

# МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИКОСНОВЕНИЯ К КОРПУСАМ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ ПРИ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ

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

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

**Аннотация:** Разработана модель, позволяющая в программной среде MatLab Simulink выполнять имитацию процессов, происходящих в системах заземления карьеров и разрывов при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ) в электрических сетях напряжением 6 (10) кВ и утечках тока в низковольтных электрических сетях. Выполнено моделирование процессов в системах заземления типового участка добычи открытых горных работ (ОГР) с участковой подстанцией, экскаватором, передвижной низковольтной подстанцией, буровым станком, воздушными и кабельными линиями. В модели схема электроснабжения сети с изолированным режимом нейтрали представляется в виде двух взаимосвязанных систем — питания и заземления. Система питания представляется трансформаторами, проводниками и электроустановками с проводимостями фаз относительно земли. Система заземления представляется главным заземлителем на участковой подстанции, магистральными воздушными линиями заземления и заземляющими жилами кабелей, местными заземлителями приключательного пункта и низковольтной подстанции, дополнительными заземлителями, образующимися при контакте металлических корпусов электроустановок с грунтом. Выполнено моделирование напряжения прикосновения и токов в заземлителях. Определено, что ток однофазного замыкания на землю равен сумме токов, протекающих во всех заземлителях: главном, местных и дополнительных. Напряжения прикосновения зависят от величины токов ОЗЗ и сопротивлений заземлителей. Практикуемое увеличение токов ОЗЗ с резистивным режимом нейтрали для надежной работы максимальных токовых защит в четыре и более раз повышает напряжение прикосновения. Нарушение целостности системы заземления, например при обрыве заземляющего троса, значительно повышает напряжение прикосновения на всех корпусах электрифицированного оборудования ОГР.

**Ключевые слова:** электроснабжение открытых горных работ, однофазное замыкание на землю, система заземления, моделирование напряжений прикосновения и токов.

**Для цитирования:** Ляхомский А. В., Герасимов А. И. Моделирование напряжения прикосновения к корпусам электроустановок открытых горных работ при однофазных замыканиях на землю // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 12. – С. 169–178. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_12\_0\_169.

## Contact voltage modeling for electrical installation bodies with phase-to-ground fault in open pit mines

A.V. Lyakhomskii<sup>1</sup>, A.I. Gerasimov<sup>1</sup>

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

---

**Abstract:** The newly developed MatLab Simulink-based model allows simulating processes in earthing systems in open pit mines and quarries, in case of phase-to-ground fault (PGF) in 6 (10) kV power grids and in case of current drainage in low-voltage grids. The processes in the earthing systems at a typical open pit mine site with a substation, a shovel, a mobile low-voltage substation, a drill, and an air cable line are modeled. The model represents the schematic of the power network with insulated neutral as two interrelated systems of feed and earthing. The feed system is composed of transformers, conductors and electric installations with grounded phase conductors. The earthing system consists of the principal earthing of the substation, main aerial earthing lines and cable earthing, local earthing devices of the switching substation and low-voltage substation, and of auxiliary earthing when metal bodies of the electrical installations contact soil. The contact voltages and currents in earth leads are modeled. It is found that phase-to-ground fault current equals the sum of all currents in all earthing lines, namely, in principal, local and auxiliary earth leads. The contact voltages depend on the values of PGF currents and earth-connection resistances. The increase in the PGF currents with resistive neutrals for the reliable operation of the maximum current protections elevates the contact voltages by 4 times and more. Violation of the earthing system integrity, for instance, in breakage of earthing cable, greatly escalates the contact voltage at the bodies of all electrical equipment in an open pit mine.

**Key words:** open pit mining power supply, phase-to-ground fault, earthing system, modeling contact voltages and current voltages.

**For citation:** Lyakhomskii A. V., Gerasimov A. I. Contact voltage modeling for electrical installation bodies with phase-to-ground fault in open pit mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(12):169-178. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_12\_0\_169.

---

## Введение

В соответствии с требованиями нормативных документов [1–3] электробезопасность на открытых горных работах (ОГР) должна обеспечиваться: организационными и техническими мероприятиями; использованием электрических сетей с изолированной или заземленной нейтралью трансформатора через высокоомный резистор; применением главных, местных и дополнительных заземлителей. В зарубежных изданиях [4–6] в качестве основы электробезопасности рассматриваются способы заземления систем и расположение точек заземления.

Возможность поражения электрическим током персонала, обслуживающего электроустановки, во многом зависит

от значения напряжения прикосновения, появляющегося на корпусах при пробое изоляции фазы и неудовлетворительном состоянии системы заземления (СЗ). При обрыве заземляющих проводников СЗ напряжение прикосновения может достигать фазного. Система заземления на ОГР, имея сложную, разветвленную и изменяющуюся конфигурацию, состоит из большого числа элементов, связанных с фазами электрической сети через емкостные и активные сопротивления.

При возникновении однофазных замыканий на землю значительно возрастают токи в СЗ, что увеличивает значение напряжения прикосновения, которое при продолжительности воздействия 0,5 с может превышать безопасное ( $U_{\text{пр.без}}$ ), равное 105 В. В связи с этим для оценки

условий электробезопасности определение значений напряжения прикосновения на корпусах электроустановок и металлических конструкциях машин и оборудования является сложной и трудоемкой задачей. В этом аспекте представляется целесообразным оценить напряжение прикосновения путем моделирования токов через элементы СЗ и напряжение прикосновения на корпусах оборудования.

### Методика моделирования

Моделирование процессов в СЗ ОГР целесообразно осуществлять в среде Matlab Simulink, определяя токи в элементах СЗ и напряжения прикосновения на корпусах оборудования с учетом ОЗЗ в сетях напряжением 6(10) кВ и утечках тока на землю в сетях низкого напряжения. Вопросам моделирования ОЗЗ в электрических сетях среднего напряжения посвящено ряд работ [7–10].

Вместе с тем в отечественных и зарубежных изданиях, а также в электронных базах Интернета, не приводится моделирование в программе Matlab Simulink процессов, происходящих в системах заземления, при ОЗЗ в электрических сетях с режимом изолированной нейтрали ОГР.

На рис. 1 представлена схема электроснабжения горного участка с подстанцией ПКТП-1600/35/6 кВ, экскаватором ЭКГ-8, ПКТП-160/6/0,4 кВ, буровым станком СБР-160, воздушными и кабельными линиями. Все электроустановки заземляются на общую СЗ, состоящую из главного (центрального) заземлителя, заземляющего троса, располагающегося на опорах воздушных линий электропередачи ниже фазных проводников, заземляющих жил кабельных линий, местных заземлителей и дополнительных заземлителей оборудования.

В модели (рис. 2–4) система электроснабжения участка ОГР разбита на две системы – питания (СП) и заземления (СЗ), представленных тремя взаимосвязанными блоками:

- № 1 – участковая подстанция (рис. 2);
- № 2 – распределительная электрическая сеть, состоящая из воздушных линий электропередачи, кабельных линий, низковольтной подстанции, экскаватора, бурового станка (рис. 3);
- № 3 – система заземления (рис. 4).

В СЗ входят заземлители и проводники: главный  $R_{з.Гл}$ ; проводники заземляющей сети (заземляющий трос –  $R_{з.тр}$  и заземляющая жила кабеля  $R_{з.ж.к}$ ); ме-

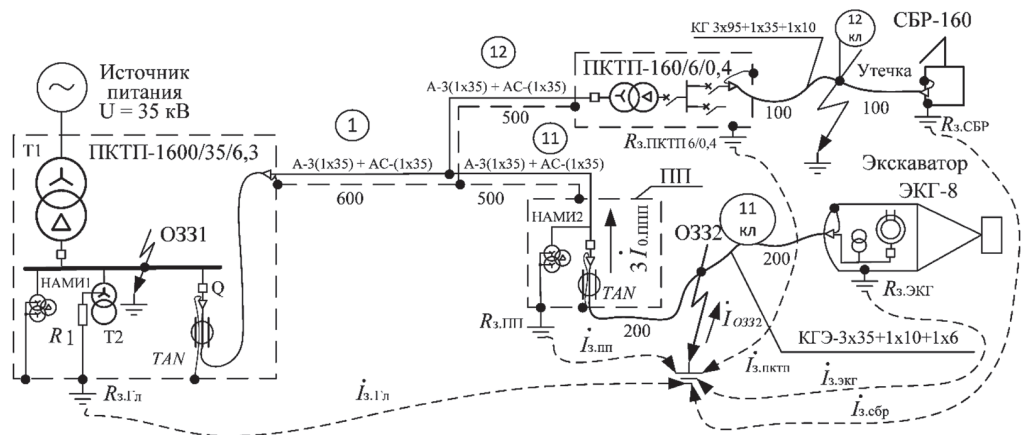


Рис. 1. Распределение токов в системе заземления горного участка

Fig. 1. Current distribution in earthing system at a mining site

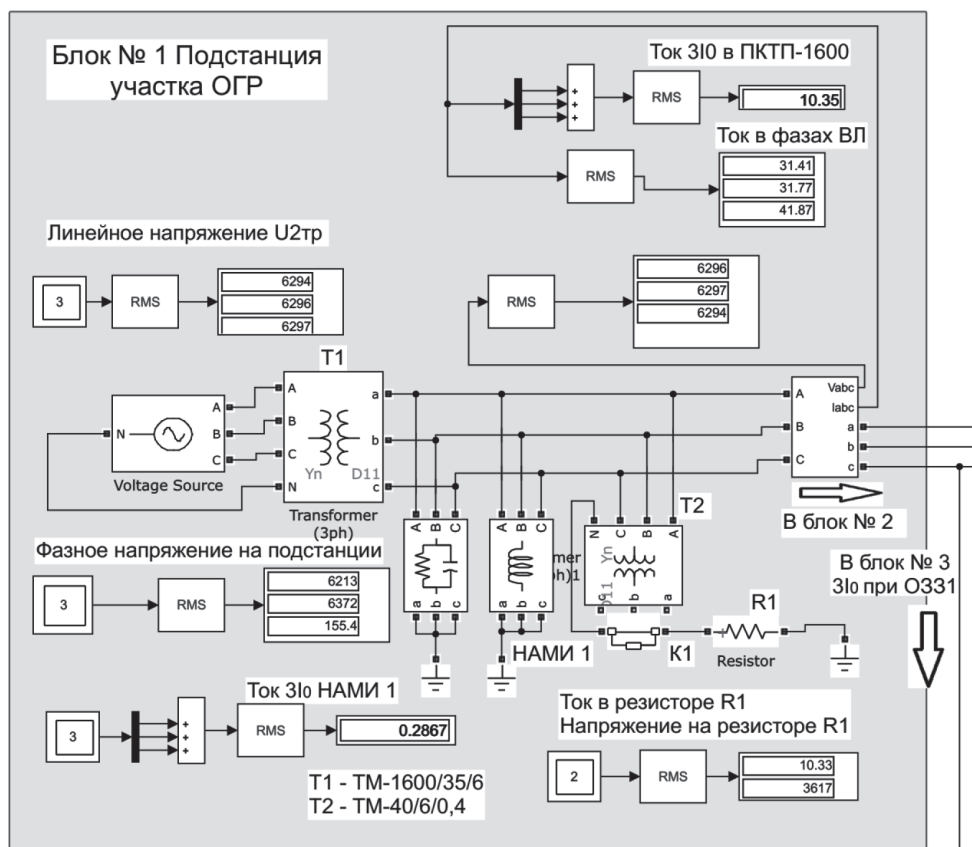


Рис. 2. Блок подстанции Simulink-модели  
 Fig. 2. Substation unit in Simulink-model

стные заземлители, объединенные с дополнительными заземлителями — естественными самозаземлителями корпусов электрифицированных машин и оборудования, приключательного пункта —  $R_{з.пп}$ , низковольтной подстанции  $R_{з.ПКТП6/0,4}$ , дополнительные — экскаватора  $R_{з.ЭКГ-8}$  и бурового станка  $R_{з.СБР}$ .

Для представления элементов воздушных и кабельных линий с целью уменьшения размеров в модели использовались трехфазные блоки Simulink.

Сопrotивления местных заземлителей, согласно нормативным документам, не нормируются. В этой связи значения сопротивлений местных и дополнительных заземлителей  $R_3^*$  приняты в соответствии с [11]:  $R_{з.пп}$  равно 115,8 Ом,

$R_{з.ЭКГ-8} = 42,8$  Ом,  $R_{з.ПКТП6/0,4} = 90$  Ом,  $R_{з.СБР} = 70$  Ом. Сопrotивление главного заземлителя  $R_{з.Гл}$  варьировалось от 1,5 до 4 Ом.

Резистор  $R_1$  между нейтралью схемы электроснабжения 6 кВ и землей на подстанции, подключаемый ключом  $K_1$ , моделирует резистивный режим изолированной нейтрали сети для значений тока ОЗЗ. Значения  $R_1$  составляли 350 и 700 Ом [12].

При пробое изоляции фазы ток  $I_{ОЗЗ}$  по проводникам СЗ поступает во все заземлители, создавая при этом напряжения прикосновения на корпусах электроустановок: участковой ПКТП, приключательном пункте ПП, экскаваторе ЭКГ-8, низковольтной ПКТП-160/6/0,4,

Блок № 2. Распределительная электрическая сеть участка ОГП

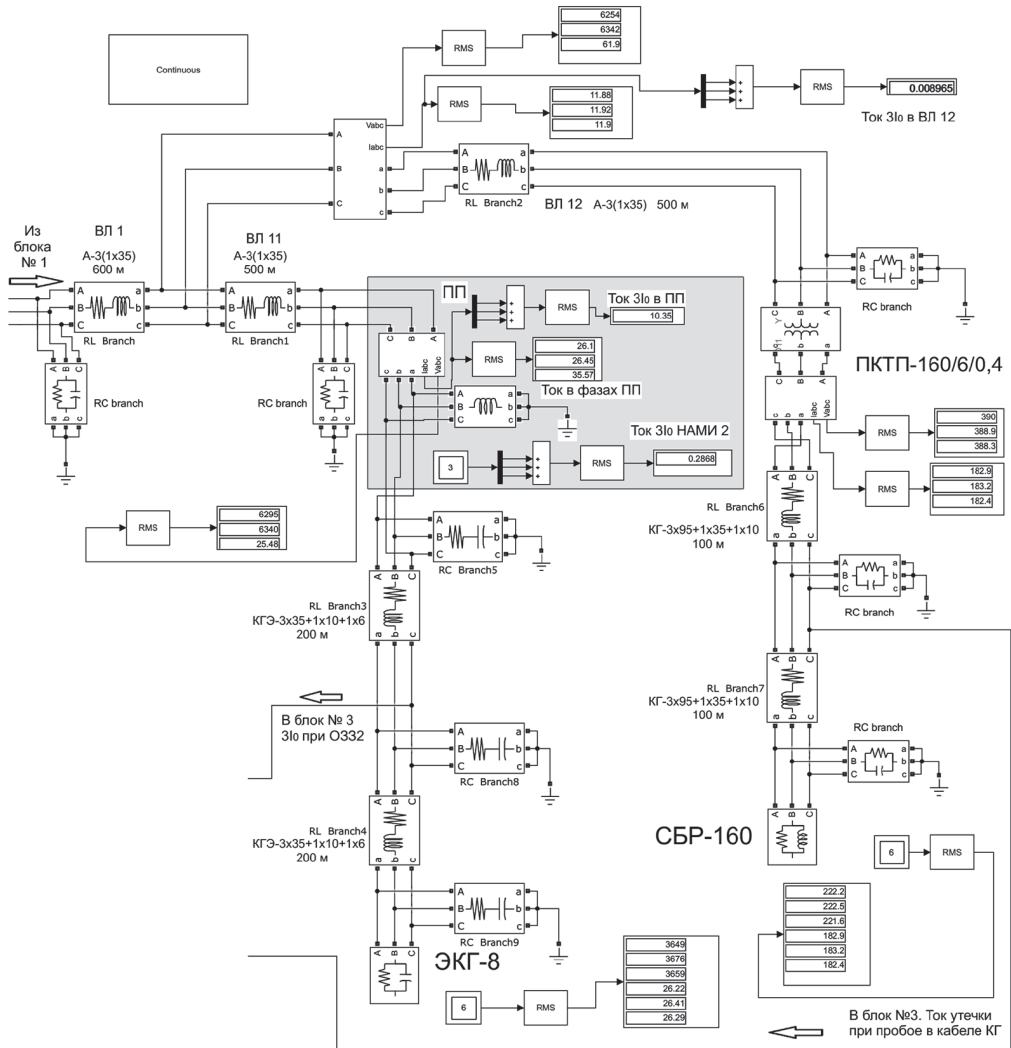


Рис. 3. Блок распределительной электрической сети участка ОГП Simulink-модели

Fig. 3. Electrical distribution system unit at an open pit site in Simulink-model

буровом станке СБР-160 (рис. 2). Действующие значения напряжений и токов отображаются на дисплеях модели.

### Моделирование

Моделирование выполнялось для следующих аварийных и ненормальных режимов:

- ОЗ31 – пробой изоляции фазы С в сети напряжением 6 кВ на подстанции;

- ОЗ32 – пробой изоляции фазы С в сети напряжением 6 кВ в экскаваторном кабеле;

- ОЗ32 и обрыв заземляющего троса СЗ ВЛ № 1;

- утечка – пробой изоляции фазы С в низковольтном кабеле (0,4 кВ) бурового станка.

Моделирование проводилось при следующих условиях: сопротивление глав-



Рис. 4. Блок системы заземления Simulink-модели  
Fig. 4. Earthing system unit in Simulink-model

ного заземлителя на подстанции  $R_{з,Гл} = 1,5 \div 4,0$  Ом; выше указанных значениях сопротивлений местных заземлителей, объединенных с дополнительными заземлителями, образующихся за счет самозаземления; подключен и отключен резистор  $R_1$ ; обрыв троса  $C_3$  на участке ВЛ № 1.

В ходе моделирования измерялись: фазные напряжения и токи в электрических сетях 6 и 0,4 кВ; токи нулевой последовательности  $3I_0$ ; токи утечки в низковольтной сети; напряжения прикосновения на корпусах оборудования, токи в элементах  $C_3$ .

### Результаты моделирования

При моделировании определены токи в элементах  $C_3$  и напряжения прикосновения на корпусах оборудования при замыканиях на землю в точках ОЗ31, ОЗ32 и в точке утечки (в кабеле

бурового станка СБР-160) при: включенном и отключенном резисторе  $R_1$ ; изменении сопротивления главного заземлителя  $R_{з,Гл}$  от 1, 5 до 4 Ом; обрыве заземляющего троса. Для смоделированных режимов работы электрической сети определены токи в заземлителях и напряжения прикосновения на корпусах оборудования (см. таблицу). На дисплеях блоков рис. 2–4 токи и напряжения для режима моделирования ОЗ32 при  $R_1 = 350$  Ом,  $R_{з,Гл} = 1,5$  Ом, местных и дополнительных заземлителях  $R_3^*$ .

Анализ данных таблицы показывает:

- При ОЗ3 и резистивном режиме нейтрали схемы электроснабжения (включенном  $R_1$ ) по сравнению с изолированным режимом нейтрали  $U_{пр}$  значительно возрастает от  $0,71 \div 0,75$  до  $13,6 \div 14,.$  В на корпусах оборудования всех элементов схемы, но не превышает безопасного значения, равного 105 В.

Результаты моделирования токов в сети и напряжений прикосновения  
Modeling data on grid currents and contact voltages

Токи и элементы сети	Измеряемые параметры	Режимы моделирования												Утечка в кабеле КТ, $R_{3,Гн} = 1,5 \text{ Ом}$
		ОЗ31 при $R_{3,Гн} = 1,5 \text{ Ом}$			ОЗ32 при $R_{3,Гн} = 350 \text{ Ом}$ и $R_{3,Гн} = 1,5 \text{ Ом}$			1,5						
		отключен $R_1 = 350 \text{ Ом}$			отключен $R_1 = 700 \text{ Ом}$			при $R_3^*$	при $10 \cdot R_3^*$	обрыв $R_{то ВЛ1}$ при $10 \cdot R_3^*$	2,0	3,0	4,0	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Ток в элементах сети напряжением 6 кВ, А	$I_{ОЗ3}$	0,539	10,39	0,544	5,297	10,42	10,41	9,989	7,01	10,41	10,39	10,37	0,024	
	$I_{R1}$	0	10,3	0	5,199	10,33	10,33	9,903	6,941	10,32	10,3	10,28	0,0072	
	$I_{I_0, ПКТП}$	0,283	10,31	0,285	5,213	10,35	10,34	9,915	6,95	10,33	10,31	10,30	0,0072	
	$I_{I_0, ПП}$	0,287	0,286	0,256	5,214	10,35	10,34	9,917	6,951	10,34	10,32	10,30	0,0036	
	$I_{I_0, ВЛ12}$	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,006	0,006	0,009	0,009	0,009	0
	$I_{I_0, НАМИ1}$	0,287	0,286	0,2889	0,288	0,287	0,286	0,286	0,275	0,193	0,286	0,285	0,286	0,0002
ПКТП-1600/55/6	$I_{I_0, НАМИ2}$	0,287	0,286	0,2889	0,288	0,287	0,286	0,286	0,275	0,193	0,286	0,285	0,286	0,0002
	$U_{но, В}$	0,75	14,4	0,72	6,96	13,74	15,41	0,00	0,00	17,85	25,47	32,38	0,04	
ПП	$I_{R3, ГП, А}$	0,5	9,6	0,48	4,66	9,16	10,27	0,00	0,00	8,92	8,49	8,09	0,02	
	$U_{но, В}$	0,72	13,76	1,21	11,8	23,23	25,83	175,92	1221,14	27,14	34,41	40,99	0,05	
	$I_{RПП, А}$	0,01	0,12	0,01	0,1	0,2	0,02	1,52	1,05	0,23	0,30	0,35	0	
	$U_{но, В}$	0,71	13,62	1,32	12,88	25,35	28,6	176,32	1221,44	29,22	36,40	42,92	0,05	
ЭКГ-8	$I_{RЭКГ, А}$	0,02	0,32	0,03	0,3	0,59	0,07	4,12	2,85	0,68	0,85	1,00	0	
	$U_{но, В}$	0,72	13,6	0,97	9,44	18,58	21,26	171,92	1218,3	22,61	29,81	36,42	0,08	
ПКТП-160/6/0,4	$I_{RПКТП, А}$	0,01	0,15	0,01	0,1	0,21	0,02	1,91	1,35	0,25	0,33	0,40	0	
	$U_{но, В}$	0,71	13,71	0,96	9,38	18,46	21,04	170,80	1217,5	22,37	29,61	36,18	0,08	
СБР-160	$I_{R, СБР, А}$	0,01	0,2	0,01	0,13	0,26	0,03	2,44	1,74	0,32	0,42	0,52	0	

Примечание:  $R_3^*$  — включает местные и дополнительные заземлители:  $R_{3,ПП} = 115,8 \text{ Ом}$ ,  $R_{3,ЭКГ-8} = 42,8 \text{ Ом}$ ,  $R_{3,ПКТП60,4} = 90 \text{ Ом}$ ,  $R_{3,СБР} = 70 \text{ Ом}$ .

- При ОЗЗ и увеличении  $R_1$  от 350 до 700 Ом  $U_{\text{пр}}$  снижается от  $13,6 \div 14,4$  до  $6,96 \div 12,88$  В.

- При ОЗЗ и увеличении  $R_{\text{з.гл}}$  от 1,5 до 3,0 Ом  $U_{\text{пр}}$  на корпусах оборудования всех элементов схемы увеличивается от  $13,74 \div 25,35$  до  $25,47 \div 36,40$  В, но не превышает  $U_{\text{пр.без}}$ . При увеличении  $R_{\text{з.гл}}$  до 4,0 Ом  $U_{\text{пр}}$  увеличивается до  $32,38 \div 42,92$  В.

- При обрыве заземляющего троса в сети 6 кВ и ОЗЗ на корпусах оборудования всех элементов схемы возникает  $U_{\text{пр}}$  от 170,8 до 176,32 В, что значительно превышает  $U_{\text{пр.без}}$ , которое практически пропорционально увеличивается при возрастании сопротивлений местных заземлителей.

- При возникновении утечки в низковольтной сети напряжения прикосновения  $U_{\text{пр}}$  на элементах схемы при нормальном режиме работы СЗ не превысили  $0,04 \div 0,08$  В при токе утечки (металлическое замыкание фазы кабеля бурового станка на грунт), равном 23 мА.

Результаты моделирования показали, что применяемые на предприятиях ОГР мероприятия по созданию добавочных токов ОЗЗ с целью улучшения надежности срабатывания релейных защит ухудшают электробезопасность в связи со значительным увеличением напряжений прикосновения. Особенно большие напряжения прикосновения могут возникать при обрыве проводников СЗ. В ПП применяются устройства контроля целостности заземляющих жил экскаваторных кабелей. Очевидно, что необходима разработка устройств для контроля целостности контактных соединений и заземляющих тросов СЗ ОГР в целом, а также применение методов по уменьшению токов ОЗЗ [13].

### **Заключение**

- Разработана в программной среде Matlab Simulink модель, позволяющая

проводить анализ условий электробезопасности в части определения напряжения прикосновения в электрических сетях 6 и 0,4 кВ открытых горных работ.

- Моделирование создает возможности для выполнения развернутых экспериментальных исследований процессов, происходящих в заземляющих системах при однофазных замыканиях на землю в высоковольтных электрических сетях без разрушения электроустановок, которые могут происходить при проведении физических экспериментов в электрических сетях на действующих карьерах и разрезах.

- Для аварийных режимов однофазных замыканий на землю в высоковольтных электрических сетях и утечек тока на землю в низковольтных электрических сетях всего комплекса систем электроснабжения участков открытых горных работ моделирование позволяет получить значения напряжений прикосновения на корпусах электроустановок при различных значениях сопротивлений главного заземлителя карьерной участковой подстанции, сопротивлений растекания токов с корпусов электроустановок и местных заземлителей, а также для случая обрыва проводников заземляющей сети.

- Моделирование напряжения прикосновения позволяет проводить анализ и оценку условий электробезопасности в электрических сетях открытых горных работ, имеющих сложную разветвленную изменяющуюся структуру, в режимах однофазных замыканий на землю.

- Дополнительные заземлители оказывают существенное влияние на значение напряжения прикосновения при обрыве проводников СЗ. В этой связи целесообразно провести исследования по оценке и установлению значений сопротивлений самозаземления металлических корпусов машин и оборудования, применяемых на открытых горных работах.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 08.12.2020 № 505 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых». (Зарегистрирован 21.12.2020 № 61651). Дата опубликования: 22.12.2020. Номер опубликования: 0001202012220071. — 524 с. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202012220071>.

2. Правила устройства электроустановок, 7 изд. (Все действующие разделы ПУЭ). — М.: Морткнига, 2021. — 584 с.

3. 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.

4. Drandic A., Marusic A. Drandic M., Havska J. Power system neutral point grounding // Journal of Energy. 2017, vol. 66, Special Issue, pp. 52–68.

5. 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, vol. 12, no. 5, pp. 833–838.

6. Ravlic S., Marusic A. Simulation models for various neutral earthing. Methods in medium voltage systems // Procedia Engineering. 2015, vol. 100, pp. 1182–1191.

7. 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.

8. 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, no. 3, ver. 1, p. 43–51.

9. Perelmuter V. Electrotechnical system. Simulation with Simulink and SimPowerSystems. 2017, CRS P. 450 p. Doi 10.1201/9781315316246-2.

10. Владимиров Л. В., Върва 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.

11. Чеботаев Н. И. Электрооборудование и электроснабжение открытых горных работ: Учебник для вузов. 3-е изд. стер. — М.: Изд-во «Горная книга», 2018. — 474 с.

12. Евминов Л. И., Алферов Т. В. Резистивное заземление нейтрали в распределительных сетях 6–35 кВ // Агротехника и энергообеспечение. — 2019. — № 4 (25). — С. 94–108.

13. Акулов А. В. Методы уменьшения полного тока однофазного замыкания на землю в сетях 6 (10) кВ открытых горных работ [электронный ресурс]. URL: <https://vde.nmu.org.ua/ua/science/ntz/archive/84/12.pdf> (дата обращения 16.04.2021). **PLAB**

## REFERENCES

1. *Prkaz Federal'noy sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 08.12.2020 № 505 «Ob utverzhdenii Federal'nykh norm i pravil v oblasti promyshlennoy bezopasnosti «Pravila bezopasnosti pri vedenii gornykh rabot i pererabotke tverdykh poleznykh iskopaemykh»* [Order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision No. 505 of 08.12.2020 «On Approval of Federal Norms and Rules in the Field of Industrial Safety «Safety Rules for Mining and Processing of Solid Minerals»], available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202012220071>. [In Russ].

2. *Pravila ustroystva elektroustanovok, 7 izd. (Vse deystvuyushchie razdely PUE)* [Electrical Installation Rules, 7th edition. (All current sections of the EIR)], Moscow, Morkniga, 2021, 584 p. [In Russ].

3. Rukovodyashchie ukazaniya po vyboru rezhima zazemleniya neytrali v elektricheskikh setyakh napryazheniem 6–35 kV. STO 18-2013 [Guidelines for the selection of the neutral grounding mode in electrical networks with a voltage of 6–35 kV. System of standardization STO 18-2013], Saint-Petersburg, Izd-vo OAO «Lenenergo», 2013, 77 p. [In Russ].

4. Drandic A., Marusic A. Drandic M., Havska J. Power system neutral point grounding. *Journal of Energy*. 2017, vol. 66, Special Issue, pp. 52–68.

5. 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, vol. 12, no. 5, pp. 833–838.

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

7. Ivanitskiy V. A., Tyulenev M. E. Model for the analysis of single-phase ground fault modes in power supply networks. *Intelligent systems in manufacturing*. 2013, no. 2 (22), pp. 185–189. [In Russ].

8. 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, no. 3, ver. 1, p. 43–51.

9. Perelmuter V. *Electrotechnical system. Simulation with Simulink and SimPowerSystems*. 2017, CRS P. 450 p. Doi 10.1201/9781315316246-2.

10. Vladimirov L., Vyrva A., Oshchepkov V., Popov A., Surikov V. Simulation of a single-phase earth fault mode in an electrical distribution network with isolated neutral. *Omskiy nauchnyy vestnik*. 2012, no. 1 (107), pp. 197–201. [In Russ].

11. Chebotaev N. I. *Elektrooborudovanie i elektrosnabzhenie otkrytykh gornykh rabot*. Uchebnyy dlya vuzov. 3-e izd. [Electrical equipment and power supply of opencast mining. Textbook for universities. 3rd edition], Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2018, 474 p.

12. Evminov L. I., Alferov T. V. Neutral resistive grounding in 6–35 kV distribution networks. *Agrotekhnika i energoobespechenie*. 2019, no. 4 (25), pp. 94–108. [In Russ].

13. Akulov A. V. *Metody umen'sheniya polnogo toka odnofaznogo zamykaniya na zemlyu v setyakh 6 (10) kV otkrytykh gornykh rabot* [Methods of reducing the total current of a single-phase earth fault in 6 (10) kV networks of open pit mining], available at: <https://vde.nmu.org.ua/ua/science/ntz/archive/84/12.pdf> (accessed 16.04.2021). [In Russ].

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

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

e-mail: mggu.eegp@mail.ru,

<sup>1</sup> НИТУ «МИСиС».

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

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.V. Lyakhomskii<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

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

e-mail: mggu.eegp@mail.ru,

<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 30.07.2021; получена после рецензии 01.09.2021; принята к печати 10.11.2021.

Received by the editors 30.07.2021; received after the review 01.09.2021; accepted for printing 10.11.2021.