

ЭЛЕКТРОЭНЕРGETИКА

УДК 621.311

СПОСОБ ВЫПОЛНЕНИЯ АДАПТИВНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6–10 КВ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

О.А. ДОБРЯГИНА, В.В. ТЮТИКОВ, Т.Ю. ШАДРИКОВА, В.А. ШУИН
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: rza@rza.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. В распределительных кабельных сетях напряжением 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью, наиболее широкое применение для защиты от однофазных замыканий на землю получили простые и надежные токовые защиты нулевой последовательности. Однако защиты данного типа во многих случаях не обеспечивают требуемую чувствительность при внутренних (в зоне действия) замыканиях из-за необходимости отстройки по току срабатывания от бросков переходных токов при внешних замыканиях через перемежающуюся дугу. Повышение чувствительности возможно при применении адаптивных токовых защит, однако известные способы их выполнения эффективны только при устойчивых замыканиях через переходное сопротивление, но не позволяют обеспечить высокую динамическую устойчивость функционирования в переходных режимах при наиболее опасных для сети дуговых перемежающихся замыканиях. В связи с этим совершенствование способов выполнения адаптивных токовых защит от замыканий на землю является актуальной задачей.

Материалы и методы. Для сравнительного анализа эффективности функционирования известных и предлагаемого способов выполнения адаптивных токовых защит с учетом сложности переходных процессов при замыканиях на землю через перемежающуюся дугу в кабельных сетях 6–10 кВ использовано имитационное моделирование в системе Matlab с пакетами расширения SimPowerSystem и Simulink. Исследования алгоритмов функционирования адаптивных токовых защит от замыканий на землю проведены на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ с изолированной нейтралью и с заземлением нейтрали через высокоомный резистор.

Результаты. Исследования на имитационных моделях показали, что известные способы выполнения адаптивной токовой защиты от замыканий на землю, основанные на использовании полных токов и напряжения нулевой последовательности, неэффективны при дуговых перемежающихся замыканиях на землю. Предложен способ выполнения адаптивной токовой защиты от замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью или с заземлением нейтрали через высокоомный резистор, значительно повышающий динамическую устойчивость функционирования адаптивной токовой защиты в переходных режимах при дуговых замыканиях на землю и позволяющий обеспечить использование в качестве воздействующих величин только составляющих рабочей частоты 50 Гц тока и напряжения нулевой последовательности.

Выводы. Предложенный способ выполнения адаптивной токовой защиты от замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью и с заземлением нейтрали через высокоомный резистор не только обеспечивает повышение чувствительности при замыканиях на землю через переходное сопротивление, значительное повышение динамической устойчивости функционирования в переходных режимах при замыканиях через перемежающуюся дугу, но и расширяет область ее возможного применения.

Ключевые слова: кабельные сети 6–10 кВ с изолированной нейтралью, однофазные замыкания на землю, адаптивная токовая защита от замыканий на землю, динамическая устойчивость функционирования

METHOD OF ADAPTIVE CURRENT PROTECTION AGAINST EARTH FAULTS IN 6–10 KV CABLE NETWORKS WITH AN INSULATED NEUTRAL

O.A. DOBRYAGINA, V.V. TYUTIKOV, T.Yu. SHADRIKOVA, V.A. SHUIN
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: rza@rza.ispu.ru

Abstract

Background. Simple and reliable zero sequence overcurrent protection in distribution 6–10 kV cable networks with an insulated neutral is most widely used for protection against single phase earth faults. However, protection of this type in many cases does not provide the required sensitivity to internal (inside the protected zone) faults as it must be tuned to the response current from surge transients during external faults through an intermittent arc. It is possible to increase the sensitivity if adaptive current protection is applied. However, the known methods for its implementation are only effective for stable faults through transient resistance but do not provide high dynamic stability of operation in transient conditions in case of arc intermittent earth faults that are the most dangerous for the network. Therefore, an urgent problem to be solved now is improving the principles of adaptive current protection against earth faults.

Materials and methods. To compare the efficiency of the known and proposed principles of adaptive current protection implementation taking into account the complexity of transients during earth faults through an intermittent arc in 6–10 kV cable networks, we used Matlab simulation with the SimPowerSystem and Simulink extension packages. The research into the operation algorithms of adaptive current protection against earth faults was carried out on simulation models of 6–10 kV cable networks with an insulated neutral and with neutral grounding through a high-value resistor.

Results. The studies on the simulation models have shown that the known methods of implementation of adaptive current protection against earth faults based on the use of full zero sequence currents and voltage are ineffective during intermittent arc earth faults. The authors propose a method of adaptive current protection against earth faults in 6–10 kV cable networks with an insulated neutral and with neutral grounding through a high-value resistor that provides a significant increase in dynamic stability of transient operation with arc ground faults and allows using only zero sequence current and voltage components of the operating frequency of 50 Hz as the actuating quantities.

Conclusions. The proposed method of implementing adaptive current protection against earth faults in 6–10 kV cable networks with an insulated neutral and with neutral grounding through a high-value resistor does not only increase the sensitivity of this protection type to earth faults through transient resistance and dynamic stability of operation in transient conditions in case of arc intermittent earth faults but also broadens the range of its possible applications.

Key words: 6–10 kV cable networks with an insulated neutral, single-phase earth faults, adaptive current protection against earth faults, dynamic stability of operation

DOI: 10.17588/2072-2672.2019.5.031-039

Введение. Для защиты от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) – основного вида повреждений в распределительных кабельных сетях среднего напряжения 6–10 кВ – наиболее широкое применение получили токовые защиты нулевой последовательности (ТЗНП) [1–5]. Известно, что в начальной

стадии повреждения изоляции в кабельных сетях с изолированной нейтралью большая часть ОЗЗ имеет дуговой перемежающийся характер [6–8]. Отстройка от влияния переходных процессов при дуговых ОЗЗ по току срабатывания приводит к снижению чувствительности ТЗНП при внутренних ОЗЗ и

значительному ограничению области ее возможного применения. Поэтому применение традиционных исполнений ТЗНП ограничивается присоединениями, собственный емкостный ток которых $I_{C \text{ собс}}$ не превышает ~15–20 % от величины суммарного емкостного тока сети $I_{C\Sigma}$ [3–6]. Доля присоединений с $I_{C \text{ собс}} > (0,15-0,2)I_{C\Sigma}$ на центрах питания (ЦП) кабельных сетей с изолированной нейтралью может составлять до ~25–30 % и более [9]. Недостатком ТЗНП является также не всегда достаточная чувствительность при внутренних устойчивых ОЗЗ (УОЗЗ) через переходное сопротивление [5].

На присоединениях, имеющих $I_{C \text{ собс}} > 0,2I_{C\Sigma}$, должны применяться токовые направленные защиты нулевой последовательности (ТЗНП), условия селективности которых при внешних и чувствительности при внутренних ОЗЗ, в отличие от ТЗНП, не ограничены относительными значениями собственного емкостного тока $I_{C \text{ собс}}$ защищаемого присоединения. Однако указанные преимущества ТЗНП обеспечиваются в основном при УОЗЗ. По данным эксплуатации некоторые исполнения ТЗНП ведут себя неудовлетворительно при дуговых ОЗЗ из-за возможных в переходных режимах нарушений фазных соотношений между напряжением $\underline{U}_0(t)$ и током $I_0(t)$ нулевой последовательности [2, 4, 10, 11]. Недостатком направленных защит от ОЗЗ являются также отказы их функционирования из-за возможных в реальных условиях эксплуатации ошибок в полярности подключения вторичных цепей кабельных трансформаторов тока нулевой последовательности.

Поэтому совершенствование ненаправленных токовых защит от ОЗЗ является актуальной задачей, прежде всего для ЦП кабельных сетей среднего напряжения. Одним из перспективных направлений решения рассматриваемой задачи является применение адаптивных токовых защит от ОЗЗ.

Методы исследования. При анализе особенностей функционирования традиционной и разработанной адаптивных токовых защит с учетом сложности переходных процессов при дуговых замыканиях на землю в кабельных сетях среднего напряжения в работе применялось имитационное моделирование в системе Matlab с пакетами расширения SimPowerSystem и Simulink. Исследования алгоритмов функционирования адаптивных токовых защит от ОЗЗ проводились

на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ, учитывающих основные особенности их конфигурации и распределенный характер параметров кабельных линий.

Способ действия традиционной адаптивной токовой защиты нулевой последовательности. Известные предложения в части принципов выполнения адаптивных ТЗНП, например [12, 13], для сетей 6–10 кВ предназначены в первую очередь для повышения чувствительности при внутренних УОЗЗ через переходное сопротивление. Адаптивные свойства таких защит обеспечиваются автоматическим изменением уставки по току срабатывания в зависимости от текущего значения коэффициента полноты замыкания на землю:

$$I_{0 \text{ с.з}}(t) \geq K_{\text{отс}} b_0(t) I_{C \text{ собс}}, \quad (1)$$

где $K_{\text{отс}}$ – коэффициент отстройки, учитывающий погрешности функционирования защиты; $I_{C \text{ собс}}$ – собственный емкостный ток защищаемого присоединения; $b_0(t)$ – текущее значение коэффициента полноты ОЗЗ, определяемого отношением текущего значения напряжения нулевой последовательности $U_0(t)$ к номинальному фазному напряжению сети $U_{\text{ф ном}}$ или к текущему значению фазного напряжения $U_{\text{ф}}(t)$ [12, 13]:

$$b_0(t) = U_0(t) / U_{\text{ф ном}}, \quad (2)$$

или

$$b_0(t) = U_0(t) / U_{\text{ф}}(t). \quad (3)$$

Вариант структурно-функциональной схемы традиционной адаптивной ТЗНП, в котором $b_0(t)$ определяется по (2), представлен на рис. 1.

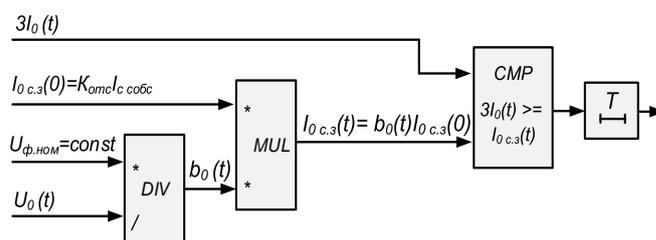


Рис. 1. Схема традиционной адаптивной ТЗНП: DIV – блок деления, на выходе которого формируется текущее значение коэффициента полноты замыкания; MUL – блок умножения, на выходе которого формируется текущее значение уставки $I_{0 \text{ с.з}}(t)$; CMP – схема сравнения текущего значения воздействующей величины $I_0(t)$ с уставкой; $U_{\text{ф ном}}$ – номинальное фазное напряжение сети; T – временная задержка на срабатывание

Начальное значение уставки срабатывания по току $I_{0\text{с.з.}}(0)$ определяется по выражению (1) при $b_0(t) = 1$, т.е. выбирается из условия отстройки от внешних УОЗЗ без учета влияния переходных процессов при дуговых замыканиях.

Как правило, значение тока $3I_0$ при дуговых перемежающихся ОЗЗ (ДПОЗЗ) изменяется в значительно большей степени, чем значение напряжения $3U_0$, т.е. коэффициент полноты замыкания, определяемый по (2) или (3), для стадий УОЗЗ и ДПОЗЗ имеет разные значения. Потому при внешних дуговых ОЗЗ рассмотренный способ регулирования уставки адаптивной ТЗНП по току срабатывания по (1) в общем случае не позволяет обеспечить динамическую устойчивость ее функционирования.

На рис. 2 в качестве примера приведены полученные на имитационной модели кабельной сети 6 кВ с $I_{\text{с}\Sigma} = 5$ А осциллограммы, иллюстрирующие изменение среднеквадратичного значения тока $3I_{0\text{неп}}(t)$ в неповрежденном присоединении с собственным емкостным током $I_{\text{с}\text{собс}} = 0,2I_{\text{с}\Sigma}$, величины коэффициента полноты замыкания $b_0(t)$ и текущей уставки адаптивной

ТЗНП $I_{0\text{с.з.}}(t)$ при сложном дуговом ОЗЗ, переходящем в металлическое устойчивое замыкание, а затем в УОЗЗ через большое переходное сопротивление.

Анализ осциллограмм (рис. 2) показывает, что предложенные в [12, 13] способы выполнения адаптивной ТЗНП обеспечивают необходимое соотношение между воздействующей величиной и уставкой ($I_{0\text{уст}}(t) > 3I_{0\text{неп}}(t)$) только на стадии УОЗЗ. Для обеспечения устойчивых несрабатываний защиты на дуговой стадии ОЗЗ начальную уставку по току срабатывания $I_{0\text{с.з.}}(0)$ адаптивной ТЗНП на основе рассматриваемых способов необходимо увеличить, выбирая ее по выражению

$$I_{0\text{с.з.}}(0) \geq K_{\text{отс}} K_{\text{пер}} I_{\text{с}\text{собс}}, \quad (4)$$

где $K_{\text{пер}} > 1$ – коэффициент, учитывающий увеличение тока в переходных режимах при дуговых ОЗЗ.

Необходимая для обеспечения устойчивых несрабатываний адаптивной токовой защиты на стадии ДПОЗЗ степень увеличения уставки $I_{0\text{с.з.}}(0)$, т.е. значение коэффициента $K_{\text{пер}}$, может достигать 4–5.

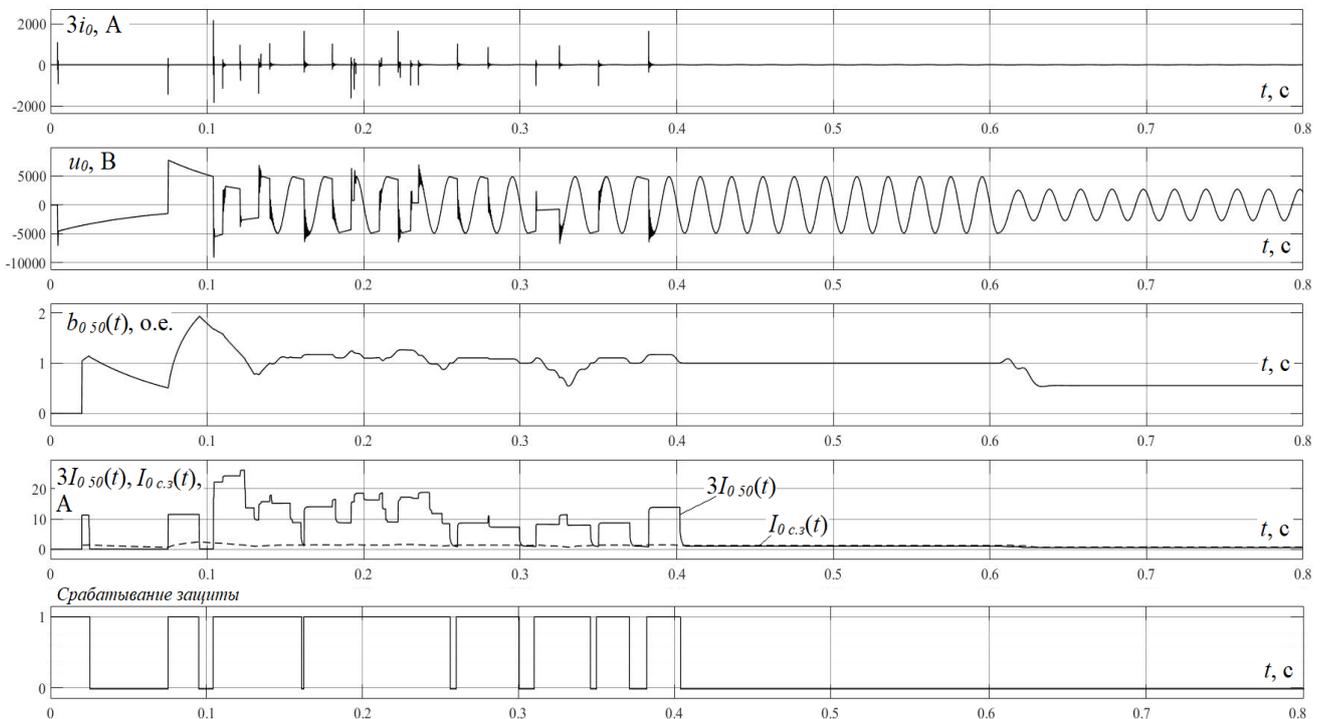


Рис. 2. Расчетные осциллограммы, иллюстрирующие особенности функционирования традиционной адаптивной ТЗНП при внешнем дуговом ОЗЗ, переходящем в устойчивое замыкание (металлическое, а затем через большое переходное сопротивление), в сети 6 кВ с $I_{\text{с}\Sigma} = 5$ А на присоединении с собственным емкостным током $I_{\text{с}\text{собс}} = 0,2I_{\text{с}\Sigma}$

С учетом (4) условие применимости адаптивной ТЗНП на рассматриваемом принципе при устойчивых ОЗЗ будет иметь такой же вид, как и для обычной ТЗНП [4]:

$$I_{c \text{ собс}^*} = I_{c \text{ собс}} / I_{c \Sigma} \leq 1 / (1 + K_{\text{отс}} K_{\text{пер}} K_{\text{ч.мин}}), \quad (5)$$

где $K_{\text{ч.мин}}$ – минимально допустимое значение коэффициента чувствительности для токовых защит от ОЗЗ.

Согласно (5), необходимость увеличения уставки $I_{0 \text{ с.з}}(0)$ в $K_{\text{пер}}$ раз значительно ограничивает область возможного применения адаптивной токовой защиты на основе рассматриваемых способов в кабельных сетях 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью. Отметим также, что рассмотренные выше способы выполнения адаптивной ТЗНП по [12, 13] не получили практического применения в кабельных сетях 6–10 кВ.

Способ действия адаптивной ТЗНП, основанной на использовании составляющих основной частоты 50 Гц. В [4] показано, что в кабельной сети 6–10 кВ с изолированной нейтралью для мгновенных значений составляющих основной частоты 50 Гц тока нулевой последовательности $3i_{0 \text{ 50}}(t)$ в месте ОЗЗ и напряжения нулевой последовательности $u_{0 \text{ 50}}(t)$ на шинах источника питания выполняется соотношение

$$3i_{0 \text{ 50}}(t) \approx 3C_{0\Sigma} \omega u_{0 \text{ 50}}(t), \quad (6)$$

где $3C_{0\Sigma}$ – суммарная емкость фазы сети на землю; ω – угловая частота сети.

Согласно (6), в любых режимах ОЗЗ текущее среднеквадратичное значение составляющей рабочей частоты тока нулевой последовательности в месте замыкания связано с текущим среднеквадратичным значением составляющей рабочей частоты напряжения нулевой последовательности соотношением

$$3i_{0 \text{ 50}}(t) \approx 3C_{0\Sigma} \omega U_{0 \text{ 50}}(t). \quad (7)$$

С учетом (7) для среднеквадратичных значений составляющей рабочей частоты 50 Гц токов нулевой последовательности в неповрежденном $3i_{0 \text{ неп}}(t)$ и поврежденном $3i_{0 \text{ пов}}(t)$ присоединениях, используемых в цифровых токовых защитах в качестве воздействующей величины, получим:

$$3I_{0 \text{ неп}}(t) \approx 3C_{0 \text{ собс}} \omega U_{0 \text{ 50}}(t); \quad (8)$$

$$3I_{0 \text{ пов}}(t) \approx 3(C_{0\Sigma} - C_{0 \text{ собс}}) \omega U_{0 \text{ 50}}(t). \quad (9)$$

Текущее значение коэффициента полноты замыкания на землю для составляющей рабочей частоты напряжения нулевой последовательности можно определить следующим образом:

$$b_{0 \text{ 50}}(t) = U_{0 \text{ 50}}(t) / U_{\text{ф.ном}}. \quad (10)$$

С учетом (10) из (8) и (9) получим:

$$3I_{0 \text{ 50 неп}}(t) \approx 3C_{0 \text{ собс}} \omega b_{0 \text{ 50}}(t) U_{\text{ф.ном}} = b_{0 \text{ 50}}(t) I_{c \text{ собс}}; \quad (11)$$

$$3I_{0 \text{ 50 пов}}(t) \approx 3(C_{0\Sigma} - C_{0 \text{ собс}}) \omega b_{0 \text{ 50}}(t) U_{\text{ф.ном}} = b_{0 \text{ 50}}(t) (I_{c\Sigma} - I_{c \text{ собс}}). \quad (12)$$

На основе соотношений (11) и (12) может быть получена максимальная токовая защита от ОЗЗ для некомпенсированных кабельных сетей 6–10 кВ, обеспечивающая адаптивность к влиянию не только переходного сопротивления в месте повреждения, но и переходных токов при дуговых замыканиях на землю.

Текущее значение уставки по току срабатывания предлагаемой адаптивной ТЗНП для обеспечения несрабатываний при внешних устойчивых и дуговых ОЗЗ должно формироваться в соответствии с выражением

$$I_{0 \text{ с.з}}(t) \geq K_{\text{отс}} b_{0 \text{ 50}}(t) I_{c \text{ собс}}. \quad (13)$$

Так как предлагаемая защита обеспечивает адаптивность к влиянию переходных процессов при дуговых ОЗЗ, условие ее применимости определяется выражением (5) при $K_{\text{пер}} = 1$. При значениях коэффициентов $K_{\text{отс}} = 1,5$, $K_{\text{ч.мин}} = 1,25$ (для защит от ОЗЗ с действием на сигнал), $K_{\text{пер}} = 1$ из (5) получим, что адаптивная ТЗНП может применяться на присоединениях с относительным значением собственного емкостного тока $I_{c \text{ собс}} \leq 0,35$. По данным [6], условию $I_{c \text{ собс}^*} \leq 0,35$ на ЦП кабельных сетей 6–10 кВ удовлетворяет более 90 % всех присоединений, на распределительных подстанциях и трансформаторных пунктах кабельных сетей 6–10 кВ систем промышленного электроснабжения – 100 % присоединений.

Структурно-функциональная схема и принцип действия адаптивной ТЗНП на основе составляющих рабочей частоты 50 Гц. На рис. 3 представлена структурно-функциональная схема адаптивной токовой защиты, основанной на использовании составляющих рабочей частоты 50 Гц.

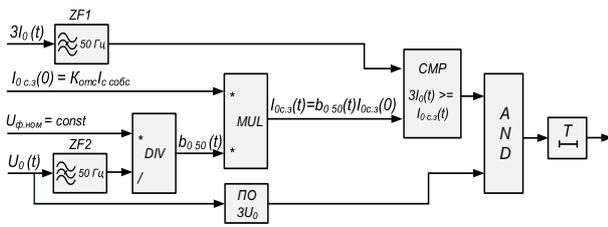


Рис. 3. Схема адаптивной токовой защиты, основанной на использовании составляющих рабочей частоты 50 Гц: DIV, MUL, CMP, T – то же, что и на рис. 2; ZF1, ZF2 – фильтры, выделяющие из входных величин $3I_0$ и U_0 составляющую рабочей частоты 50 Гц; ПО $3U_0$ – пусковой орган по напряжению нулевой последовательности, предназначенный для отстройки устройства защиты от переходных процессов, связанных с коммутационными переключениями в защищаемой сети; AND – логический элемент «И» для разрешения действия защиты только при срабатывании ПО $3U_0$

Результаты исследования. На рис. 4 приведены полученные на имитационной модели кабельной сети 6 кВ с $I_{C\Sigma} = 5$ А, работающей с изолированной нейтралью, осциллограммы, иллюстрирующие изменение среднеквадратичного значения тока $3I_{0\text{неп}}$ в

неповрежденном присоединении с собственным емкостным током $I_{C\text{собс}} = 0,2I_{C\Sigma}$, величины коэффициента полноты замыкания по составляющей рабочей частоты напряжения нулевой последовательности $b_{0,50}(t)$ и текущей уставки адаптивной ТЗНП $I_{0,с.з}(t)$ при сложном дуговом ОЗЗ, переходящем в металлическое устойчивое замыкание, а затем в УОЗЗ через большое переходное сопротивление.

Анализ осциллограмм, приведенных на рис. 4, 5, показывает, что при любых изменениях воздействующей величины (среднеквадратичного значения составляющей рабочей частоты тока $3I_{0,50}$), обусловленных как влиянием переходного сопротивления при УОЗЗ, так и влиянием переходных токов при замыканиях через перемежающуюся дугу, автоматически обеспечивается как требуемый уровень отстроенности защиты от внешних ОЗЗ ($I_{0,с.з}(t)/3I_{0,50}(t) \geq K_{\text{отс}}$ – рис. 4, кривые 3, 4), так и требуемый уровень чувствительности при внутренних ОЗЗ ($3I_{0,50}(t)/I_{0,с.з}(t) \geq K_{\text{ч.мин}}$ – рис. 5, кривые 3, 4).

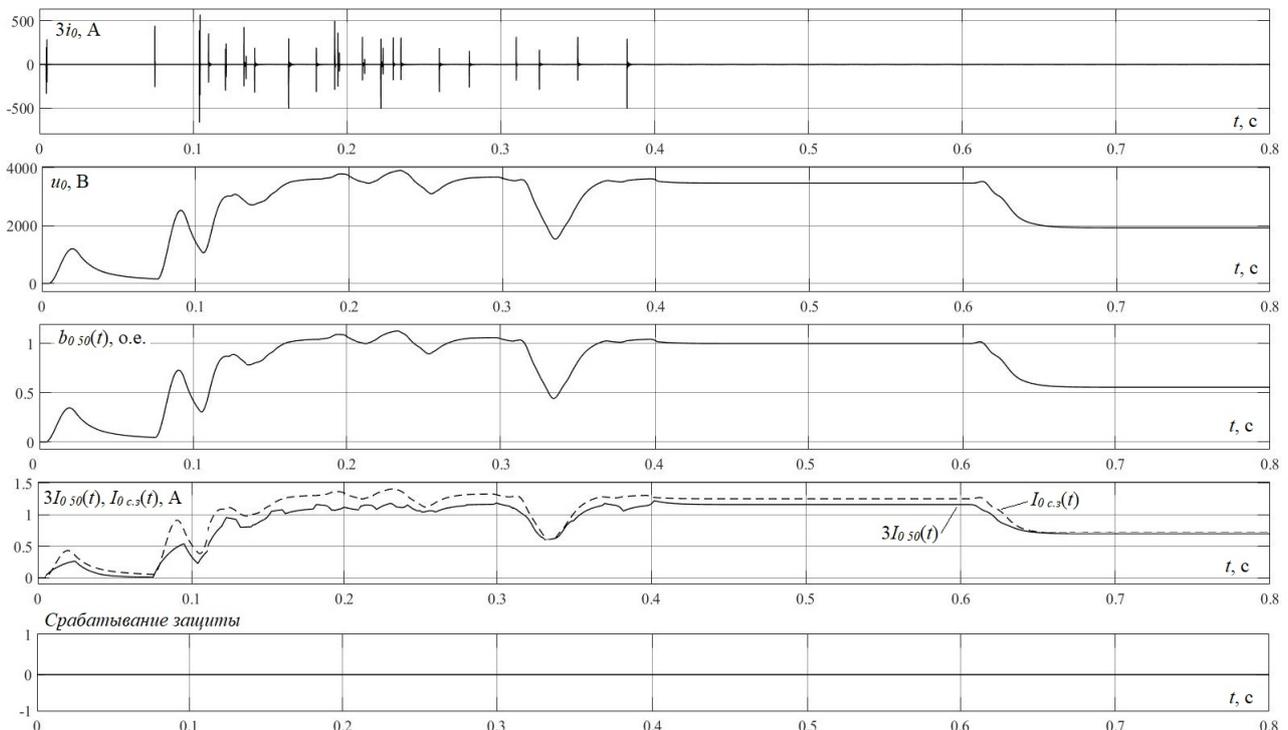


Рис. 4. Расчетные осциллограммы, иллюстрирующие функционирование разработанной адаптивной ТЗНП при внешнем сложном дуговом ОЗЗ, переходящем в устойчивое замыкание (металлическое, а затем через большое переходное сопротивление), в сети 6 кВ с $I_{C\Sigma} = 5$ А на присоединении с собственным емкостным током $I_{C\text{собс}} = 0,2I_{C\Sigma}$

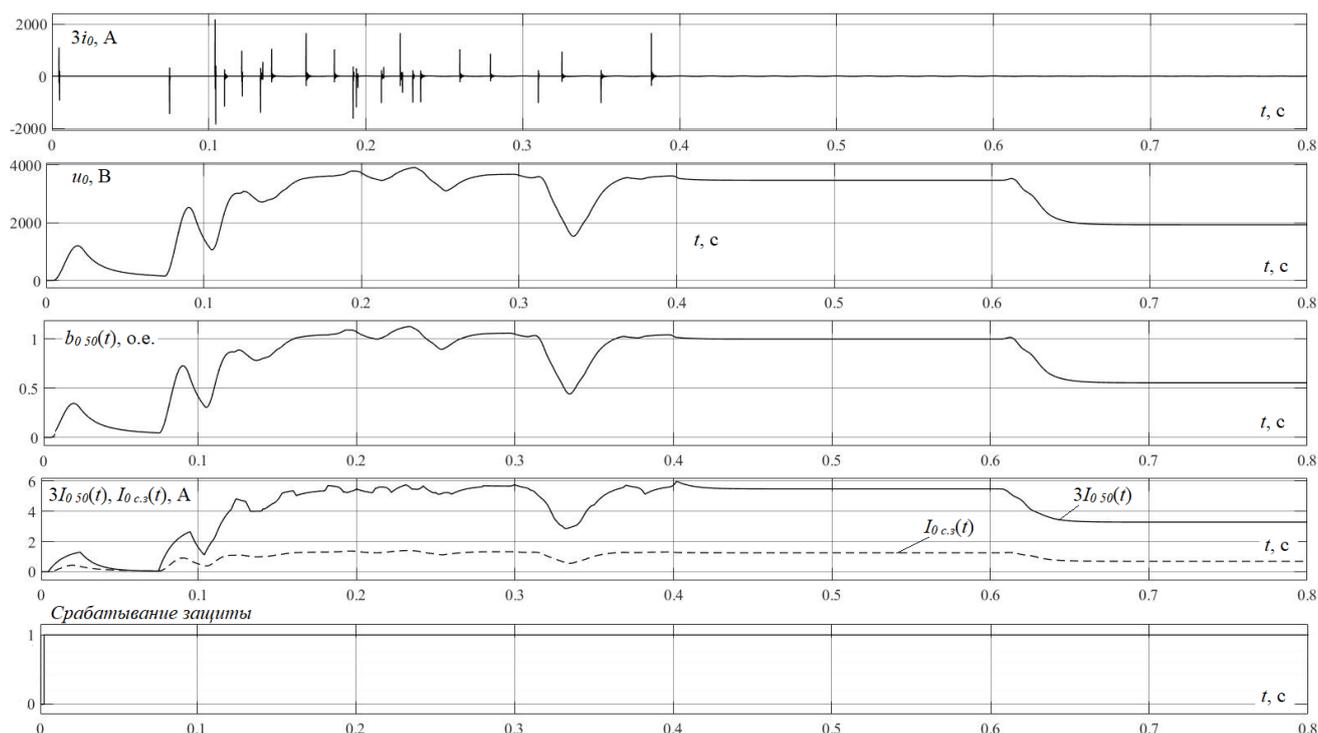


Рис. 5. Расчетные осциллограммы, иллюстрирующие функционирование разработанной адаптивной ТЗНП при внутреннем сложном дуговом ОЗЗ, переходящем в устойчивое замыкание (металлическое, а затем через большое переходное сопротивление), в сети 6 кВ с $I_{C\Sigma} = 5$ А на присоединении с собственным емкостным током $I_{C\text{собс}} = 0,2I_{C\Sigma}$

Выводы. Известные способы выполнения адаптивной токовой защиты от ОЗЗ, основанные на использовании полного тока и напряжения нулевой последовательности, не позволяют обеспечить высокую устойчивость функционирования в кабельных сетях с изолированной нейтралью при замыканиях через перемежающуюся дугу.

Предложенный способ выполнения адаптивной токовой защиты от ОЗЗ на основе составляющих рабочей частоты 50 Гц тока и напряжения нулевой последовательности позволяет не только увеличить чувствительность к замыканиям через большое переходное сопротивление, но и обеспечить высокую динамическую устойчивость функционирования при внешних и внутренних дуговых перемежающихся замыканиях.

Список литературы

1. Федосеев А.М. Релейная защита электрических систем. – М.: Энергия, 1976. – 560 с.
2. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. – М.: Высш. шк., 2006. – 639 с.

3. Шабад М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики 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», «Энергетик», 2001. – 104 с.

5. Шалин А.И. Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. Достоинства и недостатки различных защит // Новости ЭлектроТехники. – 2005. – № 3 (33) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/33/13.php>.

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

7. Дударев Л.Е., Запорожченко С.И., Лукьянцев Н.М. Дуговые замыкания на землю в кабельных сетях // Электрические станции. – 1971. – № 8. – С. 64–66.

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

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

10. Шалин А.И. Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. Направленные защиты. Влияние электрической дуги на направленные защиты // Новости ЭлектроТехники. – 2006. – № 1 (37) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2006/37/06.php>.

11. 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.

12. Патент 2088010 Российская Федерация МПК H02H3/16, H01H83/20. Реле защиты / В.И. Кашкалов. – Заявл. 19.08.1994; опубл. 20.08.1997.

13. Патент 2422964 Российская Федерация МПК H02H3/16, G01R31/08. Устройство токовой защиты электрических сетей от однофазных замыканий на землю (варианты) / М.Л. Сапунков, А.А. Худяков. – Заявл. 17.03.2010; опубл. 27.06.2011.

References

1. Fedoseev, A.M. *Releynaya zashchita elektricheskikh sistem* [Relay protection of electrical systems]. Moscow: Energiya, 1976. 560 p.

2. Andreev, V.A. *Releynaya zashchita i avtomatika sistem elektrosnabzheniya* [Relay protection and automation of power supply systems]. Moscow: Vysshaya shkola, 2006. 639 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 earth faults in 6–10 kV electrical networks]. Moscow: Energoprogress, Energetik, 2001. 104 p.

5. Shalin, A.I. *Zamykaniya na zemlyu v setyakh 6–35 kV. Dostoinstva i nedostatki razlichnykh zashchit* [Earth faults in 6–35 kV networks. Advantages and disadvantages of various protections]. *Novosti ElektroTekhniki*, 2005, vol. 3 (33). Available at: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/33/13.php>.

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

7. Dudarev, L.E., Zaporozhchenko, S.I., Luk'yantsev, N.M. *Dugovye zamykaniya na zemlyu v kabel'nykh setyakh* [Arc earth faults in cable networks]. *Elektricheskie stantsii*, 1971, no. 8, pp. 64–66.

8. 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.

9. 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 the sensitivity of current protection against earth faults in 6–10 kV cable networks]. *Vestnik IGEEU*, 2016, issue 3, pp. 50–55.

10. Shalin, A.I. *Zamykaniya na zemlyu v setyakh 6–35 kV. Napravlennyye zashchity. Vliyaniye elektricheskoy dugi na napravlennyye zashchity* [Earth faults in 6–35 kV networks. Directional protection. The effect of an electric arc on directional protection]. *Novosti ElektroTekhniki*, 2006, no. 1(37). Available at: <http://www.news.elteh.ru/arh/2006/37/06.php>.

11. Borkhman, 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 earth faults in 6–10 kV networks and measures for their improvement]. *Energetik*, 2000, no. 1, pp. 20–22.

12. Kashkalov, V.I. *Rele zashchity* [Protection relays]. Patent RF, no. 2088010, 1997.

13. Sapunkov, M.L., Khudyakov, A.A. *Ustroystvo tokovoy zashchity elektricheskikh setey ot odnofaznykh zamykaniy na zemlyu (varianty)* [A device of current protection of electric networks from single-phase earth faults (variants)]. Patent RF, no. 2422964, 2011.

Добрягина Ольга Александровна,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, 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, e-mail: dobryagina@eef.ispu.ru

Тютиков Владимир Валентинович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, проректор по научной работе, зав. кафедрой автоматизации технологических процессов, e-mail: tvv@ispu.ru

Tyutikov Vladimir Valentinovich,

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (post-doctoral degree), Vice-Rector for Research, Head of the Work Process Automation Department, e-mail: tvv@ispu.ru

Шадрикова Татьяна Юрьевна,

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

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, telephone (4932) 26-99-06, e-mail: shuin@rza.ispu.ru