной проводимости нулевой последовательности защищаемого присоединения Y_0 , значение воздействующей величины на зажимах предлагаемой защиты $C_0 = 3I_0/U'_0$ определяется только величиной емкостей фаз на землю защищаемого присоединения (при внешних ОЗЗ) или внешней сети (при внутренних ОЗЗ), не зависящей от частоты, что позволяет обеспечить высокую устойчивость функционирования как в установившихся, так и в переходных режимах ОЗЗ. Отметим, что стабильность замера $C_0 = 3I_0/u'_0$ как в установившихся, так и в переходных режимах ОЗЗ может быть обеспечена только при подавлении в токе $Z_{i_0}(t)$ и производной $u'_0(t)$ составляющих с частотами, превышающими 1,5–2 кГц.

Для обеспечения селективности несрабатываний при внешних замыканиях на землю предлагаемой максимальной защиты, реагирующей на отношение $Z_{i_0}/u'_0 = C_0$, уставку срабатывания должна выбираться из условия отстройки от собственной емкости фаз на землю защищаемого присоединения

$$C_{0\text{уст}} \geq K_{\text{отс}} 3C_{0\text{собс}}. \quad (16)$$

При выборе уставки по (16) условие применимости предлагаемой защиты определяет

ся выражением (9), в котором следует принять $K_{пер} = 1$. При обычно принимаемых $K_{отс} = 1,3$, $K_{ч.мин} = 1,25$ (для защиты от ОЗЗ с действием на сигнал) и $K_{пер} = 1$ из (9) получим, что для предлагаемой защиты условия селективности и чувствительности выполняются, если относительное значение собственной емкости фаз на землю (относительный собственный емкостный ток) защищаемого присоединения не превышает величины

$$3C_{0\text{собс}^*} = I_{C\text{собс}^*} \leq \frac{1}{1+K_{отс}K_{ч.мин}} = \frac{1}{1+1,3 \cdot 1,25} = 0,38,$$

что значительно больше, чем для рассмотренных выше ТЗНП и максимальной адмитансной защиты.

Доля присоединений на центрах питания распределительных кабельных сетей 6–10 кВ, для которых $I_{C\text{собс}^*} \leq 0,38$, более 90 % от общего числа присоединений, подключенных к шинам защищаемого объекта, а на других объектах – распределительных и трансформаторных подстанциях (РП и ТП) – практически равна 100 % [4].

В кабельных сетях, работающих с заземлением нейтрали через высокоомный резистор, при внешних ОЗЗ ток $3i_0$ в защищаемом присоединении, как и в сети с изолированной нейтралью, определяется соотношением (10). Соответственно, замер защиты при внешних ОЗЗ для мгновенных значений тока и напряжения нулевой последовательности, как и в сети с изолированной нейтралью, определяется соотношением (12), для среднеквадратичных – соотношением (14).

При внутренних ОЗЗ с учетом тока i_R заземляющего резистора, протекающего только через место повреждения и в поврежденном присоединении, ток $3i_0$ рассчитывается как

$$3i_{0\text{пов}} = -3(C_{0\Sigma} - C_{0\text{собс}})u_0' - \frac{U_N}{R_N} = -3(C_{0\Sigma} - C_{0\text{собс}})u_0' - \frac{u_0}{R_N}, \quad (17)$$

где R_N – сопротивление резистора, включенного в нейтраль сети.

Из (17) для среднеквадратичных значений электрических величин $3I_0$ и U'_0 можно получить следующее соотношение:

$$C_{0\text{пов}} = \frac{3I_{0\text{пов}}}{U'_0} = 3(C_{0\Sigma} - C_{0\text{собс}}) \sqrt{1 + \frac{C_{0\Sigma}^2}{(C_{0\Sigma} - C_{0\text{собс}})^2}}. \quad (18)$$

Согласно (18), активная составляющая i_R тока $3i_0$ защищаемого присоединения, обусловленная заземляющим резистором R_N , при внутренних ОЗЗ увеличивает замер защиты, т.е. ее чувствительность. Однако влияние активной составляющей тока ОЗЗ на замер защиты в установившемся и переходных режимах ОЗЗ будет различным. Как известно [15], при высокоомном заземлении нейтрали опти-

мальным считается сопротивление резистора $R_N = 1/3\omega C_{0\Sigma}$. При указанном сопротивлении заземляющего резистора R_N в установившемся режиме ОЗЗ реактивная (емкостная) составляющая тока замыкания равна активной, т.е. $I_R = I_{C\Sigma}$, а полный ток ОЗЗ равен $I_3^{(1)} = \sqrt{I_{C\Sigma}^2 + I_R^2} \approx \sqrt{2}I_{C\Sigma}$. При этом ток $3i_0$ пов и, соответственно, значение воздействующей величины $C_{0\text{пов}}$ на зажимах защиты увеличиваются в $\sqrt{1 + C_{0\Sigma}^2 / (C_{0\Sigma} - C_{0\text{собс}})^2}$ раз. В переходных режимах при дуговых ОЗЗ в токе $3i_0$ пов активная составляющая тока ОЗЗ и, соответственно, тока $3i_0$ пов значительно меньше емкостной и не оказывает существенного влияния на замер защиты, который в этих режимах определяется выражением (15).

Таким образом, заземление нейтрали сети через высокоомный резистор не влияет на условия селективности предлагаемой защиты, по сравнению с изолированной нейтралью, увеличивает замер и, соответственно, чувствительность предлагаемой защиты в установившемся режиме ОЗЗ и обеспечивает такую же чувствительность в переходных режимах ОЗЗ, как и в сети с изолированной нейтралью.

Анализ функционирования максимальной защиты на основе контроля емкости нулевой последовательности при УОЗЗ и ДПОЗЗ. Структурно-функциональная схема защиты, основанной на контроле величины емкости нулевой последовательности защищаемого присоединения, показана на рис. 3.

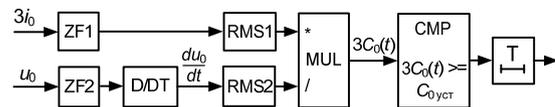


Рис. 3. Структурно-функциональная схема защиты на основе контроля емкости нулевой последовательности

Схема защиты (рис. 3) включает следующие основные функциональные узлы и элементы: ZF1, ZF2 – полосовые фильтры, выделяющие из тока $3i_0$ и напряжения u_0 сумму составляющей основной частоты 50 Гц и высших гармонических составляющих в диапазоне до 1,5–2 кГц; D/DT – дифференциатор; MUL – блок деления; RMS1, RMS2 – блоки вычисления среднеквадратичного значения; CMP – блок сравнения значений двух величин; T – элемент временной задержки на срабатывание.

Уставка $C_{0\text{уст}}$ выбирается из условия отстройки от собственной емкости фаз на землю защищаемого присоединения по выражению (16). Если значение выходной величины блока деления $MUL C_0(t) = 3I_0(t) / U'_0(t)$ больше заданной уставки срабатывания, на выходе блока сравнения CMP появляется логический сигнал 1, означающий срабатывание защиты.

При внешних ОЗЗ замер защиты – сигнал на выходе блока СМР – в соответствии с (14), как в установившемся режиме ОЗЗ, так и в переходных режимах при дуговых замыканиях на землю имеет значение, равное $3C_0 \text{ собс}$, что меньше уставки срабатывания, сигнал на выходе блока СМР равен 0, т.е. защита не срабатывает.

При внутренних ОЗЗ в сети, работающей с изолированной нейтралью, замер защиты – сигнал на выходе блока СМР – в соответствии с (15), и в установившемся режиме ОЗЗ, и в переходных режимах при дуговых замыканиях на землю имеет значение, равное $3(C_{0\Sigma} - C_0 \text{ собс})$. Если замер защиты превышает заданную уставку срабатывания, на выходе блока СМР и

элемента временной задержки на срабатывание Т появляется логический сигнал 1, являющийся сигналом срабатывания защиты.

Эффективность функционирования разработанного способа защиты на основе контроля емкости нулевой последовательности исследовалась на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ в системе Matlab. На рис. 4, 5 в качестве примера приведены расчетные осциллограммы, иллюстрирующие алгоритм функционирования защиты при различных разновидностях внутренних и внешних ОЗЗ (ДПОЗЗ и УОЗЗ) в кабельной сети 6 кВ с изолированной нейтралью.

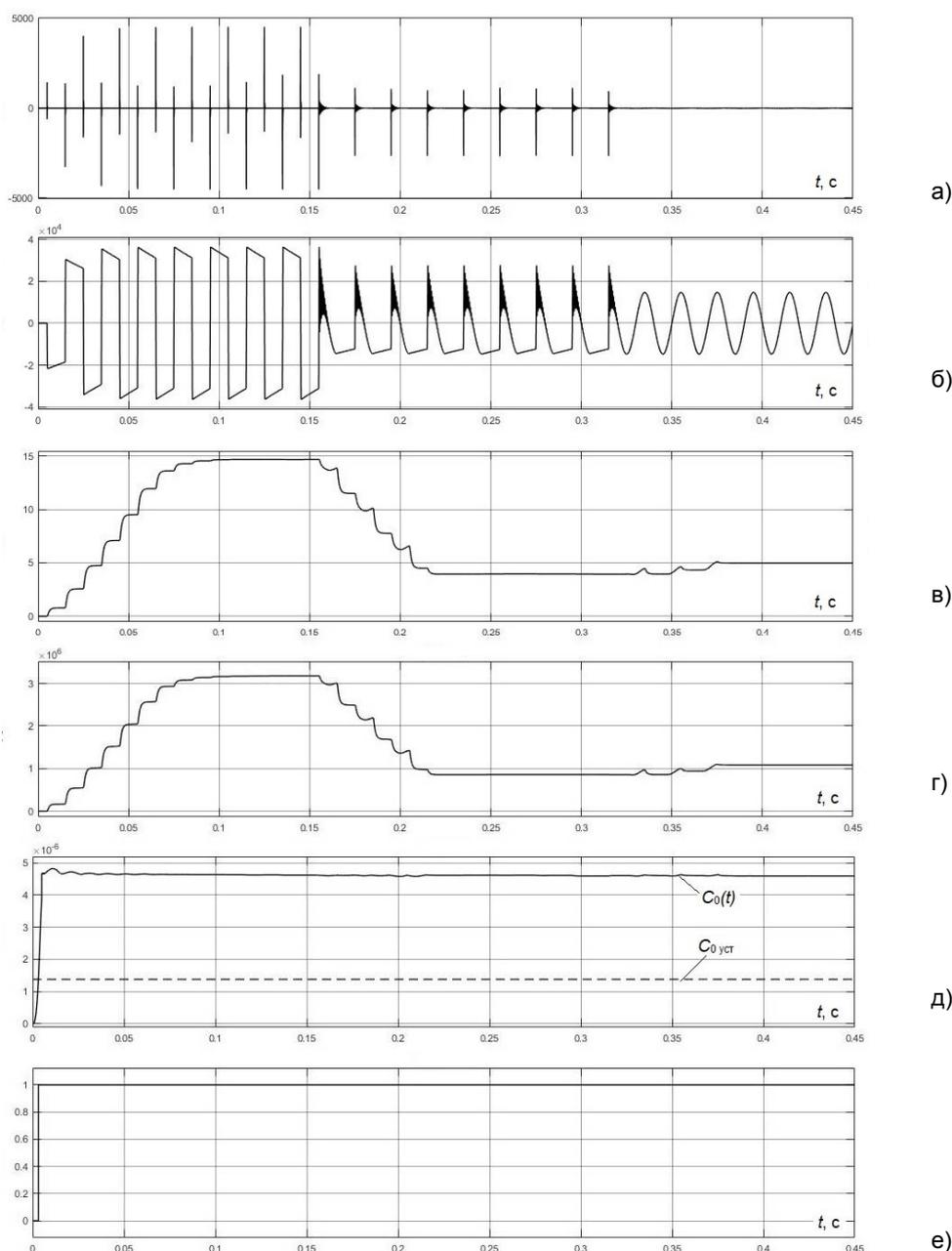


Рис. 4. Работа защиты на основе контроля емкости нулевой последовательности при внутреннем ОЗЗ в кабельной сети 6 кВ с изолированной нейтралью: а – ток $I_0(t)$; б – напряжение $U_0(t)$; в – текущее значение тока $I_0(t)$; г – текущее значение производной $U'_0(t)$; д – текущее значение $C_0(t)$ (сплошная линия) и уставка $C_{0уст}$ по (16) (пунктирная линия); е – сигнал на выходе защиты (при задержке на срабатывание $T_{cp} = 0$)

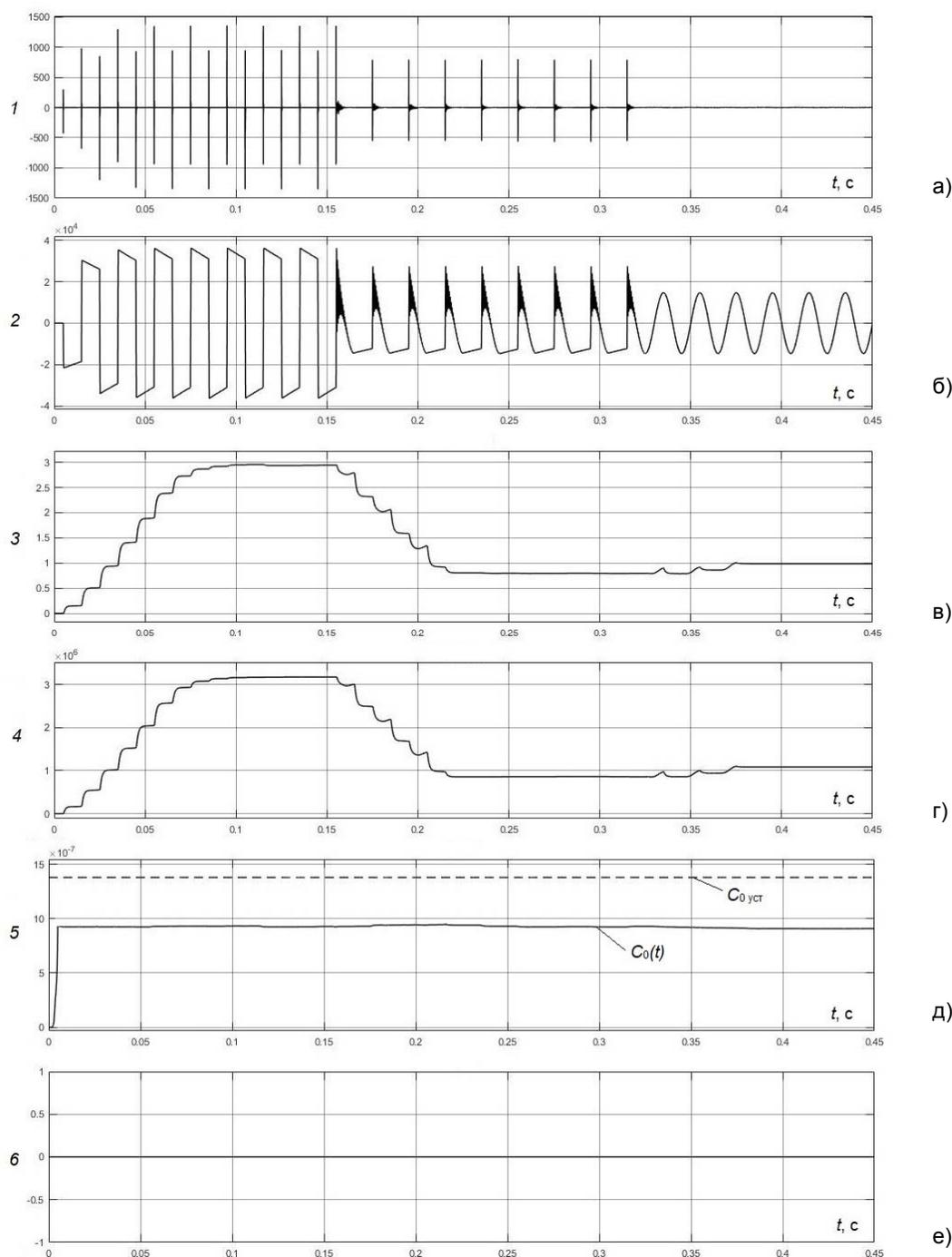


Рис. 5. Работа защиты на основе контроля емкости нулевой последовательности при внешнем ОЗЗ в кабельной сети 6 кВ с изолированной нейтралью, а–е – то же, что и на рис. 4

Результаты исследования. Анализ результатов вычислительных экспериментов, выполненных на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ с изолированной нейтралью, показал (например, осциллограммы на рис. 4, 5), что воздействующая величина защиты – емкость нулевой последовательности защищаемого присоединения – как в переходных, так и в установившемся режимах ОЗЗ остается неизменной, чем обеспечивается высокая устойчивость функционирования как при ДПОЗЗ, так и при УОЗЗ.

В сетях, работающих с заземлением нейтрали через высокоомный резистор, в переходных режимах при внутренних дуговых прерывистых ОЗЗ активная составляющая тока нулевой последовательности в поврежденном присоединении значительно меньше емкостной и не оказывает существенного влияния на замер защиты, который в этих режимах, как и в сети с изолированной нейтралью, определяется выражением (15). В режиме УОЗЗ за счет активного тока, создаваемого заземляющим резистором R_N , замер увеличивается в

$\sqrt{1 + C_{0\Sigma}^2 / (C_{0\Sigma} - C_{0\text{собс}})^2}$ раз, что повышает чувствительность защиты.

Выводы. «Классическая» максимальная адмитансная защита, основанная на контроле проводимости нулевой последовательности защищаемого присоединения, не позволяет обеспечить высокую динамическую устойчивость функционирования при дуговых ОЗЗ, что значительно уменьшает ее чувствительность при внутренних замыканиях и сужает область ее возможного применения.

Предложенный способ выполнения адмитансной защиты от ОЗЗ кабельных сетей с изолированной нейтралью и с высокоомным заземлением нейтрали, основанный на контроле емкости нулевой последовательности, позволяет обеспечить повышение селективности и чувствительности защиты и расширение области ее возможного применения, ограничиваемой величиной собственного емкостного тока защищаемого присоединения.

Список литературы

1. **Шабад М.А.** Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. – СПб.: ПЭИПК, 2003. – 350 с.
2. **Шуин В.А., Гусенков А.В.** Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ. – М.: НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик», 2001. – 104 с.
3. **Чернобровов Н.В., Семенов В.А.** Релейная защита энергетических систем. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 800 с.
4. **Multiparameter Current Protections Against Ground Faults in 6–10 kV Cable Networks / V.A. Shuin, A.N. Golubev, O.A. Dobryagina, T.Yu. Shadrikova // Power Technology and Engineering.** – January 2018. – Vol. 51, no. 5. – P. 602–610.
5. **Ольшовец П.** Адмитансные защиты – эффективное средство охраны сетей СН от замыканий на землю // Релейная защита и автоматизация. – Чебоксары: РИЦ «Содействие развитию релейной защиты, автоматики и управлению в электроэнергетике», 2017. – № 3(28). – С. 56–59.
6. **Пат. 2491563** Российская Федерация, G01R31/08. Способ и устройство для определения замыкания на землю / Валроос Ари (FI), Алтонен Янне (FI); опубл. 27.08.2013.
7. **Wahlroos A., Altonen J.** Multifrequency admittance protection // *Wiadomości Elektrotechniczne.* – 2016. – 12.
8. **Lorenc J., et. al.** Admittance criteria for earth fault detection in substation automation systems in Polish distribution power networks. CIREN. – Birmingham, 1997.
9. **Petersen W.** Der aussetzende (intermittierende) Erdschluss // *ETZ.* – 1917. – Н. 47, 48.
10. **Peters J.F., Slepian J.** Voltage Induced by Arcign Grounds // *Tr. AIEE.* – 1928, Apr. – P. 478.
11. **Нудельман Г.С., Шамис М.А.** Быстродействующее реле тока для защиты от замыканий на землю // *Электротехническая промышленность. Сер. Аппараты низкого напряжения.* – 1981. – Вып. 1 (92). – С. 13.

12. **Устройства** сигнализации замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ / В.М. Кискачи, С.Е. Сурцева, Н.М. Горшенина и др. // *Электрические станции.* – 1972. – № 4. – С. 69–72.

13. **Кискачи В.М.** Селективность сигнализации замыканий на землю с использованием высших гармоник токов нулевой последовательности // *Электричество.* – 1967. – № 9. – С. 24–30.

14. **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.

15. **Защита** сетей 6–35 кВ от перенапряжений / Ф.Х. Халилова, Г.А. Евдокунина, В.С. Поляков и др.; под ред. Ф.Х. Халилова, Г.А. Евдокунина, А.И. Таджибаева. – СПб.: Энергоатомиздат, 2002. – 272 с.

References

1. Shabad, M.A. *Raschetny releynoy zashchity i avtomatiki raspredelitel'nykh setey* [Calculations of relay protection and automation of distribution networks]. Saint-Petersburg: PEIPK, 2003, 350 p.
2. Shuin, V.A. Gusev, A.V. *Zashchity ot zamykaniy na zemlyu v elektricheskikh setyakh 6–10 kV* [Protection against earth faults in 6–10 kV electric networks]. Moscow: NTF EnergoProgress, Energetik, 2001. 104 p.
3. Chernobrovov, N.V., Semenov, V.A. *Reley-naya zashchita energeticheskikh sistem* [Relay protection of power systems]. Moscow: Energoatomizdat, 1998. 800 p.
4. Shuin, V.A., Golubev, A.N., Dobryagina, O.A., Shadrikova, T.Yu. Multiparameter Current Protections Against Ground Faults in 6–10 kV Cable Networks. *Power Technology and Engineering*, January 2018, vol. 51, no. 5, pp. 602–610.
5. Ol'shovets, P. Admittansnye zashchity – effektivnoe sredstvo okhrany setey SN ot zamykaniy na zemlyu [Admittance protection – an effective means of earth fault protection of MV networks]. *Reley-naya zashchita i avtomatizatsiya*, 2017, no. 3 (28), pp. 56–59.
6. Wahlroos, A., Altonen, J. *Sposob i ustroystvo dlya opredeleniya zamykaniya na zemlyu* [Method and device for earth fault detection]. Patent RF, no. 2491563, 2013.
7. Wahlroos, A., Altonen, J. Multifrequency admittance protection. *Wiadomości Elektrotechniczne*, 2016, 12.
8. Lorenc, J., Marszalkiewicz, K., Andruszkiewicz, J. Admittance criteria for earth fault detection in substation automation systems in Polish distribution power networks, CIREN 1997, Birmingham, UK.
9. Petersen, W. Der aussetzende (intermittierende) Erdschluss. *ETZ*, 1917, pp. 47–48.
10. Peters, J.F., Slepian, J. Voltage Induced by Arcign Grounds. *Tr. AIEE*, 1928, Apr., p. 478.
11. Nudel'man, G.S., Shamis, M.A. Bystrodeystvuyushchee rele toka dlya zashchity ot zamykaniy na zemlyu [High-speed earth fault relay for earth fault protection]. *Elektricheskaya promyshlennost'. Ser. Apparaty nizkogo napryazheniya*, 1981, issue 1(92), p. 13.
12. Kiskachi, V.M., Surtseva, S.E., Gorshenina, N.M. Ustroystva signalizatsii zamykaniy na zemlyu v kabel'nykh setyakh 6–10 kV [Earth fault signaling devices in 6–10 kV cable networks]. *Elektricheskie stantsii*, 1972, no. 4, pp. 69–72.
13. Kiskachi, V.M. Selektivnost' signalizatsii zamykaniy na zemlyu s ispol'zovaniem vysshikh garmonik

tokov nulevoy posledovatel'nosti [Selectivity of earth fault signaling using higher harmonics]. *Elektrichestvo*, 1967, no. 9, pp. 24–30.

14. Shuin, V.A. Nachal'nye fazovye sootnosheniya elektricheskikh velichin perekhodnogo protsessa pri замыкaniyakh na zemlyu v kabel'nykh setyakh 6–10 kV [Initial phase relations of electrical quantities of the tran-

sient process in the case of earth faults in 6–10 kV cable networks]. *Elektrichestvo*, 1991, no. 10, pp. 58–61.

15. Khalilov, F.Kh., Evdokunin, G.A., Polyakov, V.S. *Zashchita setey 6–35 kV ot perenapryazheniy* [Overvoltage protection of 6–35 kV networks]. Saint-Petersburg: Energoatomizdat, 2002/ 272 p.

Шуин Владимир Александрович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами,
телефон (4932) 26-99-06,
e-mail: shuin@rza.ispu.ru

Shuin Vladimir Aleksandrovich,

Ivanovo State Power Engineering University,
Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of the Department of Electric Power Systems Automatic Control,

tel. (4932) 26-99-06,

e-mail: shuin@rza.ispu.ru

Воробьева Екатерина Андреевна,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами,
телефон (4932) 26-99-06,

e-mail: rza@rza.ispu.ru

Vorobyova Ekaterina Andreyevna,

Ivanovo State Power Engineering University,
Post-graduate Student of the Department of Electric Power Systems Automatic Control,

tel. (4932) 26-99-06,

e-mail: rza@rza.ispu.ru

Добрягина Ольга Александровна,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами,
телефон (4932) 26-99-06,

e-mail: dobryagina@eef.ispu.ru

Dobryagina Olga Aleksandrovna,

Ivanovo State Power Engineering University,
Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Department of Electric Power Systems Automatic Control,

tel. (4932) 26-99-06,

e-mail: sarbeeva_olga@mail.ru

Шадрикова Татьяна Юрьевна,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами,
телефон (4932) 26-99-06,

e-mail: stu@rza.ispu.ru

Shadrikova Tatyana Yuryevna,

Ivanovo State Power Engineering University,
Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Department of Electric Power Systems Automatic Control,

tel. (4932) 26-99-06,

e-mail: stu@rza.ispu.ru