

УДК 621.311

Юрий Дмитриевич Кутумов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: kutumov97@mail.ru

Разработка способа дистанционного определения расстояния до места возникновения однофазного замыкания на землю, основанного на вычислении параметров контура «фаза–земля» в сетях 6–10 кВ

Авторское резюме

Состояние вопроса. В настоящее время для распределительных кабельных сетей напряжением 6–10 кВ разработано множество методов дистанционного определения расстояния до места возникновения однофазного замыкания на землю. Указанные методы основаны на анализе режимных параметров как при устойчивых однофазных замыканиях на землю, так и при переходных процессах, возникающих при однофазных замыканиях на землю. Тем не менее точность определения расстояния до места возникновения однофазных замыканий на землю с применением указанных методов невелика, что определяет отсутствие их широкого внедрения. Перспективным направлением в указанной области является определение расстояния до места возникновения однофазных замыканий на землю на основе расчета пассивных параметров контура «фаза–земля», образуемого фазными проводниками кабеля и его оболочкой.

Материалы и методы. При исследовании переходных и установившихся режимов при однофазных замыканиях на землю для оценки устойчивости функционирования предлагаемых методов дистанционного определения расстояния до места возникновения однофазного замыкания на землю применено имитационное моделирование в программных комплексах PSCAD и Matlab, а также в COMSOL Multiphysics.

Результаты. Предложен способ дистанционного определения расстояния до места возникновения однофазного замыкания на землю, основанный на вычислении и последующем анализе пассивных параметров контура «фаза–земля» в кабельных сетях напряжением 6–10 кВ с изолированной нейтралью. Дана оценка применимости основной гармонической составляющей (50 Гц) для целей дистанционного определения расстояния до места возникновения однофазного замыкания на землю. Обозначен частотный диапазон высших гармонических составляющих в переходных токах и напряжениях при однофазных замыканиях на землю, в котором предложенный способ (и иные подобные способы) будет функциональным и позволит достоверно рассчитать пассивные параметры контура «фаза–земля».

Выводы. Разработанный способ дистанционного определения расстояния до места возникновения однофазного замыкания на землю на основе измерения параметров переходных процессов при однофазных замыканиях на землю позволяет с достаточной точностью определить расстояние до места возникновения как устойчивых, так и кратковременных однофазных замыканий на землю на основе фиксации мгновенных значений аварийных составляющих токов и напряжений в исследуемой сети, что обеспечивает возможность его применения и в кабельных сетях с резонансно-заземленной нейтралью.

Ключевые слова: кабельные сети напряжением 6–10 кВ с изолированной нейтралью, однофазные замыкания на землю, дистанционное определение расстояния до места возникновения однофазного замыкания на землю

Yuri Dmitrievich Kutumov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: kutumov97@mail.ru

Development of a method for distant single phase to earth fault localization based on calculating phase-to-ground loop parameters in 6–10 kV networks

Abstract

Background. At the present time, a great number of methods of distant single phase to earth fault localization (DSPEFL) have been developed for 6–10 kV distribution cable networks. These methods are based on the analysis of operating parameters both during stable single phase to earth faults (SFEFs) and transient processes that occur during SFEFs. However, the accuracy of single phase to earth fault localization is low, which determines the lack of their widespread implementation. A promising direction in this area is to determine the distance to the place of single phase to earth fault

based on the calculation of the passive parameters of the phase-to-earth loop which is formed by the phase conductors of the cable and its sheath.

Materials and methods. Simulation study in PSCAD, Matlab and also in COMSOL Multiphysics software has been carried out to study transient and steady-state modes during SFEFs, and to assess the stability of the functioning of the proposed DSPEFL methods.

Results. The author has proposed a DSPEFL method, which is based on the calculation and subsequent analysis of the passive parameters of the phase-to-earth loop in 6–10 kV cable networks with an isolated neutral point. An assessment of the applicability of the fundamental harmonic component (50 Hz) for DSPEFL is made. The frequency range of higher harmonic components in transient current and voltage during SFEF is indicated, in which the proposed method (and other similar methods) will be functional and will allow reliably calculate the passive parameters of the phase-to-earth circuit.

Conclusions. The developed method of DSPEFL based on measuring the parameters of transient processes during SFEF allows us to determine with sufficient accuracy the distance to single phase to earth fault localization during both stable and short-term SFEFs. It is based on recording the instantaneous values of fault current and voltage in the network under study, which makes it possible to use it in cable networks with resonant-grounded neutral point.

Key words: 6–10 kV cable networks with isolated neutral point, single phase to earth faults, distant single phase to earth fault localization

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.1.047-054

Введение. В настоящее время кабельные сети напряжением 6–10 кВ составляют основу систем электроснабжения городов и промышленных предприятий. Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) в кабельных сетях являются преобладающим видом повреждения.

В силу особенностей кабельных сетей с изолированной нейтралью (~80 % от всех кабельных сетей) и резонансно-заземленной через дугогасящий реактор нейтралью (~15–20 % от всех кабельных сетей) ОЗЗ может являться допустимым режимом работы в течение определенного времени (до 2–6 ч). В течение указанного времени требуется, однако, осуществить поиск поврежденного присоединения и расстояния до места повреждения в целях оперативной ликвидации указанного типа повреждения. Необходимость оперативной (а иногда и автоматической) локации ОЗЗ обусловлена значительным уровнем перенапряжений при данном типе повреждения, кратность которых при устойчивом ОЗЗ (УОЗЗ) составляет ~1,73, а при дуговом перемежающемся ОЗЗ (ДПОЗЗ) – до ~3,5–4,0. Такие перенапряжения в электрически связанной сети могут приводить к развитию ОЗЗ в двойные и множественные замыкания, являющиеся разновидностью короткого замыкания и приводящие к множественным отключениям питающих фидеров действием защит от междуфазных КЗ и длительным нарушениям электроснабжения в кабельных сетях.

Учитывая физические особенности работы кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией (БПИ) (более 80–90 % всех кабельных сетей 6–10 кВ), а именно способность данной изоляции к восстановлению изоляционного пространства при ОЗЗ, следует выделить такие разновидности ОЗЗ, как кратковременные самоустраняющиеся (КрОЗЗ, «клевики земли»), дуговые перемежающиеся (ДПОЗЗ) и дуговые прерывистые (ДПрОЗЗ). Изоляция кабеля, единожды повредившись даже при КрОЗЗ, полностью не восстановит свою изоляционную способность; в

месте кратковременного пробоя вероятность его повторения наиболее высока. В связи с этим диагностирование КрОЗЗ, накопление информации о местах их возникновения, в том числе с применением функциональных методов и способов дистанционного определения расстояния до места возникновения однофазного замыкания на землю (ДОМЗЗ), является актуальной задачей.

В настоящее время существует значительное количество методов ДОМЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, основанных на измерении как переходных, так и установившихся токов и напряжений при ОЗЗ. Тем не менее точность определения расстояния до места возникновения ОЗЗ с применением указанных методов невелика, что подтверждается отсутствием их широкого внедрения. Перспективным направлением в указанной области является определение расстояния до места возникновения ОЗЗ на основе расчета пассивных параметров контура «фаза–земля», образуемого фазными проводниками кабеля и его оболочкой. Также целесообразно иметь на вооружении методы и способы ДОМЗЗ, основанные, в том числе, на фиксации параметров переходных процессов при ОЗЗ (и при КрОЗЗ в частности) для накопления диагностической информации.

Степень разработанности направления исследований. Существующие методы ДОМЗЗ можно разделить на следующие группы (рис. 1):

- методы ДОМЗЗ по параметрам аварийного режима (ПАР);
- импульсные методы ДОМЗЗ;
- методы ДОМЗЗ на основе сравнения измеренных значений электрических величин переходного процесса и значений, полученных с помощью разработанной модели кабельной сети (алгоритмические методы ДОМЗЗ).

В основе методов ДОМЗЗ по параметрам аварийного режима лежит измерение параметров (амплитуды, начальной фазы, постоянной времени затухания и пр.) токов и напряжений (их составляющих) при ОЗЗ как в уста-

новившихся режимах, так и при переходных процессах.

Так, в [1] предложен метод ДОМЗЗ в подземных кабельных ЛЭП, основанный на измерениях параметров аварийного режима основной частоты, дополненный алгоритмом компенсации емкостного тока, присущего кабельным ЛЭП.

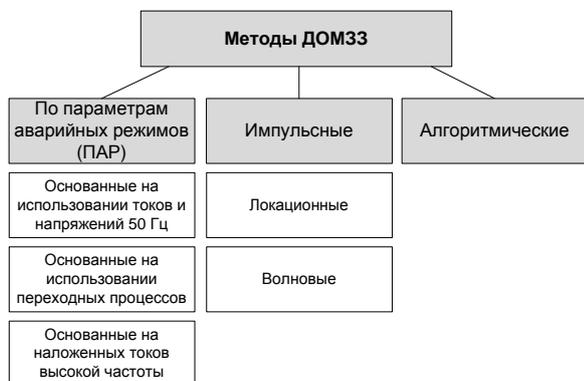


Рис. 1. Классификация методов ДОМЗЗ для кабельных сетей 6–10 кВ

Известны методы [2], основанные на измерении частоты колебаний зарядной составляющей тока ОЗЗ. В [3] для анализа составляющих переходного процесса предложено использовать вейвлет-преобразование.

В [4] рассмотрен алгоритм ДОМЗЗ на основе применения искусственных нейронных сетей. Нейронная сеть анализирует выборки из мгновенных значений сигналов переходных токов и напряжений, которые берутся с частотой дискретизации 5 кГц. Нейронная сеть «обучается», соотнося данные о частоте, затухании и амплитуде сигналов переходных токов и напряжений с расположением места повреждения.

В [5] рассматривается метод ДОМЗЗ, основанный на регистрации и анализе характера снижения напряжения поврежденной фазы $u_{\phi}(t)$ на шинах источника питания. Значение $u_{\phi}(t)$ после пробоя аппроксимируется полиномом второго порядка, после чего находится максимальное значение его производной в момент t_0 , соответствующий времени возникновения пробоя $du_{\phi}/dt|_{t=t_0}$, которое и характеризует расстояние до места ОЗЗ.

В [6] предлагается метод ДОМЗЗ, основанный на анализе соотношений между током и напряжением переходного процесса поврежденной фазы. Расстояние до места ОЗЗ предлагается определять, в том числе, и по замерам амплитуд переходного тока ОЗЗ. Очевидно, что использование такого подхода не отражает реальной картины переходных процессов в кабельных сетях (например, существование зарядной и разрядной составляющих тока ОЗЗ).

В основе методов ДОМЗЗ по параметрам аварийного режима на основе наложенных

токов лежит использование специальных источников «наложенного» тока высокой частоты (например, [7]).

Импульсные методы ДОМЗЗ можно разделить на локационные и волновые.

Локационные методы ДОМЗЗ [8–10] основаны на измерении временного промежутка между моментом отправления импульса прямоугольной формы и моментом возврата к месту установки устройства отраженной от места повреждения электромагнитной волны.

В основе волновых методов ДОМЗЗ [11–14] лежит анализ распространения электромагнитных волн, обусловленных возмущающим воздействием (под которым может подразумеваться ОЗЗ).

Под *алгоритмическими методами ДОМЗЗ* понимаются методы, основанные на применении модели исследуемого объекта (ЛЭП, сети), называемой в [15] алгоритмической моделью объекта (АМО). На основе данных о величинах режимных параметров, полученных при реальном ОЗЗ (или коротком замыкании), происходит подбор таких параметров повреждения в АМО (расстояния до места повреждения, его типа, величины переходного сопротивления), при которых режимные параметры в модели начнут совпадать с режимными параметрами, полученными в реальных условиях.

Алгоритмические методы находят широкое распространение при определении расстояния до места короткого замыкания в сетях 110 кВ и выше в рамках производственной деятельности компаний-лидеров отрасли, таких как АО «Системный оператор Единой энергетической системы».

Методы исследования. Наиболее эффективным методом анализа при переходных и установившихся режимах, сопровождающих ОЗЗ, является математическое имитационное моделирование. При исследовании переходных и установившихся режимов при ОЗЗ, при оценке устойчивости функционирования предлагаемых методов ДОМЗЗ, применялось имитационное моделирование в программных комплексах PSCAD и Matlab. Частотные характеристики кабельной ЛЭП исследовались в программных комплексах Matlab и COMSOL Multiphysics.

Параметры и характеристики кабельных линий напряжением 6–10 кВ. На рис. 2 показан элементарный участок («секция») схемы замещения кабельной ЛЭП напряжением 6–10 кВ.

В контексте исследуемой задачи – разработка алгоритмов ДОМЗЗ – может быть интересно и целесообразно исследовать параметры эквивалентного контура «фаза–земля» поврежденного кабеля. Сопротивление замкнутой петли «фаза–оболочка» рассчитывается как

$$\dot{z}_{\phi-3} = \dot{z}_{ph} + \dot{z}_{sh} - 2 \cdot \dot{z}_{m0}. \quad (1)$$

Исследуемая кабельная ЛЭП выполнена с помощью кабеля марки ААБл-3×240 – кабель

с алюминиевой жилой в алюминиевой оболочке с БПИ. Задача определения пассивных параметров кабелей указанных типов, в том числе зависимостей индуктивных и активных параметров от частоты, успешно решена в [16].

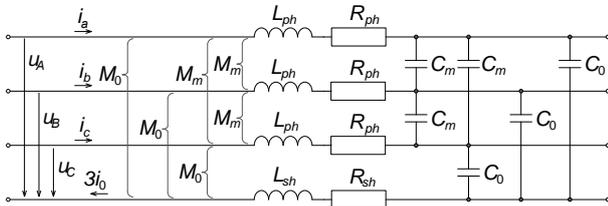


Рис. 2. Эквивалентная схема замещения трехжильного кабеля с алюминиевой оболочкой: L_{ph} – собственная индуктивность фазной жилы; L_{sh} – собственная индуктивность алюминиевого экрана; M_m – взаимная индуктивность между фазными жилами; M_0 – взаимная индуктивность между фазной жилой и оболочкой; R_{ph} – активное сопротивление фазной жилы; R_{sh} – активное сопротивление алюминиевой оболочки; C_m – емкость между фазными жилами; C_0 – емкость между фазной жилой и оболочкой

Для разработки функциональных методов ДОМЗЗ на основе измерения параметров контура «фаза–земля» (1) необходимо определить частотный диапазон токов и напряжений, при котором импеданс кабельной линии будет сохранять активно-индуктивный характер.

На рис. 3–5 приведены зависимости активного сопротивления и индуктивности контура «фаза–земля» исследуемой ЛЭП от длины участка (расстояния до места замыкания на землю). Исследования производились для частот 1000, 5000 и 10000 Гц.

На зависимости наложены также линии, отражающие «желаемую» зависимость параметра от расстояния до места ОЗЗ (полученную по известным удельным параметрам контура «фаза–земля» – индуктивности $L_{ф-з}$).

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- при частотах входного сигнала до 1000–2000 Гц опытные зависимости соответствуют теоретическим, что говорит нам об отсутствии влияния «распределенности» параметров ЛЭП (и ее поперечных емкостей) на величину входного импеданса;

- при частоте входного сигнала 5000 Гц при расстоянии до места повреждения от 2,0 км начинает проявляться «распределенность» параметров кабельной ЛЭП (расстояние от места повреждения 2,0 км составляет ~7% от длины волны ~150000 км/с/5000 Гц = 30 км);

- при частоте входного сигнала 10000 Гц при расстоянии до места повреждения от 1,0 км начинает проявляться «распределенность» параметров кабельной ЛЭП, а при расстоянии от 3,0 км входной импеданс приобретает емкостной характер – происходит резонанс.

Таким образом, для реализации устройства ДОМЗЗ на основе измерения индуктивности контура «фаза–земля» приемлемо использовать частотные компоненты в диапазоне до 1–2 кГц (в кабельных сетях городского и промышленного электроснабжения с длиной шлейфа до ~3–5 км).

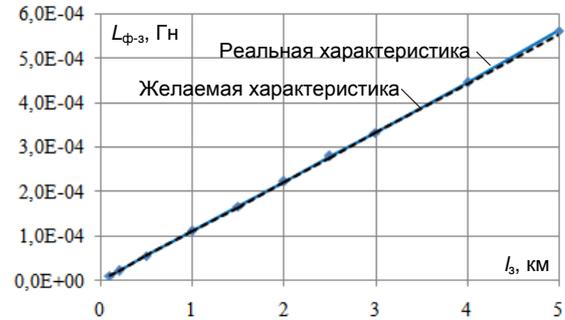


Рис. 3. Зависимость индуктивности контура «фаза–земля» от расстояния до места ОЗЗ при частоте входного сигнала, равной 1000 Гц

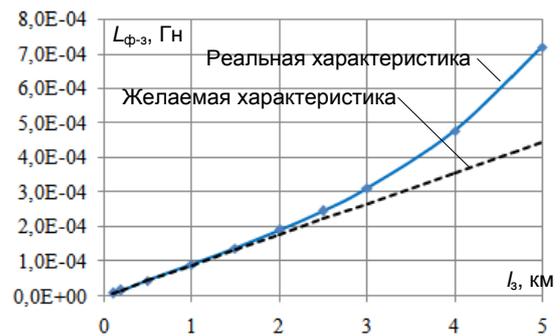


Рис. 4. Зависимость индуктивности контура «фаза–земля» от расстояния до места ОЗЗ при частоте входного сигнала, равной 5000 Гц



Рис. 5. Зависимость индуктивности контура «фаза–земля» от расстояния до места ОЗЗ при частоте входного сигнала, равной 10000 Гц

О способах ДОМЗЗ на основе измерения составляющей 50 Гц. Индуктивность петли «фаза–земля» (Гн) исследуемой кабельной ЛЭП при однофазном замыкании на землю в сетях с изолированной нейтралью может быть рассчитана по следующему расчетному выражению:

$$L_{\text{защ}} = \text{Im}\{\dot{z}_{\text{защ}}\} = \text{Im}\{\dot{z}_{\text{ф-з}}\} = \text{Im}\left\{\frac{\dot{U}_{\text{ф}(50 \text{ Гц})}}{i_{\text{ф}(50 \text{ Гц})}}\right\}. \quad (2)$$

В ходе исследования зависимости замера по выражению (2) было установлено, что замер будет стабилен и корректен только после завершения переходного процесса (рис. 6). Указанное связано в первую очередь с наличием «преломления» напряжения поврежденной фазы в момент возникновения ОЗЗ.

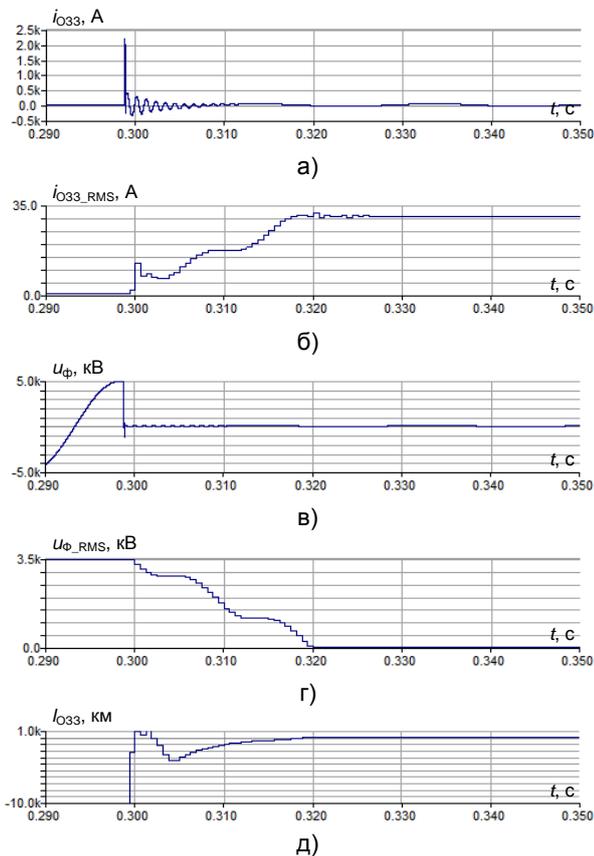


Рис. 6. Иллюстрация нестабильности 1-й гармоники фазного напряжения и фазного тока при ОЗЗ (а–г), а также замера по выражению (2) (д) в условиях наличия интенсивного переходного процесса

Расчеты величины $I_{\text{ОЗЗ}}$ (кА) в программном комплексе PSCAD (рис. 7) показали, что она прямо пропорциональна расстоянию до места повреждения; характер ее изменения при этом не зависит существенно от величины емкостного тока примыкающей сети. Коэффициент пропорциональности равен удельной индуктивности петли «фаза–земля», которая по результатам расчета в COMSOL составляет 0,0002002 Гн/км, а по результатам расчета в PSCAD – 0,000194 Гн/км. В связи с этим можно утверждать, что указанный метод ДОМЗЗ функционирует в имитационной модели достаточно точно.

Тем не менее следует отметить, что при устойчивом ОЗЗ в зависимости от расстояния до места возникновения ОЗЗ действующее напряжение поврежденной фазы не превышает

5–40 В, что крайне невелико и в реальных условиях функционирования будет находиться в пределах измерительной погрешности трансформатора напряжения.

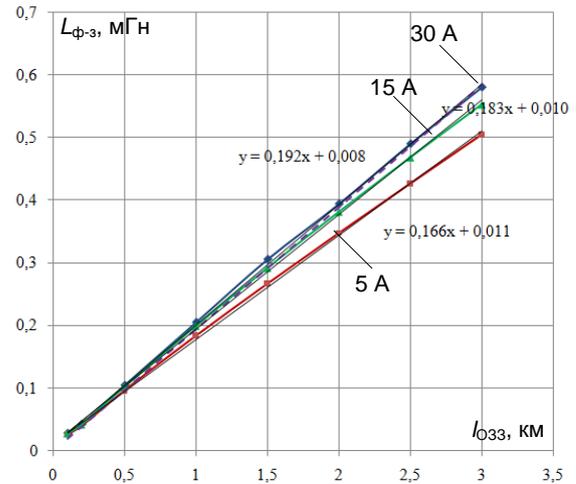


Рис. 7. Результаты вычисления индуктивности контура «фаза–земля» по параметрам аварийного режима (1-я гармоника, 50 Гц) при устойчивом ОЗЗ

Использование высших гармоник, обусловленных переходными процессами при ОЗЗ, которое могло бы решить проблему фиксации КрОЗЗ при предлагаемом способе расчета индуктивности петли «фаза–земля», не представляется возможным в силу того, что замер любой n -й гармоники фазного напряжения нестабилен (в отличие от аналогичных гармонических составляющих тока поврежденной фазы) (рис. 8).

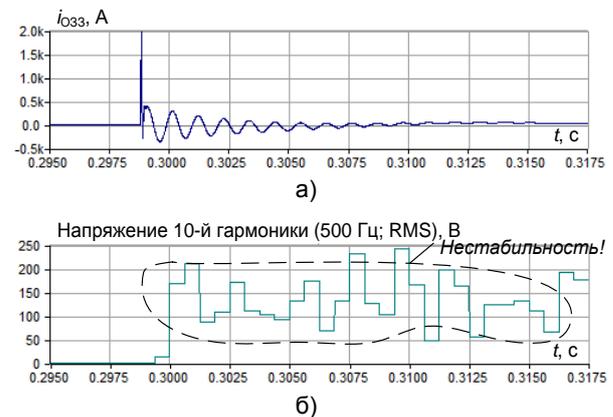


Рис. 8. Иллюстрация нестабильности 10-й гармоники фазного напряжения при ОЗЗ в условиях наличия интенсивного переходного процесса

Таким образом, использование гармонической составляющей основной частоты для целей ДОМЗЗ является актуальным только при УОЗЗ. Указанный способ в реальных условиях функционирования, несмотря на приемлемую точность расчета в имитационной модели, не может быть применен в сети с изолированной нейтралью. Тем не менее целесообразно в перспективе исследовать его применение в се-

тях с более значительными уровнями токов замыкания на землю – кабельных сетях 20 кВ с низкоомным заземлением нейтрали и кабельных сетях 6–10 кВ с частичным заземлением нейтрали (собственные нужды АЭС).

Методы ДОМЗЗ на основе измерения составляющих в диапазоне от 500 до 2000 Гц (или иных высокочастотных составляющих). Указанный частотный диапазон позволит рассчитывать расстояние до места ОЗЗ не только при устойчивых ОЗЗ, но и при КрОЗЗ, ДПОЗЗ и иных типах ОЗЗ, сопровождающихся интенсивными переходными процессами. Однако реализация подобных методов осложняется тем, что отдельные высшие гармоники напряжения поврежденной фазы нестабильны.

В связи с этим целесообразно рассматривать методы, связанные с анализом широкого частотного диапазона или анализом мгновенных значений токов и напряжений.

Рассмотрим дифференциальное уравнение, описывающее контур «фаза–земля» поврежденной кабельной ЛЭП, и первую производную указанного уравнения:

$$u_{\phi}(t) = i_{\phi}(t) R_{\phi-3} + \frac{di_{\phi}(t)}{dt} L_{\phi-3}; \quad (3)$$

$$\frac{du_{\phi}(t)}{dt} = \frac{di_{\phi}(t)}{dt} R_{\phi-3} + \frac{d^2i_{\phi}(t)}{dt^2} L_{\phi-3}. \quad (4)$$

В (3) и (4) имеем две неизвестные величины – индуктивность и активное сопротивление контура «фаза–земля». Индуктивность может быть выражена следующим образом:

$$L_{\phi-3} = \frac{u_{\phi}(t) \frac{di_{\phi}(t)}{dt} - i_{\phi}(t) \frac{du_{\phi}(t)}{dt}}{\frac{di_{\phi}(t)}{dt} \frac{di_{\phi}(t)}{dt} - i_{\phi}(t) \frac{d^2i_{\phi}(t)}{dt^2}}. \quad (5)$$

Если заменить функции и их производные на дискретные отсчеты, то выражение примет следующий вид:

$$L_{\phi-3} = \frac{u_{\phi}[n] \frac{i_{\phi}[n] - i_{\phi}[n-1]}{T_d} - i_{\phi}[n] \frac{u_{\phi}[n] - u_{\phi}[n-1]}{T_d}}{\frac{i_{\phi}[n] - i_{\phi}[n-1]}{T_d} \frac{i_{\phi}[n] - i_{\phi}[n-1]}{T_d} - i_{\phi}[n] \frac{i_{\phi}[n] - 2i_{\phi}[n-1] + i_{\phi}[n-2]}{T_d^2}}. \quad (6)$$

Эксперименты показали, что указанный способ с приемлемой точностью функционирует при измерении зарядной составляющей тока ОЗЗ (рис. 9) (составляющая, обусловленная дозарядом емкостей неповрежденных фаз при ОЗЗ, имеет частотный диапазон от сотен Гц до 1–2 кГц) в случае, если частота дискретизации информационных сигналов составляет 80 или 96 выборок на период промышленной частоты.

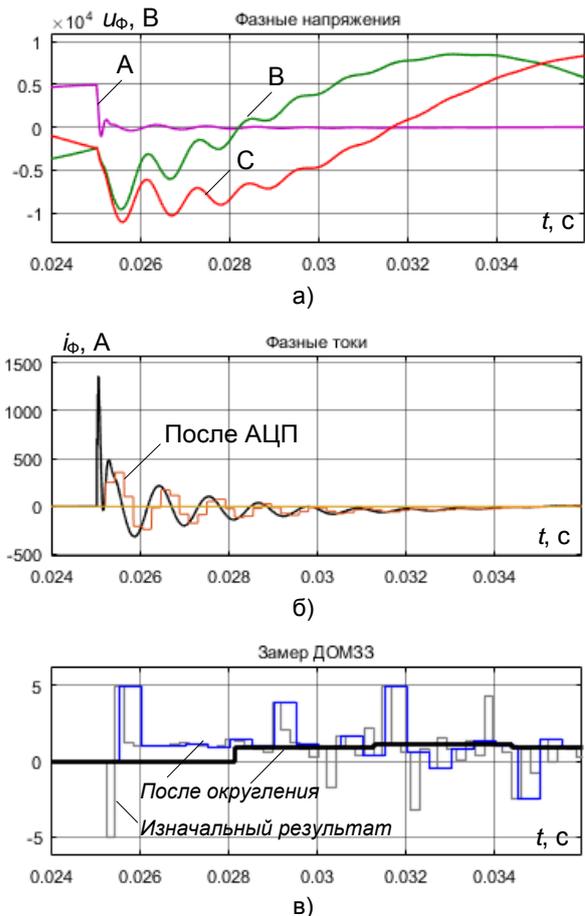


Рис. 9. Иллюстрация функционирования метода ДОМЗЗ, основанного на анализе мгновенных значений токов и напряжений (и их производных) на поврежденной фазе (расстояние до места ОЗЗ – 1 км, 96 выборок на период)

Для корректной работы при измерении разрядной составляющей тока ОЗЗ (обусловлена разрядом емкости поврежденной фазы на землю) при реализации указанного способа требуется частота дискретизации, значительно превышающая 256 выборок на период промышленной частоты (рис. 10).

Применение указанного способа допустимо, в том числе, в сетях с резонансным заземлением нейтрали, так как параметры разрядной составляющей тока ОЗЗ не зависят от режима заземления нейтрали (изолированная; резонансно-заземленная).

Результаты. Предложенный способ ДОМЗЗ, основанный на вычислении и последующем анализе пассивных параметров контура «фаза–земля» в кабельных сетях напряжением 6–10 кВ с изолированной нейтралью, подразумевает анализ параметров разрядной составляющей тока ОЗЗ, фазного напряжения и их производных с частотой дискретизации 80 (96) выборок на период промышленной частоты, позволяет с приемлемой точностью определять расстояние до места возникновения ОЗЗ на кабельных линиях длиной до 2,0 км (погрешности не превы-

шают 7–8 %). Использование разрядной составляющей тока ОЗЗ в данных условиях не представляется возможным в силу следующих обстоятельств:

– параметры контура «фаза–земля» в данных условиях отличаются от ожидаемых (индуктивность петли «фаза–земля» при частотах, соответствующих разрядной составляющей и составляющих 1–20 кГц) (см. рис. 5);

– используемые в настоящее время аналого-цифровые преобразователи не позволяют достоверно отобразить указанную составляющую тока ОЗЗ.

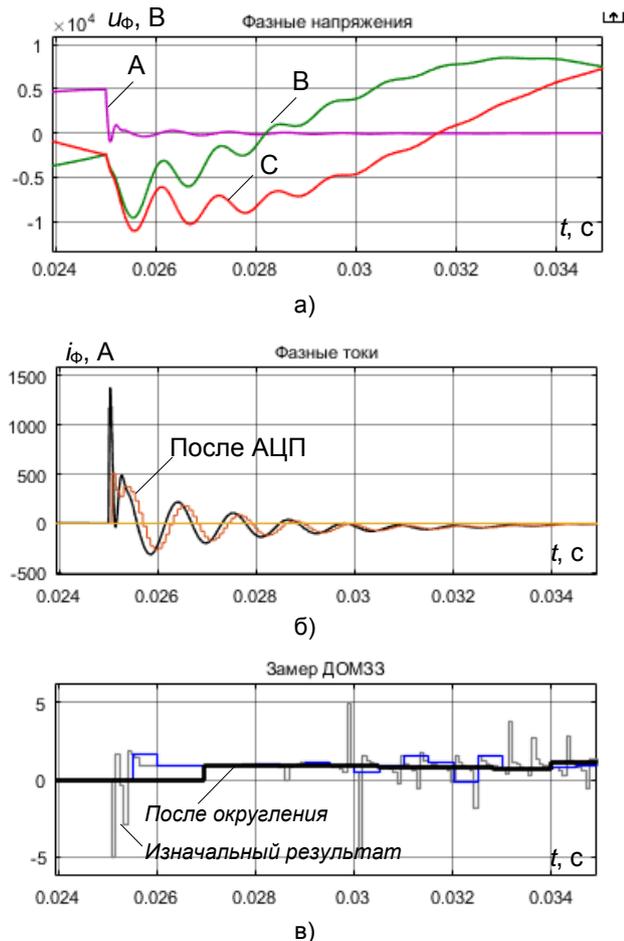


Рис. 10. Иллюстрация функционирования метода ДОМ33, основанного на анализе мгновенных значений токов и напряжений (и их производных) на поврежденной фазе (расстояние до места ОЗЗ – 1 км, 256 выборок на период)

Выводы. Разработанный способ ДОМ33 на основе измерения параметров переходных процессов при ОЗЗ позволяет с достаточной точностью определить расстояние до места возникновения как устойчивых, так и кратковременных ОЗЗ на основе фиксации мгновенных значений аварийных составляющих токов и напряжений в исследуемой сети, что обеспечивает возможность его применения в кабельных сетях как с изолированной нейтралью, так и с резонансно-заземленной нейтралью.

Список литературы

1. **Fault** Location for Underground Distribution Feeders: An Extended Impedance-Based Formulation with Capacitive Current Compensation / A. Filomena, M. Resener, R. Salim, A. Bretas // *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* – 2009. – Vol. 31. – P. 489–496.
2. **Welfonder T.** Localisation de défauts monophasés dans les réseaux de distribution à neutre compensé: PhD thesis. – Grenoble INPG, 1998.
3. **Comparison** on wavelet and differential equation algorithms in earth fault distance computation / S. Hänninen, M. Lehtonen, T. Hakola, R. Rantanen // *PSCC, 13th Power Systems Computation Conference: Proceedings.* – Trondheim, Norway, 1999. – P. 801–807.
4. **Comparison** of artificial neural networks and conventional algorithms in ground fault distance computation / G. Eberl, S. Hanninen, M. Lehtonen, P. Schegner // *2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37077).* – Singapore, 2000. – Vol. 3. – P. 1991–1996. DOI: 10.1109/PESW.2000.847659.
5. **Качесов В.Е.** Метод определения зоны однофазного замыкания в распределительных сетях под рабочим напряжением // *Электричество.* – 2005. – № 6. – С. 9–18.
6. **Байбурин Э.Р.** Повышение надежности сельских электрических сетей 6(10) кВ на основе оперативного определения места повреждения при однофазных замыканиях на землю по параметрам переходного процесса без отключения потребителей: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02. – Уфа: БГАУ, 2006. – 222 с.
7. **Пат.** на изобретение № 2446533 Российская Федерация, МПК H02H3/16, G01R31/08. Способ определения места однофазного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью : № 2010132425/07 : заявл. 02.08.2010 : опубл. 27.03.2012 / П.Г. Мустафин, Е.Е. Котельникова.
8. **Куликов А.Л.** Цифровое дистанционное определение повреждений ЛЭП / под ред. М.Ш. Мисриханова. – Н. Новгород: Изд-во Волго-Вятской академии гос. службы, 2006. – 315 с.
9. **Шалыт Г.М.** Определение мест повреждения линий импульсными методами. – М.: Энергия, 1968. – 216 с.
10. **Локационный** автоматический искатель повреждений ВЛ Р5-7 / Г.М. Шалыт, С.Е. Сидорчук, А.Н. Афонин, А.Я. Красюк // *Определение мест повреждения воздушных линий электропередачи.* – М.: Энергия, 1977. – С. 131–139.
11. **Петрухин А.А.** Совершенствование методов и технических средств определения мест повреждений воздушных ЛЭП 6–35 кВ на основе активного зондирования: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. – Иванов, 2009. – 176 с.
12. **Латипов А.Г.** Комплекс методик определения места повреждения в распределительных электрических сетях напряжением 6–35 кВ по параметрам установившихся и переходных режимов: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. – Казань: КГЭУ, 2012. – 212 с.
13. **Crossley P.A., McLaren P.G.** Distance Protection Based on Travelling Waves // *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems.* – September 1983. – Vol. PAS–102, Issue 9.

14. Dommel H., Michels J. High-speed relaying using traveling wave transient analysis // *IEEE Trans. Power Appar. Syst.* – New York, 1978.

15. Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Павлов А.О. Алгоритмические модели электрических систем // Труды АЭН ЧР. – 1999. – № 1-2. – С. 10–21.

References

1. Filomena, A., Resener, M., Salim, R., Bretas, A. Fault Location for Underground Distribution Feeders: An Extended Impedance-Based Formulation with Capacitive Current Compensation. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 2009, vol. 31, pp. 489–496.

2. Welfonder, T. Localisation de défauts monophasés dans les réseaux de distribution à neutre compensé. PhD thesis. Grenoble INPG, 1998.

3. Hänninen, S., Lehtonen, M., Hakola, T., Rantanen, R. Comparison on wavelet and differential equation algorithms in earth fault distance computation. *PSCC, 13th Power Systems Computation Conference: Proceedings*. Trondheim, Norway, 1999, pp. 801–807.

4. Eberl, G., Hanninen, S., Lehtonen, M., Schegner, P. Comparison of artificial neural networks and conventional algorithms in ground fault distance computation. *2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings* (Cat. No.00CH37077). Singapore, 2000, vol. 3, pp. 1991–1996. DOI: 10.1109/PESW.2000.847659.

5. Kachesov, V.E. Metod opredeleniya zony odnofaznogo замыкания в распределительных сетях под рабочим напряжением [A method for determining the zone of single phase to earth fault in distribution networks under operating voltage]. *Elektrichestvo*, 2005, no. 6, pp. 9–18.

6. Bayburin, E.R. *Povyshenie nadezhnosti sel'skikh elektricheskikh setey 6(10) kV na osnove operativnogo opredeleniya mesta povrezhdeniya pri odnofaznykh замыкaniyakh na zemlyu po parametram perekhodnogo protsessa bez otklyucheniya potrebiteley*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Increasing the reliability of 6(10) kV rural electric networks based on prompt determination of the location of damage during single phase to earth faults according to the parameters of the transient process without disconnecting consumers. Cand. tech. sci. diss.]. Ufa: BGAU, 2006. 222 p.

7. Mustafin, R.G., Kotelnikova, E.E. *Sposob opredeleniya mesta odnofaznogo замыкaniya na zemlyu v seti s izolirovannoy nejtral'yu* [Method for determining the location of a single-phase to earth fault in a network with an isolated neutral point]. Patent RF, no. 2446533, 2012.

8. Kulikov, A.L. *Tsifrovoye distantsionnoye opredelenie povrezhdeniy LEP* [Digital distance detection of power line faults]. N.Novgorod: Izdatel'stvo Volgo-Vyatskoy akademii gosudarstvennoy sluzhby, 2006. 315 p.

9. Shalyt, G.M. *Opredelenie mest povrezhdeniya liniy impul'snymi metodami* [Determination of line fault locations using pulse methods]. Moscow: Energiya, 1968. 216 p.

10. Shalyt, G.M., Sidorchuk, S.E., Afonin, A.N., Krasnyuk, A.Ya. Lokatsionnyy avtomaticheskyy iskatel' povrezhdeniy VL R5-7 [Localized automatic fault detector for overhead lines]. *Opredelenie mest povrezhdeniya vozduzhnykh liniy elektroperedachi*. Moscow: Energiya, 1977, pp. 131–139.

11. Petrukhin, A.A. *Sovershenstvovanie metodov i tekhnicheskikh sredstv opredeleniya mest povrezhdeniy vozduzhnykh LEP 6–35 kV na osnove aktivnogo zondirovaniya*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Improving methods and technical means for determining the location of damage to 6–35 kV overhead power lines based on active sensing. Cand. tech. sci. diss.]. Ivanovo, 2009. 176 p.

12. Latipov, A.G. *Kompleks metodik opredeleniya mesta povrezhdeniya v raspredelitel'nykh elektricheskikh setyakh napryazheniem 6–35 kV po parametram ustanovivshikhsya i perekhodnykh rezhimov*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [A set of methods for determining the location of faults in electrical distribution networks with voltages of 6–35 kV based on the parameters of steady-state and transient modes. Cand. tech. sci. diss.]. Kazan': KGEU, 2012. 212 p.

13. Crossley, P.A., McLaren, P.G. Distance Protection Based on Travelling Waves. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, September 1983, vol. PAS–102, issue 9.

14. Dommel, H., Michels, J. High-speed relaying using traveling wave transient analysis. *IEEE Trans. Power Appar. Syst.* New York, 1978.

15. Lyamets, Yu.Ya., Nudel'man, G.S., Pavlov, A.O. Алгоритмические модели электрических систем [Algorithmic models of electrical systems]. *Trudy AEN ChR*, 1999, no. 1-2, pp. 10–21.