

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ 6 кВ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ

А.В. Ляхомский<sup>1</sup>, А.И. Герасимов<sup>1</sup>, Е.Н. Перфильева<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: mggu.eegp@mail.ru

**Аннотация:** В программной среде MATLAB Simulink выполнено моделирование режимов однофазных замыканий на землю, наиболее распространенных в электрических сетях открытых горных работ с изолированной (или заземленной через высокоомный резистор) нейтралью питающего трансформатора. Моделирование проведено применительно к электрической сети, включающей следующие элементы: подстанцию с трансформатором 35/6,3 кВ и распределительным устройством; электрическую сеть, состоящую из участка воздушной линии электропередачи и кабельной вставки, подключенной через приключательный пункт; электроприемника в виде экскаватора ЭШ-10/70. Для указанных элементов электрической сети разработаны блоки MATLAB Simulink, позволяющие моделировать режимы однофазных замыканий на землю для различных (возможных) вариантов конфигурации моделируемой сети. Получены осциллограммы переходных процессов и действующие значения токов однофазного замыкания на землю в различных элементах моделируемой сети для замыканий на подстанции и в экскаваторном кабеле. Выполненное на основе изложенных принципов и положений моделирование обеспечивает получение решений для электрических сетей открытых горных работ в части параметров токов однофазных замыканий на землю при обосновании выбора защит от однофазных замыканий на землю и уставок их срабатывания.

**Ключевые слова:** моделирование, электрические сети, изолированная нейтраль, замыкания на землю, MATLAB Simulink, трансформатор, резистор, электроприемник.

**Для цитирования:** Ляхомский А. В., Герасимов А. И., Перфильева Е. Н. Моделирование режимов однофазных замыканий на землю в электрических сетях напряжением 6 кВ открытых горных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 2. – С. 164–178. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-164-178.

### Modeling phase-to-ground faults in 6kW grids in open pit mining

A.V. Lyakhomskiy<sup>1</sup>, A.I. Gerasimov<sup>1</sup>, E.N. Perfil'eva<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National University of Science and Technology «MiSiS», Moscow, Russia, e-mail: mggu.eegp@mail.ru

**Abstract:** MATLAB Simulink-based modeling of phase-to-ground faults, common in power grids with insulated (or earthed via high-ohm resistor) generator neutral, has been performed. The model power grid contained: a substation with 35/6.3 kW transformer and switchgear; a power line composed of an overhead line branch and an inserted cable connected via a switching station; and the current-using equipment represented by power shovel ESH-10/70.

The MATLAB Simulink-modeled blocks of these elements allow modeling phase-to-ground faults for various (possible) configurations of a power grid. The oscillograms of transient phenomena and the effective values of currents of phase-to-ground faults are obtained for the elements of the power grid in case of faults at the substation and in the shovel cable. The principles and provisions of the models are reported. The implemented modeling can provide parameters of phase-to-ground fault currents for validation of the selected ground fault protection and the protection operation setting for power grids in open pit mining.

**Key words:** modeling, power grids, insulated neutral, ground fault, MATLAB Simulink, transformer, resistor, current-using equipment.

**For citation:** Lyakhomskiy A. V., Gerasimov A. I., Perfil'eva E. N. Modeling phase-to-ground faults in 6kV grids in open pit mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(2):164-178. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-164-178.

**Введение**

Для электроснабжения открытых горных работ (ОГР) применяются электрические сети с изолированной или заземленной через высокоомный резистор нейтралью трансформаторов [1]. Наиболее частыми повреждениями (70–90% от всех замыканий) в этих сетях являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) [2].

С учетом специфики режимов ОЗЗ, заключающейся в неопределенности

цепей растекания токов через землю, определение значений показателей токов указанных режимов с применением расчетных методов представляет задачу, решаемую в условиях неопределенности и неполноты информации. В этой связи актуально рассмотреть вопрос моделирования режимов ОЗЗ [3] в электрических сетях напряжением 6–10 кВ открытых горных работ. Моделирование позволит с достаточной точностью определять значения токов, фазных напря-

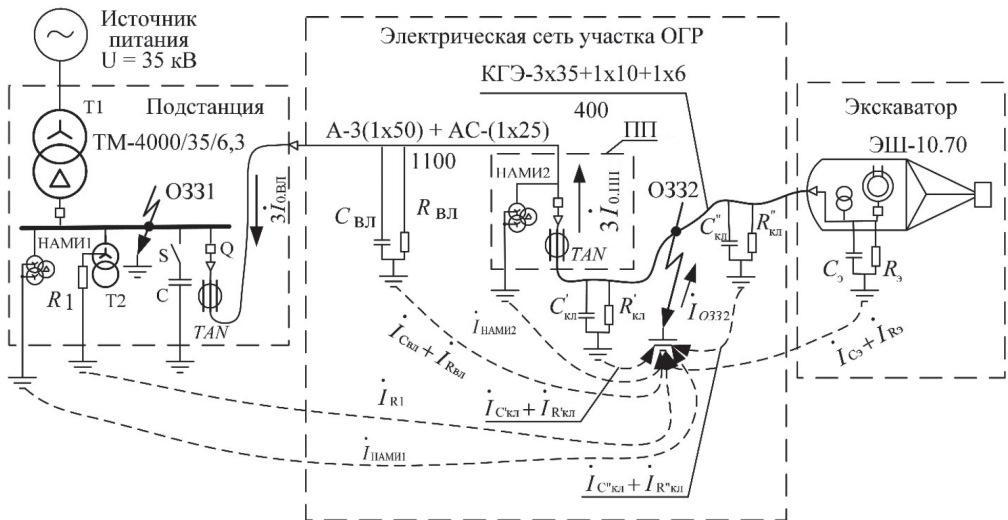


Рис. 1. Схема участка электрической сети ОГР

Fig. 1. Open pit mine circuit layout (a section)

жений, получать осциллограммы токов и напряжений в разных точках электрической сети для анализа режимов ОЗЗ с целью выбора защит и уставок их срабатывания в соответствии с методиками [4–7].

#### **Выбор методики моделирования**

Моделирование режимов ОЗЗ целесообразно проводить в программной среде MATLAB Simulink [8, 9].

#### **Типовой объект для моделирования**

Для моделирования режимов ОЗЗ рассмотрена схема участка электрической сети разреза (рис. 1). Схема декомпозируется на 3 элемента-блока: подстанция; электрическая сеть с воздушной линией электропередачи (ВЛ), передвижным приключательным пунктом (ПП), экскаваторным кабелем; экскаватор с сетевым двигателем и трансформатором собственных нужд.

На подстанции установлены: силовой трансформатор Т1 (ТМ-4000/35/6); измерительный трансформатор напряжения (НАМИ-6); трансформатор собственных нужд Т2 (ТМ-40/6/0,4) с подключаемым резистором  $R1$  между нейтралью высоковольтной обмотки и землей [10]; высоковольтная ячейка КРУ-СЭЩ-59-13-6/30 ХЛ1 с подключаемой между фазами сети и землей конденсаторной установкой С типа КЭП-6,3-30-2УХЛ1 мощностью 30 квар, емкостью каждой фазы 2,41 мкФ; фидерная ячейка с выключателем  $Q$  и трансформатором тока нулевой последовательности  $TAN$ .

При моделировании режимов ОЗЗ резистор  $R1$  и конденсаторная установка С выборочно подключаются для увеличения токов ОЗЗ до величины, необходимой для срабатывания токовых защит.

При моделировании рассмотрены две точки возникновения ОЗЗ: ОЗЗ1 — на подстанции; ОЗЗ2 — в экскаваторном кабеле. Пунктирными линиями со стрел-

ками показано распределение токов в грунте при ОЗЗ в экскаваторном кабеле — точка ОЗЗ2. На подстанции подключен резистор  $R1$ , конденсаторная установка С отключена.

#### **Принципы и основные положения построения модели объекта**

Simulink модель для анализа переходных процессов и установившихся режимов ОЗЗ в электрической сети участка открытых горных работ (рис. 1) представлена на 3-х взаимосвязанных рисунках блоков (рис. 2–4): подстанции, электрической сети участка ОГР и экскаватора.

В модели использованы следующие элементы Simulink [11–13]:

- Powergui — решатель для непрерывного решения по определению параметров ОЗЗ, позволяющий получить синусоидальные кривые тока и напряжения при дискретизация модели — Discrete 0,0001 s;
- G — Ground connection — моделирование соединения с землей;
- Gen — Three-Phase Source — моделирование трехфазного источника переменного тока;
- TPTTW1, TPTTW2 — Three-Phase Transformer, Two Windings — моделирование трехфазных двухобмоточных трансформаторов Т1, Т2;
- K1...K4 — Three-Phase Breaker, Breaker — моделирование выключателей;
- R1...R22, L1...L12, C1...C12 — Parallel RLC Branch — моделирование активных сопротивлений  $R$ , индуктивностей  $L$ , емкостей  $C$  элементов электрооборудования и электрической сети;
- V-I1, V-I2 — V-I — Measurement — измерители линейных, фазных напряжений и токов;
- RMS — измерители действующих значений, поступающих на входы визуализаторов сигналов;



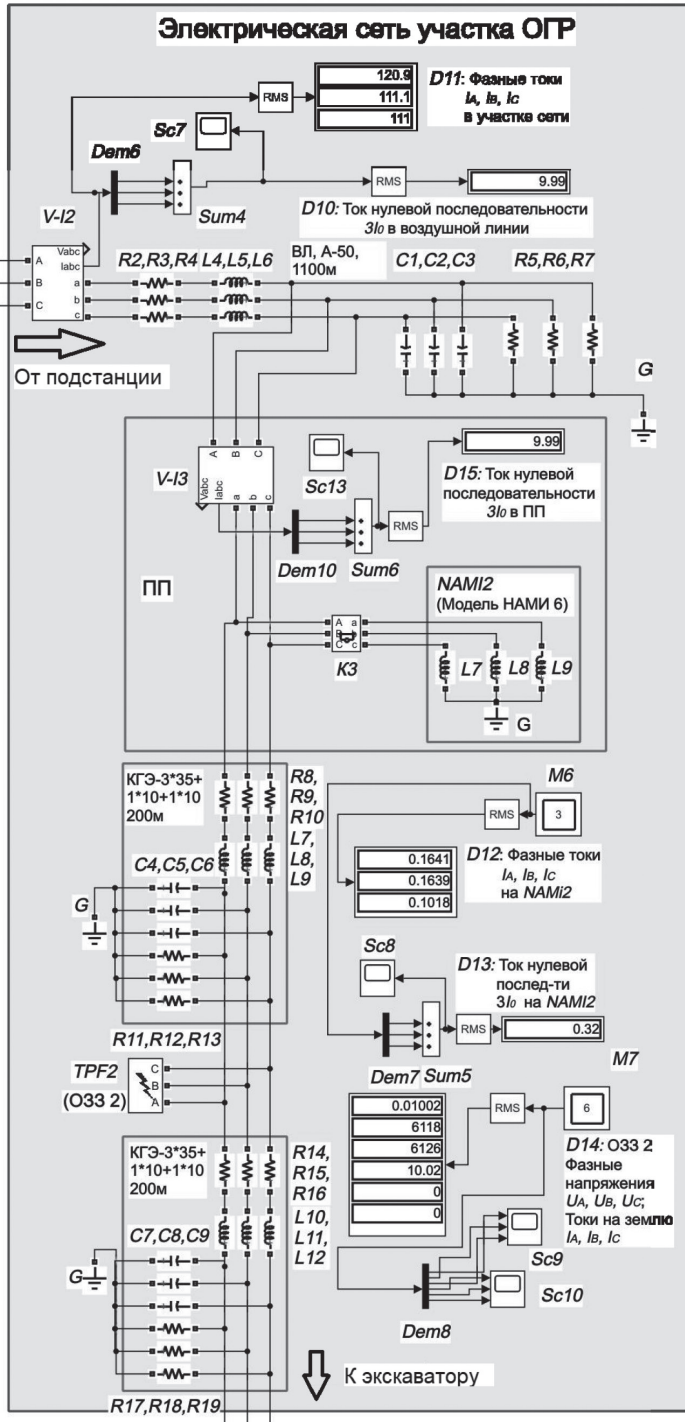


Рис. 3. Блок электрической сети участка ОГП Simulink модели

Fig. 3. Simulink model block of open pit mine grid section

- *M1...M8* – Multimeter – измерители электрических величин;
- *Sc1...Sc13* – Scope – осциллографы для визуализация сигналов в виде графиков;
- *D1...D15* – Display – визуализаторы сигналов в числовом формате;
- *Dem1...Dem9* – Demux – разделители сигналов на скалярные величины или направленные векторы;
- *Sum1...Sum5* – Sum – сумматоры сигналов;
- *Gain1* – Gain – множитель входного сигнала на константу;
- *TPF1, TPF2* – Three-Phase Fault – трехфазный выключатель для создания ОЗЗ1, ОЗЗ2, которым можно управлять временем включения и выключения одной, двух, трех фаз, а также соединять их с землей через малое сопротивление (при металлическом замыкании на землю) или заданное сопротивление дуги;
- *TPP RLC L* – Three-Phase Parallel RLC Load – моделирует трехфазную нагрузку ЭШ-10/70А.

Параметры трансформаторов (табл. 1) для моделирования блока подстанции модели Simulink рекомендуется определять по паспортным данным, используя методики [14, 15].

В элементе Simulink *TPTTW1* во вторичной обмотке трансформатора Т1 токи из неповрежденных фаз электрической сети не могут переходить в поврежденную фазу.

Указанный переход токов в модели может быть достигнут за счет первичной обмотки трансформатора собственных нужд Т2 или за счет конденсаторной установки КЭП-6,3-30-2УХЛ1, используемой для создания добавочного емкостного тока.

Для моделирования режимов ОЗЗ требуются параметры воздушных линий и кабельных линий электропередачи, экскаваторов и другого электрооборудования электрических сетей ОГР. Однофазное замыкание на землю является несимметричным режимом работы электрической сети, сопровождающимся появлением тока нулевой последовательности  $3I_0$ . Величина тока  $3I_0$  зависит от емкостей и активных сопротивлений фаз элементов электрической сети относительно земли, которые определялись в соответствии с табл. 2 по удельным величинам емкостных токов для воздушных и кабельных линий [16] и по емкостным токам электродвигателей, трансформаторов, экскаваторов (табл. 3).

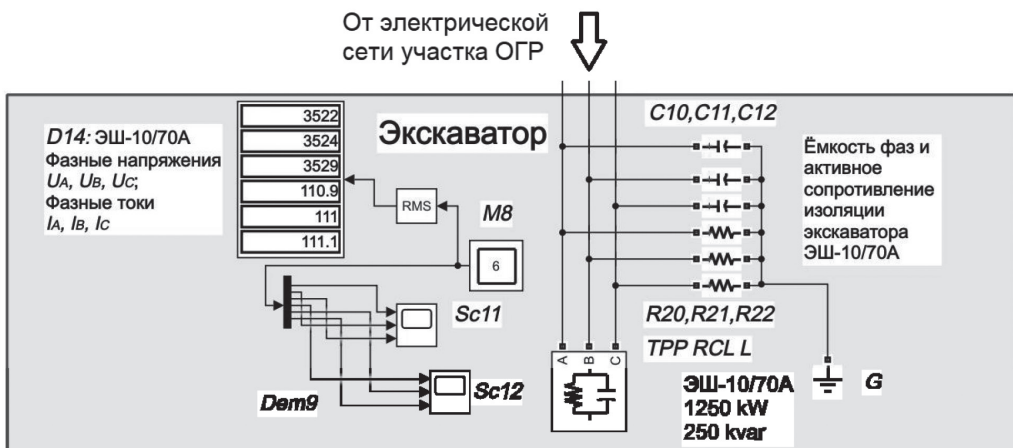


Рис. 4. Блок экскаватора Simulink модели

Fig. 4. Simulink model block of shovel

Таблица 1

**Вводимые параметры трансформаторов для модели Simulink [15]**  
**Input parameters of transformers in Simulink model [15]**

Параметры		Трансформаторы	
		ТМН-4000/35/6,3	ТМ-40/6/0,4
Номинальная мощность $P_n$ , ВА		4 000 000	400 000
Частота $f_n$ , Гц		50	50
Параметры первичной обмотки	напряжение $V1$ , В	35000	6000
	сопротивление $R1$ , Ом	1,2824	9,9
	индуктивность $L1$ , Гн	0,036327	0,0562229
Параметры вторичной обмотки	напряжение $V2$ , В	6300	400
	сопротивление $R2$ , Ом	0,41155	0,044
	индуктивность $L2$ , Гн	0,001177	0,000249
Активное сопротивление параллельной намагничивающей ветви $R_m$ , Ом		0,001177	0,000249
Индуктивность намагничивания $L_m$ , Гн		120,3	110,566

Таблица 2

**Удельные емкости и сопротивления изоляции элементов электрической сети напряжением 6 кВ относительно земли**  
**Volume efficiencies and insulation resistances of 6 kW grid elements relative to earth**

Сечение	Удельный емкостной ток, А/км	Емкость одной фазы, Ф/км	Сопротивление изоляции одной фазы, Ом/км
<b>ВЛ с заземляющим проводом</b>			
A-3(1x16) + AC-(1x25)	0,0164	5,03E-09	6 336 771
A-3(1x25) + AC-(1x25)	0,0168	5,15E-09	6 185 896
A-3(1x35) + AC-(1x25)	0,017	5,21E-09	6 113 120
A-3(1x50) + AC-(1x25)	0,0173	5,3E-09	6 007 113
A-3(1x70) + AC-(1x25)	0,0176	5,39E-09	5 904 719
A-3(1x95) + AC-(1x25)	0,0179	5,49E-09	5 805 757
A-3(1x120) + AC-(1x25)	0,0181	5,55E-09	5 741 605
A-3(1x150) + AC-(1x25)	0,0184	5,64E-09	5 647 992
<b>Кабели КГЭ</b>			
3x25+1x10+1x6	0,95	2,91E-07	109 392,7
3x35+1x10+1x6	1,08	3,31E-07	96 225,04
3x50+1x10+1x10	1,18	3,62E-07	88 070,38
3x70+1x10+1x10	1,4	4,29E-07	74 230,75
3x95+1x10+1x10	1,6	4,9E-07	64 951,91
3x120+1x10+1x10	1,73	5,3E-07	60 071,13
3x150+1x10+1x10	1,93	5,91E-07	53 846,14

Таблица 3

**Емкостные токи и сопротивления изоляции относительно земли электрооборудования напряжением 6 кВ**

**Capacitance currents and insulation resistances of 6 kW electric equipment relative to earth**

Электрооборудование	Емкостной ток, А	Емкость одной фазы, Ф	Сопротивление изоляции одной фазы, Ом
<b>Асинхронные двигатели</b>			
с короткозамкнутым ротором мощностью до 250 кВт	0,05	1,53E-08	2 078 461
с фазным ротором мощностью до 250 кВт	0,07	2,15E-08	1 484 615
250 – 630 кВт	0,08	2,45E-08	1 299 038
с короткозамкнутым ротором мощностью свыше 630 кВт	0,09	2,76E-08	1 154 701
<b>Синхронные двигатели</b>			
до 1000 кВт	0,1	3,06E-08	1 039 230
свыше 1000 кВт	0,12	3,68E-08	866 025
<b>Трансформаторы</b>			
до 1000 кВА	0,02	6,13E-09	5 196 152
свыше 1000 кВА	0,04	1,23E-08	2 598 076
<b>Экскаваторы</b>			
ЭКГ-4у и ЭКГ-5	0,05	1,53E-08	2 078 461
ЭКГ-8	0,1	3,06E-08	1 039 230
ЭШ-10/70	0,25	7,66E-08	415 692
ЭШ-15/90	0,38	1,16E-07	273 481

Сопротивление изоляции элементов зависит от ее влажности, которая изменяется по временам года. В среднем активное сопротивление изоляции (табл. 2, 3) воздушных и кабельных линий, электродвигателей, трансформаторов в условиях открытых горных работ превосходит емкостное сопротивления практически в 10 раз. Для Simulink модели (рис. 2–4) схемы электроснабжения (рис. 1) использовались приведенные значения параметров табл. 2, 3.

### Результаты исследования

Моделирование осуществлялось для 5 возможных вариантов состояния схемы (рис. 1):

- «Т2» — с отключенным резистором  $R1$  между нейтралью трансформатора

ТМ-40/6/0,4 и землей и отключенной конденсаторной установкой С;

- «Т2 с  $R1$ », в котором между нейтралью трансформатора и землей подключены параллельно два резистора типа РЗ-700-17-6 [6] по 700 Ом каждый, общее сопротивление 350 Ом;

- «Т2 с  $R1$  и С», в котором между нейтралью трансформатора и землей включен резистор  $R1$ , а между фазами сети и землей подключена конденсаторная установка мощностью 30 квар, емкостью каждой фазы 2,41 мкФ;

- «Т2 с С» — с отключенным резистором  $R1$ ;

- «С» — с подключенной конденсаторной установкой КЭП-6,3-30-2УХЛ1 и отключенным трансформатором Т2 с  $R1$ .

В результате моделирования получены осциллограммы переходных процессов при времени решения 0,03 с. На рис. 5 представлены осциллограммы токов нулевой последовательности в соответствующих точках замыкания ОЗ31, ОЗ32 и элементах сети (ВЛ и ПП) при различных вариантах электрической схемы. На осциллограммах вписаны действующие значения установившихся токов. Анализ осциллограмм показал следующее:

- в точках ОЗ31 (рис. 5, а, в) и ОЗ32 (рис. 5, б, г) в момент замыкания возникает пик тока, связанный с разрядом емкостей элементов;
- при варианте «Т2 с R1» и ОЗ3 на подстанции (точка ОЗ31, рис. 5, а) в ВЛ и ПП наблюдаются затухающие высокочастотные составляющие тока;
- при варианте «Т2 с R1» и ОЗ3 в экскаваторном кабеле (точка ОЗ32, рис. 5, б) в элементах электрической сети не наблюдаются затухающие высокочастотные составляющие тока;
- при варианте «С» затухающие высокочастотные составляющие тока  $3I_0$

имеют место при ОЗ3 на подстанции (точка ОЗ31, рис. 5, в) и в кабельной линии (точка ОЗ32, рис. 5, г).

Результаты моделирования токов установившихся режимов ОЗ3 (время решения 30 с) представлены в табл. 4.

Анализ результатов моделирования (табл. 4) показал следующее:

- с отключенным трансформатором Т2 и отключенной высоковольтной ячейкой с конденсаторной установкой модель не имеет решений по токам ОЗ3, т.к. в данном случае не образуется цепей для их возникновения;
- токи нулевой последовательности в емкостных и активных сопротивлениях элементов в электрической сети относительно земли направлены к месту ОЗ3, максимальный ток формируется в месте пробоя изоляции (точке возникновения ОЗ3);
- при отключенных резисторе R1 и конденсаторной установке токи нулевой последовательности в элементах электрической сети имеют малые значения и могут не обеспечивать чувствительность защиты от ОЗ3;

Таблица 4

**Результаты моделирования токов при ОЗ3**  
**Modeling data ion currents in phase-to-ground faults**

Варианты схемы сети	Место ОЗ3	Токи в точках ОЗ3, А		Токи в элементах электрической сети, А					
		ОЗ31	ОЗ32	R1	С	ВЛ	ПП	НАМИ 1	НАМИ 2
«Т2»	ОЗ31	0,63	0	0	0	0,53	0,51	0,44	0,40
	ОЗ32	0	0,33	0	0	0,31	0,29	0,31	0,32
«Т2 с R1»	ОЗ31	10,3	0	10,23	0,01	0,53	0,51	0,44	0,40
	ОЗ32	0	10,02	9,96	0,01	9,99	9,99	0,31	0,32
«Т2 с R1 и С»	ОЗ31	13,17	0	10,25	8,25	0,53	0,51	0,34	0,33
	ОЗ32	0	12,81	9,98	8,03	12,51	12,52	0,31	0,32
«Т2 с С»	ОЗ31	8,437	0	0	8,25	0,53	0,51	0,34	0,33
	ОЗ32	0	8,22	0	8,05	7,78	7,80	0,31	0,32
«С»	ОЗ31	8,437	0	0	8,25	0,53	0,51	0,34	0,33
	ОЗ32	0	8,22	0	8,05	7,78	7,80	0,31	0,32

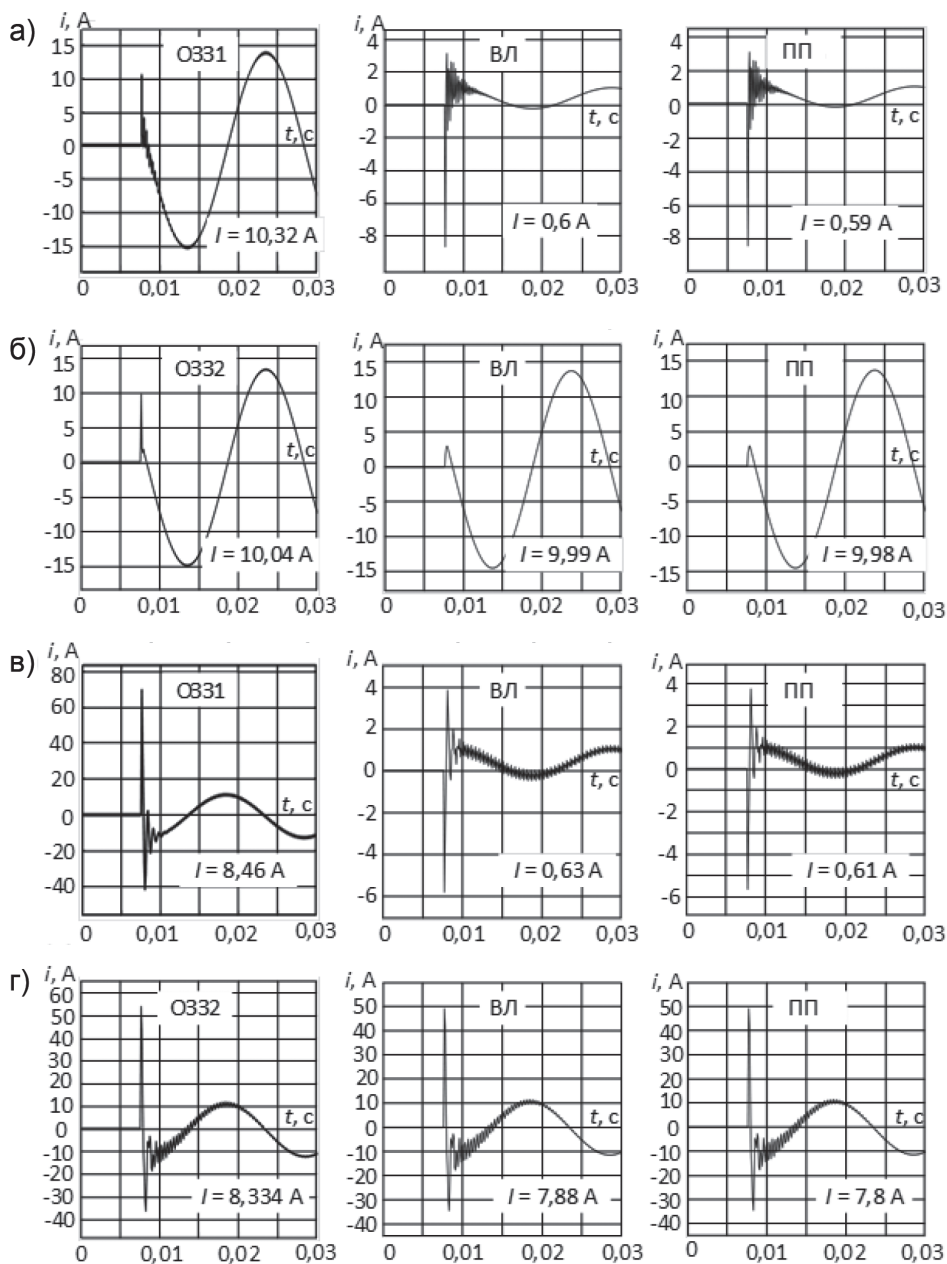


Рис. 5. Осциллограммы токов нулевой последовательности в точках замыкания O331, O332 и элементах сети ВЛ и ПП при различных вариантах состояния электрической схемы: вариант T2 с R1 (O331 на подстанции) (а); вариант T2 с R1 (O332 в экскаваторном кабеле) (б); вариант C (O331 на подстанции) (в); вариант C (O332 в экскаваторном кабеле) (г)

Fig. 5. Oscillograms of zero-sequence currents at phase-to-ground fault points PGF1, PGF2 and in grid elements of overhead line and switching station for various circuit conditions: (a) variant T2 with R1 (PGF1 at substation); (b) variant T2 with R1 (PGF2 in shovel cable); (c) variant C (PGF1 at substation); (d) variant C (PGF2 in shovel cable)

- подключение резистора  $R1$  или конденсаторной установки обеспечивает в отходящей от подстанции линии и в приключательном пункте ток, достаточный для срабатывания токовых защит от ОЗЗ;

- при одновременном подключении резистора  $R1$  и конденсаторной установки  $C$  токи ОЗЗ определяются по сумме векторов активного и реактивного токов;

- при ОЗЗ на подстанции токи имеют большие значения, чем при ОЗЗ в элементах электрической сети;

- индуктивные токи измерительных трансформаторов напряжения в земле зависят от мест ОЗЗ — чем ближе к месту ОЗЗ, тем токи больше.

В связи с малыми значениями токов ОЗЗ следует учитывать влияние измерительных трансформаторов напряжения. Индуктивные токи измерительных трансформаторов при ОЗЗ оказывают существенное влияние на емкостные токи в электрической сети открытых горных работ. Линейный ток НАМИ-6 при его предельной мощности 1000 ВА составляет 0,0912 А. Индуктивность одной фазы измерительных трансформаторов

составляет 120,3 Гн. При ОЗЗ индуктивный ток НАМИ-6 в земле между нейтралью его первичной обмотки и точкой ОЗЗ по результатам моделирования в установившемся режиме достигает значений 0,31 — 0,44 А, что соизмеримо со значениями токов нулевой последовательности электрической сети ОГР (табл. 3).

На действующих карьерах, как правило, к участковым подстанциям подключается несколько линий с отпайками. Моделирование режимов ОЗЗ в этом случае выполняется подключением к Simulink модели подстанции (рис. 2) Simulink моделей участков электрической сети ОГР (рис. 3), экскаваторов и других электроприемников (рис. 4) для формирования соответствующей схемы электрической сети.

### **Заключение**

Моделирование режимов ОЗЗ на основе изложенных в статье принципов и положений позволяет получать решения для электрических сетей ОГР в части параметров токов однофазных замыканий на землю при обосновании выбора уставок и защит от ОЗЗ.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых»*. Серия 03. Выпуск 78. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2015. — 276 с.

2. *Шуин В. А., Ганджаев Д. И., Сарбеева О. А., Шагурина У. С.* Особенности использования электрических величин переходного процесса в защитах от замыканий на землю электрических сетей 6–10 кВ // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. — 2011. — № 1. — С. 32–41.

3. *Владимиров Л. В., Вырва А. А., Ощепков В. А., Попов А. П., Суриков В. И.* Моделирование режима однофазного замыкания на землю в распределительной электрической сети с изолированной нейтралью // Омский научный вестник. — 2012. — № 1 (107). — С. 197–201.

4. *Шуин В. А., Воробьева Е. А., Добрягина О. А., Шадрикова Т. Ю.* Принципы выполнения адаптивной токовой защиты от замыканий на землю в некомпенсированных кабельных сетях напряжением 6–10 кВ // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. — 2018. — № 3. — С. 28–37.

5. *СТО ДИВГ-059-2017*. Релейная защита распределительных сетей 6–10 кВ. Расчет уставок. Методические указания. — СПб.: Изд-во СПб НТЦ Механотроника, 2017. — 68 с.
6. *СТО 18-2013*. Руководящие указания по выбору режима заземления нейтрали в электрических сетях напряжением 6–35 кВ. — СПб.: Изд-во ОАО «ЛЕНЭНЕРГО», 2013. — 77 с.
7. Gukovskiy Yu., Sychev Yu., Pelenev D. The automatic correction of selective action of relay protection system against single phase earth faults in electrical networks of mining enterprises // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. No 5. Pp. 833–838.
8. Иваницкий В. А., Тюленев М. Е. Модель для анализа режимов однофазного замыкания на землю в сетях электроснабжения // Интеллектуальные системы в производстве. — 2013. — № 2 (22). — С. 185–189.
9. Dauda A., Japhet D., Edwin M., Mandu A. Folarin. Modelling and Simulation of Faults in Distribution Network System Using MATLAB Simulink // IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE). 2018. Vol. 13. Issue 3. Ver. 1. Pp. 43–51.
10. Drandic A., Marusic A., Drandic M., Havska J. Power system neutral point grounding // Journal of Energy. 2017. Vol. 66. No 1-4. Pp. 52–68.
11. Perelmuter V. Electrotechnical Systems. Simulation with Simulink and SimPowerSystems. CRS Press, 2017. 450 p.
12. Джендубаев А.-З. Р., Алиев И. И. MATLAB, Simulink и SimPowerSystems в электроэнергетике: учебное пособие. — Черкесск: БИЦ СевКавГГТА, 2014. — 136 с.
13. Ravlic S., Marusic A. Simulation models for various neutral earthing. Methods in medium voltage systems // Procedia Engineering. 2015. Vol. 100. Pp. 1182–1191.
14. Дед А. В. Расчет параметров Simulink-модели силового трехфазного трансформатора для исследования длительных несимметричных режимов // Омский научный вестник. — 2017. — № 3. — С. 68–74.
15. Ягуп В. Г. К определению параметров моделей трансформаторов // Світлотехніка та електроенергетика. — 2014. — № 2. — С. 52–63.
16. Герасимов А. И., Заварыкин Б. С. Электроснабжение карьеров: учебное пособие. — Красноярск: СФУ, 2013. — 184 с. **ГИАБ**

## REFERENCES

1. *Federal'nye normy i pravila v oblasti promyshlennoy bezopasnosti «Pravila bezopasnosti pri vedenii gornykh rabot i pererabotke tverdykh poleznykh iskopaemykh»* [Federal Norms and Rules for Industry Safety: Safety Regulations for Solid Mineral Mining and Processing]. Series 03. Issue 78. Moscow, ZAO NTTS PB, 2015, 276 p.
2. Shuin V.A., Gandzhaev D. I., Sarbeeva O. A., Shagurina U. S. Utilization of electrical values of transient phenomena in ground fault protection in 6–10 kW power grids. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2011, no 1, pp. 32–41. [In Russ].
3. Vladimirov L. V., Vyryva A. A., Oshchepkov V. A., Popov A. P., Surikov V. I. Modeling phase-to-ground fault in electrical distribution system with insulated neutral. *Omskiy nauchnyy vestnik*. 2012, no 1 (107), pp. 197–201. [In Russ].
4. Shuin V.A., Vorob'eva E.A., Dobryagina O.A., Shadrikova T. Yu. Principles of adaptive current protection from ground faults in 6–10 kW unbalanced cable networks. *Vestnik Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2018, no 3, pp. 28–37. [In Russ].
5. *СТО ДИВГ-059-2017*. *Releynaya zashchita raspredelitel'nykh setey 6–10 kV. Raschet ustavok*. Metodicheskie ukazaniya [Standards of Organizations STO DIVG-059-2017. Relay protection of 6 kW distribution systems. Calculation of settings. Guidelines], Saint-Petersburg, Izd-vo SPb NTTS Mekhanotronika, 2017, 68 p.

6. STO 18-2013. *Rukovodyashchie ukazaniya po vyboru rezhima zazemleniya neytrali v elektricheskikh setyakh napryazheniem 6–35 kV* [Standards of Organizations STO 18-2013. Guidance on neutral grounding in 6–35 kW power grids ], Saint-Petersburg, Izd-vo OAO «LEN-ENERGO», 2013, 77 p.

7. Gukovskiy Yu., Sychev Yu., Pelenev D. The automatic correction of selective action of relay protection system against single phase earth faults in electrical networks of mining enterprises. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017. No 5. Pp. 833–838.

8. Ivanitskiy V.A., Tyulenev M.E. Analytical model of phase-to-ground faults in power supply grids. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2013, no 2 (22), pp. 185–189. [In Russ].

9. Dauda A., Japhet D., Edwin M., Mandu A. Folarin. Modelling and Simulation of Faults in Distribution Network System Using MATLAB Simulink. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)*. 2018. Vol. 13. Issue 3. Ver. 1. Pp. 43–51.

10. Drandic A., Marusic A., Drandic M., Havska J. Power system neutral point grounding. *Jornal of Energy*. 2017. Vol. 66. No 1-4. Pp. 52–68.

11. Perelmuter V. *Electrotechnical Systems. Simulation with Simulink and SimPowerSystems*. CRS Press, 2017. 450 p.

12. Dzhendubaev A.-Z.R., Aliev I.I. *MATLAB, Simulink i SimPowerSystems v elektroenergetike: uchebnoe posobie* [MATLAB, Simulink and SimPowerSystems in electrical energy industry: Educational aid], Cherkessk, BITS SevKavGGTA, 2014, 136 p.

13. Ravlic S., Marusic A. Simulation models for various neutral earthing. Methods in medium voltage systems. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 100. Pp. 1182–1191.

14. Ded A.V. Parameter determination in Simulink-model of three-phase supply transformer for studies into long-term unbalanced conditions. *Omskiy nauchnyy vestnik*. 2017, no 3, pp. 68–74. [In Russ].

15. Yagup V.G. Parameter determination for models of transformers. *Svitlotekhnika ta elektroenergetika*. 2014, no 2, pp. 52–63.

16. Gerasimov A. I., Zavarykin B.S. *Elektrosnabzhenie kar'erov: uchebnoe posobie* [Power supply of open pit mines: Educational aid], Krasnoyarsk, SFU, 2013, 184 p.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ляхомский Александр Валентинович<sup>1</sup> — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой,

Герасимов Анатолий Игоревич<sup>1</sup> — канд. техн. наук, доцент,

Перфильева Евгения Николаевна<sup>1</sup> — доцент,

<sup>1</sup> НИТУ «МИСиС».

**Для контактов:** Герасимов А.И., e-mail: mggu.eegp@mail.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.V. Lyakhomskiy<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Chair,

A.I. Gerasimov<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

E.N. Perfil'eva<sup>1</sup>, Assistant Professor,

<sup>1</sup> National University of Science and Technology «MISIS»,

119049, Moscow, Russia.

**Corresponding author:** A.I. Gerasimov, e-mail: mggu.eegp@mail.ru.

Получена редакцией 29.09.2020; получена после рецензии 05.11.2020; принята к печати 10.01.2021.

Received by the editors 29.09.2020; received after the review 05.11.2020; accepted for printing 10.01.2021.

