

УДК 621.311

Владимир Александрович Шуин

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: vshuin@mail.ru

Юрий Дмитриевич Кутумов

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: kutumov97@mail.ru

Наталья Владимировна Кузьмина

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

Татьяна Юрьевна Шадрикова

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

Моделирование кабельных линий напряжением 6–10 кВ при расчетах переходных процессов при замыканиях на землю

Авторское резюме

Состояние вопроса. Как правило, в публикациях, посвященных расчетам переходных процессов при однофазных замыканиях на землю в кабельных сетях напряжением 6–10 кВ, не учитывается зависимость индуктивностей кабельных линий от частоты, что в некоторых случаях может привести к существенным погрешностям в оценках параметров переходных токов и напряжений. В связи с этим актуальной является задача оценки указанных погрешностей и определения области применения частотно-независимых схем замещения и моделей кабельных линий 6–10 кВ при расчетах и моделировании переходных процессов при ОЗЗ.

Материалы и методы. Для исследования влияния частотной зависимости индуктивностей кабельных линий 6–10 кВ на точность расчетов переходных процессов при ОЗЗ использован программный комплекс для моделирования электроэнергетических систем PSCAD/EMTDC, позволяющий создавать модели электрических сетей с применением как частотно-зависимых, так и частотно-независимых моделей кабельных ЛЭП только с круглыми жилами. Для проверки адекватности частотно-зависимой модели трехфазного кабеля, разработанной в PSCAD, использована частотно-зависимая модель трехфазного кабеля 6–10 кВ с секторными жилами, выполненная в программном комплексе COMSOL Multiphysics.

Результаты. Сформулирован подход к разработке моделей кабельных ЛЭП 6–10 кВ с параметрами, зависящими и не зависящими от частоты. Получены оценки погрешностей определения параметров переходных токов и напряжений при ОЗЗ при использовании моделей кабельных ЛЭП, не учитывающих зависимости индуктивностей от частоты (для разрядных составляющих – 15–20 %, для зарядных составляющих – 5–10 %). Показано, что модели, в которых параметры кабельных линий определены по скорости распространения электромагнитной волны, могут применяться для приближенных расчетов переходных токов и напряжений при решении большинства задач, связанных с исследованиями переходных процессов при ОЗЗ.

Выводы. Применение разработанных рекомендаций по определению параметров трехфазных кабельных линий 6–10 кВ повысит точность расчетов переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ. Обеспечить требуемую для разработки методов дистанционного определения места замыкания на землю в сетях 6–10 кВ точность позволяет только применение частотно-зависимых моделей кабельных линий.

Ключевые слова: кабельные линии 6–10 кВ, однофазные замыкания на землю, переходные процессы, параметры кабельной линии

Vladimir Alexandrovich Shuin

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: vshuin@mail.ru

Yuri Dmitrievich Kutumov

Ivanovo State Power Engineering University, Post-graduate Student of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: kutumov97@mail.ru

Natalia Vladimirovna Kuzmina

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

Tatiana Yurievna Shadrikova

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

Simulation study of 6–10 kV cable lines for transient processes calculation during earth faults

Abstract

Background. As a rule, researchers do not consider the dependence of the inductance of cable lines on frequency in their scientific papers devoted to the calculation of transient processes during single phase-to-ground fault in 6–10 cable networks. In some cases, it can lead to significant errors in evaluation of current and voltage transient components parameters. Therefore, it is an urgent task to estimate defined errors and the scope of application of frequency-independent equivalent circuits and models of 6–10 kV cable lines during calculation and simulation of transient processes in case of single phase-to-ground fault.

Materials and methods. The authors applied PSCAD / EMTDC software to study the effect of the frequency dependence of the inductances of 6–10 kV cable lines on the calculation accuracy of transient processes during single phase-to-ground fault. It allows to simulate electric power systems models with the usage of both frequency-dependent and frequency-independent cable line models with round conductors only. To check the adequacy of the frequency-dependent three phase cable model developed in PSCAD software, the authors have used a frequency-dependent model of 6–10 kV three-phase cable with sector-shaped conductors designed in COMSOL Multiphysics software.

Results. The authors have developed an approach to develop of 6–10 kV cable lines models with frequency-dependent and frequency-independent parameters. The authors have obtained error estimation in transient current and voltage parameters during single phase-to-ground fault in cable networks models that do not consider the frequency dependence on inductance (for discharge components the error is 15–20 %, for charging components the error is equal to 5–10 %). It is shown that models with cable line parameters defined according to spreading speed of electromagnetic wave, can be used for approximate calculation of transient current and voltage to solve most of tasks of investigation of transient processes during single phase-to-ground faults.

Conclusions. Application of the developed recommendations to determine three phase medium voltage cable lines parameters will increase the calculation accuracy of transient processes during single phase-to-ground faults in 6–10 kV cable networks. Only application of frequency-dependent models of cable lines allows us to provide required accuracy to develop methods of distant earth fault localization in 6–10 kV networks.

Key words: 6–10 kV cable lines, single phase-to-ground fault, transient processes, cable line parameters

DOI: 10.17588/2072-2672.2021.5.030-040

Введение. Примерно половина вырабатываемой в стране электроэнергии распределяется потребителям через кабельные сети среднего напряжения 6–35 кВ, более 99 % суммарной протяженности которых составляют сети напряжением 6–10 кВ¹. Преобладающим видом повреждений в указанных сетях являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ). Наибольшую опасность представляют дуговые перемежаю-

щиеся ОЗЗ (ДПОЗЗ) в кабельных сетях, работающих с изолированной нейтралью, сопровождающиеся интенсивными переходными процессами при повторных зажиганиях заземляющей дуги и обусловленными ими опасными перенапряжениями и значительным увеличением среднеквадратичного значения тока в месте повреждения [1–3]. Переходные процессы при ДПОЗЗ оказывают также значительное влияние на селективность и устойчивость функционирования устройств защиты от замыканий на землю [4, 5]. Учитывая сказанное, точность расчетов параметров переходных токов и напря-

¹ Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: ЭНАС, 2012. – 376 с.

жений при ДПОЗЗ играет существенную роль при решении таких задач, как выбор методов и средств защиты электрооборудования кабельных сетей 6–10 кВ от перенапряжений и термического действия тока в месте повреждения, разработка способов повышения селективности и устойчивости функционирования защит от данного вида повреждений, разработка устройств защиты от ОЗЗ на основе переходных процессов, разработка методов дистанционного определения места ОЗЗ (ДОМЗЗ) на кабельных линиях (КЛ) по параметрам переходного процесса и др.

Основными методами исследования переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях среднего напряжения являются аналитические расчеты с использованием упрощенных математических моделей [5–11] и имитационное моделирование с применением специально разработанных программ, а также современных программных комплексов для научно-технических расчетов в электроэнергетике и электротехнике (Matlab, PSCAD, RTDS, ATPDesigner [12–16]). И в том, и в другом случаях достоверность результатов расчетов переходного процесса при ОЗЗ определяется точностью учета продольных параметров кабельных линий (прежде всего, индуктивностей прямой и нулевой последовательностей), которые в общем случае зависят от частоты переходных токов.

Анализ публикаций, посвященных исследованиям переходных процессов при ОЗЗ, показал, что в расчетных схемах замещения и имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ, как правило, используются модели КЛ, параметры которых не зависят от частоты (частотно-независимые модели). При определении значений погонных индуктивностей прямой $L_{1л}$ и нулевой $L_{0л}$ последовательностей частотно-независимых моделей КЛ 6–10 кВ, как правило, используются два подхода:

1) по справочным данным, полученным на частоте 50 Гц;

2) по скорости распространения электромагнитной волны в каналах прямой и нулевой последовательностей (каналах «фаза–фаза» и «фаза–земля»):

$$L_{1л} = L_{2л} \approx \frac{1}{V_1^2 C_{1л}}; \quad (1)$$

$$L_{0л} \approx \frac{1}{V_0^2 C_{0л}}, \quad (2)$$

где $C_{1л}$ и $C_{0л}$ – емкости прямой и нулевой последовательностей КЛ соответственно; V_1 , V_0 – скорости распространения электромагнитной волны в каналах прямой и нулевой последовательностей КЛ (в каналах «фаза–фаза» и «фаза–земля»), принимаемые для трехфазных КЛ 6–10 кВ равными 150–160 м/мкс [17]).

Применение при расчетах переходных процессов при ОЗЗ частотно-независимых моделей КЛ приводит к погрешностям в оценке параметров (амплитуды, частоты, постоянных затухания и др.) переходных токов и напряжений. В связи с этим актуальной задачей является оценка указанных погрешностей и определение допустимости и области применения частотно-независимых моделей КЛ при расчетах переходных процессов при ОЗЗ в сетях 6–10 кВ.

Методы исследования. Для проведения исследований влияния зависимости индуктивностей кабельных линий 6–10 кВ от частоты на точность расчетов переходных процессов при ОЗЗ использовался программный комплекс для моделирования электроэнергетических систем PSCAD/EMTDC, позволяющий создавать модели электрических сетей с применением как частотно-зависимых, так и частотно-независимых моделей КЛ. В качестве эталонной частотно-зависимой модели использовалась модель Frequency Dependent (Phase) Model [18], реализованная с помощью компонента Cable системы моделирования PSCAD и являющаяся наиболее точной из описанных в научной литературе моделей для выполнения расчетов переходных процессов и установившихся режимов в кабельных ЛЭП. В качестве частотно-независимых моделей КЛ 6–10 кВ использовались модели на основе компонента Cable, погонные значения продольных параметров которых определялись для фиксированной частоты (частотно-независимая модель Bergeron [19]).

Компонент Cable программного комплекса PSCAD позволяет создавать модели кабеля только с проводниками круглого сечения, в то время как кабельные сети 6–10 кВ состоят на ~95 % из трехфазных кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией (БПИ) и секторными жилами. Для проверки адекватности частотно-зависимой модели трехфазного кабеля с круглыми жилами в PSCAD реальному трехфазному кабелю 6–10 кВ с секторными жилами использова-

лась частотно-зависимая модель последнего, выполненная с применением программного комплекса COMSOL Multiphysics [18].

Имитационная модель кабельной сети в PSCAD. Расчетная схема кабельной сети напряжением 6 кВ для анализа влияния зависимости параметров КЛ от частоты на погрешности расчета переходных токов и напряжений при ОЗЗ приведена на рис. 1.

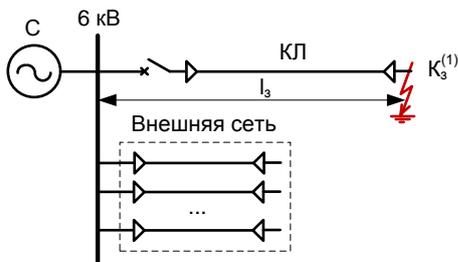


Рис. 1. Однолинейная схема кабельной сети 6 кВ для исследования влияния зависимости продольных параметров КЛ от частоты на погрешности расчета переходных токов и напряжений при ОЗЗ

Схема сети включает в себя кабельную линию для анализа переходных процессов при различных расстояниях l_3 места ОЗЗ от шин источника питания, трехфазный источник питания (систему С) с номинальным напряжением 6 кВ и кабельные линии внешней сети. Схема имитационной модели кабельной сети в программном комплексе PSCAD приведена на рис. 2. Параметры исследуемой сети (суммарный емкостный ток сети I_{Cz} , длина кабельной линии КЛ, индуктивность источника питания, переходное сопротивление в месте повреждения и др.) при проведении вычислительных экспериментов могут изменяться.

Модель кабельной линии КЛ в PSCAD реализована с помощью компонента Cable, в котором, кроме конструктивных параметров кабеля, может быть задана зависимость индуктивностей и активных сопротивлений от частоты (частотно-зависимая модель Frequency Dependent (Phase) Model Options) или отсутствие указанной зависимости (частотно-независимая модель Bergeron) (рис. 3).

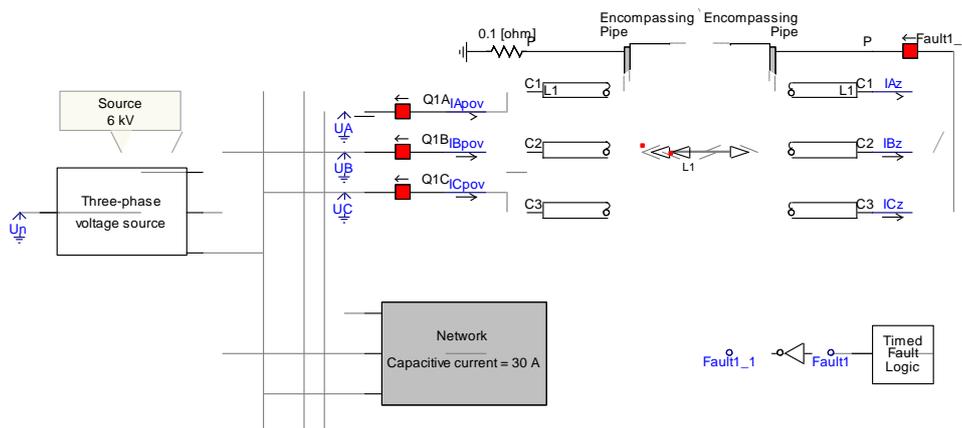


Рис. 2. Имитационная модель кабельной сети 6 кВ в PSCAD

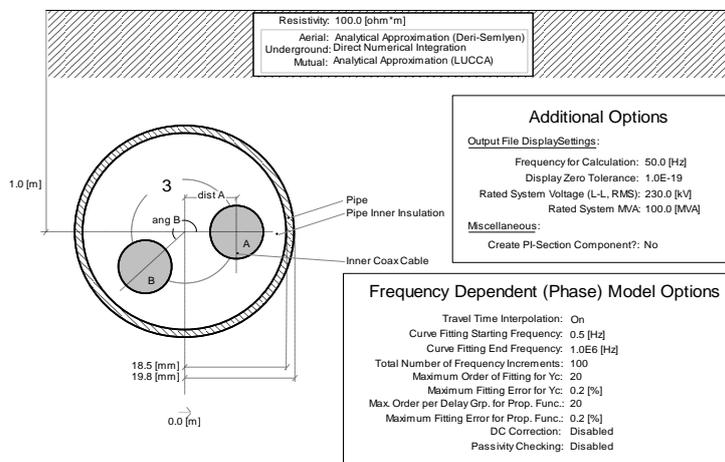


Рис. 3. Окно параметров частотно-зависимой модели КЛ, реализованной в PSCAD на основе компонента Cable

Проверка адекватности модели КЛ в PSCAD реальной КЛ 6–10 кВ с секторными жилами. Как отмечено выше, в кабельных сетях напряжением 6–10 кВ в основном применяются трехфазные кабели с БПИ и секторными жилами. Различие конструкции жил трехфазной КЛ, реализуемой на базе компонента Cable в PSCAD, и реальной КЛ 6–10 кВ в общем случае обуславливает различие их частотных характеристик для каналов «фаза–фаза» и «фаза–земля», т. е. сопротивлений прямой и нулевой последовательностей для одного и того же значения частоты переходного тока. Поэтому результаты расчетов переходных процессов, полученные на модели сети в PSCAD, будут иметь практическую значимость для кабельных сетей 6–10 кВ, если модель КЛ с круглыми жилами с приемлемой при решении указанных выше задач точностью будет адекватна реальной КЛ с секторными жилами.

Известно [1, 5], что в переходном процессе, возникающем при ОЗЗ в кабельных сетях среднего напряжения, можно выделить две стадии, различающиеся по частоте колебаний свободных составляющих токов и напряжений и времени их затухания. Первая стадия связана с разрядом емкости поврежденной фазы и перезарядом междуфазных емкостей и называется разрядной, вторая стадия связана с дополнительным зарядом емкостей неповрежденных фаз через индуктивность источника питания и называется зарядной. В кабельных сетях 6–10 кВ частота зарядных колебаний может иметь значения от сотен герц до ~2–3 кГц, разрядных колебаний – от ~3 кГц до нескольких десятков килогерц [5]. С учетом указанного различия частот разрядной и зарядной стадий первую из них часто называют высокочастотной, вторую – среднечастотной стадией переходного процесса при ОЗЗ. Время затухания высокочастотных разрядных колебаний в реальных кабельных сетях 6–10 кВ обычно не превышает нескольких сотен микросекунд, зарядных среднечастотных – 3–5 мс [1]. Отметим, что расчеты на моделях, не позволяющие полностью учесть все факторы, влияющие на активные потери в контуре нулевой последовательности, дают значения полного времени затухания переходного процесса при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ до 7–10 мс [5].

Практически приемлемую точность измерений переходных токов и напряжений при ОЗЗ в целях решения указанных выше задач можно обеспечить только при частоте высокочастотных колебаний не более ~20 кГц, так как применяемые в кабельных сетях 6–10 кВ в качестве первичных преобразователей тока и напряжения электромагнитные трансформаторы тока и напряжения обеспечивают достаточную точность преобразования (погрешности не более 5–10 %) только при указанной частоте первичных токов и напряжений. Таким образом, адекватность модели КЛ с круглыми жилами реальной КЛ 6–10 кВ с секторными жилами должна оцениваться в диапазоне частот от 50 Гц (установившийся режим ОЗЗ) до ~20 кГц.

Для обеспечения адекватности модели КЛ с круглыми жилами в PSCAD реальной КЛ 6–10 кВ с секторными жилами на частоте 50 Гц должны выполняться следующие условия:

$$F_M \approx F_K; \quad (3)$$

$$F_{об.м} \approx F_{об.к}; \quad (4)$$

$$L_{0м(50Гц)} \approx L_{0к(50Гц)}; \quad (5)$$

$$L_{1м(50Гц)} \approx L_{1к(50Гц)}; \quad (6)$$

$$C_{0м} \approx C_{0к}; \quad (7)$$

$$C_{1м} \approx C_{1к}, \quad (8)$$

где F , $F_{об}$ – сечение жилы и оболочки кабеля, мм²; C_0 , C_1 – емкость нулевой и прямой последовательностей, Ф/км; $L_{0(50 Гц)}$, $L_{1(50 Гц)}$ – индуктивность нулевой и прямой последовательностей в области низких частот, Гн/км; индексами «м» и «к» обозначены соответственно параметры модели в PSCAD и кабеля-прототипа (в качестве прототипа в расчетной схеме сети (рис. 1) был выбран кабель ААБл-6-3х240).

Выполнение условий (3) и (4) обеспечивает равенство активных сопротивлений модели и кабеля-прототипа для составляющих нулевой и прямой последовательностей, условий (5) и (6) – равенство индуктивностей нулевой и прямой последовательностей, соотношений (7) и (8) – равенство емкостей нулевой и прямой последовательностей при любых частотах.

На параметры (частоту, амплитуду, постоянную затухания и др.) разрядной и зарядной составляющих переходного тока в месте ОЗЗ и напряжений на шинах источника питания в кабельных сетях 6–10 кВ оказывают влияние не только частотные

характеристики каналов прямой и нулевой последовательностей поврежденной КЛ, но и другие факторы. Основными из них являются суммарный емкостный ток сети $I_{c\Sigma}$, расстояние l_3 до места повреждения от шин источника питания, индуктивность источника питания [1, 5, 8].

С учетом влияния на параметры переходных токов и напряжений указанных дополнительных факторов для проверки адекватности модели КЛ с круглыми жилами в области средних и высоких частот, соответствующих зарядной и разрядной стадиям переходного процесса при ОЗЗ, использовалась прямая верификация путем сравнения результатов расчетов переходных токов и напряжений на модели кабельной сети в PSCAD (рис. 2) с результатами расчетов, полученными на модели аналогичной сети, в которой в качестве КЛ1 использовалась модель кабеля-прототипа типа ААБл-6-3х240, выполненная на основе других математических методов. В качестве такой модели может быть принята частотно-зависимая модель КЛ 6–10 кВ с секторными жилами, полученная с применением программного комплекса COMSOL Multiphysics, позволяющего с высокой точностью моделировать любые физические процессы, которые описываются частными дифференциальными уравнениями [18].

На рис. 4 приведена модель сети 6 кВ в программном комплексе COMSOL Multiphysics, где L_s , R_s – индуктивность и активное сопротивление источника питания; C_{mn} , C_{0n} – емкость между фазами и между фазой и оболочкой КЛ; L_{ph} , R_{ph} – индуктивность и активное сопротивление фазной жилы КЛ; L_{sh} , R_{sh} – индуктивность и активное сопротивление оболочки КЛ; M_0 , M_m – взаимная индуктивность между фазой и оболочкой и между двумя фазами КЛ; G_{0net} , C_{0net} – суммарная поперечная проводимость и емкость нулевой последовательности внешней сети; G_{mnet} , C_{mnet} – суммарная проводимость и емкость между фазами внешней сети; $K_3^{(1)}$ – элемент, моделирующий ОЗЗ.

При создании модели сети 6 кВ в программном комплексе COMSOL Multiphysics используются расчетные модули Magnetic Fields, Electric circuits и Electric currents. В расчетном модуле Magnetic Fields реализована полевая модель магнитной составляющей электро-

магнитного поля исследуемой КЛ; в модуле Electric circuit – модель внешней сети и источника питания 6 кВ. Использование модуля Magnetic Fields позволяет получить модель КЛ с секторными жилами и частотно-зависимыми продольными параметрами (индуктивностями и активными сопротивлениями). Величины емкостей КЛ предварительно определяются по полевой модели, реализованной с применением расчетного модуля Electric currents.

Модели сети 6 кВ в PSCAD (рис. 2, 3) и COMSOL Multiphysics (рис. 4) имеют одинаковые параметры и отличаются только моделями линии КЛ. При верификации сравнивались результаты расчетов по указанному модели переходного тока в месте ОЗЗ, напряжения на поврежденной и неповрежденной фазах на шинах источника питания и напряжения на нейтрали сети (напряжения нулевой последовательности). При верификации варьировались расстояние l_3 места повреждения от шин источника питания и параметры внешней сети (т.е. суммарный емкостный ток сети $I_{c\Sigma}$). На рис. 5 в качестве примера дано сравнение результатов расчетов переходного тока в месте ОЗЗ при $l_3 = 0,5$ км и $l_3 = 1$ км в сети 6 кВ с $I_{c\Sigma} = 30$ А.

Анализ результатов верификации показал, что погрешности расчетов основных параметров свободных составляющих переходных токов и напряжений (амплитуды и частоты) при ОЗЗ на модели в PSCAD, по сравнению с моделью в COMSOL Multiphysics, не превышают следующих значений:

- 15–20 % в разрядной (высокочастотной) стадии переходного процесса, длящейся несколько сотен микросекунд;
- 5–10 % в зарядной (среднечастотной) стадии переходного процесса, длящейся до ~10 мс;
- не более 5 % в установившемся режиме ОЗЗ (низкочастотной стадии процесса).

Полученные оценки точности расчетов позволяют сделать вывод о том, что модель КЛ с круглыми жилами при выполнении условий (3)–(8) позволяет обеспечить с практически достаточной точностью адекватность модели реальной трехфазной КЛ 6–10 кВ с БПИ и секторными жилами на среднечастотной (зарядной) стадии переходного процесса и в установившемся режиме ОЗЗ.

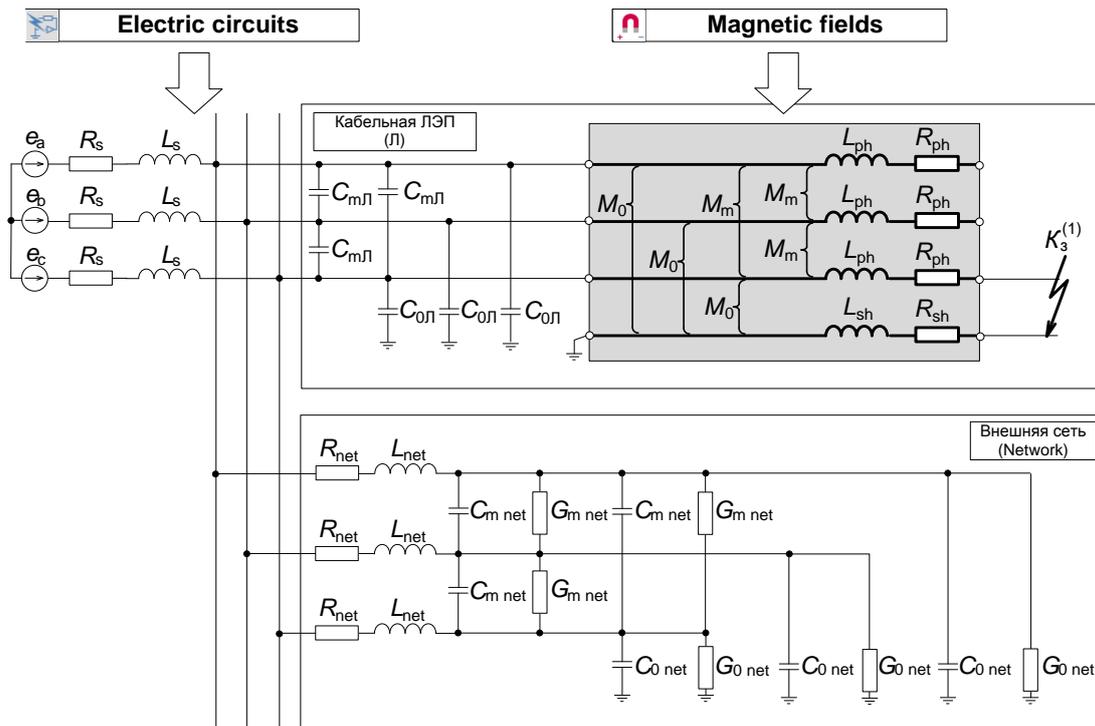
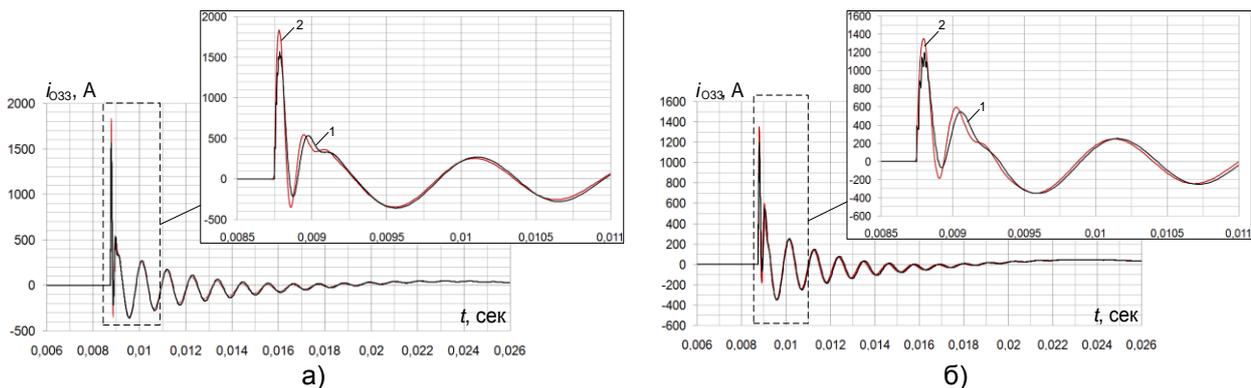


Рис. 4. Модель сети 6 кВ в программном комплексе COMSOL Multiphysics

Рис. 5. Сравнение результатов расчета переходного тока ОЗЗ в сети 6 кВ с $I_{\Sigma} = 5$ А с использованием модели КЛ1 с круглыми жилами в PSCAD (кривая 1) и модели КЛ1 в COMSOL Multiphysics (кривая 2): а – $l_3 = 0,5$ км; б – $l_3 = 1$ км

Отметим, что погрешности расчетов параметров высокочастотной разрядной составляющей переходного тока ОЗЗ в силу быстрого ее затухания практически не оказывают влияния на оценки среднеквадратичного значения тока в месте повреждения и величину максимальных перенапряжений при ДПОЗЗ. Более точные оценки параметров разрядной составляющей требуются только в задачах ДОМЗЗ, основанных на использовании параметров электрических величин переходного процесса. Следует отметить, что для повышения точности дистанционного определения расстояния до места ОЗЗ, как правило, используются крутизна переднего фронта (начальное значение производ-

ной) переходного тока или напряжения поврежденной фазы [19, 20]. Анализ осциллограмм (рис. 4) показывает, что погрешности оценки данного параметра при использовании в расчетах модели КЛ с круглыми жилами заметно меньше (~5–10 %), чем погрешности оценки амплитуды или длительности первой полуволны разрядной составляющей переходного тока или напряжения (15–20 %).

Изложенное позволяет сделать вывод о достаточной для решения задач, связанных с расчетами переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, адекватности моделей КЛ с круглыми жилами реальным КЛ с секторными жилами.

Методика проведения вычислительных экспериментов на имитационных моделях в PSCAD. Для проведения вычислительных экспериментов по исследованию влияния частотной зависимости индуктивностей КЛ на погрешности расчетов переходных процессов при ОЗЗ использовались одновременно три имитационные модели кабельной сети 6 кВ в PSCAD (рис. 2), различающиеся моделями кабельной линии КЛ:

– модель 1 (эталонная) – с частотно-зависимой моделью КЛ1 (Frequency Dependent (Phase) Model);

– модель 2 – с частотно-независимой моделью КЛ1 (Bergeron Model), индуктивности прямой и нулевой последовательностей которых определены по (1) и (2);

– модель 3 – с частотно-независимой моделью КЛ1 (Bergeron Model), индуктивности прямой и нулевой последовательностей которых определены по справочным данным для частоты 50 Гц.

При испытаниях измерялись параметры разрядной и зарядной составляющих свободных колебаний переходного тока ОЗЗ и переходного напряжения на поврежденной фазе (амплитуда, частота, постоянная затухания, длительность (крутизна) переднего фронта) и оценивались погрешности моделей 2 и 3 по сравнению с эталонной моделью 1.

Результаты исследований влияния частотных характеристик КЛ на точность расчетов переходного процесса при ОЗЗ. На рис. 6–8 в качестве примера приведены осциллограммы переходного тока ОЗЗ (рис. 6), напряжения на поврежденной фазе (рис. 7) и напряжения нулевой последовательности (рис. 8), полученные при вычислительных экспериментах на моделях 1, 2 и 3.

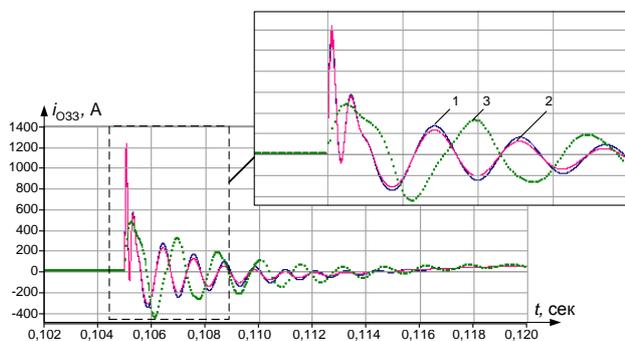


Рис. 6. Осциллограммы переходного тока в месте ОЗЗ: 1 – модель 1; 2 – модель 2; 3 – модель 3

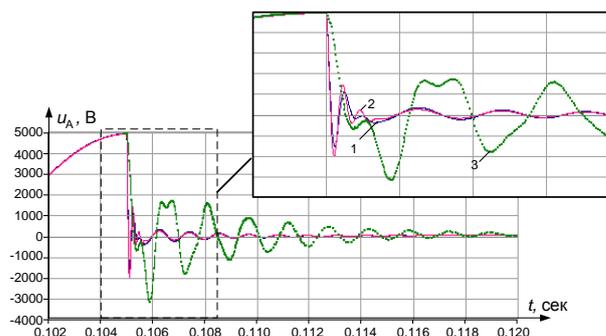


Рис. 7. Осциллограммы напряжения на поврежденной фазе сети: 1 – модель 1; 2 – модель 2; 3 – модель 3

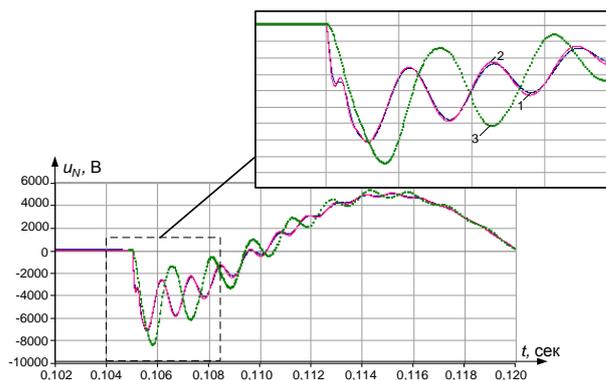


Рис. 8. Осциллограммы напряжения нулевой последовательности: 1 – модель 1; 2 – модель 2; 3 – модель 3

При проведении вычислительных экспериментов варьировались суммарный емкостный ток сети $I_{\Sigma} = 5\text{--}30$ А и расстояние до места ОЗЗ от шин источника питания $l_3 = 0,1\text{--}5$ км. Приведенные на рис. 6–8 осциллограммы получены при следующих расчетных условиях: $I_{\Sigma} = 30$ А; $l_3 = 1$ км; пробой изоляции на максимуме напряжения поврежденной фазы ($\varphi_{\text{пр}} = 90^\circ$); переходное сопротивление в месте ОЗЗ $r_n = 0$.

Анализ результатов вычислительных экспериментов показал, что модель 3, параметры КЛ которой определены на основе справочных данных и характеристик на частоте 50 Гц, неадекватна эталонной частотно-зависимой модели 1 в части таких параметров, как амплитуда, длительность и крутизна переднего фронта первой полуволны переходного тока, частота и время полного затухания разрядной составляющей. Погрешности в оценке указанных параметров разрядной стадии переходного тока при использовании модели 3 по сравнению с эталонной моделью могут достигать 70–80 % и более. В зарядной стадии переходного тока

амплитудная погрешность уменьшается, но сохраняется значительная угловая погрешность (например, рис. 6).

Значительные погрешности при использовании модели 3 возникают также при оценке параметров переходного напряжения поврежденной фазы (рис. 7) и напряжения нулевой последовательности (рис. 8), прежде всего таких, как максимальное значение, длительность и крутизна переднего фронта, которые используются в некоторых методах дистанционного определения места ОЗЗ по параметрам переходного процесса.

Изложенное позволяет сделать вывод, что применение для расчетов переходных процессов при ОЗЗ моделей кабельных сетей 6–10 кВ, в которых параметры КЛ определяются по справочным данным на частоте 50 Гц, может приводить к грубым ошибкам в оценке в расчетах переходных токов и напряжений.

Существенно более точные оценки параметров электрических величин переходного процесса позволяет получить модель 2, в которой параметры КЛ определены по скорости распространения электромагнитной волны в кабелях из соотношений (1) и (2). Погрешности модели при расчетах параметров разрядной стадии переходного процесса (амплитуда и длительность, крутизна переднего фронта первой полуволны тока), как правило, не превышают 15–20 % (например, рис. 6, 7). В зарядной стадии переходного процесса погрешности модели 2 не превышают 10 % (например, рис. 6–8). Поэтому модели, в которых параметры КЛ определены по скорости распространения электромагнитной волны в кабелях, могут применяться для приближенных расчетов переходных токов и напряжений при решении большинства задач, связанных с исследованиями переходных процессов при ОЗЗ.

Исключением является задача ДОМЗЗ по параметрам переходного процесса, актуальная, прежде всего, для распределительных кабельных сетей 6–10 кВ городского электроснабжения. Для решения указанной задачи в основном используются ток и напряжения разрядной стадии переходного процесса, параметры которых наиболее существенно зависят от удаленности места ОЗЗ от шин защищаемого объекта. Обеспечить требуемую для ДОМЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ точ-

ность расчетов параметров разрядных токов и напряжений, на наш взгляд, позволяет только применение частотно-зависимых моделей КЛ.

Выводы. Применение в расчетах переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ моделей кабельных ЛЭП, параметры которых определены на основе справочных данных при частоте 50 Гц, может приводить к грубым ошибкам в расчетах переходных токов и напряжений, прежде всего их разрядных составляющих.

Приемлемую для большинства задач точность расчетов переходных токов и напряжений как для разрядной, так и зарядной стадий переходного процесса при ОЗЗ позволяет обеспечить применение моделей кабельных ЛЭП, параметры которых определены по скорости распространения электромагнитных волн в каналах «фаз–фаза» и «фаза–земля» кабелей.

Обеспечить высокую точность расчетов параметров электрических величин переходного процесса при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, необходимую, прежде всего, для решения задачи дистанционного определения места повреждения при замыканиях на землю, должны модели кабельных ЛЭП, учитывающие зависимость их продольных параметров индуктивностей от частоты переходных токов.

Таким образом, применение разработанных рекомендаций по выбору параметров схем замещения и имитационных моделей трехфазных кабельных линий с бумажно-пропитанной изоляцией позволяет повысить точность и избежать грубых ошибок в расчетах переходных токов и напряжений при ОЗЗ в кабельных сетях напряжением 6–10 кВ.

Список литературы

1. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1971. – 152 с.
2. Дударев Л.Е., Запорожченко С.И., Лукьянцев Н.М. Дуговые замыкания на землю в кабельных сетях // Электрические станции. – 1971. – № 8. – С. 64–66.
3. 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. Таджикибаева. – СПб.: Энергоатомиздат, 2002. – 268 с.
4. Шалин А.И. Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. Достоинства и недостатки

различных защит // Новости ЭлектроТехники. – 2005. – № 3(33).

5. **Шуин В.А., Гусенков А.В.** Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ. – М.: НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик», 2001. – 104 с.

6. **Сирота И.М., Масляник В.В.** Свободные емкостные токи замыкания на землю в сетях с малыми токами замыкания на землю // Электричество. – 1977. – № 3. – С. 38–43.

7. **Сирота И.М., Кисленко С.Н., Михайлов А.М.** Режимы нейтрали электрических сетей. – Киев: Наукова Думка, 1985. – 264 с.

8. **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.

9. **Цапенко Е.Ф.** Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 128 с.

10. **Дударев Л.Е., Зубков В.В.** Некоторые особенности переходных процессов при замыкании фазы на землю в сетях 6–35 кВ и использование их для средств релейной защиты // Электрические станции. – 1978. – № 6. – С. 68–71.

11. **Шуляк В.Г.** Переходные процессы в сетях с изолированной нейтралью при замыкании на землю // Известия вузов. Энергетика. – 1969. – № 1. – С. 1–6.

12. **Дьяконов В.П., Пеньков А.А.** MATLAB и SIMULINK в электроэнергетике. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 816 с.

13. **Power Systems Computer Aided Design / ElectroMagnetic Transients including DC** (Программный комплекс для моделирования энергосистем PSCAD/EMTDC) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ennlab.ru/category/products/manitoba/> [Дата обращения 20.07.21].

14. **Real-Time Digital Simulator (RTDS)** (Программно-технический комплекс цифрового моделирования в реальном масштабе времени) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ennlab.ru/category/products/manitoba/> [Дата обращения 20.07.21].

15. **ATPDesigner.** Design and Simulation of Electrical Power Networks [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.atpdesigner.de/network_calculation_and_protection_relays/index.html [Дата обращения 20.07.21].

16. **Сафонов Д.Г.** Имитационное моделирование функционирования распределительной сети с дугогасящим реактором // Омский научный вестник. – 2018. – № 6(162). – С. 98–102.

17. **Шалыт Г.М.** Определение мест повреждения линии электропередачи импульсными методами. – М.: Энергия, 1968. – 215 с.

18. **COMSOL Multiphysics Reference Manual.** Справочное руководство COMSOL Multiphysics [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL_ReferenceManual.pdf [Дата обращения 13.07.2021].

19. **Filatova G.A., Shadrikova T.Yu., Shuin V.A.** Comparison of electrical variables of transient process for earth-to ground fault location in medium voltage cable networks // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 16–19 May 2017, St. Petersburg, Russia. – DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076243.

20. **Качесов В.Е.** Метод определения зоны однофазного замыкания в распределительных сетях под рабочим напряжением // Электричество. – 2005. – № 6. – С. 9–18.

References

1. Likhachev, F.A. *Zamykaniya na zemlyu v setyakh s izolirovannoy neytral'yu i s kompensatsiyey emkostnykh tokov* [Phase to earth faults in networks with isolated neutral point and with compensation of capacitive currents]. Moscow: Energiya, 1971. 152 p.

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

3. Halilov, F.H., Evdokunin, G.A., Polyakov, V.S., Podporkin, G.V., Tadzhibaev, A.I. *Zashchita setey 6–35 kV ot perenapryazheniy* [Over-voltage protection of 6–35 kV networks]. Saint-Petersburg: Energoatomizdat, 2002. 268 p.

4. Shalin, A.I. *Zamykaniya na zemlyu v setyakh 6–35 kV. Dostoinstva i nedostatki razlichnykh zashchit* [Phase to earth faults in 6–35 kV networks. Advantages and disadvantages of different protection devices]. *Novosti ElektroTehniky*, 2005, no. 3(33).

5. Shuin, V.A., Gusenkov, A.V. *Zashchity ot zamykaniy na zemlyu v elektricheskikh setyakh 6–10 kV* [Phase to earth fault protection devices in 6–10 kV power networks]. Moscow: NTF «Energoprogress», «Energetik», 2001. 104 p.

6. Sirota, I.M., Maslyanik, V.V. *Svobodnye emkostnye toki zamykaniya na zemlyu v setyakh s malymi tokami zamykaniya na zemlyu* [Transient components of phase to earth fault capacitive currents in networks with low phase to earth fault currents]. *Elektrichestvo*, 1977, no. 3, pp. 38–43.

7. Sirota, I.M., Kislenco, S.N., Mikhaylov, A.M. *Rezhimy neytrali elektricheskikh setey* [Neutral point grounding modes of electrical power networks]. Kiev: Naukova Dumka, 1985. 264 p.

8. Shuin, V.A. *Nachal'nye fazovye sootnosheniya elektricheskikh velichin perekhodnogo protsesssa pri zamykaniyakh na zemlyu v kabel'nykh setyakh 6–10 kV* [Initial phase relations of transient mode electrical quantities during phase to earth faults in 6–10 kV cable networks]. *Elektrichestvo*, 1991, no. 10, pp. 58–61.

9. Tsapenko, E.F. *Zamykaniya na zemlyu v setyakh 6–35 kV* [Phase to earth faults in 6–35 kV cable networks]. Moscow: Energoatomizdat, 1986. 128 p.
10. Dudarev, L.E., Zubkov, V.V. Nekotorye osobennosti perekhodnykh protsessov pri zamykanii fazy na zemlyu v setyakh 6–35 kV i ispol'zovanie ikh dlya sredstv releynoy zashchity [Some features of transient processes during phase to earth faults in 6–35 kV networks and their usage for relay protection devices]. *Elektricheskie stantsii*, 1978, no. 6, pp. 68–71.
11. Shulyak, V.G. Perekhodnye protsessy v setyakh s izolirovannoy neytral'yu pri zamykanii na zemlyu [Transient processes in networks with isolated neutral point during phase to earth faults]. *Izvestiya vuzov. Energetika*, 1969, no. 1, pp. 1–6.
12. D'yakonov, V.P., Pen'kov, A.A. *MATLAB i SIMULINK v elektroenergetike* [MATLAB and SIMULINK in electrical engineering]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2009. 816 p.
13. Power Systems Computer Aided Design / ElectroMagnetic Transients including DC. Available at: <https://ennlab.ru/category/products/manitoba/>
14. Real-Time Digital Simulator (RTDS). Available at: <https://ennlab.ru/category/products/manitoba/>.
15. ATPDesigner. Design and Simulation of Electrical Power Networks. Available at: http://www.atpdesigner.de/network_calculation_and_protection_relays/index.html.
16. Safonov, D.G. Imitatsionnoe modelirovanie funktsionirovaniya raspreditel'noy seti s dugogasyashchim reaktorom [Simulation study of distribution power networks with arc suppression coils]. *Omskiy nauchnyy vestnik*, 2018, no. 6(162), pp. 98–102.
17. Shalyt, G.M. *Opreделение mest povrezhdeniya linii elektroperedachi impul'snymi metodami* [Fault location in transmission lines with the usage of impulse methods]. Moscow: Energiya, 1968. 215 p.
18. COMSOL Multiphysics Reference Manual. Available at: <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL>.
19. Filatova, G.A., Shadrikova, T.Yu., Shuin, V.A. Comparison of electrical variables of transient process for earth-to ground fault location in medium voltage cable networks. *2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 16–19 May 2017*. Saint-Petersburg, 2017. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076243.
20. Kachesov, V.E. Metod opredeleniya zony odnofaznogo zamykaniya v raspreditel'nykh setyakh pod rabochim napryazheniem [A method of definition of phase to earth fault zone in distribution networks under operational voltage]. *Elektrichestvo*, 2005, no. 6, pp. 9–18.