

## ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

---

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

### **Выбор параметров моделей воздушных линий для расчетов переходных процессов при замыканиях на землю в сетях напряжением 6–10 кВ**

#### **Авторское резюме**

**Состояние вопроса.** Однофазные замыкания на землю являются наиболее распространенным видом повреждений в воздушных распределительных сетях напряжением 6–10 кВ. Наибольшую опасность для сети и поврежденного элемента представляют дуговые перемежающиеся ОЗЗ, сопровождающиеся интенсивными переходными процессами и, как следствие, опасными перенапряжениями и значительными бросками переходного тока в месте повреждения изоляции. Переходные процессы при ОЗЗ также оказывают значительное влияние на селективность и устойчивость функционирования устройств защиты от данного вида повреждений. В связи с этим разработка методов и средств повышения эффективности функционирования воздушных сетей 6–10 кВ при ОЗЗ и технического совершенствования устройств защиты во многих случаях связана с необходимостью расчетов переходных процессов, возникающих при пробоях изоляции фазы сети на землю. Достоверность расчетов переходных процессов при ОЗЗ в рассматриваемых сетях определяется главным образом точностью учета продольных параметров воздушных линий 6–10 кВ, прежде всего индуктивностей, которые в общем случае зависят от частоты составляющих переходного тока. В публикациях, посвященных исследованиям переходных процессов при ОЗЗ в электрических сетях среднего напряжения, включая воздушные сети 6–10 кВ, в схемах замещения и моделях ЛЭП, как правило, используются постоянные (не зависящие от частоты) значения индуктивностей. Оценка погрешностей, обусловленных применением указанного подхода к

определению параметров воздушных линий 6–10 кВ при расчетах и моделировании переходных процессов при ОЗЗ, и определение области его применения является, на наш взгляд, актуальной задачей.

**Материалы и методы.** Для получения частотных зависимостей индуктивностей трехфазной воздушной линии 6–10 кВ и исследования их влияния на точность расчетов переходных токов и напряжений при ОЗЗ использованы современные методы моделирования электроэнергетических систем и их элементов с применением программных комплексов COMSOL Multiphysics и PSCAD. Параметры моделей воздушной линии 6–10 кВ, разработанных в указанных программных комплексах, на частоте 50 Гц заданы в соответствии со справочными данными.

**Результаты.** Получены оценки погрешностей определения параметров переходных токов и напряжений при ОЗЗ в воздушных сетях 6–10 кВ при использовании моделей ЛЭП, не учитывающих частотные зависимости индуктивностей, составляющие по амплитуде до 40–50 %. Показано, что применение частотно-независимых моделей допустимо только в тех случаях, когда параметры расчетной схемы замещения сети и положение точки ОЗЗ остаются практически постоянными, при решении задач, требующих высокой точности определения параметров переходных токов и напряжений, например дистанционного определения места замыкания на землю, необходимо использовать частотно-зависимые модели воздушных линий 6–10 кВ.

**Выводы.** Применение разработанных рекомендаций по определению параметров трехфазных воздушных линий 6–10 кВ позволяет повысить достоверность расчетов и избежать грубых ошибок при решении задач, связанных с исследованиями переходных процессов при ОЗЗ в сетях данного класса напряжения.

**Ключевые слова:** воздушные сети 6–10 кВ, однофазные замыкания на землю, переходные процессы, параметры схем замещения, параметры моделей воздушных линий

**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

## **Selection of parameters of overhead lines models when calculating transient processes during earth faults in 6–10 kV networks**

### **Abstract**

**Background.** Single phase-to-ground faults are the most common type of faults in 6–10 kV overhead distribution networks. Arc intermittent single phase-to-ground fault (PSP) are the most dangerous for the network and the damaged element. They are followed by intense transient processes and, as a result, dangerous overvoltage rate and significant transient current surges at the point of insulation damage. PSP transients also have a significant effect on the selectivity and operation stability of protection devices against this type of damage. Therefore, the development of the methods and means to improve the operation efficiency of 6–10 kV overhead networks in case of PSP and technical improvement of protection devices in many cases is due to the need to calculate the transient processes that occur during insulation breakdowns of the network phase to earth. For the systems under consideration, the reliability of transient processes calculations in case of PSP is determined mainly by the accuracy of estimation of the parameters of 6–10 kV overhead lines, first of all, of inductance, which generally depends on the frequency of the transient current components. In the scientific papers devoted to the study of transient processes in case of PSP in medium voltage electrical networks, including 6–10 kV overhead networks, constant (frequency independent) values of inductance are used as a rule in the equivalent circuits and in the models of transmission lines. An urgent task is to estimate errors caused by the application of this approach to determine the parameters of 6–10 kV overhead lines during the calculations and modeling of transient processes during PSP, and cases of its application.

**Materials and methods.** Advanced methods of modeling of electric power systems and their elements have been applied with the use of COMSOL Multiphysics and PSCAD software to obtain the frequency dependences of the inductances of a 6–10 kV three-phase overhead line and study of their influence on the calculation accuracy of transient currents and voltages in case of PSP. The parameters of 6–10 kV overhead line models developed in the indicated software packages at a frequency of 50 Hz are set in accordance with the reference data.

**Results.** The authors obtain the errors estimation to determine the parameters of transient currents and voltages during PSP in 6–10 kV overhead networks when using transmission line models. The frequency dependences of inductance, which are up to 40–50 % in amplitude are not considered. The results show that application of frequency-independent models is permissible only in the cases when parameters of the calculated equivalent circuit of the network and position of PSP point remain practically constant, when solving problems that require high accuracy to determine the parameters of transient currents and voltages, for example, to determine remotely the location of a ground fault, it is necessary to use frequency-dependent models of 6–10 kV overhead lines.

**Conclusions.** Introduction of the developed recommendations to determine 6–10 kV three-phase overhead lines parameters allow us to increase the reliability of calculations and to avoid raw errors when solving the problems which are related to the study of transient processes in case of earth faults in the networks of the given voltage class.

**Key words:** 6–10 kV overhead networks, single phase-to-ground fault, transient processes, parameters of equivalent circuits, parameters of overhead lines models

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2021.5.005-017

**Введение.** Необходимость в расчетах переходных процессов при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ) в электрических сетях среднего напряжения, включая воздушные сети 6–10 кВ, работающие с изолированной нейтралью, резонансным заземлением нейтрали через дугогасящий реактор или заземлением нейтрали через высокоомный резистор, возникает при решении следующих задач:

– определение максимальных перенапряжений при дуговых перемежающихся ОЗЗ (ДПОЗЗ);

– определение среднеквадратичного значения тока при ДПОЗЗ для проверки проводников и изоляции поврежденной линии, ограничителей перенапряжений и других аппаратов на термическую стойкость;

– исследование влияния переходных процессов на устойчивость функционирования защит от ОЗЗ, основанных на использовании различных составляющих установившегося режима замыкания (составляющей основной частоты 50 Гц, высших гармоник, «наложенных» токов промышленной частоты);

– разработка защит от замыканий на землю, основанных на использовании электрических величин переходного процесса;

– разработка методов дистанционного определения места замыкания на землю (ДОМЗЗ) по параметрам переходных токов и напряжений и др.

Анализ публикаций, посвященных исследованиям переходных процессов при ОЗЗ в электрических сетях среднего

напряжения, показал, что при параметрировании расчетных схем замещения и имитационных моделей ЛЭП, как правило, применяются два подхода к определению их продольных параметров:

1) по справочным данным, полученным на частоте 50 Гц (например, [1–6]);

2) по параметрам, определенным по скорости распространения электромагнитной волны в каналах прямой и нулевой последовательностей (в каналах «фаза–фаза» и «фаза–земля») (например, [7–10]):

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

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

где  $C_{1л}$  и  $C_{0л}$  – погонные емкости прямой и нулевой последовательностей ЛЭП соответственно;  $V_1$ ,  $V_0$  – скорости распространения электромагнитной волны в каналах прямой и нулевой последовательностей.

Оба подхода основаны на применении моделей ЛЭП, параметры которых не зависят от частоты токов переходного процесса при ОЗЗ (частотно-независимых моделей). Первый из указанных подходов применяется при расчетах переходных процессов как в воздушных, так и в кабельных сетях среднего напряжения. Следует отметить также, что во многих публикациях, посвященных расчетам переходных процессов при ОЗЗ в электрических сетях среднего напряжения, отсутствуют какие-либо рекомендации по определению параметров схемы замещения или модели ЛЭП. Поэтому можно полагать,

что авторами указанных публикаций по умолчанию принимается, что параметры ЛЭП определяются по справочным данным, рассчитанным для частоты 50 Гц. Второй подход получил применение при расчетах переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ (например [9, 10]).

Применение при расчетах переходных процессов при ОЗЗ в сетях 6–10 кВ частотно-независимых моделей с учетом того, что продольные сопротивления, прежде всего индуктивности, воздушных линий (ВЛ) зависят от частоты, приводит к погрешностям в оценке параметров (амплитуды, частоты, постоянных затухания и др.) переходных токов и напряжений. В связи с этим актуальной задачей является оценка значений указанных погрешностей и определение допустимости и области применения частотно-независимых моделей ВЛ при расчетах переходных процессов при ОЗЗ в воздушных сетях 6–10 кВ.

**Методы исследования.** Основными методами исследований переходных процессов при ОЗЗ в электрических сетях среднего напряжения являются аналитические расчеты с использованием упрощенных математических моделей (схем замещения) и имитационное моделирование с применением специально разработанных программ и современных систем для научно-технических расчетов в области электроэнергетики и электротехники (Matlab, PSCAD, RTDS, ATPDesigner [11–14]).

При оценке погрешностей, обусловленных применением в расчетах переходных процессов при ОЗЗ упрощенных частотно-независимых моделей ВЛ 6–10 кВ, важной задачей является выбор эталонной частотно-зависимой модели ЛЭП. В качестве эталонной может быть принята частотно-зависимая модель ВЛ 6–10 кВ, полученная с применением программного комплекса COMSOL Multiphysics, позволяющего с высокой точностью моделировать любые физические процессы, которые описываются частными дифференциальными уравнениями [15].

Однако COMSOL Multiphysics не может эффективно использоваться для построения моделей электрических сетей, содержащих, кроме ВЛ, и другие элементы, влияющие на параметры переходных токов и напряжений. С учетом этого для исследований погрешностей, возникающих при расчетах переходных процессов

при ОЗЗ в воздушных сетях 6–10 кВ с использованием моделей ВЛ, параметры которых не зависят от частоты, нами применялся программный комплекс PSCAD [12], позволяющий создавать модели электрических сетей с применением как частотно-зависимых, так и частотно-независимых моделей ЛЭП. Отметим, что частотно-зависимая модель Frequency Dependent (Phase) Model в программном комплексе PSCAD считается наиболее точной из описанных в научной литературе моделей для выполнения расчетов переходных процессов и установившихся режимов в воздушных ЛЭП. Частотно-зависимая модель ВЛ в COMSOL Multiphysics использовалась для верификации модели воздушной линии в PSCAD.

**Имитационные модели в PSCAD для исследования погрешностей расчета переходных процессов при ОЗЗ в воздушных сетях 6–10 кВ.** Исследования погрешностей расчета переходных токов и напряжений при ОЗЗ, обусловленных применением частотно-независимых моделей ВЛ, выполнялись для воздушной сети напряжением 6 кВ, схема которой приведена на рис. 1,а.

Схемы сетей 6 кВ с частотно-зависимыми и частотно-независимыми моделями воздушных линий идентичны и включают в себя две ЛЭП (ВЛ1, ВЛ2 для анализа переходных процессов при ОЗЗ как в поврежденной, так и в неповрежденной линиях), трехфазный источник питания (систему С) с номинальным напряжением 6 кВ и емкости внешней сети. Расчетная имитационная модель сети в программном комплексе PSCAD приведена на рис. 1,б. Основные параметры исследуемой сети (суммарный емкостный ток  $I_{\Sigma C}$ , длины линий ВЛ1 и ВЛ2, индуктивность источника питания и др.) при проведении вычислительных экспериментов могут изменяться.

Модели воздушных линий ВЛ1 и ВЛ2 в PSCAD реализованы с помощью компонента Transmission Line, в котором, кроме конструктивных параметров, могут быть заданы зависимость индуктивностей и активных сопротивлений от частоты (частотно-зависимая модель Frequency Dependent (Phase) Model Options (рис. 2,а)) или погонные значения продольных параметров для фиксированной частоты (частотно-независимая модель Bergeron Model Options (рис. 2,б)).

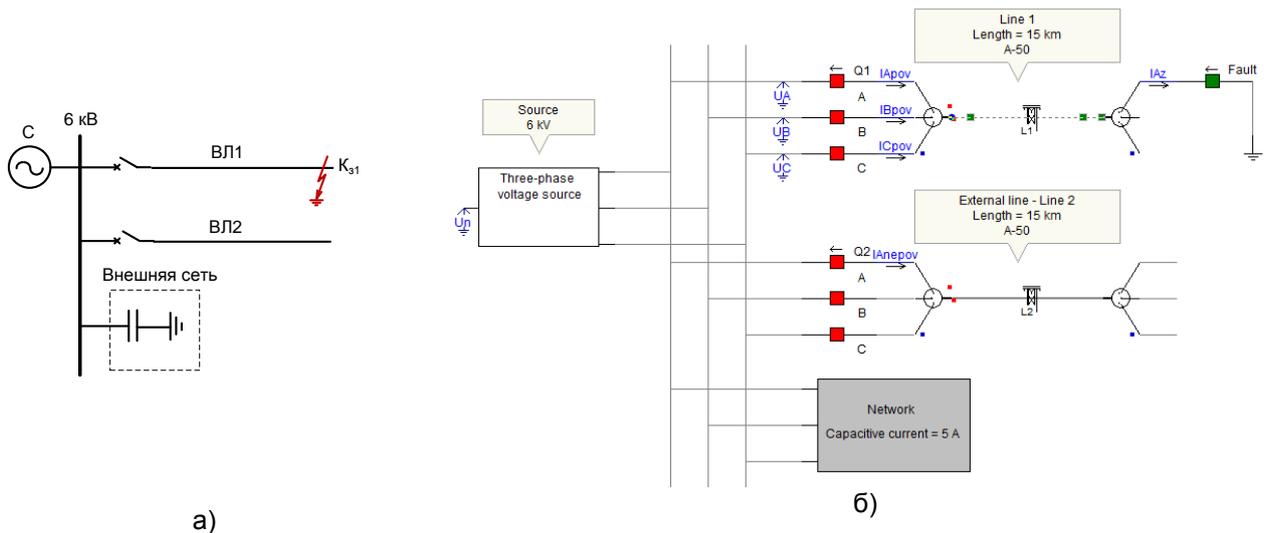


Рис. 1. Однолинейная схема электрической сети 6 кВ для исследования влияния частотной зависимости параметров воздушной линии на погрешности расчета переходных токов и напряжений при ОЗЗ (а) и ее имитационная модель в PSCAD (б)

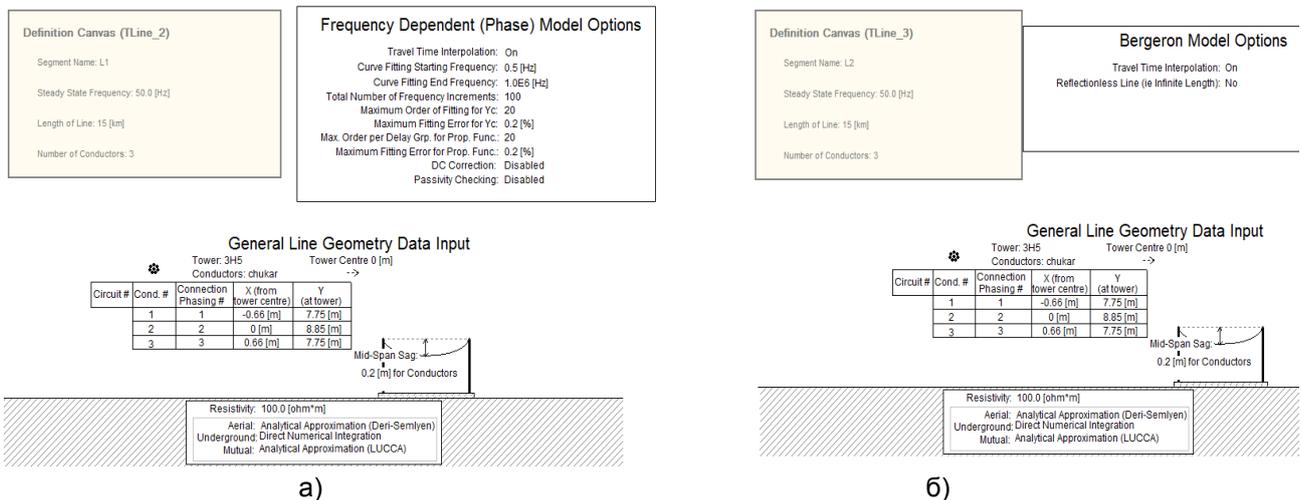


Рис. 2. Модели воздушной ЛЭП, реализуемые в PSCAD на основе компонента Transmission Line: а – окно параметров частотно-зависимой модели ВЛ Frequency Dependent (Phase); б – окно параметров частотно-независимой модели Bergeron

**Параметрирование частотно-зависимой и частотно-независимых моделей ВЛ сети 6 кВ.** Компонент Transmission Line программного комплекса PSCAD позволяет создавать частотно-зависимую модель ВЛ Frequency Dependent (Phase) Model Options только с проводниками кругового сечения. При создании такой модели задаются данные, включающие конструктивные параметры промежуточной опоры ЛЭП, сечение, материал, конструктивные параметры и провис проводов, электрические характеристики грунта, рабочую частоту ЛЭП и др. (рис. 2,а).

В распределительных сетях напряжением 6–10 кВ наиболее широкое применение получили алюминиевые провода (среднее

сечение проводов ВЛ равно  $\sim 50 \text{ мм}^2$ ). С учетом этого принято, что в схеме сети 6 кВ (рис. 2,а) ВЛ1 и ВЛ2 выполнены проводом марки А-50/9 на промежуточных опорах типа П10-1. Основные параметры ВЛ1 и ВЛ2, используемые при создании в PSCAD, частотно-зависимой и частотно-независимой моделей, приведены в таблице.

В моделях, основанных на использовании второго из указанных выше подходов к параметрированию расчетных схем замещения и имитационных моделей ВЛ, используются так называемые справочные значения индуктивностей и активных сопротивлений прямой и нулевой последовательностей, определенных для частоты  $f = 50 \text{ Гц}$ . Поперечные параметры ВЛ – ем-

кости прямой и нулевой последовательно-стей – от частоты не зависят.

### Основные параметры ВЛ1 и ВЛ2

Марка провода	A-50/9
сечение провода $F$ , мм <sup>2</sup>	50
радиус провода $r_n$ , мм	4,5
число проволок в проводе	3
радиус проволоки $r$ , мм	1,5
удельное активное сопротивление провода $\rho$ , Ом·м/мм <sup>2</sup>	0,0315
стрела провиса проводов, м	0,2
Тип промежуточной опоры	П110-1
Расстояния между фазными проводами:	
– $D_{AB}$ , мм	1300
– $D_{BC}$ , мм	1300
– $D_{AC}$ , мм	1320
Расстояния между фазными проводами и землей:	
– $D_A$ , мм	7750
– $D_B$ , мм	8850
– $D_C$ , мм	750
Удельное сопротивление земли (грунта) $\rho_3$ , Ом·м	100
Установившаяся (рабочая) частота $f$ , Гц	50

Справочные продольные параметры для воздушных ЛЭП на рабочей частоте определяются расчетным способом по методике J.R. Carson [16, 17]. Для трехфазной ВЛ без тросов погонные значения сопротивлений прямой и нулевой последовательностей могут быть определены по следующим выражениям [17]:

– сопротивление прямой последовательности

$$Z_{1л} = R_{1л} + jX_{1л} = r_n + j\left(0,145 \frac{D_{cp}}{\rho_{э.л}} + 2\pi f \frac{\mu_0 \mu}{8\pi} 10^3\right), \quad (3)$$

где  $r_n$  – активное сопротивление провода, Ом/км;  $D_{cp}$  – среднее геометрическое расстояние между проводами фаз  $A$ ,  $B$  и  $C$ , м;  $\rho_{э.л}$  – эквивалентный радиус провода, м;

– сопротивление нулевой последовательности

$$Z_{0л} = R_{0л} + jX_{0л} = r_n + 3r_3 + j\left(0,435 \frac{D_3}{\rho_{cp}} + 2\pi f \frac{\mu_0 \mu}{8\pi} 10^3\right), \quad (4)$$

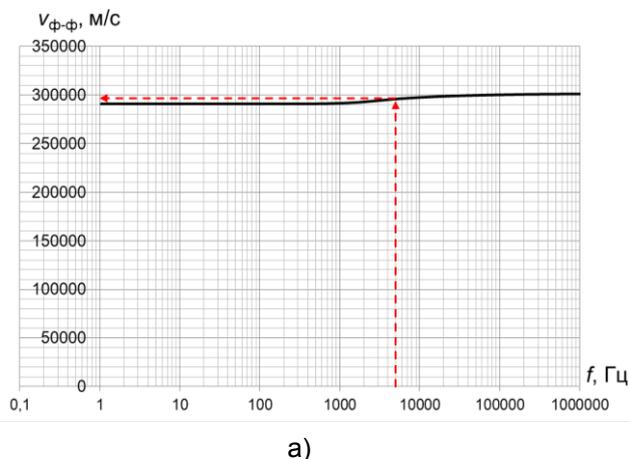
где  $r_3$  – сопротивление, учитывающее потери активной мощности в земле, Ом/км;  $\rho_{cp}$  – средний геометрический радиус системы трех проводов линии, м;  $D_3$  – эквивалентная глубина расположения обратного провода в земле, м.

Сравнение значений  $R_{1л}$ ,  $X_{1л}$ ,  $R_{0л}$ ,  $X_{0л}$ , рассчитанных по (3) и (4), со значениями указанных параметров, определенных при  $f = 50$  Гц по частотным характеристикам индуктивных и активных сопротивлений частотно-зависимой модели ВЛ в PSCAD, показало практически точное их совпадение (погрешности не более 1–2 %). Таким образом, для параметрирования частотно-независимой модели Bergeron с использованием справочных значений продольных параметров ВЛ в программном комплексе PSCAD достаточно принять установившуюся (рабочую) частоту  $f$  равной 50 Гц, как и для частотно-зависимой модели. В остальных случаях конкретные значения справочных параметров ЛЭП на частоте 50 Гц  $R_{1л}$ ,  $X_{1л}$ ,  $R_{0л}$ ,  $X_{0л}$  (например, при расчетах на основе схем замещения сети, параметрировании имитационных моделей ЛЭП в Matlab и др.) определяются по (3) и (4).

Более сложной задачей является определение фиксированного значения частоты при параметрировании в PSCAD частотно-независимой модели Bergeron, параметры которой определяются по скорости распространения электромагнитных волн в ЛЭП по (1) и (2). В отличие от кабельных линий среднего напряжения, для которых скорости распространения электромагнитной волны в каналах прямой и нулевой последовательностей примерно одинаковы и обычно принимаются равными  $V_1 \approx V_0 = 150\text{--}160$  м/мкс независимо от спектра свободных составляющих переходных токов и напряжений при ОЗЗ [7, 9, 10], для ВЛ характерно существенное различие зависимости указанных скоростей от частоты (рис. 3).

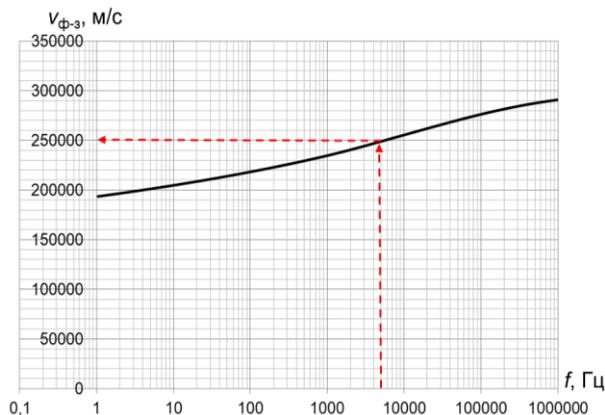
Для определения скоростей распространения электромагнитных волн  $V_1$  и  $V_0$  на основе зависимостей рис. 3,а,б необходимо оценить «верхнюю» частоту спектра свободных составляющих переходных токов и напряжений при ОЗЗ в воздушных сетях 6–10 кВ. В переходных токах и напряжениях при ОЗЗ условно выделяют две основные составляющие, различающиеся по частоте колебаний [4, 9, 10]. Первая из них связана с разрядом емкости поврежденной фазы и перезарядом междуфазных емкостей и называется разрядной, вторая связана с дополнительным зарядом емкостей неповрежденных фаз через индуктивность источника питания и называется зарядной. Частота разрядных колебаний при ОЗЗ в воздушных сетях 6–10 кВ зависит в основ-

ном от суммарного емкостного тока сети  $I_{\Sigma}$  и удаленности места повреждения от шин источника питания и может изменяться от единиц килогерц до 5 и более килогерц. Ча-



а)

стота зарядных колебаний зависит также от индуктивности источника питания и может изменяться от сотен герц до 1,5–2 кГц.



б)

Рис. 3. Зависимости скорости распространения электромагнитных волн в каналах прямой и нулевой последовательностей ВЛ 6–10 кВ от частоты: а – канал прямой последовательности («фаза–фаза»); б – канал нулевой последовательности («фаза–земля»)

Анализ спектрограмм переходных процессов при ОЗЗ в воздушных сетях 6–10 кВ при различных значениях основных параметров (суммарного емкостного тока сети  $I_{\Sigma} = 1–10$  А, удаленности места ОЗЗ от шин источника питания  $l_3 = 0,5–30$  км, индуктивности источника питания) показал, что 90 % и более энергии броска переходного тока сосредоточено в диапазоне частот до ~5 кГц (рис. 4).

Составляющие более высокой частоты быстро затухают из-за быстрого увеличения активного сопротивления земли  $r_3$  с ростом частоты переходного тока ОЗЗ [17]

$$r_3 = \pi^2 f \cdot 10^{-4} \quad (5)$$

и практически не оказывают влияния на форму и параметры броска переходного тока. С учетом изложенного «верхнюю» частоту спектра свободных составляющих переходных токов и напряжений при ОЗЗ в воздушных сетях 6–10 кВ при определении скорости распространения электромагнитных волн в каналах прямой и нулевой последовательностей ВЛ можно принять равной ~5 кГц. При  $f = 5$  кГц  $V_1 \approx 295$  м/мкс (рис. 3,а) и  $V_0 \approx 250$  м/мкс (рис. 3,б).

Таким образом, при применении для расчетов переходных процессов при ОЗЗ программного комплекса PSCAD для параметрирования частотно-независимой модели Bergeron с использованием значений продольных параметров ВЛ достаточно принять установившуюся частоту  $f = 5$  кГц.

В случаях, когда необходимы конкретные значения индуктивностей ВЛ (например, при расчетах на основе схем замещения сети, параметрировании имитационных моделей ЛЭП в Matlab и др.),  $L_{1л}$  и  $L_{0л}$  определяют по (1) и (2) при  $V_1 \approx 295$  м/мкс и  $V_0 \approx 250$  м/мкс.

Отметим также, что значения индуктивностей  $L_{1л}$  и  $L_{0л}$ , определенных по (1) и (2) при  $V_1 \approx 295$  м/мкс и  $V_0 \approx 250$  м/мкс, достаточно точно совпадают (погрешности не более ~2–3 %) со значениями указанных параметров, определенных при  $f = 5$  кГц по частотным характеристикам модели ВЛ Frequency Dependent (Phase) Model Options в PSCAD.

**Частотные характеристики моделей ВЛ 6–10 кВ.** Так как параметры электрических величин переходного процесса при ОЗЗ определяются параметрами схем замещения прямой и нулевой последовательностей, частотные характеристики моделей ВЛ удобно представить в виде зависимостей индуктивностей прямой и нулевой последовательностей от частоты. На рис. 5 приведены частотные характеристики ВЛ 6 кВ, выполненной проводом марки А-50/9 на промежуточных опорах типа П10-1, для частотно-зависимых моделей линии в PSCAD и COMSOL Multiphysics и для частотно-независимых моделей с параметрами, рассчитанными по справочным данным и по уравнениям (1) и (2).

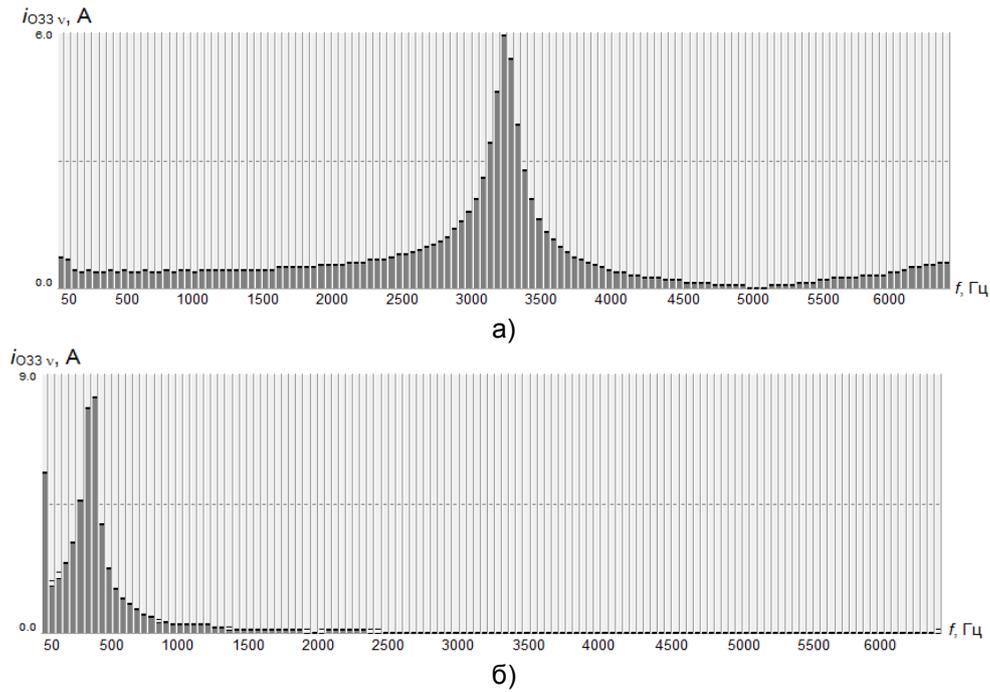


Рис. 4. Спектрограммы бросков переходного тока  $i_{033v}$  в месте ОЗЗ в сети 6 кВ: а –  $I_{\Sigma} = 1$  А,  $l_3 = 0,5$  км; б –  $I_{\Sigma} = 5$  А,  $l_3 = 15$  км

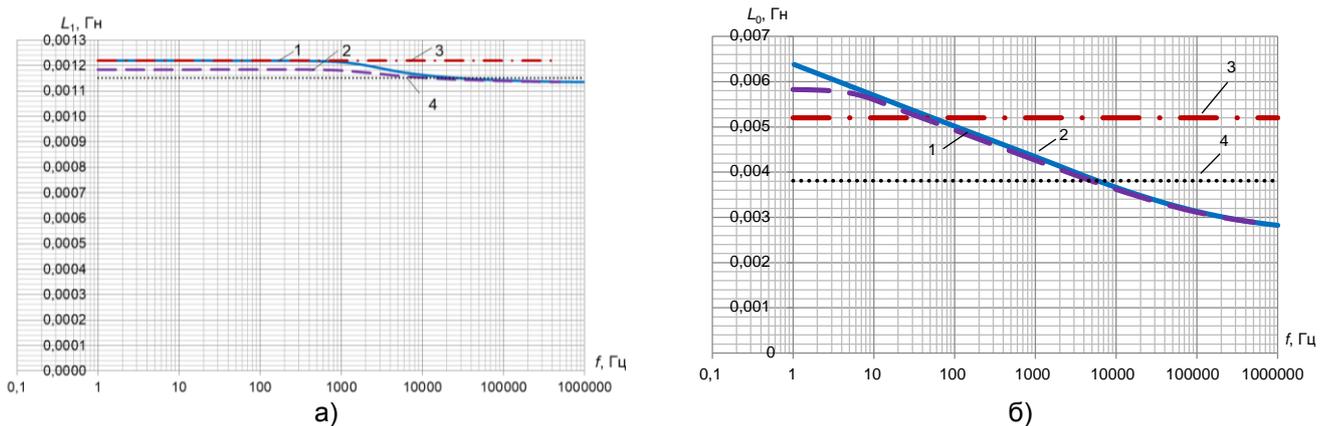


Рис. 5. Частотные характеристики прямой (а) и нулевой (б) последовательностей различных моделей ВЛ 6 кВ: 1 – модель в PSCAD; 2 – модель в COMSOL Multiphysics; 3 – частотно-независимая модель с параметрами на основе справочных данных; 4 – частотно-независимая модель с параметрами, рассчитанными по уравнениям (1) и (2)

Анализ полученных зависимостей (рис. 5,а,б) показывает, что в диапазоне частот от 20 Гц до 10 кГц МГц отклонения частотных характеристик модели ВЛ в PSCAD (зависимости 1) от характеристик модели в COMSOL Multiphysics (зависимости 2), принятой за эталонную, для индуктивностей прямой последовательности не превышают ~3,5 %, для индуктивностей нулевой последовательности – менее 2 %. При частотах более 10 кГц отклонения частотных характеристики модели ВЛ в PSCAD от соответствующих характеристик модели в COMSOL Multiphysics уменьшаются практически до нуля. Таким образом,

модель в PSCAD также можно рассматривать как эталонную.

Анализ полученных зависимостей также показывает, что при одинаковых параметрах источника питания и внешней сети (рис. 2,а) основной причиной возникновения погрешностей расчетов переходных процессов при ОЗЗ при использовании частотно-независимых моделей ВЛ являются, прежде всего, отклонения их частотных характеристик нулевой последовательности (рис. 5,б, зависимости 3 и 4) от соответствующих характеристик эталонных частотно-зависимых моделей ВЛ (рис. 5,б, зависимости 1 и 2). Величины указанных отклонений частотных характеристик, а

следовательно, и величины погрешностей расчета зависят от спектра частот переходных токов и напряжений. При преобладании в спектре свободных составляющих переходного процесса при ОЗЗ относительно низких частот (от сотен герц до ~1 кГц) более точные результаты расчета позволяет обеспечить модель 3 с параметрами на основе справочных данных. В области более высоких частот (от 1 кГц и выше) – модель 4 с параметрами, определенными по скорости распространения электромагнитных волн в каналах прямой и нулевой последовательностей ВЛ.

**Методика проведения вычислительных экспериментов на имитационных моделях.** Для проведения вычислительных экспериментов по исследованию влияния частотной зависимости индуктивностей ВЛ на погрешности расчетов переходных процессов при ОЗЗ использовались одновременно три имитационные модели воздушной сети 6 кВ (см. рис. 2,б) в PSCAD, различающиеся моделями воздушных линий ВЛ1 и ВЛ2:

– модель 1 (эталонная) с частотно-зависимыми моделями ВЛ1 и ВЛ2 (Frequency Dependent (Phase) Model);

– модель 2 с частотно-независимыми моделями ВЛ1 и ВЛ2 (Bergeron Model), продольные параметры которых определены по справочным данным для частоты 50 Гц;

– модель 3 с частотно-независимыми моделями ВЛ1 и ВЛ2 (Bergeron Model), индуктивности прямой и нулевой последовательностей которых определены по скоро-

сти распространения электромагнитных волн в каналах прямой и нулевой последовательностей линий.

Вычислительные эксперименты на моделях сети включали:

– имитацию однократного пробоя изоляции в конце ВЛ1 (см. рис. 2,а, т.  $K_{31}$ ), переходящего в устойчивое ОЗЗ;

– имитацию ДПОЗЗ в конце ВЛ1 (см. рис. 2,а, т.  $K_{31}$ ).

При однократном пробое изоляции измерялись и оценивались параметры основной составляющей свободных колебаний переходного тока ОЗЗ и переходного напряжения на поврежденной фазе (амплитуда, длительность первой полуволны, постоянная затухания). При ДПОЗЗ оценивались максимальные перенапряжения на неповрежденных фазах сети и среднеквадратичное значение тока в месте повреждения. Как уже отмечалось выше, при проведении вычислительных экспериментов параметры сети 6 кВ варьировались в следующих пределах: суммарный емкостный ток сети  $I_{\Sigma} = 1\text{--}10$  А; расстояние от шин источника питания до места ОЗЗ  $l_3 = 0,5\text{--}30$  км.

**Анализ результатов вычислительных экспериментов.** Осциллограммы на рис. 6 иллюстрируют погрешности расчетов параметров броска переходного тока в месте ОЗЗ и напряжения на поврежденной фазе при пробое изоляции, переходящем в устойчивое замыкание, и влияние на них расстояния  $l_3$  до места повреждения.

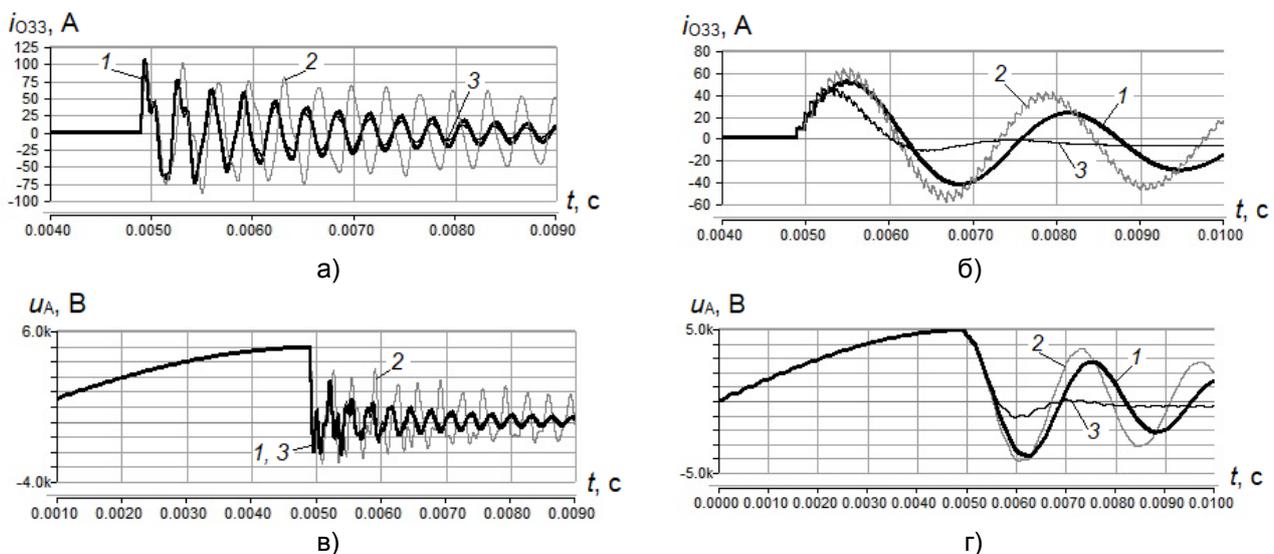


Рис. 6. Осциллограммы переходного тока в месте ОЗЗ (а, б) и напряжения на поврежденной фазе (в, г) при пробое изоляции, переходящем в устойчивое замыкание, в сети 6 кВ: а, в –  $I_{\Sigma} = 1$  А,  $l_3 = 0,5$  км; б, г –  $I_{\Sigma} = 5$  А,  $l_3 = 15$  км; а, в –  $l_3 = 0,5$  км; б, г –  $l_3 = 15$  км; 1 – модель 1; 2 – модель 2; 3 – модель 3

Анализ осциллограмм (рис. 6,а,в), полученных в сети с  $I_{\Sigma} = 1$  А при  $l_3 = 0,5$  км, показывает, что модель 3 (с параметрами ВЛ, определенными по скорости распространения электромагнитных волн прямой и нулевой последовательностей) дает результаты, практически точно совпадающие с результатами эталонной частотно-зависимой модели 1, в то время как для модели 2 (с параметрами ВЛ, определенными по паспортным данным) погрешность по частоте основной составляющей переходного тока и напряжения имеет величину  $\sim 15\%$ , а амплитудная погрешность для первых полуволн переходного тока и напряжения составляет  $\sim 15\text{--}20\%$  и быстро возрастает с развитием переходного процесса. При увеличении  $I_{\Sigma}$  и (или)  $l_3$  (рис. 6,б,г) частотная и особенно амплитудная погрешности модели 3 резко возрастают и превышают аналогичные погрешности модели 2, при том что частотные погрешности последней составляют  $\sim 15\text{--}20\%$ , а амплитудные достигают значений до  $\sim 40\text{--}50\%$ .

Указанные оценки погрешностей частотно-независимых моделей 2 и 3 и зависимость точности расчетов переходных процессов при замыканиях на землю в воздушных сетях 6–10 кВ от значений  $I_{\Sigma}$  и  $l_3$

иллюстрируют осциллограммы ДПОЗЗ, приведенные на рис. 7, 8.

Рассмотренные особенности поведения моделей сети 2 и 3, основанных на использовании частотно-независимых моделей ВЛ, можно объяснить следующим. При близких к шинам источника питания замыканиях и (или) небольших значениях суммарного тока сети  $I_{\Sigma}$  в спектре переходного тока ОЗЗ преобладают высокочастотные составляющие (рис. 4, а), поэтому модель 3, продольные параметры ВЛ которой примерно соответствуют данному диапазону частот, обеспечивают более высокую точность расчетов переходного процесса.

При достаточно больших расстояниях от шин до места ОЗЗ и (или) больших значениях  $I_{\Sigma}$  в спектре переходного тока ОЗЗ преобладают низкочастотные и среднечастотные составляющие (рис. 4, б), к которым более точно адаптирована модель 2. С учетом этого частотно-независимую модель ВЛ, параметры которой определены на основе паспортных данных для  $f = 50$  Гц, можно назвать низкочастотной моделью, а модель ВЛ, параметры которой выбраны по скорости распространения электромагнитных волн в линии, т.е. для более высоких частот, – соответственно, высокочастотной.

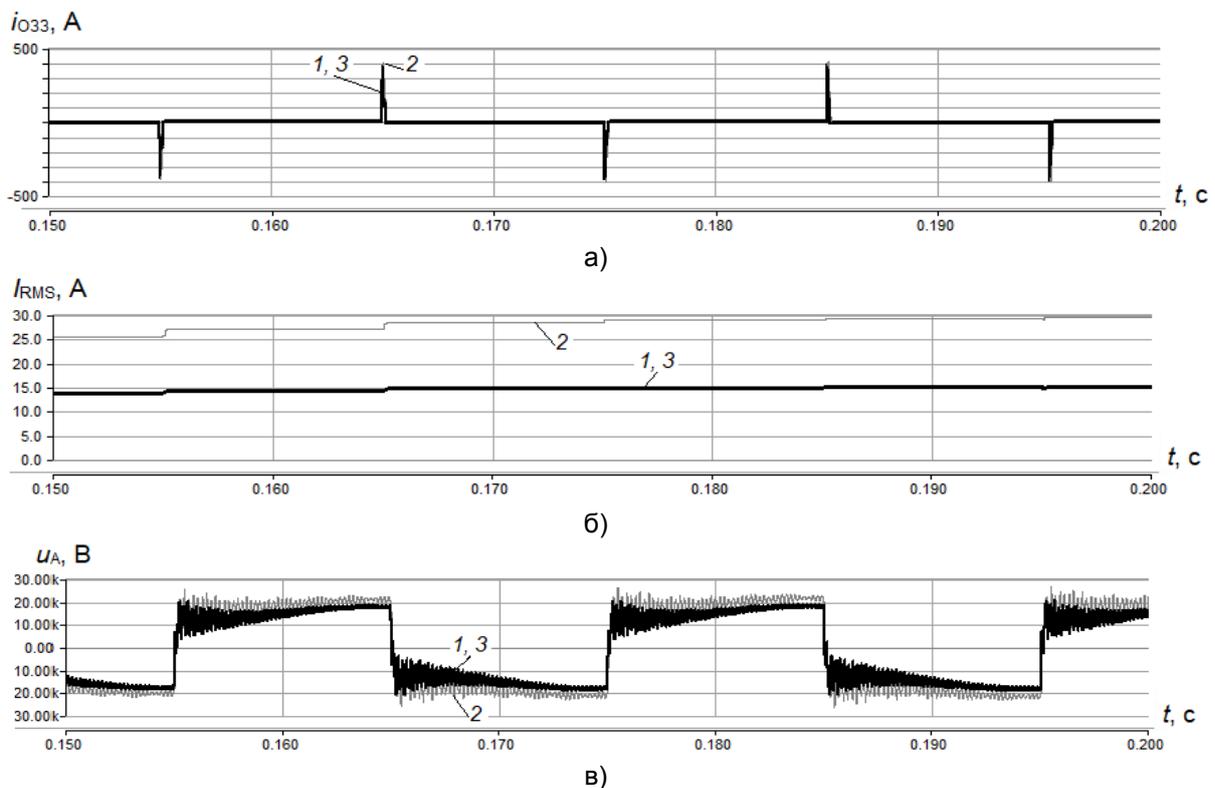


Рис. 7. Осциллограммы переходного тока в месте повреждения (а), его среднеквадратичного значения (б) и напряжения на неповрежденной фазе (в) при ДПОЗЗ в сети 6 кВ с  $I_{\Sigma} = 1$  А при  $l_3 = 0,5$  км: 1 – модель 1; 2 – модель 2; 3 – модель 3

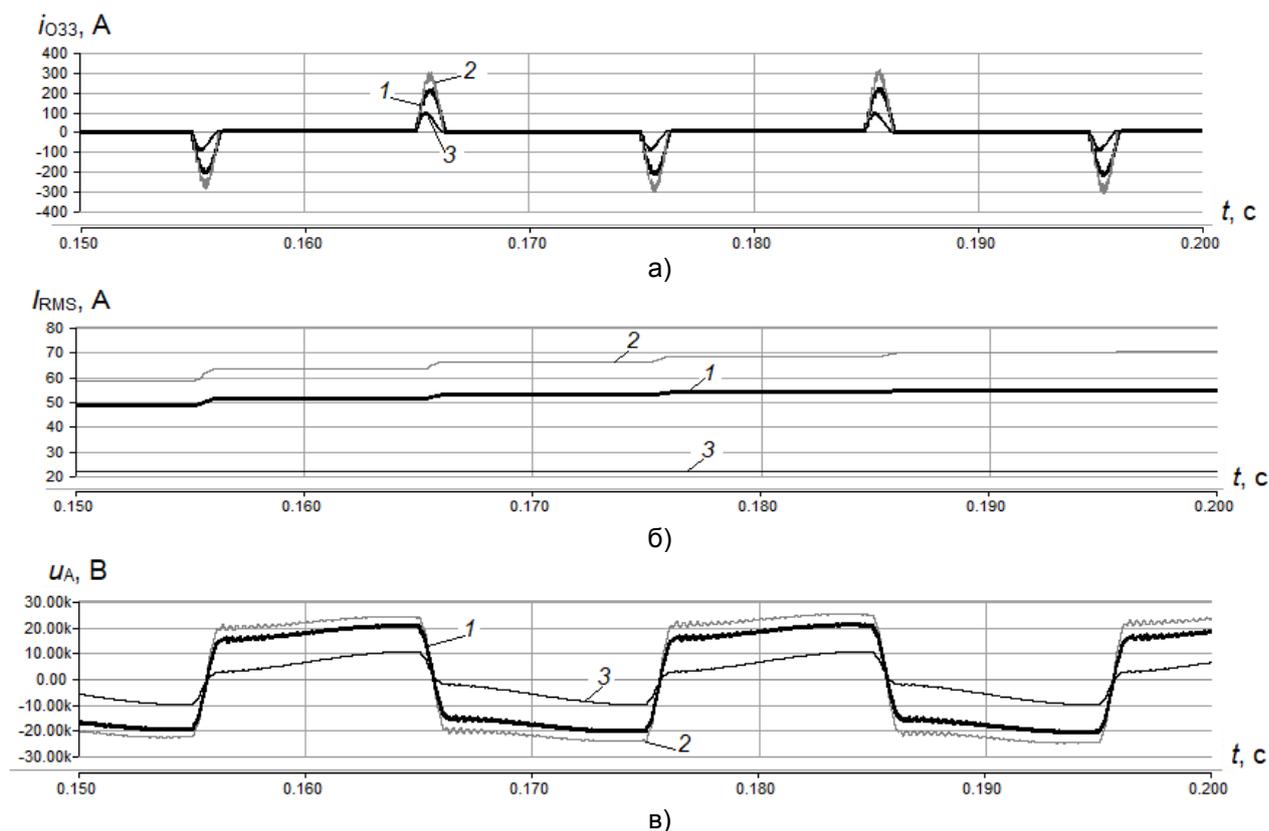


Рис. 8. Осциллограммы переходного тока в месте повреждения (а), его среднеквадратичного значения (б) и напряжения на неповрежденной фазе (в) при ДПОЗЗ в сети 6 кВ с  $I_{OZ} = 5$  А при  $l_s = 15$  км: 1, 2, 3 – то же, что и на рис. 7

Отметим также, что влияние на точность расчетов переходных процессов при ОЗЗ могут оказывать и другие параметры сети, влияющие на частотный спектр тока повреждения, например индуктивность источника питания и переходное сопротивление в месте повреждения. Из перечисленных выше факторов наиболее существенным является расстояние от шин источника питания до места ОЗЗ.

Таким образом, точность расчетов переходных процессов при ОЗЗ в воздушных сетях 6–10 кВ при применении как низкочастотной, так и высокочастотной моделей ВЛ существенно зависит от положения места повреждения в сети. Следовательно, ни одна из частотно-независимых моделей ВЛ в общем случае не может обеспечить приемлемую точность расчетов переходного процесса при изменениях положения в сети места ОЗЗ. Поэтому их применение допустимо только в тех случаях, когда параметры расчетной схемы замещения или имитационной модели сети, а также положение расчетной точки ОЗЗ остаются неизменными. Такие условия имеют место, например, при оценке максимальных перенапряжений и

максимальных среднеквадратичных значений тока ОЗЗ при дуговых замыканиях, когда рассматривается повреждение на шинах источника питания.

**Выводы.** На основании вышеизложенного можно сделать следующие основные выводы.

1. Погрешности расчетов параметров переходных токов и напряжений при ОЗЗ в воздушных сетях 6–10 кВ при применении в расчетных схемах замещения или имитационных моделях сети частотно-независимых моделей воздушных линий существенно зависят от положения места замыкания в сети.

2. Погрешности, указанные в п. 1, могут достигать значений 15–20 % (погрешность по частоте тока переходных токов и напряжений) и 40–50 % и более (погрешность по амплитуде).

3. С учетом п. 1 применение частотно-независимых моделей допустимо только в тех случаях, когда параметры расчетной схемы замещения или имитационной модели сети, а также положение расчетной точки ОЗЗ остаются постоянными или изменяются в небольшом диапазоне.

4. Высокую точность расчетов параметров переходных токов и напряжений при ОЗЗ в воздушных сетях 6–10 кВ, необходимую при решении задач, связанных с разработкой защит от данного вида повреждений на основе переходных процессов и методов ДОМЗЗ по параметрам переходного процесса, позволяет обеспечить только применение частотно-зависимых моделей ВЛ.

### Список литературы

1. **Сирота И.М.** Переходные процессы при замыканиях на землю в компенсированной сети при замыкании фазы на землю // Вопросы устойчивости и автоматики энергетических систем. – Киев: Изд-во АН УССР, 1959. – С. 55–76.
2. **Сирота И.М., Масляник В.В.** Свободные емкостные токи замыкания на землю в сетях малыми токами замыкания на землю // Электричество. – 1977. – № 3. – С. 38–43.
3. **Шуляк В.Г.** Переходные процессы в сетях с изолированной нейтралью при замыкании на землю // Известия вузов. Энергетика. – 1969. – № 1. – С. 1–6.
4. **Лихачев Ф.А.** Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1971. – 152 с.
5. **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.
6. **Сафонов Д.Г.** Имитационное моделирование функционирования распределительной сети с дугогасящим реактором // Омский научный вестник. – 2018. – № 6(162). – С. 98–102.
7. **Шалыт Г.М.** Определение мест повреждения линии электропередачи импульсными методами. – М.: Энергия, 1968. – 215 с.
8. **Шуин В.А.** Влияние разряда емкости поврежденной фазы на переходный процесс при замыканиях на землю в кабельных сетях 3–10 кВ // Электричество. – 1983. – № 12. – С. 4–9.
9. **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.
10. **Шуин В.А., Гусенков А.В.** Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ. – М.: НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик», 2001. – 104 с.
11. **Дьяконов В.П., Пеньков А.А.** MATLAB и SIMULINK в электроэнергетике. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 816 с.
12. **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 13.07.21].
13. **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 13.07.21].
14. **ATPDesigner.** Design and Simulation of Electrical Power Networks [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.atpdesigner.de/network\\_calculation\\_and\\_protection\\_relays/index.html](http://www.atpdesigner.de/network_calculation_and_protection_relays/index.html) [Дата обращения 13.07.21].
15. **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](https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL_ReferenceManual.pdf) [Дата обращения 13.07.2021].
16. **Carson J.R.** Wave Propagation in overhead wires with Ground Return // Bell System Tech. Journal. – 1926, Oct. – Vol. V, no. 4. – P. 539–554.
17. **Руководящие** указания по релейной защите. Вып. 11. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110–750 кВ. – М.: Энергия, 1979. – 152 с.
18. **Petersen W.** Der aussetzende (intermittierende) Erdschluss // ETZ. – 1917. – P. 47–48.

### References

1. Sirota, I.M. Perekhodnye protsessy pri zamykaniyakh na zemlyu v kompensirovannoy seti pri zamykaniy fazy na zemlyu [Earth fault transients in a compensated network with a phase-to-ground fault]. *Voprosy ustoychivosti i avtomatiki energeticheskikh sistem* [Issues of stability and automation of power systems]. Kiev: AN USSR, 1959, pp. 55–76.
2. Sirota, I.M., Maslyanik, V.V. Svobodnye emkostnye toki zamykaniya na zemlyu v setyakh s malymi tokami zamykaniya na zemlyu [Free capacitive earth fault currents in networks with low earth fault currents]. *Elektrichestvo*, 1977, no. 3, pp. 38–43.
3. Shulyak, V.G. Perekhodnye protsessy v setyakh s izolirovannoy neytral'yu pri zamykaniy na zemlyu [Transient processes in networks with isolated neutral in case of earth fault]. *Izvestiya vuzov. Energetika*, 1969, no. 1, pp. 1–6.
4. Likhachev, F.A. *Zamykaniya na zemlyu v setyakh s izolirovannoy neytral'yu i s kompensatsiyey emkostnykh tokov* [Earth faults in networks with isolated neutral and with capacitive currents compensation]. Moscow: Energiya, 1971. 152 p.

5. 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 use for relay protection]. *Elektricheskie stantsii*, 1978, no. 6, pp. 68–71.

6. Safonov, D.G. Imitatsionnoe modelirovanie funktsionirovaniya raspredelitel'noy seti s dugogasyashchim reaktorom [Simulation modeling of the functioning of a distribution network with an arc suppression reactor]. *Omskiy nauchnyy vestnik*, 2018, no. 6(162), pp. 98–102.

7. Shalyt, G.M. *Opredelenie mest povrezhdeniya linii elektroperedachi impul'snymi metodami* [Determination of places of damage of a power line by impulse methods]. Moscow: Energiya, 1968. 215 p.

8. Shuin, V.A. Vliyanie razryada emkosti povrezhdennoy fazy na perekhodnyy protsess pri zamykaniyakh na zemlyu v kabel'nykh setyakh 3–10 kV [Influence of the capacitance discharge of the damaged phase on the transient process during earth faults in 3–10 kV cable networks]. *Elektrichestvo*, 1983, no. 12, pp. 4–9.

9. Shuin, V.A. Nachal'nye fazovye sootnosheniya elektricheskikh velichin perekhodnogo protsessa pri zamykaniyakh na zemlyu v kabel'nykh setyakh 6–10 kV [Initial phase relationships of electrical values of transient process in case of earth faults in 6–10 kV cable networks]. *Elektrichestvo*, 1991, no. 10, pp. 58–61.

10. Shuin, V.A., Gusenkov, A.V. *Zashchity ot zamykaniy na zemlyu v elektricheskikh setyakh*

6–10 kV [Protection against earth faults in 6–10 kV electrical networks]. Moscow: NTF Energo-progress, Energetik, 2001. 104 p.

11. 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.

12. *Power Systems Computer Aided Design / ElectroMagnetic Transients including DC*. Available at: <https://ennlab.ru/category/products/manitoba/>.

13. *Real-Time Digital Simulator (RTDS)*. Available at: <https://ennlab.ru/category/products/manitoba/>

14. *ATPDesigner. Design and Simulation of Electrical Power Networks*. Available at: [http://www.atpdesigner.de/network\\_calculation\\_and\\_protection\\_relays/index.html](http://www.atpdesigner.de/network_calculation_and_protection_relays/index.html).

15. *COMSOL Multiphysics Reference Manual*. Available at: [https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL\\_ReferenceManual.pdf](https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL_ReferenceManual.pdf).

16. Carson, J.R. Wave Propagation in overhead wires with Ground Return. *Bell System Tech. Journal*, 1926, Oct, vol. V, no. 4, pp. 539–554.

17. *Rukovodyashchie ukazaniya po releynoy zashchite. Vypusk 11. Raschety tokov korotkogo zamykaniya dlya releynoy zashchity i sistemnoy avtomatiki v setyakh 110–750 kV* [Relay protection guidelines. Issue 11. Calculations of short-circuit currents for relay protection and system automation in 110–750 kV networks]. Moscow: Energiya, 1979. 152 p.

18. Petersen, W. Der aussetzende (intermittierende) Erdschluss. *ETZ*, 1917, pp. 47–48.