

УДК 621.311

Оценка чувствительности токовых защит от замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ

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

Авторское резюме

Состояние вопроса: Для защиты от однофазных замыканий на землю в распределительных кабельных сетях напряжением 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью, как правило, применяются максимальные токовые защиты нулевой последовательности. Опыт эксплуатации токовых защит нулевой последовательности показывает, что частые отказы функционирования защит данного типа имеют место при наиболее опасных для защищаемой сети дугowych перемежающихся однофазных замыканиях на землю. Анализ показал, что причины недостаточного технического совершенства токовых защит нулевой последовательности связаны с применяемым в настоящее время подходом к оценке их чувствительности, который предполагает ее оценку только при устойчивых замыканиях на землю и не требует оценки при дугowych перемежающихся замыканиях. В настоящее время методы оценки чувствительности токовых защит нулевой последовательности при дугowych перемежающихся однофазных замыканиях на землю отсутствуют. В связи с этим актуальны исследования, направленные на повышение технического совершенства, прежде всего современных цифровых исполнений токовых защит нулевой последовательности на микропроцессорной базе.

Материалы и методы: Разработка подхода и методики оценки чувствительности токовых защит нулевой последовательности при дугowych перемежающихся однофазных замыканиях на землю проводились с применением комплексных имитационных моделей «Кабельная сеть 6–10 кВ – алгоритм ТЗНП», выполненных с применением пакетов SimPowerSystem и Simulink системы моделирования Matlab.

Результаты: Предложен подход и разработана методика оценки чувствительности токовых защит нулевой последовательности не только при устойчивых, но и при дугowych перемежающихся замыканиях.

Выводы: Достоверность разработанной методики проверена исследованиями на имитационных моделях кабельных сетей и алгоритмов функционирования токовых защит нулевой последовательности. Предложенная методика позволяет более точно оценить реальную эффективность функционирования токовых защит нулевой последовательности при внутренних однофазных замыканиях на землю в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью и может быть использована проектными и эксплуатационными организациями при расчетах уставок и оценке чувствительности токовых защит нулевой последовательности.

Ключевые слова: кабельные сети 6–10 кВ, изолированная нейтраль, однофазные замыкания на землю, токовые защиты нулевой последовательности, оценка чувствительности, имитационное моделирование.

Evaluation of current protection sensitivity against earth faults in 6–10 kV cable networks

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

Abstract

Background: Zero sequence current protection (ZSCP) is normally used for protection against single-phase earth fault (SGF) in 6–10 kV distribution cable networks working with isolated neutral. ZSCP operation experience shows that frequent failures of this protection type take place under arcing intermittent single-phase earth faults that are most dangerous for the network. Analysis has shown that the reason for ZSCP technical imperfection is the existing approach to assessing their sensitivity that accounts for persistent earth faults and neglects arcing intermittent short-circuits. There are currently no methods for assessing sensitivity of ZSCP under arcing intermittent single-phase earth faults, which makes it necessary to conduct research primarily aimed at perfection of modern microprocessor-based ZSCP digital versions.

Materials and methods: In order to develop an approach and methods of assessment of ZSCP sensitivity to arcing intermittent short-circuits, we used complex simulation models «6–10 kV cable network – earth fault protection» and SimPowerSystem and Simulink packages of the modeling system Matlab.

Results: A new approach and a new method have been developed to assess ZSCP sensitivity under persistent and arcing intermittent short-circuits.

Conclusions: The functionality of the developed method has been proved by tests on simulation models of cable networks and ZSCP algorithms. The developed method allows to more accurately evaluate the effectiveness of zero sequence current protection in all types of earth faults in 6–10 kV cable networks with insulated neutral and can be used by design, commissioning and operational organizations in zero sequence current protection calculations.

Key words: 6–10 kV cable networks, insulated neutral, single-phase earth faults, zero sequence current protection, sensitivity assessment, simulation.

DOI: 10.17588/2072-2672.2016.3.050-055

Введение. Более 50 % вырабатываемой в РФ электроэнергетики распределяется потребителям через кабельные сети напряжением 6–10 кВ. Значительная часть распределительных кабельных сетей 6–10 кВ работает с изолированной нейтралью. Аварии в таких кабельных сетях 6–10 кВ составляют около 70 % всех нарушений электроснабжения потребителей. Причиной аварий часто являются дуговые перемежающиеся однофазные замыкания на землю (ДПОЗЗ). ДПОЗЗ сопровождаются опасными перенапряжениями на неповрежденных фазах по всей электрически связанной сети и значительным увеличением эффективного значения тока в месте повреждения, обусловливающими вторичные пробой в точках сети с ослабленной изоляцией и переходы ОЗЗ в двойные замыкания на землю или междуфазные короткие замыкания (КЗ) в месте повреждения [1, 2]. Поэтому надежность электроснабжения потребителей в значительной мере зависит от технического совершенства – селективности и устойчивости функционирования устройств защиты от ОЗЗ, обеспечивающих определение поврежденного элемента и возможность ликвидации дефекта изоляции без нарушения электроснабжения потребителей.

В сетях 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью, в качестве устройств защиты от ОЗЗ преобладающее применение получили максимальные токовые защиты нулевой последовательности (ТЗНП) [3, 4]. Анализ опыта эксплуатации устройств защиты от ОЗЗ электрических сетей среднего напряжения, выполненный в 2000 г. ОРГРЭС на основе информации, полученной из четырнадцати энергосистем [5], показал, что все исполнения ТЗНП, как на электромеханической, так и на микроэлектронной базе, имеют среднюю оценку эффективности функционирования, равную 2,8–3,0, что вряд ли можно признать приемлемым (см. таблицу).

Поэтому исследования, направленные на повышение технического совершенства, прежде всего современных цифровых исполнений ТЗНП на микропроцессорной базе, актуальны.

Условия селективности и чувствительности цифровых исполнений ТЗНП в кабельных сетях 6–10 кВ. Первичный ток срабатывания ТЗНП в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью выбирается из условия отстройки от собственного емкостного тока защищаемого присоединения при внешних ОЗЗ [3, 4]:

$$I_{0\text{с.з}} \geq K_{\text{отс}} K_{\text{бр.макс}} I_{\text{С собс}} = K_{\text{отс}} K_{\text{бр.макс}} 3\omega C_0 U_{\text{ф.ном}}, \quad (1)$$

где $K_{\text{отс}} = 1,3$ – коэффициент отстройки; $I_{\text{С собс}}$ – собственный емкостный ток защищаемого присоединения, определяемый при номинальном фазном напряжении сети $U_{\text{ф.ном}}$; C_0 – емкость фазы на землю защищаемого присоединения; $\omega = 2\pi \cdot 50$; $K_{\text{бр.макс}}$ – максимальное значение коэффициента, учитывающего увеличение тока $3I_0$ в неповрежденном присоединении за счет бросков переходных емкостных токов при ДПОЗЗ.

В цифровых исполнениях ТЗНП в качестве воздействующей величины может быть использовано среднеквадратичное или средневыпрямленное значение полного тока $3I_0$ или его составляющей основной частоты 50 Гц в защищаемом присоединении. В [6] показано, что использование в качестве воздействующей величины среднеквадратичного значения составляющей основной частоты 50 Гц тока $3I_0$ обеспечивает более эффективную отстройку защиты от влияния переходных токов при внешних ДПОЗЗ, чем использование средневыпрямленного значения. Для таких исполнений ТЗНП коэффициент $K_{\text{бр.макс}}$ устанавливает соотношение между собственным емкостным током защищаемого присоединения $I_{\text{С собс}}$ при внешнем устойчивом ОЗЗ и составляющей основной частоты 50 Гц на входе измерительного органа тока ТЗНП при ДПОЗЗ. Значение коэффициента $K_{\text{бр}}$ зависит в основном от интервалов времени между повторными зажиганиями и гашениями заземляющей дуги при дуговых прерывистых ОЗЗ. Наибольших значений коэффициент $K_{\text{бр}} = K_{\text{бр.макс}}$ достигает при ДПОЗЗ, развивающихся в соответствии с теорией W. Petersen [7], когда повторные пробой изоляции возникают через полупериод рабочей частоты $T_{50}/2 = 10$ мс. В [3, 6, 8] для микропроцессорных ТЗНП рекомендуется принимать $K_{\text{бр.макс}} = 2–3$.

Эффективность срабатываний ТЗНП при внутренних замыканиях, в соответствии с требованиями Правил устройства электроустановок¹, оценивается коэффициентом чувствительности только при устойчивых ОЗЗ (УОЗЗ), определяемым по выражению

$$K_{\text{ч}}^{(\text{УОЗЗ})} = \frac{I_{\text{С}\Sigma\text{мин}} - I_{\text{С собс}}}{I_{0\text{с.з}}} \geq K_{\text{ч.мин}}, \quad (2)$$

где $I_{\text{С}\Sigma\text{мин}}$ – суммарный емкостный ток сети в расчетном минимальном режиме; $K_{\text{ч.мин}}$ – минимально допустимое значение коэффициента чувствительности (1,2 – для защиты с действием на сигнал; 1,5 – для защиты с действием на отключение).

¹ Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е изд. Утв. Приказом Минэнерго Российской Федерации от 08.07.2002. № 204. – М.: Омега-Л, 2012. – 272 с.

Оценка эффективности функционирования различных исполнений защиты от ОЗЗ [5]

Исполнение ТЗНП	Число ТЗНП	Средние оценки по основным характеристикам				Средняя оценка эффективности (по совокупности характеристик)
		чувствительность	селективность	надежность	удобство эксплуатации	
РТ-40/0,2	60	3,0	2,0	3,0	3,0	2,8
РТЗ-50	300	3,0	3,0	2,0	3,0	2,8
РТЗ-51	15	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0

Отметим, что такой способ оценки эффективности функционирования ТЗНП при внутренних повреждениях не гарантирует устойчивых срабатываний при значительно более опасных для сети и поврежденного элемента ДПОЗЗ. В то же время известно [10, 11], что в сетях 6–10 кВ большая часть ОЗЗ в кабелях и электрических машинах начинается с дугового прерывистого замыкания, которое может длиться от нескольких минут до нескольких часов и более. По известным данным [4, 11], «бездействие» ТЗНП на этой стадии развития повреждения изоляции из-за недостаточной чувствительности в 50 % и более случаев является причиной переходов ОЗЗ в двойные и многоместные замыкания на землю или КЗ в месте повреждения и аварийного отключения одного или двух присоединений.

О подходе к оценке чувствительности ТЗНП при ДПОЗЗ. Известно [1, 2], что дуговые прерывистые ОЗЗ сопровождаются опасными для сети перенапряжениями (т.е. являются дуговыми перемежающимися – ДПОЗЗ) только при определенных интервалах времени Δt между повторными зажиганиями и гашениями заземляющей дуги, при этом кратность перенапряжений $K_n = U_{\max}/U_{ф.м}$ увеличивается при уменьшении величины Δt . Так как амплитуды переходного тока при пробоях изоляции фазы сети на землю и максимальные кратности перенапряжений K_n взаимосвязаны, то значение $K_{бр.макс}$ соответствует максимальным значениям K_n и минимальным значениям Δt_{\min} между повторными зажиганиями заземляющей дуги. Минимальные значения Δt_{\min} , при которых возникают наиболее опасные перенапряжения, имеют место при ДПОЗЗ, протекающих в соответствии с классической теорией W. Petersen [7], и равны половине периода основной частоты $T_{50}/2 = 10$ мс. С увеличением Δt кратность перенапряжений и опасность их для сети уменьшается, при этом уменьшаются и значения $K_{бр}$. Начиная с некоторых значений $\Delta t > \Delta t_{\max}$ перенапряжения, сопровождающие повторные пробои изоляции, перестанут представлять опасность для сети. Для достижения одной из главных целей функционирования защиты от ОЗЗ – снижения вероятности их переходов из-за перенапряжений в двойные замыкания на землю или междуфазные КЗ в месте повреждения и повышения надежности электроснабжения потреби-

телей – необходимо, чтобы ТЗНП обеспечивала возможность фиксации дуговых прерывистых ОЗЗ при $\Delta t \leq \Delta t_{\max}$. Указанным максимальным значениям Δt_{\max} , при которых дуговое прерывистое ОЗЗ имеет характер опасного ДПОЗЗ, можно поставить в соответствие значение $K_{бр} = K_{бр.мин}$.

Используя введенное понятие $K_{бр.мин}$, можно оценить чувствительность ТЗНП при ДПОЗЗ, представляющих опасность для всей электрически связанной сети по величине сопровождающих их перенапряжений:

$$K_{ч(ДПОЗЗ)} = \frac{K_{бр.мин}(I_{C\Sigma мин} - I_{Cсобс})}{I_{0с.з}} \geq K_{ч.мин} \quad (3)$$

Из (1), (2) и (3) можно получить условия применимости ТЗНП (условие одновременно обеспечения минимально допустимой устойчивости несрабатываний при внешних ОЗЗ и минимально допустимой чувствительности при внутренних УОЗЗ и ДПОЗЗ):

– при обеспечении чувствительности только при внутренних УОЗЗ

$$I_{Cсобс}^* = \frac{I_{Cсобс}}{I_{C\Sigma мин}} \leq \frac{1}{1 + K_{отс}K_{бр.макс}K_{ч.мин}}; \quad (4)$$

– при обеспечении чувствительности при внутренних ДПОЗЗ

$$I_{Cсобс}^* = \frac{I_{Cсобс}}{I_{C\Sigma мин}} \leq \frac{K_{бр.мин}}{K_{бр.мин} + K_{отс}K_{бр.макс}K_{ч.мин}} \quad (5)$$

Сравнение (4) и (5) показывает, что при $K_{бр.мин} < 1$ более жестким является условие обеспечения минимально допустимой чувствительности при внутренних ДПОЗЗ (5), а при $K_{бр.мин} \geq 1$ – условие обеспечения минимально допустимой чувствительности при внутренних УОЗЗ (4).

Согласно (4) и (5), условия применимости ТЗНП определяются не только относительным значением собственного емкостного тока защищаемого присоединения $I_{Cсобс}^*$, но и в значительной мере величиной коэффициентов броска переходного тока $K_{бр.макс}$ и $K_{бр.мин}$. Для практической оценки возможностей обеспечения минимально допустимой чувствительности ТЗНП не только при УОЗЗ, но и, что более важно в аспекте снижения аварийности в кабельных сетях с изолированной нейтралью и повышения надежности электроснабжения потребителей, при более опасных ДПОЗЗ, необходимо определить значения $K_{бр.мин}$, характерные для кабельных

сетей 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью.

Оценка значений $K_{бр.мин}$ на имитационных моделях. Оценки значений $K_{бр.макс}$ для наиболее эффективных цифровых исполнений ТЗНП, основанных на использовании составляющих основной частоты 50 Гц тока $3I_0$, полученные на комплексных имитационных моделях «Кабельная сеть 6–10 кВ – ТЗНП» в системе Matlab, даны в [6]. Учитывая сложность математического описания переходных процессов при ДПОЗЗ в электрических сетях среднего напряжения, в [6] расчетные значения $K_{бр.мин}$ также получены на имитационных моделях, отражающих основные особенности конфигурации и значения параметров элементов кабельных сетей 6–10 кВ промышленного и городского электроснабжения, выполненных в среде Matlab. Суммарный емкостный ток $I_{с\sum}$ исследуемых кабельных сетей изменялся в пределах от единиц ампер до 30 А. При исследованиях ДПОЗЗ, кроме значений Δt , варьировались также условия гашения и повторного зажигания заземляющей дуги (в соответствии с существующими теориями W. Petersen, J. Peters и J. Slepian или Белякова Н.Н. [7, 12, 13]), удаленность места повреждения от шин, индуктивность источника питания сети и др.

При экспериментах для одних и тех же расчетных условий оценивались кратности максимальных перенапряжений K_n на шинах центра питания исследуемой сети и соответствующие им значения коэффициента броска переходного тока $K_{бр}$ в поврежденном при соединении. Значения $K_{бр}$ определялись для исполнений ТЗНП, основанных на использовании основной составляющей 50 Гц тока $3I_0$ (т.е. выполненных с применением фильтров, выделяющих из тока $3I_0$ составляющую основной частоты).

На рис. 1, 2 приведены полученные на основе обработки результатов вычислительных экспериментов на имитационных моделях зависимости максимальных кратностей перенапряжений на неповрежденных фазах K_n и соответствующих им значений $K_{бр}$ от интервалов времени Δt между повторными зажиганиями заземляющей дуги для кабельных сетей 6–10 кВ с изолированной нейтралью с различными значениями суммарного емкостного тока $I_{с\sum}$.

Анализ полученных зависимостей (рис. 1, 2) показывает, что при уменьшении кратности перенапряжений K_n уменьшаются и соответствующие им значения коэффициента броска $K_{бр}$, при этом, в отличие от K_n , значения $K_{бр}$ практически не зависят от суммарного емкостного тока сети $I_{с\sum}$. Задаваясь значением опасной для контролируемой сети кратности перенапряжений $K_{п.макс.доп}$, по полученным за-

висимостям (рис. 1, 2) можно определить соответствующее ей значение $K_{бр} = K_{бр.мин}$.

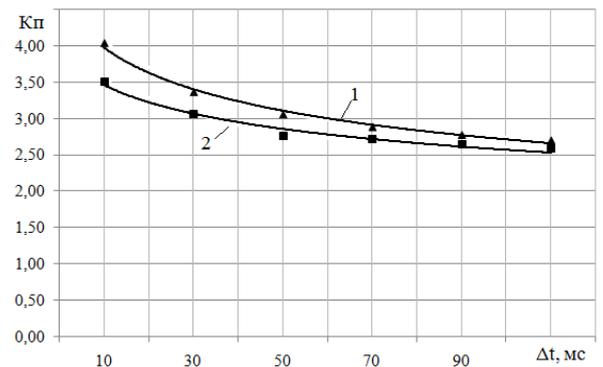


Рис. 1. Зависимость максимальных значений кратностей перенапряжений при ДПОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью с $I_{с\sum} = 5–30$ А от интервалов времени Δt между повторными пробоями изоляции: 1 – $I_{с\sum} = 5$ А; 2 – $I_{с\sum} = 30$ А

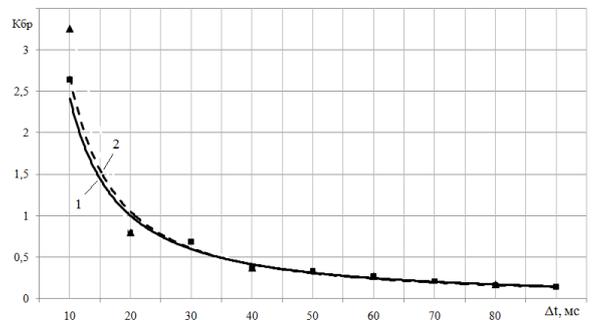


Рис. 2. Зависимость значений коэффициента $K_{бр}$ при ДПОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью с $I_{с\sum} = 5–30$ А от интервалов времени Δt между повторными пробоями изоляции: 1 – $I_{с\sum} = 5$ А; 2 – $I_{с\sum} = 30$ А

Известно, что наиболее слабыми по запасам изоляционной прочности элементами кабельных сетей напряжением 6–10 кВ являются электрические машины (электродвигатели и генераторы), изоляция которых при высоковольтных испытаниях, в соответствии с существующими нормами [9], должна проверяться напряжением $U_{исп} \approx 2,9U_{ф.м}$. Известно также, что применяемые для защиты кабельных сетей от дуговых перенапряжений ограничители перенапряжений (ОПН) с учетом их технических возможностей и методики выбора их параметров обеспечивают величину остающегося напряжения $U_{ост} \approx (2,7–3)U_{ф.м}$ [2]. С учетом этого кратности дуговых перенапряжений $K_n < 2,9–3,0$ можно рассматривать как относительно безопасные для контролируемой сети. Опасные для сети перенапряжения с кратностью $K_{п.макс.доп} \geq 3$ возникают при $\Delta t \leq \sim 60$ мс (рис. 1). Поэтому такие дуговые ОЗЗ следует рассматривать как опасные ДПОЗЗ, при которых ТЗНП должна срабатывать. Отметим, что значение $\Delta t \leq \sim 60$ достаточно хорошо коррелируется эксперимен-

тальными данными, полученными в реальных кабельных сетях 6–10 кВ [14].

Принимая, что опасные для сети перенапряжения могут возникать при значениях $\Delta t_{\text{мин}} \leq 60$ мс, по зависимости рис. 2 можно получить

$$K_{\text{бр.мин}} \approx 0,25-0,3.$$

Полученные рассмотренным способом значения $K_{\text{бр.мин}}$ позволяют более точно оценить по выражениям (3) и (5) реальную эффективность функционирования и область возможного применения цифровых исполнений ТЗНП на объектах распределительных кабельных сетей 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью.

Заключение

На основе исследований на имитационных моделях показано, что для защиты кабельных сетей 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью, от опасных перенапряжений при дуговых ОЗЗ ТЗНП должна обеспечивать требуемую чувствительность при внутренних дуговых прерывистых ОЗЗ с интервалами времени между повторными пробоями изоляции $\Delta t \leq 50-60$ мс, которым соответствуют значения коэффициента $K_{\text{бр.мин}} \approx 0,25-0,3$.

Полученные на основе исследований на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ значения коэффициента $K_{\text{бр.мин}}$ позволяют оценить чувствительность ТЗНП не только при устойчивых, но и при 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. – 208 с.
2. 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. – 268 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. 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.
6. Выбор воздействующей величины цифровых токовых защит от однофазных замыканий на землю в кабельных сетях среднего напряжения / М.С. Аль-Хомиди, О.А. Добрягина, Т.Ю. Шадрикова, В.А. Шуин // Вестник ИГЭУ. – 2015. – Вып. 2. – С. 21–29.
7. Petersen W. Der aussetzende (intermittierende) Erdschluss // ETZ. – 1917. – Н. 47, 48.
8. Александров А.М. Выбор уставок срабатывания асинхронных электродвигателей напряжением выше 1 кВ. – СПб.: ПЭИПК, 2004. – 80 с.

9. Дударев Л.Е., Запороженко С.И., Лукьянцев Н.М. Дуговые замыкания на землю в кабельных сетях // Электрические станции. – 1971. – № 8. – С. 64–66.
10. Шалыт Г.М. Повышение эффективности профилактики изоляции в кабельных сетях // Труды ВНИИЭ. Вып. 8. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – С. 77–97.
11. Peters J.F., Slepian J. Voltage Induced by Acreign Grounds. Tr. // AIEE. – 1928, Apr. – P. 478.
12. Беляков Н.Н. Исследование перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях 6 и 10 кВ с изолированной нейтралью // Электричество. – 1957. – № 5. – С. 31–36.
13. Шуцкий В.И., Жидков В.О., Ильин Ю.Н. Защитное шунтирование однофазных повреждений электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 208 с.

References

1. Likhachev, F.A. *Zamykaniya na zemlyu v setyakh s izolirovannoy neytral'yu i s kompensatsiey emkostnykh tokov* [Earth faults in networks with insulated neutral and with capacitance current compensation]. Moscow, Energiya, 1971. 208 p.
2. Khalilov, F.Kh., Evdokunin, G.A., Polyakov, V.S. *Zashchita setey 6–35 kV ot perenapryazheniy* [Protection of 6–35 kV networks from overvoltages]. Saint-Petersburg, Energoatomizdat, 2002. 268 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* [Earth fault current protections in 6–10 kV electrical systems]. Moscow, NTF «Energoprogress», «Energetik», 2001. 104 p.
5. Borukhman, V.A. *Ob ekspluatatsii selektivnykh zashchit ot zamykaniy na zemlyu v setyakh 6–10 kV i meropriyatiyakh po ikh sovershenstvovaniyu* [Operation of selective protection against earth faults in 6–10 kV networks and their improvement]. *Energetik*, 2000, no. 1, pp. 20–22.
6. Al-Khomidi, M.S., Dobryagina, O.A., Shadrikova, T.Yu., Shuin, V.A. *Vybor vozdeystvuyushchey velichiny tsifrovyykh tokovykh zashchit ot odnofaznykh zamykaniy na zemlyu v kabel'nykh setyakh srednego napryazheniya* [Selection of actuating quantity for digital single-phase earth fault current protections of medium voltage cable systems]. *Vestnik IGEU*, 2015, issue 2, pp. 21–29.
7. Petersen, W. *Der aussetzende (intermittierende) Erdschluss* [Intermittent earth fault]. *ETZ*, 1917, pp. 47, 48.
8. Aleksandrov, A.M. *Vybor ustavok srbatyvaniya asinkhronnykh elektrodvigatelay napryazheniem vyshe 1 kV* [Choice of setpoints of > 1kV voltage induction motors]. Saint-Petersburg, PEIPK, 2004. 80 p.
9. Dudarev, L.E., Zaporozhchenko, S.I., Luk'yantsev, N.M. *Dugovye zamykaniya na zemlyu v kabel'nykh setyakh* [Arcing earth faults in cable networks]. *Elektricheskie stantsii*, 1971, no. 8, pp. 64–66.
10. Shalyt, G.M. *Povyshenie effektivnosti profilaktiki izolyatsii v kabel'nykh setyakh* [Improving the efficiency of insulation maintenance in cable networks], in *Trudy VNIIE. Vyp. 8* [Collected works of VNIIE (All-Union Electric Power Research Institute)]. Moscow, Gosenergoizdat, 1959, pp. 77–97.
11. Peters, J.F., Slepian, J. *Voltage Induced by Acreign Grounds*, Tr. AIEE, 1928. 478 p.
12. Belyakov, N.N. *Issledovanie perenapryazheniy pri dugovykh zamykaniyakh na zemlyu v setyakh 6–10 kV s izolirovannoy neytral'yu* [A study of overvoltage under arcing earth faults in 6–10 kV networks with insulated neutral]. *Elektrichestvo*, 1957, no. 5, pp. 31–36.
13. Shutskiy, V.I., Zhidkov, V.O., Il'in, Yu.N. *Zashchitnoe shuntirovanie odnofaznykh povrezhdeniy elektroustanovok* [Protective bridging of single-phase faults in electrical installations]. Moscow, Energoatomizdat, 1988. 208 p.

Аль-Хомиди Марван Саид Саиф,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, аспирант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами,
телефон (4932) 26-99-05,
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) 26-99-05,
e-mail: dobryagina_oa@mail.ru

Шагурина Елена Сергеевна,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами,
телефон (4932) 26-99-05,
e-mail: e_chugrova@mail.ru

Шадрикова Татьяна Юрьевна,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
старший преподаватель кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами,
телефон (4932) 26-99-05,
e-mail: tanya-vinokurova@mail.ru

Шуин Владимир Александрович,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами,
телефон (4932) 26-99-05,
e-mail: shuin@rza.ispu.ru