

# Техносферная безопасность в электроэнергетике Technological safety in electrical energy engineering

Научная статья

УДК 658.382

DOI: 10.14529/power220112

## АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ КОСВЕННОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗОЛЯЦИИ СЕТИ ОТНОСИТЕЛЬНО ЗЕМЛИ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ MATLAB/Simulink

*Хуршедшох Давлаталиевич Бобоев*<sup>1</sup>, *khboboev-93@mail.ru*

*Юрий Иванович Аверьянов*<sup>1</sup>, *aver541710@mail.ru*

*Андрей Владимирович Богданов*<sup>1</sup>, *bav-64@mail.ru*

*Игорь Леонидович Кравчук*<sup>2</sup>, *kravchuk65@mail.ru*

<sup>1</sup> Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

<sup>2</sup> Челябинский филиал Института горного дела УрО РАН, Челябинск, Россия

**Аннотация.** Рациональное решение вопросов, связанных с профилактикой электротравматизма, а также с безопасностью эксплуатации и надежностью электроснабжения потребителей электроэнергии невозможно без определения параметров изоляции электроустановок. Если в процессе эксплуатации электрооборудования выявлять участки, где наблюдается устойчивое снижение уровня изоляции и заблаговременно выводить их в ремонт, то можно значительно повысить надёжность электроснабжения и безопасность эксплуатации. Таким образом, полная информация о состоянии изоляции электроустановок может быть получена при применении соответствующих методов контроля изоляции. В статье рассматривается краткая характеристика существующих методов определения параметров изоляции сети относительно земли, проанализированы погрешности косвенного метода, основанного на подключении к одной из фаз дополнительной емкости. Приведены результаты исследований на компьютерной модели влияния различных факторов на точность измерений параметров изоляции фаз сети относительно земли, которые показали, что при несимметрии фазных напряжений и изменении величины и вида нагрузки погрешность измерения не превышает 8 %.

**Ключевые слова:** карьерные распределительные сети, параметры изоляции сети относительно земли

**Для цитирования:** Анализ погрешностей косвенного метода контроля параметров изоляции сети относительно земли в программной среде MATLAB/Simulink / Х.Д. Бобоев, Ю.И. Аверьянов, А.В. Богданов, И.Л. Кравчук // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2022. Т. 22, № 1. С. 106–116. DOI: 10.14529/power220112

Original article

DOI: 10.14529/power220112

## ERROR ANALYSIS OF THE INDIRECT METHOD FOR MONITORING NETWORK ISOLATION PARAMETERS RELATIVE TO THE GROUND IN MATLAB/Simulink

*Khurshedshokh D. Boboev*<sup>1</sup>, *khboboev-93@mail.ru*

*Yuriy I. Aver'yanov*<sup>1</sup>, *aver541710@mail.ru*

*Andrey V. Bogdanov*<sup>1</sup>, *bav-64@mail.ru*

*Igor' L. Kravchuk*<sup>2</sup>, *kravchuk65@mail.ru*

<sup>1</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

<sup>2</sup> Chelyabinsk branch of the Institute of Mining of the UB of RAS, Chelyabinsk, Russia

**Abstract.** The insulation parameters of electrical installations must be determined to find methods to prevent electrical injuries and ensure the safety of operation and reliability of power supply to electricity consumers. By identifying areas showing a steady decrease in insulation during operation and repairing such areas in a timely manner, the reliability of power supply and operational safety can be significantly improved. Complete information about the insulation of electrical installations can be obtained by applying appropriate insulation monitoring methods. The article offers a brief description of existing methods for determining the parameters of network isolation relative to the ground and analyzes

the errors of the indirect method based on connecting to one of the phases of additional capacity. A computer model of the influence of various factors on the accuracy of measurements of the insulation parameters of the network phases relative to the ground was analyzed. The analysis showed that with phase voltage asymmetry and changes in the magnitude and type of load, the measurement error of the proposed method does not exceed 8%.

**Keywords:** quarry distribution networks, insulation level, network isolation parameters relative to the ground

**For citation:** Boboev Kh.D., Aver'yanov Yu.I., Bogdanov A.V., Kravchuk I.L. Error analysis of the indirect method for monitoring network isolation parameters relative to the ground in MATLAB/Simulink. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2022;22(1): 106–116. (In Russ.) DOI: 10.14529/power220112

## Введение

Интенсификация добычи полезных ископаемых открытым способом происходит на базе полной электрификации производства. Современные открытые горные разработки представляют комплекс, насыщенный мощным энергоёмким оборудованием с разветвленной системой электроснабжения [1]. Специфические условия эксплуатации электрооборудования на открытых горных разработках – расположение горнодобывающих машин и пунктов электроснабжения на уступах карьеров под открытым небом, постоянное изменение границ карьера и в связи с этим, перемещение горнодобывающего оборудования и сетей электроснабжения – все это определяет повышенные требования к вопросам электробезопасности [2–9].

Изучение состояния электробезопасности и аварийности карьерных распределительных сетей (КРС) на открытых горных работах показывает, что одним из существенных недостатков эксплуатации этих сетей является отсутствие совершенных систем контроля изоляции [10–14]. Несомненно, что решение этой проблемы позволит значительно сократить аварийность и простои высокопроизводительного оборудования, повысит безопасность обслуживающего персонала и уменьшит вероятность возникновения пожаров на горных работах.

На открытых горных работах наиболее опасным с точки зрения электропоражения являются высоковольтные сети напряжением 6 кВ переменного тока. На их элементы – распределительные устройства, приключательные пункты, кабели, коммутационную аппаратуру и токоприемники – приходится 36,7 % всех электропоражений и 10 % со смертельным исходом [15]. Анализ причин этих электротравм показывает, что большинство из них явились следствием нарушения или невыполнения правил и инструкций по технике безопасности.

Для предотвращения и предупреждения случаев электротравматизма и повышения электробезопасности обслуживающего персонала, а также сокращения простоев горных машин и механизмов большое значение имеет непрерывный контроль изоляции в карьерных сетях 6 кВ [16–18]. Современный карьер представляет собой полностью электрифицированное предприятия для открытой добычи полезного ископаемого. Открытые разработки – это наиболее механизированная отрасль,

насыщенная разнообразным энергоёмким оборудованием. Основным видом повреждений линий электропередачи напряжением 6 кВ являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ). Их число достигает до 90 % общего количества повреждений [19–22].

Причиной повреждений КРС в большинстве случаев является снижение сопротивления изоляции. Для прогнозирования таких случаев необходимы непрерывный контроль сопротивления изоляции и автоматическое отключение участка линии до момента наступления аварии [23–26]. Необходимо отметить, что доля механических повреждений изоляции незначительна. Для кабельной части КРС она составляет 5–6 % общего числа повреждений кабеля, для воздушной – до 20 % [27]. Таким образом, большая часть повреждений линий происходит по причине старения изоляции – процесса, распределённого во времени. При решении вопросов повышения безопасности и надежности карьерного электроснабжения и оборудования необходимо уделять первостепенное внимание контролю изоляции как всей электросистемы, так и ее элементов.

Таким образом, в процессе эксплуатации возникает необходимость периодического контроля изоляции КРС относительно земли. Кроме того, для правильного выбора параметров устройств защиты от ОЗЗ, уставок и проверки устройств контроля изоляции и решения вопросов надежной эксплуатации сетей необходимо знать параметры их сопротивления изоляции. Следует подчеркнуть, что величины сопротивления изоляции также определяют опасность возникновения пожара. В настоящее время разработан и применяется ряд методов контроля состояния изоляции. Однако применение их не всегда оказывается эффективным.

## Методы контроля изоляции

Недопустимое снижение изоляции любого из элементов электрооборудования или электрической сети вследствие старения изоляционного материала, отсыревания изоляции, механических повреждений и т. д. приводит к появлению электроопасных ситуаций. Правила устройства электроустановок совершенно не учитывают специфику условий работы электрооборудования горных работ и не нормируют величины параметров изоляции сети относительно земли элементов электрооборудования.

Величины полного сопротивления изоляции сети относительно земли, а также его активной и емкостной составляющих являются исходными данными при проектировании и выборе средств контроля изоляции и защитных устройств, а также при определении периодичности и характера профилактических мероприятий, направленных на повышение надежности и долговечности электрооборудования.

Указанные параметры можно определить либо аналитически, либо экспериментально [1, 2, 28, 29]. В настоящее время существуют достаточно простые и точные формулы для расчета величины тока замыкания на землю и сопротивления изоляции в общепромышленных сетях с изолированной нейтралью по величине длины воздушных и кабельных линий, электрически связанных между собой. Однако на открытых горных работах, где условия эксплуатации сетей электроснабжения значительно отличаются от условий промышленных стационарных сетей, где сопротивление изоляции относительно земли зависит в большей мере от условий окружающей среды и условий эксплуатации и где имеется большое число энергоемкого оборудования, применение этих формул дает значительные погрешности в получаемых результатах (30 %, в некоторых случаях больше) [3].

Экспериментальные измерения в сетях проводятся либо прямым, либо косвенными методами (рис. 1). Для прямого метода производят искусственное металлическое замыкание одной из фаз на землю, что крайне нежелательно по целому ряду причин. При металлическом замыкании на землю при переходном процессе возникают перенапряжения на здоровых фазах относительно земли. В этом случае возможен переход однофазного замыкания в двухфазное короткое замыкание на

землю в различных точках сети. На корпусах электрооборудования возникают потенциалы, опасные для обслуживающего персонала, устранить которые простыми средствами не представляется возможным [3, 30–32].

Проведенный анализ существующих методов [1, 8, 33–35] показал, что в настоящее время на практике в сетях с изолированной нейтралью для определения параметров изоляции используется либо подключение дополнительной активной проводимости, либо подключение дополнительной емкости.

Необходимо отметить, что при подключении активной проводимости требуется рассеивать значительную мощность (10 кВт и выше), в результате чего неизбежен значительный температурный дрейф параметров дополнительной активной проводимости, что существенно увеличит погрешность результатов измерений. Кроме того, следует учитывать отсутствие доступных промышленных образцов высоковольтных активных проводимостей, пригодных для использования в установках напряжением выше 1000 В.

Анализ известных методов, практика применения их в реальных электрических сетях показывают, что в качестве дополнительной емкости целесообразно использовать силовые конденсаторы, применяемые в конденсаторных установках, предназначенных для компенсации реактивной мощности и регулирования напряжения.

#### Компьютерная модель

С целью оценки влияния на точность определения параметров изоляции фаз сети относительно земли была разработана компьютерная модель с использованием MATLAB/Simulink (рис. 2) [36–39], а также проверена ее адекватность. Следует отметить,

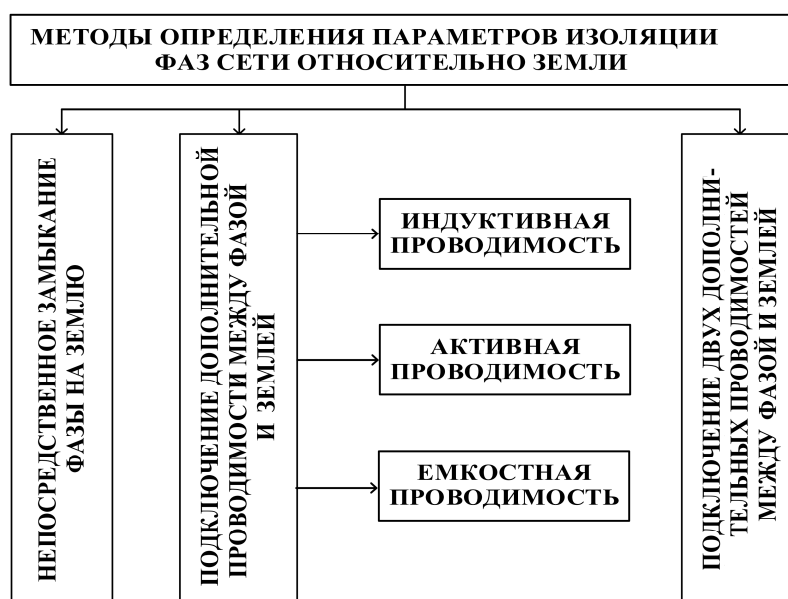


Рис. 1. Классификация методов контроля изоляции сети относительно земли  
Fig. 1. Classification of methods for monitoring network isolation relative to the ground

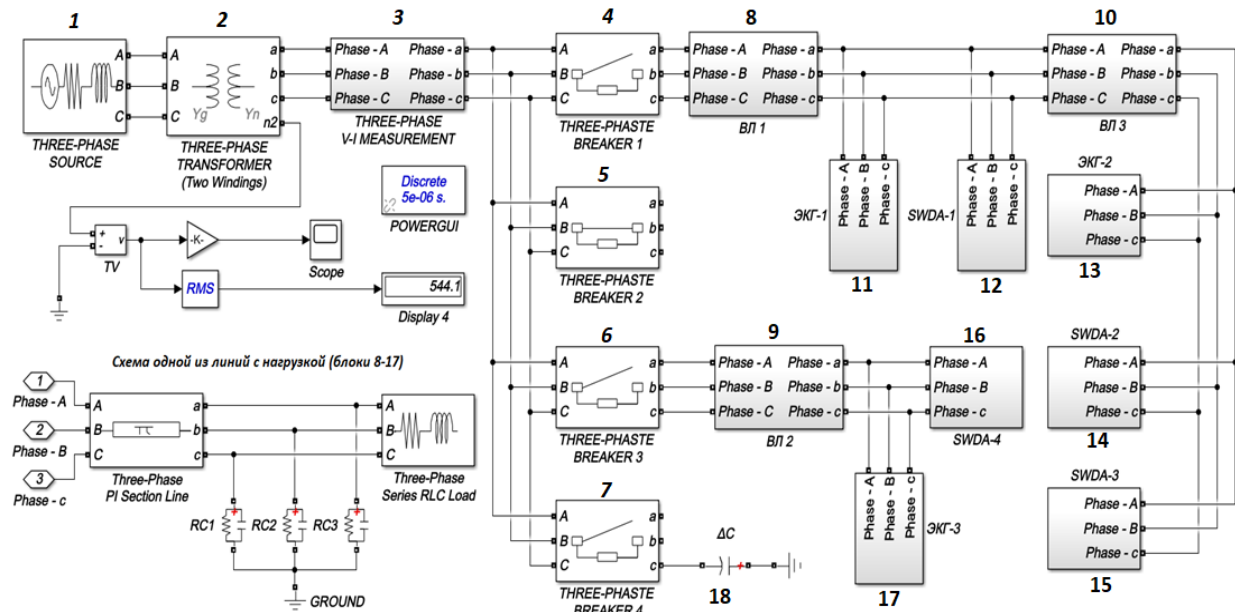


Рис. 2. Общий вид разработанной компьютерной модели  
Fig. 2. Schematic of the developed computer model

что компьютерная модель и ее блоки были подробно рассмотрены в [1, 8, 31, 36, 37].

Исследования погрешностей косвенного метода, основанного на подключении к одной из фаз дополнительной емкости при естественной несимметрии в сети и изменении вида и величины нагрузки в ней, проводились на данной компьютерной модели.

Необходимо особо отметить, что при моделировании КРС использованы стандартные блоки из библиотеки SimPowerSystem. Разработанная модель включает в себя следующие основные блоки:

- Блок 1 – энергосистема напряжением 35 кВ, которая моделируется с помощью стандартного блока Three-Phase Source;
- Блок 2 – трансформатор был смоделирован при помощи стандартного блока Three-Phase Transformer Inductance Matrix Type (Two Windings);
- Блок 3 – измерительный прибор для определения величин напряжений и токов в фазах;
- Блоки 4–7 – выключатели;
- Блоки 8–17 – моделирующие воздушные и кабельные линии с экскаваторами и буровыми станками;
- Блок 18 – дополнительная емкость для создания несимметрии;
- Display предназначен для представления числовых значений измеряемых величин на экране;
- RMS служит для измерения действующего значения сигнала, поступающего на вход;
- А, В, С – обозначение фаз на входе блока;
- а, b, с – обозначение фаз на выходе блока;
- Блоки RC1–RC3 – ветви для интерпретации сопротивления изоляции фаз сети относительно земли.

Адекватность указанной модели была проверена на основе реальной КРС одного из горнодобывающих предприятий Республики Таджикистан. Ее адекватность проверялась по величине  $I_{O33}$ . Результаты, полученные на имитационной модели и при аналитическом расчете, имели небольшое расхождение (не более 5 %), что позволяет считать адекватной имитационную модель.

### Результаты исследований

На разработанной модели проведены исследования влияния различных факторов на результаты определения параметров изоляции косвенным методом, основанным на подключении к одной из фаз дополнительной емкости.

Исследование погрешностей определения сопротивления изоляции фаз сети относительно земли заключается в раскрытии зависимостей величин установленной активной и емкостной проводимостей изоляции сети относительно земли от несимметрии сети, нагрузки и т. п. Исследования погрешностей определения параметров изоляции фаз сети относительно земли проводились по методике, приведенной в [3].

В таблице приведено влияние характера и величины нагрузки при изменении ее от 0 до 100 % и несимметрии в сети от 0 до 5 % на точность измерения составляющих сопротивления изоляции фаз сети относительно земли.

Выполненные исследования погрешностей определения параметров сети относительно земли показали, что при несимметрии фазных напряжений погрешность измерения не превышает 8 %.

Следует особо отметить, что в КРС всегда наблюдается несимметрия, следовательно, применение методики, разработанной на кафедре «Безопасность

Таблица

Данные о погрешностях (в %) измерений косвенного метода, основанного на подключении к одной из фаз дополнительной емкости при изменении активной, реактивной и полной нагрузок от 0 до 100 % и несимметрии от 0 до 5 %

Table

Measurement errors (in %) of the indirect method based on the connection to one of the phases of an additional capacity when the active, reactive, and full load changes from 0 to 100% and the asymmetry from 0 to 5%

Погрешности измерений		Относительная погрешность $\delta R_{\Phi}$ и $\delta C_{\Phi}$ определения параметров изоляции										
		Изменение нагрузки в сети (в %): 1 – активной, 2 – реактивной, 3 – полной										
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1	$R_{\text{ИЗ}}$	7,5749	7,7962	7,6512	7,7052	7,5583	7,6123	7,6669	7,5486	7,6034	7,2769	7,5701
	$C_{\Sigma}$	-8,2062	-8,4241	-8,2789	-8,3515	-8,2062	-8,2062	-8,2789	-8,1336	-8,2062	-7,8431	-8,2062
	$R_{\text{ИЗ}}$	7,5749	7,7181	7,6636	7,6085	7,7537	7,5277	7,6737	7,6487	7,6234	7,5979	7,5722
2	$C_{\Sigma}$	-8,2062	-8,3515	-8,2789	-8,2062	-8,4241	-8,1336	-8,2789	-8,2789	-8,2789	-8,2062	-8,2062
	$R_{\text{ИЗ}}$	7,57521	7,796023	7,65105	7,70531	7,55805	7,612068	7,6671	7,5493	7,6034	7,27702	7,57059
3	$C_{\Sigma}$	-8,20603	-8,42404	-8,27907	-8,35108	-8,20609	-8,2061	-8,2792	-8,1343	-8,2064	-7,8435	-8,2068
	$R_{\text{ИЗ}}$	6,7586	6,8666	6,9442	6,8527	6,7303	6,8081	6,8553	6,7325	6,8106	6,8580	6,9056
1	$C_{\Sigma}$	-7,2622	-7,4074	-7,4800	-7,3348	-7,1895	-7,3348	-7,3348	-7,1895	-7,3348	-7,3348	-7,4074
	$R_{\text{ИЗ}}$	6,7586	7,1000	6,8413	6,8131	6,7537	6,7249	6,8690	6,8405	6,8117	6,7827	6,7534
2	$C_{\Sigma}$	-7,2622	-7,6253	-7,3348	-7,3348	-7,2622	-7,1895	-7,4074	-7,3348	-7,3348	-7,2622	-7,2622
	$R_{\text{ИЗ}}$	6,75902	6,808035	6,858065	6,908025	6,7561	6,80705	6,683023	6,7345	6,8176	6,69204	6,77505
3	$C_{\Sigma}$	-7,2622	-7,3357	-7,3356	-7,4075	-7,2623	-7,3351	-7,19059	-7,19089	-7,33501	-7,19025	-7,2627
	$R_{\text{ИЗ}}$	5,9588	6,0361	5,9429	5,8496	6,0981	5,9735	6,0513	5,9264	6,0043	5,1907	6,0980
1	$C_{\Sigma}$	-6,3181	-6,3907	-6,3181	-6,2455	-6,4633	-6,3181	-6,4633	-6,3181	-6,3907	-5,4466	-6,4633
	$R_{\text{ИЗ}}$	5,9588	5,8959	6,0356	5,9725	5,9404	6,0820	6,0501	6,0180	5,9856	5,9529	5,9523
2	$C_{\Sigma}$	-6,3181	-6,2455	-6,3907	-6,3181	-6,3181	-6,4633	-6,4633	-6,3907	-6,3907	-6,3181	-6,3181
	$R_{\text{ИЗ}}$	5,95902	5,97403	6,020254	5,89303	5,94012	5,987015	6,066012	5,937012	6,0171	5,88712	5,75533
3	$C_{\Sigma}$	-6,31805	-6,31806	-6,39108	-6,24509	-6,31807	-6,39104	-6,46303	-6,31801	-6,39112	-6,2451	-6,10158

1	$R_{\text{ИЗ}}$	5,1907	5,0959	5,2049	5,0781	5,1556	5,0285	6,5377	5,1521	5,2300	5,2762
	$C_{\Sigma}$	-5,4466	-5,3740	-5,5192	-5,3740	-5,4466	-5,3014	-6,9717	-5,4466	-5,5192	-5,5919
	$R_{\text{ИЗ}}$	5,0464	5,1839	5,1485	5,2876	5,0446	5,2167	5,1809	5,1447	5,1083	5,1045
2	$C_{\Sigma}$	-5,3740	-5,4466	-5,4466	-5,5919	-5,3014	-5,5192	-5,4466	-5,4466	-5,3740	-5,3740
	$R_{\text{ИЗ}}$	5,11401	5,19812	5,06713	5,10901	5,1521	5,22812	5,09402	5,17085	5,2471	5,1451
	$C_{\Sigma}$	-5,3741	-5,5191	-5,3044	-5,3741	-5,4473	-5,5191	-5,3743	-5,4473	-5,5191	-5,4473
1	$R_{\text{ИЗ}}$	5,7480	5,7633	5,6673	5,7466	5,8261	5,6978	5,7774	5,8572	5,7285	5,7762
	$C_{\Sigma}$	-6,1002	-6,1002	-6,0276	-6,1002	-6,1728	-6,0276	-6,1002	-6,1002	-6,2455	-6,1002
	$R_{\text{ИЗ}}$	5,7480	5,8572	5,8240	5,7905	5,7567	5,7553	5,7211	5,6866	5,6849	5,8654
2	$C_{\Sigma}$	-6,1002	-6,2455	-6,1728	-6,1728	-6,1002	-6,1002	-6,1002	-6,0276	-6,0276	-6,2455
	$R_{\text{ИЗ}}$	5,7484	5,8736	5,7427	5,8222	5,69065	5,77025	5,66901	5,75078	5,8641	5,76301
	$C_{\Sigma}$	-6,1095	-6,245	-6,1095	-6,1734	-6,0284	-6,1095	-6,0284	-6,1095	-6,2457	-6,1095
1	$R_{\text{ИЗ}}$	6,7558	6,7730	6,6771	6,7582	6,8396	6,7113	6,7928	6,8744	6,7458	6,6168
	$C_{\Sigma}$	-7,2622	-7,2622	-7,1895	-7,2622	-7,3348	-7,1895	-7,2622	-7,4074	-7,2622	-7,1169
	$R_{\text{ИЗ}}$	6,7558	6,6964	6,6663	6,6360	6,8182	6,6073	6,7909	6,7935	6,5799	6,5817
2	$C_{\Sigma}$	-7,2622	-7,1895	-7,1169	-7,1169	-7,3348	-7,0443	-7,2622	-7,2622	-7,0443	-7,0443
	$R_{\text{ИЗ}}$	6,7563	6,7145	6,7983	6,6714	6,7561	6,6592	6,5623	6,8655	6,7682	6,7045
	$C_{\Sigma}$	-7,2622	-7,19067	-7,2621	-7,1171	-7,2622	-7,1171	-7,0445	-7,4071	-7,2622	-7,19067

жизнедеятельности» ЮУрГУ, дает наименьшую погрешность и она может быть использована при проведении исследований интересующих нас параметров КРС на открытых горных разработках.

На основании проведенных исследований с помощью разработанной компьютерной модели и полученных результатов можно сделать вывод, что характер и величина нагрузки, а также несимметрия сети во время измерений влияют на точность измерения незначительно.

#### **Выводы**

1. Измерение параметров изоляции сети относительно земли необходимо для рациональной

организации профилактического обслуживания электроустановок, а также для разработки норм на допустимые значения указанных параметров, нормирования уставок аппаратов защиты и проектирования электроустановок.

2. Проведенные исследования показали, что при несимметрии сети, а также при изменении величины нагрузки погрешность определения параметров изоляции не превышает 8,3 %.

3. Выполненный анализ погрешностей данного метода позволяет рекомендовать его для карьерных распределительных сетей, характеризующихся сравнительно высоким уровнем естественной несимметрии напряжения.

#### **Список литературы**

1. Сидоров А.И., Бобоев Х.Д. Исследование погрешностей косвенного метода измерения параметров изоляции фаз сети относительно земли на имитационной модели // *Безопасность труда в промышленности*. 2020. № 9. С. 24–29. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-9-24-29
2. *Электробезопасность в горнодобывающей промышленности* / Л.В. Гладилин, В.И. Щуцкий, Ю.Г. Бацежев, Н.И. Чеботаев. М.: Недра, 1977. 327 с.
3. Сидоров А.И. Теория и практика системного подхода к обеспечению электробезопасности на открытых горных работах: дис. ... д-ра техн. наук: 05.26.01 / Сидоров Александр Иванович. Челябинск. 1993. 444 с.
4. Moloi K., Yusuff A.A. Power Distribution System Fault Diagnostic Using Genetic Algorithm and Neural Network // 2021 Southern African Universities Power Engineering Conference/Robotics and Mechatronics/Pattern Recognition Association of South Africa (SAUPEC/RobMech/PRASA). 2021. P. 1–5. DOI: 10.1109/SAUPEC/RobMech/PRASA52254.2021.9377241
5. Perera N., Rajapakse A.D., Buchholzer T.E. Isolation of Faults in Distribution Networks with Distributed Generators // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2008. Vol. 23, no. 4. P. 2347–2355. DOI: 10.1109/TPWRD.2008.2002867
6. *Электробезопасность на открытых горных работах* / В.И. Щуцкий, А.И. Сидоров, Ю.В. Ситчихин, Н.А. Бендяк. М.: Недра, 1996. 266 с.
7. *Электробезопасность на открытых горных работах* / В.И. Щуцкий, А.М. Маврицын, А.И. Сидоров, Ю.В. Ситчихин. М.: Недра, 1983. 192 с.
8. Исследование косвенных методов определения параметров изоляции на компьютерной модели / А.И. Сидоров, Х.Д. Бобоев, Ю.В. Медведева, Ш.С. Саьдуллозода // *Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности*. 2021. № 1. С. 47–54. DOI: 10.25558/VOSTNII.2021.32.20.005
9. Liang M.Y., Dian S.Y., Liu T. Insulation status mobile monitoring for power cable based on a novel fringing electric field method // *Lecture Notes in Electrical Engineering* 138 LNEE. 2012. P. 987–994. DOI: 10.1007/978-1-4471-2467-2\_116
10. Utegulov B.B. Analysis of the error of the developed method of determination the active conductivity reducing the insulation level between one phase of the network and ground, and insulation parameters in a non-symmetric network with isolated neutral with voltage above 1000 V // *International Conference “Actual Problem of Electromechanics and Electrotechnology”*. Institute of Physics Publishing. 2018. P. 012–015. DOI: 10.1088/1757-899x/313/1/012015
11. Волоковской С.А., Щуцкий В.И., Чеботаев Н.И. *Электрификация открытых горных работ: учеб. для вузов*. М.: Недра. 1987. 332 с.
12. Организация контроля изоляции в распределительной сети карьера «Гаррор» / Х.Д. Бобоев, Ю.И. Аверьянов, А.В. Богданов, И.Л. Кравчук // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. 2021. Т. 21, № 4. С. 57–65. DOI: 10.14529/power210407
13. Сидоров А.И., Петров О.А., Ушаков И.М. Погрешность косвенного способа измерения емкостных проводимостей относительно земли в электрических сетях напряжением 6...10 кВ // *Электричество*. 1990. № 10. С. 33–36.
14. Utegulov B. Method for determining the single-phase ground fault current in a three-phase electrical network with an isolated neutral // *Proceedings – 2019 6th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, ICEEE 2019: Istanbul*. 2019. P. 24–27. DOI: 10.1109/ICEEE2019.2019.00012
15. Мирошкин П.П. Повышение электробезопасности и надежности электроснабжения горных предприятиях черной металлургии // *Электробезопасность на горнорудных предприятиях черной металлургии СССР*. Днепропетровск, 1975. С. 14–17.

16. Сидоров А.И., Петуров В.И., Косоротова Ю.В. Непрерывный контроль изоляции в распределительных электрических сетях // Наука – Производство – Технологии – Экология: сб. материалов всерос. науч.-техн. конф. Киров: Изд-во ВятГУ, 2002. Т. 2. С. 32.
17. Zhang Q., Tang H. Diagnosis of inhomogeneous insulation degradation in electric cables by distributed shunt conductance estimation // Control Engineering Practice. 2013. 21 (9). P. 1195–1203. DOI: 10.1016/j.conengprac.2013.04.006
18. Бобоев Х.Д. Анализ методов контроля изоляции в карьерных сетях напряжением 6 кВ // Техносферная безопасность в XXI веке: сб. науч. тр. магистрантов, аспирантов и молодых ученых, Иркутск, 26–27 ноября 2019 года. Иркутск: ИРНТУ, 2019. С. 234–239.
19. Щуцкий В.И. Метод определения параметров изоляции трехфазных электрических сетей с изолированной нейтралью напряжением выше 1000 В // Электробезопасность на открытых и подземных горных работах. Днепропетровск, 1982. С. 77.
20. Бобоев Х.Д., Богданов А.В. Параметры изоляции относительно земли в карьерных распределительных сетях горнодобывающих предприятий Республики Таджикистан // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2021. Т. 21, № 1. С. 29–37. DOI: 10.14529/power210103
21. Сидоров А.И. Основы электробезопасности. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. 343 с.
22. Krasnykh A.A., Krivoshein I.L., Kozlov A.L. Single-phase earth fault location in a branched distribution network 6–35 kV of overhead lines // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Chelyabinsk, 2016. P. 1–4. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911013
23. Лапченков К.В., Дубовой А.В., Сидоров А.И. Определение параметров изоляции относительно земли с изолированной нейтралью косвенным методом // Технологии, методы, средства: тез. докл. регион. науч.-техн. конф. Норильск: НИИДИ, 1996. С. 42.
24. Shinkarenko G.V. Determination of the Dielectric Characteristics of Electric Equipment Insulation in the Presence of Utility-Frequency Interference Currents // Power Technology and Engineering. 2016. 50 (3). P. 341–346. DOI: 10.1007/s10749-016-0709-4
25. Using ultraviolet imaging method to detect the external insulation faults of electric device / C.Ye. Zang, H.H. Lei, S. He, X. Zhao // Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP 5377769. 2009. P. 26–30. DOI: 10.1109/CEIDP.2009.5377769
26. Косоротова Ю.В. Разработка системы непрерывного контроля изоляции в распределительных электрических сетях 6–35 кВ // Конкурс грантов студентов, аспирантов и молодых ученых вузов Челябинской области: сб. рефератов науч.-исследоват. работ студентов. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. С. 67–68.
27. Сельницын А.А., Сидоров А.И., Бендяк Н.А. Способ определения изоляции сетей с изолированной нейтралью напряжением 6–35 кВ // Контроль изоляции в распределительных сетях: тез. докл. науч.-практ. конф. Челябинск: ЧГТУ, 1992. С. 13.
28. Лапченков К.В. Управление состоянием изоляции в распределительных электрических сетях: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / Лапченков Константин Владимирович. Челябинск, 1998. 18 с.
29. Boboev K., Sidorov A., Khanzhina O. Determining Ground Insulation Parameters in Quarry Distribution Networks of Mining Companies in Tajikistan // Proceedings – 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2020, Chelyabinsk, 22–24 сентября 2020 года. Chelyabinsk, 2020. P. 344–348. DOI: 10.1109/UralCon49858.2020.9216311
30. Сидоров А.И., Бендяк Н.А., Степанов С.Н. Определение параметров сетей с изолированной нейтралью относительно // Контроль изоляции в распределительных сетях: тез. докл. науч.-практ. конф. Челябинск, 1992. С. 12.
31. Boboev K., Sidorov A., Davlatov A. Evaluation of Indirect Methods for Determining the Isolation Parameters of the Network Phases Relative to the Ground on a Computer Model // 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2021. P. 556–560. DOI: 10.1109/UralCon52005.2021.9559538
32. Контроль изоляции в распределительных сетях: тез. докл. науч.-практ. конф. Челябинск: ЧГТУ, 1992. 34 с.
33. Сидоров А.И., Бобоев Х.Д. Анализ методов исследования параметров изоляции электрических сетей напряжением 6 кВ // Экология. Риск. Безопасность: материалы Всерос. науч.-практ. конф., Курган, 29–30 октября 2020 года. Курган: Курганский государственный университет, 2020. С. 273–275.
34. Бобоев Х.Д. Анализ и оценка косвенных методов определения параметров изоляции сетей напряжением выше 1000 В // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2021. № 10. С. 46–50.
35. Бобоев Х.Д. Обзор методов и средств поддержания состояния изоляции распределительных электрических сетей // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2022. № 1. С. 46–50.
36. Сидоров А.И., Бобоев Х.Д. Имитационная модель карьерной распределительной сети напряжением 6 кВ // Научный поиск: материалы двенадцатой науч. конф. аспирантов и докторантов, Челябинск, 17–19 марта 2020 года. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2020. С. 18–23.



37. Сидоров А.И., Бобоев Х.Д. Компьютерная модель карьерной распределительной сети // Безопасность технологических процессов и производств: тр. III Междунар. науч.-практ. конф., Екатеринбург, 26 мая 2021 года. Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2021. С. 85–87. DOI: 10.46689/2218-5194-2021-4-1-14-23
38. Сидоров А.И., Бобоев Х.Д. Характеристика горнодобывающих предприятий Республики Таджикистан // Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии: сб. материалов VII Междунар. науч.-практ. конф., Челябинск, 03–04 октября 2019 года. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2019. С. 166–169.
39. Разработка компьютерной модели карьерной распределительной сети напряжением 6 кВ / Х.Д. Бобоев, А.М. Давлатов, Б.И. Косимов, Р.Т. Абдуллозода // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2022. № 2. С. 3–8.

### References

1. Sidorov A.I., Boboev Kh.D. [Investigation of the errors of the indirect method of measuring the parameters of the isolation of the phases of the network relative to the ground on a simulation model]. *Occupational safety in industry*. 2020(9):24–29. (In Russ.) DOI: 10.24000/0409-2961-2020-9-24-29
2. Gladilin L.V., Shchutsky V.I., Batsezhev Yu.G., Chebotaev N.I. *Elektrobezopasnost' v gornodobyvayushchey promyshlennosti* [Electrical Safety in the Mining Industry]. Moscow: Nedra, 1977. 327 p. (In Russ.)
3. Sidorov A.I. *Teoriya i praktika sistemnogo podkhoda k obespecheniyu elektrobezopasnosti na otkrytykh gornykh rabotakh: dis. d-ra tekhn. nauk* [Theory and practice of a systematic approach to ensuring electrical safety in open pit mining. Doct. sci. diss.]. Chelyabinsk, 1993. 444 p. (In Russ.)
4. Moloi K., Yusuff A. A. Power Distribution System Fault Diagnostic Using Genetic Algorithm and Neural Network. In: *2021 Southern African Universities Power Engineering Conference/Robotics and Mechatronics/Pattern Recognition Association of South Africa (SAUPEC/RobMech/PRASA)*; 2021. P. 1–5. DOI: 10.1109/SAUPEC/RobMech/PRASA52254.2021.9377241
5. Perera N., Rajapakse A.D., Buchholzer T.E. Isolation of Faults in Distribution Networks with Distributed Generators. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2008;23(4):2347–2355. DOI: 10.1109/TPWRD.2008.2002867
6. Shchutskiy V.I., Sidorov A.I., Sitchikhin Yu.V., Bendyak N.A. *Elektrobezopasnost' na otkrytykh gornykh rabotakh* [Electrical safety in open pit mining]. Moscow: Nedra, 1996. 266 p. (In Russ.)
7. Shchutskiy V.I., Mavritsyn A.M., Sidorov A.I., Sitchikhin Yu.V. *Elektrobezopasnost' na otkrytykh gornykh rabotakh* [Electrical safety in open pit mining]. Moscow: Nedra, 1983. 192 p. (In Russ.)
8. Sidorov A.I., Boboev Kh.D., Medvedeva Yu.V., Sadullozoda Sh.S. [Investigation of indirect methods for determining the insulation parameters on a computer model]. *Bulletin of the Eastern Scientific Research Institute Scientific Center for Industrial and Environmental Safety*. 2021;(1):47–54. (In Russ.) DOI: 10.25558/VOSTNII.2021.32.20.005
9. Liang M.Y., Dian S.Y., Liu T. Insulation status mobile monitoring for power cable based on a novel fringing electric field method. In: *Lecture Notes in Electrical Engineering 138 LNEE*; 2012. P. 987–994. DOI: 10.1007/978-1-4471-2467-2\_116
10. Utegulov B.B. Analysis of the error of the developed method of determination the active conductivity reducing the insulation level between one phase of the network and ground, and insulation parameters in a non-symmetric network with isolated neutral with voltage above 1000 V. In: *International Conference "Actual Problem of Electromechanics and Electrotechnology" Institute of Physics Publishing*; 2018. P. 012–015. DOI: 10.1088/1757-899x/313/1/012015
11. Volokovskoy S.A., Shchutskiy V.I., Chebotayev N.I. *Elektrifikatsiya otkrytykh gornykh rabot: ucheb. dlya vuzov* [Electrification of Surface Mining: A University Textbook]. Moscow: Nedra; 1987. 332 p.
12. Boboev Kh.D., Averyanov Yu.I., Bogdanov A.V., Kravchuk I.L. Isolation Control in the “Terror” Quarry Distribution Network. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2021;21(4):57–65. (In Russ.) DOI: 10.14529/power210407
13. Sidorov A.I., Petrov O.A., Ushakov I.M. [The error of the indirect method of measuring the capacitive conductance relative to the ground in electrical networks with a voltage of 6...10 kV]. *Elektrichestvo*. 1990;(10):33–36. (In Russ.)
14. Utegulov B. Method for determining the single-phase ground fault current in a three-phase electrical network with an isolated neutral. In: *Proceedings – 2019 6th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, ICEEE 2019: Istanbul*; 2019. P. 24–27. DOI: 10.1109/ICEEE2019.2019.00012
15. Miroshkin P.P. [Improving electrical safety and reliability of power supply to mining enterprises of ferrous metallurgy]. In: *Elektrobezopasnost' na gornorudnykh predpriyatiyakh chernoy metallurgii SSSR* [Electrical safety at mining enterprises of ferrous metallurgy of the USSR]. Dnepropetrovsk; 1975. P. 14–17. (In Russ.)
16. Sidorov A.I., Peturov V.I., Kosorotova Yu.V. [Continuous monitoring of insulation in electrical distribution networks]. In: *Nauka – Proizvodstvo – Tekhnologiya – Ekologiya: sb. materialov vseros. nauch.-tekhn. konf.*

[Science – Production – Technology – Ecology: Sat. materials of the All-Russian scientific and technical conference]. Kirov; 2002:2. P. 32. (In Russ.)

17. Zhang Q., Tang H. Diagnosis of inhomogeneous insulation degradation in electric cables by distributed shunt conductance estimation. *Control Engineering Practice*. 2013;21(9):1195–1203. DOI: 10.1016/j.conengprac.2013.04.006

18. Boboev Kh.D. [Analysis of methods of control of isolation in career networks with voltage of 6 kV]. In: *Tekhnosfernaya bezopasnost' v XXI veke. Sbornik nauchnykh trudov magistrantov, aspirantov i molodykh uchenykh* [IX All-Russian scientific and practical conference “Technosphere security in the XXI century”]. Irkutsk; 2019. P. 234–239. (In Russ.)

19. Shchutsky V.I. [Method for determining the insulation parameters of three-phase electrical networks with isolated neutral voltage above 1000 V]. In: *Elektrobezopasnost' na otkrytykh i podzemnykh gornykh rabotakh* [Electrical safety in open pit and underground mining]. Dnepropetrovsk; 1982. P. 77. (In Russ.)

20. Boboev Kh.D., Bogdanov A.V. Parameters of Insulation Relative to the Ground in Quarry Distribution Networks of Mining Enterprises in the Republic of Tajikistan. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2021;21(1):29–37 (In Russ.) DOI: 10.14529/power210103

21. Sidorov A.I. *Osnovy elektrobezopasnosti* [Basics of electrical safety]. Chelyabinsk; 2001. 343 p. (In Russ.)

22. Krasnykh A.A., Krivoshein I.L., Kozlov A.L. Single-phase earth fault location in a branched distribution network 6–35 kV of overhead lines. In: *2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. Chelyabinsk; 2016. P. 1–4. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911013

23. Lapchenkov K.V., Dubovoy A.V., Sidorov A.I. [Determination of insulation parameters relative to earth with isolated neutral by an indirect method]. In: *Tekhnologii, metody, sredstva: tez. dokl. region. nauch.-tekhn. konf.* [Technologies, methods, means: Abstracts report regional scientific and technical conference]. Norilsk; 1996. P. 42. (In Russ.)

24. Shinkarenko G.V. Determination of the Dielectric Characteristics of Electric Equipment Insulation in the Presence of Utility-Frequency Interference Currents. *Power Technology and Engineering*. 2016;50(3):341–346. DOI: 10.1007/s10749-016-0709-4

25. Zang C.Ye, Lei H.H., He S., Zhao X. Using ultraviolet imaging method to detect the external insulation faults of electric device. In: *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. CEIDP 5377769*; 2009. P. 26–30. DOI: 10.1109/CEIDP.2009.5377769

26. Kosorotova Yu.V. [Development of a system for continuous monitoring of insulation in electrical distribution networks 6–35 kV]. In: *Konkurs grantov studentov, aspirantov i molodykh uchenykh vuzov Chelyabinskoy oblasti: sbornik referatov nauchno-issledovatel'skikh rabot studentov* [Grant competition for students, graduate students and young scientists of universities of the Chelyabinsk region: Collection of abstracts of research works of students]. Chelyabinsk; 2002. P. 67–68. (In Russ.)

27. Selnitsyn A.A., Sidorov A.I., Bendyak N.A. [A method for determining the isolation of networks with an isolated neutral voltage of 6–35 kV]. In: *Kontrol' izolyatsii v raspredelitel'nykh setyakh: tez dokl. nauchno-praktich. konferentsii* [Insulation control in distribution networks: abstract of reports scientific and practical conferences]. Chelyabinsk; 1992. P. 13. (In Russ.)

28. Lapchenkov K.V. *Upravleniye sostoyaniyem izolyatsii v raspredelitel'nykh elektricheskikh setyakh: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Management of the state of insulation in electrical distribution networks. Abstract of cand. diss.]. Chelyabinsk; 1998. 18 p. (In Russ.)

29. Boboev K., Sidorov A., Khanzhina O. Determining Ground Insulation Parameters in Quarry Distribution Networks of Mining Companies in Tajikistan. In: *Proceedings – 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2020*. Chelyabinsk; 2020. P. 344–348. DOI: 10.1109/UralCon49858.2020.9216311

30. Sidorov A.I., Bendyak N.A., Stepanov S.N. [Determination of the parameters of networks with isolated neutral relative to earth]. In: *Kontrol' izolyatsii v raspredelitel'nykh setyakh: tez. dokl. nauch.-prakt. konf.* [Insulation control in distribution networks: abstracts report scientific and practical conf.]. Chelyabinsk; 1992. P. 12. (In Russ.)

31. Boboev K., Sidorov A., Davlatov A. Evaluation of Indirect Methods for Determining the Isolation Parameters of the Network Phases Relative to the Ground on a Computer Model. In: *2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*; 2021. P. 556–560. DOI: 10.1109/UralCon52005.2021.9559538

32. *Kontrol' izolyatsii v raspredelitel'nykh setyakh: tez. dokl. nauch.-prakt. konf.* [Insulation control in distribution networks: abstracts of reports scientific and practical conferences]. Chelyabinsk; 1992. 34 p. (In Russ.)

33. Sidorov A.I., Boboev Kh.D. [Analysis of research methods for the insulation parameters of electrical networks with a voltage of 6 kV]. In: *Ekologiya. Risk. Bezopasnost': materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Kurgan* [Ecology. Risk. Safety: materials of the All-Russian scientific-practical conference, Kurgan]. Kurgan; 2020. P. 273–275. (In Russ.)

34. Boboev Kh.D. [Analysis and assessment of indirect methods for determining the insulation parameters of networks with voltages above 1000 V]. *Electrical equipment: operation and repair*. 2021;(10):46–50. (In Russ.)
35. Boboev H.D. [Review of methods and means of maintaining the state of isolation of distribution electrical networks] *Electrical equipment: operation and repair*. 2022;(1):46–50. (In Russ.)
36. Sidorov A.I., Boboev Kh.D. [Simulation model of a 6 kV quarry distribution network]. In: *Nauchnyy poisk: materialy dvenadtsatoy nauchnoy konferentsii aspirantov i doktorantov* [Scientific search: materials of the twelfth scientific conference of graduate students and doctoral students]. Chelyabinsk; 2020. P. 18–23. (In Russ.)
37. Sidorov A.I., Boboev Kh.D. [Computer model of a career distribution network]. In: *Bezopasnost' tekhnologicheskikh protsessov i proizvodstv: trudy III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Ekaterinburg, 26 maya 2021 goda* [Safety of technological processes and production: Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference, Ekaterinburg, May 26, 2021]. Ekaterinburg: Ural State Mining University, 2021. P. 85–87. DOI: 10.46689/2218-5194-2021-4-1-14-23 (In Russ.)
38. Sidorov A.I., Boboev Kh.D. [Characteristics of mining enterprises of the Republic of Tajikistan]. In: *Sbornik materialov VII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti v tret'yem tysyachelenii"* [Collection of materials of the VII international scientific and practical conference "Life Safety in the third Millennium"]. Chelyabinsk; 2019. P. 166–169. (In Russ.)
39. Boboev H.D., Davlatov A.M., Kasimov B.I., Abdullozoda R.T. [Development of a computer model of a 6 kV quarry distribution network]. *Electrical equipment: operation and repair*. 2022;(2):3–8. (In Russ.)

#### **Информация об авторах**

**Бобоев Хуршедшох Давлаталиевич**, аспирант кафедры «Безопасность жизнедеятельности», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия; khboboev-93@mail.ru.

**Аверьянов Юрий Иванович**, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Безопасность жизнедеятельности», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; aver541710@mail.ru.

**Богданов Андрей Владимирович**, д-р техн. наук, доц., проф. кафедры «Безопасность жизнедеятельности», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; bav-64@mail.ru.

**Кравчук Игорь Леонидович**, д-р техн. наук, проф., директор, Челябинский филиал Института горного дела УрО РАН, Челябинск, Россия; kravchuk65@mail.ru.

#### **Information about the authors**

**Khurshedshokh D. Boboev**, Postgraduate Student of the Department of Life Safety, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; khboboev-93@mail.ru.

**Yuriy I. Aver'yanov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Life Safety, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; aver541710@mail.ru.

**Andrey V. Bogdanov**, Dr. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Prof. of the Department of Life Safety, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; bav-64@mail.ru.

**Igor' L. Kravchuk**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director, Chelyabinsk branch of the Institute of Mining of the UB of RAS, Chelyabinsk, Russia; kravchuk65@mail.ru.

*Статья поступила в редакцию 28.02.2022; одобрена после рецензирования 10.03.2022; принята к публикации 14.03.2022.*

*The article was submitted 28.02.2022; approved after reviewing 10.03.2022; accepted for publication 14.03.2022.*