

ISSN 0536-1028 (Print)

ISSN 2686-9853 (Online)

**IZVESTIYA VYSSHIKH UCHEBNYKH ZAVEDENII  
GORNUI ZHURNAL  
ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ  
ГОРНЫЙ ЖУРНАЛ**

# **ГОРНЫЙ ЖУРНАЛ**

**1**

**2020**



Журнал распространяется по подписке Агентством «Роспечать», подписной индекс 70367.

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ), индексируется агрегатором научных ресурсов EBSCO Publishing, а также Международной базой изданий по наукам о Земле Georef.

Сведения о журнале публикуются в Международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory».

Включен в реферативный журнал и базы данных ВИНТИ РАН.

Электронные выпуски журнала размещены на порталах

Научной электронной библиотеки eLIBRARY.ru (<http://elibrary.ru>),

компании «ИВИС» (<http://ivis.ru>)

и поисковой системы Google Scholar ([scholar.google.com](http://scholar.google.com)).

Журнал доступен в электронно-библиотечной системе издательства «Лань»

(<http://e.lanbook.com>)

и электронно-библиотечной системе IPRbooks (<http://www.iprbookshop.ru>).

Журнал включен в «ПЕРЕЧЕНЬ РЕЦЕНЗИРУЕМЫХ НАУЧНЫХ ИЗДАНИЙ,  
В КОТОРЫХ ДОЛЖНЫ БЫТЬ ОПУБЛИКОВАНЫ ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ  
ДИССЕРТАЦИЙ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК,  
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК»

(в соответствии с распоряжением Минобрнауки России от 28 декабря 2018 г. № 90-р)

В журнале публикуются статьи по следующим группам специальностей научных работников:

05.05.04 – Дорожные строительные и подъемно-транспортные машины (технические науки), 05.05.06 – Горные машины (технические науки), 08.00.05 – Экономика и управление народным хозяйством (по отраслям и сферам деятельности) (экономические науки), 25.00.13 – Обогащение полезных ископаемых (технические науки), 25.00.15 – Технология бурения и освоения скважин (технические науки), 25.00.16 – Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр (технические науки), 25.00.17 – Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений (технические науки), 25.00.18 – Технология освоения морских месторождений полезных ископаемых (технические науки), 25.00.20 – Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика (технические науки), 25.00.21 – Теоретические основы проектирования горнотехнических систем (технические науки), 25.00.22 – Геотехнология (подземная, открытая и строительная) (технические науки), 25.00.35 – Геоинформатика (технические науки), 25.00.36 – Геоэкология (по отраслям) (технические науки)

---

**Р е д а к ц и я**  
Главный редактор Е. Ф. Цыпин  
Зам. главного редактора Ю. И. Лель, М. Г. Бабенко  
Ответственный секретарь Л. А. Решеткина  
Редакторы Л. Г. Соколова, Л. Ю. Парамонова

Перевод И. В. Шайхутдиновой

Компьютерная верстка Ю. Б. Швецовый

---

Подп. в печать 11.02.2020. Дата выхода в свет 17.02.2020  
Формат 70 x 108 1/16. Печать офсетная  
10,5 усл. печ. л., 11,0 уч.-изд. л. Тираж 500 экз. Заказ 6850  
Цена свободная

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-76015 от 19.06.2019 выдано  
Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий  
и массовых коммуникаций

Издатель ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»  
620144, г. Екатеринбург, ГСП, ул. Куйбышева, 30

Редакция «Известия вузов. Горный журнал»  
г. Екатеринбург, пер. Университетский, 7, к. 4101  
тел. (факс) (343) 257-65-59  
E-mail: [gornij\\_journal@ursmu.ru](mailto:gornij_journal@ursmu.ru)  
<http://www.mining-science.ru>

Типография ООО «Издательство УМЦ УПИ»  
620078, г. Екатеринбург, ул. Гагарина, 35а, оф. 2



# ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

УДК 621.316.542.622.012.622.8

DOI: 10.21440/0536-1028-2020-1-113-123

## Однофазные замыкания на землю в сетях 6–10 кВ и электротравматизм на угольных разрезах

Кузьмин С. В.<sup>1\*</sup>, Кузьмин Р. С.<sup>1</sup>, Меньшиков В. А.<sup>1</sup>, Умецкая Е. В.<sup>1</sup>,  
Кузьмин И. С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

\*e-mail: [rutas2004@list.ru](mailto:rutas2004@list.ru)

### Реферат

**Введение.** В статье приводится анализ электротравматизма и однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) в системах электроснабжения 6–10 кВ угольных разрезов в период с 1995 по 2018 г. Показано, что снижение количества ОЗЗ приведет к улучшению условий электробезопасности на угольных разрезах.

**Цель работы.** На основе статистических данных в сетях 6–10 кВ угольных разрезов по ОЗЗ и электротравмам легкой и средней степени тяжести установить взаимосвязь между указанными факторами.

**Методология.** Проведен анализ добычи угля, возникновения однофазных замыканий на землю и изменения электротравматизма за период 1995–2018 гг., что позволило более наглядно и качественно оценить динамику изменения объемов добычи угля, количества ОЗЗ, электротравм и установить взаимосвязь между данными параметрами. Выявленная взаимосвязь между ОЗЗ и электротравмами позволяет обоснованно подойти к улучшению условий электробезопасности за счет сокращения количества ОЗЗ.

**Результаты.** Показаны основные причины возникновения однофазных замыканий на землю в зависимости от временных периодов. Приведены основные направления по снижению однофазных замыканий на землю в системах электроснабжения 6–10 кВ угольных разрезов.

**Выводы.** Существенного снижения количества однофазных замыканий на землю в сетях 6–10 кВ и, как следствие, снижения электротравматизма на угольных разрезах можно добиться за счет эффективного ограничения коммутационных перенапряжений, перенапряжений в режиме однофазных замыканий на землю, достижения высокой селективности защит от замыканий на землю и улучшения качества электрической энергии и ограничения перегрузок электрооборудования и кабельных линий.

**Ключевые слова:** угольный разрез; система электроснабжения 6–10 кВ; однофазное замыкание на землю; электротравматизм.

**Введение.** Современное развитие горной отрасли требует дополнительного совершенствования систем электроснабжения угольных разрезов, карьеров, шахт и рудников, повышения надежности и безопасности их эксплуатации, так как связано с ростом энерговооруженности труда, с повышением единичной мощности технологического оборудования и увеличением объемов добычи полезных ископаемых.

Однофазные замыкания на землю, на долю которых приходится до 76 % аварийных отключений [1], оказывают существенное влияние на уровень электробезопасности и бесперебойности работы систем электроснабжения 6–10 кВ горных предприятий.

Необходимость скорейшего и оперативного восстановления электроснабжения технологического оборудования, связанного с аварийными отключениями, создает предпосылки к электропоражению обслуживающего персонала.

Статистика показывает, что вероятность электропоражения при ликвидации аварий в несколько раз выше, чем при выполнении планово-профилактического обслуживания электроустановок, т. е. электротравматизм тесно связан с аварийностью электрооборудования и систем электроснабжения, а следовательно, с замыканиями на землю [2].

Согласно исследованиям [2, 3] на горных предприятиях, наибольший удельный вес электротравм приходится на электроустановки и системы электроснабжения 6–10 кВ открытых разработок полезных ископаемых.

Рассмотрим взаимосвязь однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) и электротравматизма на угольных разрезах Сибири и Казахстана, так как в данных регионах расположены наиболее мощные месторождения угля, разрабатываемые открытым способом.

**Таблица 1. Распределение объемов добычи угля, количества ОЗЗ и электротравм по трехлетним периодам**

**Table 1. Distribution of coal production, the number of SPGSC and electrical traumas over three-year periods**

Период	Объем добычи угля, млн т	Кол-во ОЗЗ, шт.	Электротравматизм		Изменение параметров по отношению к периоду 1995–1997 гг.			
			Общий	Смертельные случаи	Добыча угля	ОЗЗ	Электротравматизм	
							Общий	Смерт. случаи
1995–1997	222,9	660	6	3	1,00	1,00	1,00	1,00
1998–2000	252,1	785	9	4	1,13	1,19	1,50	1,33
2001–2003	331,4	1551	15	4	1,49	2,35	2,50	1,33
2004–2006	379,1	1824	16	3	1,70	2,76	2,67	1,00
2007–2009	416,2	1965	18	3	1,88	2,98	3,00	1,00
2010–2012	467,4	2588	19	2	2,10	3,90	3,17	0,67
2013–2015	468,9	2939	26	2	2,15	4,45	4,33	0,63
2016–2018	449,2	2674	23	1	2,00	4,05	3,83	0,33
<i>Всего</i>	3000,2	14294	126	22	–	–	–	–

**Методология.** За период с 1995 по 2018 г. была проанализирована динамика добычи угля, возникновения однофазных замыканий на землю и изменения электротравматизма в сетях 6–10 кВ угольных разрезов Сибири и Казахстана. Было проанализировано 14 294 однофазных замыканий на землю и 118 электротравм, которые включали как смертельные случаи, так и электротравмы средней и легкой тяжести.

Анализ выполнялся за трехлетние периоды, что позволило более наглядно и качественно оценить динамику изменения объемов добычи угля, количества ОЗЗ, электротравм и установить взаимосвязь между данными параметрами.

**Результат.** В табл. 1 приведено распределение объемов добычи угля, количества ОЗЗ и электротравм по трехлетним периодам для угольных разрезов, а на рис. 1 представлена динамика изменения указанных параметров по отношению к периоду 1995–1997 гг.

Анализ результатов, представленных в табл. 1 и на рис. 1, показывает, что с увеличением объемов добычи угля на угольных разрезах происходит рост коли-

чества однофазных замыканий на землю и, как следствие, общего электротравматизма, однако количество электротравм со смертельным исходом существенно снижается.

Динамика изменения количества однофазных замыканий на землю практически соответствует изменениям общего электротравматизма на угольных разрезах, что подтверждает устойчивую взаимосвязь указанных параметров.

Наибольшая интенсивность роста количества однофазных замыканий на землю и общего электротравматизма наблюдается в период с 1995 по 2003 и с 2009 по 2015 г. В период с 2003 по 2009 г. практически не наблюдается роста однофазных замыканий на землю и электротравматизма на угольных разрезах, начиная с 2015 г. происходит снижение указанных показателей.

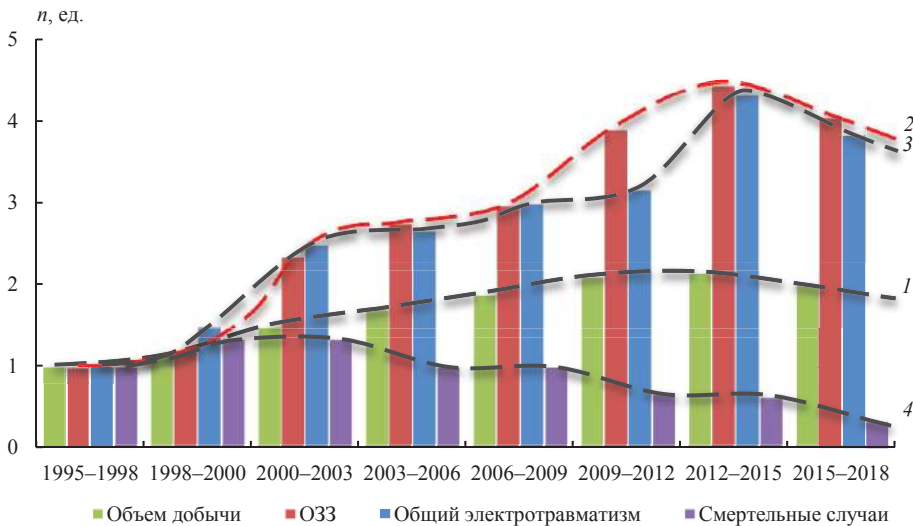


Рис. 1. Динамика изменения объемов добычи угля – 1; однофазных замыканий на землю – 2; общего электротравматизма – 3 и смертельных электротравм – 4

Fig. 1. The dynamics of changes in coal production – 1; single-phase ground short circuits – 2; general electrical traumas – 3 and fatal electrical traumas – 4

Интенсивный рост количества однофазных замыканий на землю и общего электротравматизма в период с 1995 по 2003 г. в первую очередь связан с износом электрооборудования и электрических сетей на угольных разрезах, что сопровождалось пробоем изоляции электрооборудования и кабельных линий, обрывом проводов воздушных ЛЭП напряжением 6–10 кВ. Физический износ коммутационных аппаратов и устройств релейной защиты и автоматики сопровождался несвоевременным отключением аварийных линий и присоединений в системах электроснабжения 6–10 кВ угольных разрезов, что негативно отразилось на условиях электробезопасности. Рост электротравм к 2003 по сравнению с 1995 г. увеличился в 2,5 раза, а количество однофазных замыканий на землю возросло в 2,35 раза.

В период с 2003 по 2009 г. на угольных разрезах модернизируются электроприводы экскаваторов, водоотливных установок, конвейерного транспорта. Широко внедряются вакуумные выключатели. Происходит интенсивная замена кабельных линий. На смену электромеханическим и полупроводниковым реле защиты и автоматики приходят микропроцессорные устройства.

Подобный комплекс мероприятий позволил снизить интенсивность роста однофазных замыканий на землю и общего электротравматизма. Количество одно-

Таблица 2. Количественное и процентное распределение по типам электроприемников и элементам системы электроснабжения угольных разрезов  
 Table 2. Quantitative and percentage distribution by types of power receivers and elements of the power supply system in coal mines

Элемент системы электроснабжения и тип электроприемника	Поврежденные элементы и электроприемники	Количество, шт./удельный вес, %										
		1995–1997	1998–2000	2001–2003	2004–2006	2007–2009	2010–2012	2013–2015	2016–2018			
Распределительная подстанция	Пробой изоляции	1/0,15	2/0,27	3/0,20	2/0,12	2/0,11	3/0,12	3/0,1	2/0,08			
	Пробой изоляции разделки кабеля	11/1,34	12/1,66	23/1,55	25/1,44	21/1,12	26/1,06	23/0,82	11/0,43			
	Перекрытия ввода выключателя	4/0,61	5/0,66	8/0,54	8/0,46	8/0,43	10/0,41	11/0,39	10/0,39			
	Пробой изоляции трансформаторов тока	3/0,5	1/0,13	4/0,27	4/0,23	3/0,16	3/0,12	2/0,07	1/0,04			
	<i>Всего</i>	19/3,0	20/2,66	38/2,56	39/2,25	34/1,82	42/1,78	39/1,38	24/0,94			
Воздушная ЛЭП	Пробой изоляторов	14/2,20	15/2,0	26/1,76	30/1,71	32/1,7	42/1,714	48/1,71	38/1,5			
	Схлестывание проводов	36/5,8	47/6,3	83/5,6	92/5,6	88/4,69	93/3,78	93/3,32	84/3,3			
	Пробой проводов	23/3,7	26/3,47	43/2,9	47/2,7	45/2,4	58/2,36	59/2,1	56/2,2			
	Механическое воздействие на опору	21/3,3	22/2,93	40/2,7	40/2,3	41/2,18	42/1,71	45/1,6	31/1,2			
	<i>Всего</i>	94/15,0	110/14,7	192/12,96	209/12,01	206/10,97	235/9,56	245/8,73	209/8,2			
Приключательный пункт	Пробой изоляторов	7/11	8/1,07	15/1,01	15/0,86	16/0,85	19/0,77	20/0,71	15/0,6			
	Пробой изоляции разделки кабеля	20/3,15	30/4,0	58/3,9	66/3,8	68/3,62	87/3,54	93/3,32	79/3,1			
	Перекрытия ввода выключателя	10/1,6	14/1,87	36/2,43	41/2,36	57/3,04	79/3,21	74/2,64	59/2,3			
	Пробой изоляции трансформаторов тока	1/0,15	1/0,13	2/0,14	2/0,12	2/0,11	4/0,16	7/0,25	8/0,3			
	<i>Всего</i>	38/6,0	53/7,07	111/7,5	124/7,14	143/7,62	189/7,68	194/6,92	161/6,3			



Элемент системы электрооборудования и тип электроприемника	Поврежденные элементы и электроприемники	Количество, шт./удельный вес, %									
		1995–1997	1998–2000	2001–2003	2004–2006	2007–2009	2010–2012	2013–2015	2016–2018		
Кабельная ЛЭП	Пробой изоляции кабеля	86/13,7	97/12,9	157/10,6	144/8,3	101/5,4	79/3,21	80/2,85	82/3,2		
	Пробой изоляции разделки кабеля	52/8,2	70/9,3	172/11,6	256/14,7	293/15,6	504/20,5	697/24,85	714/27,97		
	Обрыв кабеля	34/5,4	36/4,8	64/4,3	37/2,1	68/3,61	75/3,05	77/2,75	56/2,2		
	Механическое воздействие	82/13	73/9,7	121/8,2	73/4,2	125/6,66	134/5,45	129/4,6	107/4,2		
	<i>Всего</i>	366/58,9	407/54,2	755/51	722/41,5	765/40,7	947/38,52	1076/38,37	1082/42,3		
Трансформатор	Пробой изоляции обмоток	38/6	60/8,0	139/9,38	221/12,7	246/13,1	363/14,77	426/15,2	383/15		
Электродвигатель	Пробой изоляции обмоток	76/12	100/13,37	246/16,60	424/24,4	483/25,72	682/27,76	825/29,4	694/27,19		
<b>Всего</b>		631/100	750/100	1481/100	1739/100	1877/100	2458/100	2805/100	2553/100		

фазных замыканий на землю и электротравм по сравнению с 1995 г. увеличилось практически в 3 раза, по сравнению с 2003 г. – в 1,2 раза.

С 2009 по 2015 г. вновь начинается интенсивный рост количества однофазных замыканий на землю и, как следствие, увеличиваются показатели электротравматизма. К 2015 по сравнению с 2009 г. количество однофазных замыканий на землю увеличилось в 1,5 раза, а число электротравм возросло в 1,44 раза.

Данная динамика связана с двумя основными факторами:

– отсутствием проработки вопросов по электромагнитной совместимости нового оборудования, кабельных линий и устройств с реальными условиями эксплуатации на угольных разрезах;

– реструктуризацией угольных разрезов, направленной на оптимизацию структуры управления и технического обслуживания угольных разрезов, что привело к сокращению электротехнического персонала, оттоку опытных специалистов, достигших пенсионного возраста, и к разрушению системы наставничества, что затруднило передачу опыта грамотной и безопасной эксплуатации и ремонта электрооборудования молодым специалистам.

Отсутствие проработки вопросов по электромагнитной совместимости, например, при использовании вакуумных выключателей, привело к использованию низкоэффективной защиты от коммутационных перенапряжений и росту пробоев изоляции электродвигателей [4]. Переход на тиристорные и частотно-регулируемые системы электропривода негативно отразился на качестве электроэнергии из-за наличия высших гармоник тока и напряжения и, как следствие, ухудшилось состояние изоляции кабельных линий и снизилась функциональная надежность микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики, что привело к росту неселективных и ложных срабатываний защит от однофазных замыканий на землю.

Очевидно, что разработка систем, направленных на улучшение электромагнитной обстановки и совместимости на угольных разрезах, позволит снизить количество однофазных замыканий на землю и приведет к уменьшению электротравм.

Например, частичное использование современных гасителей коммутационных перенапряжений типа RC-6,6-0,25/50 УХЛ1 и переход с изолированного режима на резистивный в сетях 6 кВ угольных разрезов позволил обозначить тенденцию к снижению количества однофазных замыканий на землю. Данная тенденция отражена на рис. 1 в периоде с 2015 по 2018 г., количество однофазных замыканий на землю и электротравм в 2018 г. по сравнению с 2015 снизилось соответственно на 10 % и 13 %.

Таким образом, существующая тесная связь электротравматизма с однофазными замыканиями на землю в сети 6–10 кВ угольных разрезов позволит влиять на количество электротравм и условия электробезопасности за счет снижения количества замыканий на землю.

Для разработки технических мероприятий по снижению количества однофазных замыканий на землю был выполнен анализ распределения однофазных замыканий на землю по элементам системы электроснабжения и выявлены основные причины возникновения замыканий на землю.

Распределение по трехлетним периодам однофазных замыканий на землю по элементам системы электроснабжения, повреждение которых было выявлено, показано в табл. 2.

Анализ данных табл. 2 показывает, что за период с 1995 по 2018 г. количество поврежденных элементов распределительных подстанций, приводящих к возникновению ОЗЗ, увеличилось в 1,26 раза.

Количество ОЗЗ, связанных с повреждением воздушных линий, приключательных пунктов и кабельных линий за указанный период соответственно возросло в 2,22; 4,24 и 2,95 раза. При этом пробой изоляции разделок кабелей увеличились в 11 раз. Пробой изоляции обмоток трансформаторов и электродвигателей увеличились соответственно в 10 и 9,13 раза.

**Таблица 3. Распределение ОЗЗ, возникающих в системах электроснабжения 6–10 кВ в зависимости от причин ОЗЗ**

**Table 3. Distribution of SPGSC arising in power supply systems of 6–10 kV depending on SPGSC reasons**

Причины ОЗЗ	Количество, шт./удельный вес, %			
	1995–1997	1998–2000	2001–2003	2004–2006
Внешние (грозовые перенапряжения)	50/8	45/6	118/8	122/7
Коммутационные перенапряжения	38/6	60/8	104/7	191/11
Старение изоляции	265/42	323/43	607/41	678/39
Механическое воздействие	63/10	60/8	134/9	157/9
Перенапряжения в режиме ОЗЗ	152/24	186/25	370/25	417/24
Перегрузка	38/6	38/5	104/7	70/4
Неустановленные причины	25/4	38/5	44/3	104/6
<i>Всего</i>	631/100	750/100	1481/100	1739/100

Причины ОЗЗ	Количество, шт./удельный вес, %			
	2007–2009	2010–2012	2013–2015	2016–2018
Внешние (грозовые перенапряжения)	150/8	98/4	84/3	92/3,6
Коммутационные перенапряжения	450/24	738/30	982/30	803/31,5
Старение изоляции	527/28	639/26	589/21	501/19,6
Механическое воздействие	113/6	147/6	112/4	108/4,2
Перенапряжения в режиме ОЗЗ	506/27	639/26	842/30	685/26,8
Перегрузка	75/4	74/3	84/3	287/11,3
Неустановленные причины	56/3	123/5	112/4	77/3
<i>Всего</i>	1877/100	2458/100	2805/100	2553/100

За период с 1995 по 2003 г. основная доля ОЗЗ свыше 67 % приходилась на кабельные и воздушные линии, для трансформаторов и электродвигателей доля ОЗЗ составила 23 %. В период с 2010 по 2018 г. основная доля ОЗЗ была связана с повреждением изоляции воздушно-кабельных линий (48,5 %), трансформаторов и электродвигателей (43 %).

Данное обстоятельство указывает на то, что в последний период наблюдается интенсивное старение изоляции электродвигателей и трансформаторов, которое в первую очередь связано с длительными сроками их эксплуатации.

На интенсивное старение изоляции обмоток трансформаторов и электродвигателей и средний рост пробоев изоляции разделок кабелей оказывают серьезное влияние не только срок их использования, климатические и технологические условия эксплуатации электрооборудования и кабельных линий на угольных разрезах, но и перенапряжения в сетях 6–10 кВ, что подтверждается анализом факторов, приводящих к повреждению изоляции отдельных элементов системы электроснабжения.

Для определения удельного веса отдельных факторов в образовании ОЗЗ были детально проанализированы условия, при которых наступал пробой изоляции электродвигателей, трансформаторов и кабельных линий.

Если пробой изоляции происходил во время грозы, за основополагающий фактор принималось грозовое перенапряжение. Если пробой изоляции был зафиксирован после коммутационных операций, за основу принимали коммутационные перенапряжения. Если пробой изоляции происходил в рабочем режиме, основной причиной пробоя считалось естественное старение изоляции. Механическое воздействие на изоляцию принималось за причину пробоя изоляции, если при осмотре места пробоя были отчетливо видны механические повреждения. За причину множественных повреждений изоляции в режиме однофазного замыкания на землю принимались перенапряжения, возникающие при дуговом однофазном замыкании на землю. В случае обнаружения повреждений изоляции при срабатывании максимально-токовой защиты основной причиной считалась перегрузка кабельной линии, трансформатора или электродвигателя. Результаты анализа представлены в табл. 3.

Из данных табл. 3 видно, что пробой изоляции кабельно-воздушных линий, электрооборудования, трансформаторов и электродвигателей с 1995 по 2018 г. за счет внешних перенапряжений, старения изоляции и механических воздействий возросли практически в 2 раза. За счет коммутационных перенапряжений и перенапряжений, возникающих в режиме дугового однофазного замыкания на землю, пробой изоляции электродвигателей и элементов в системе электроснабжения соответственно возросли в 21,1 и 4,5 раза.

За счет перегрузки пробой изоляции возросли в 7,6 раза.

Следовательно, для снижения количества однофазных замыканий на землю в системах электроснабжения 6–10 кВ угольных разрезов необходимо исключить множественные повреждения изоляции, эффективно ограничивать коммутационные перенапряжения и не допускать перегрузок электрооборудования, кабельных и воздушных линий.

Исключение множественных пробоев изоляции возможно за счет снижения перенапряжений в режиме дугового однофазного замыкания на землю до уровня  $2U_H$  и достижения стопроцентной селективности защит от замыканий на землю [4].

Величина коммутационных перенапряжений зависит от типа коммутационного аппарата, типа и мощности электродвигателя и трансформатора, а также от качества электрической энергии в сетях 6–10 кВ, но в первую очередь – от гармонического состава тока нагрузки [5, 6].

Исследования показали, что при коэффициенте несинусоидальности кривой тока, равном 30–50 %, кратность коммутационных перенапряжений может возрасти в 1,5–2 раза по сравнению с условиями коммутации, где в токе нагрузки отсутствуют высшие гармоники [7].

Ограничения перегрузок можно добиться за счет эффективной компенсации реактивной мощности и подавления высших гармоник тока.

**Выводы.** Таким образом, существенного снижения количества однофазных замыканий на землю в сетях 6–10 кВ и, как следствие, снижения электротравматизма на угольных разрезах можно добиться за счет эффективного ограничения коммутационных перенапряжений, перенапряжений в режиме однофазных замыканий на землю, достижения высокой селективности защит от замыканий на землю и улучшения качества электрической энергии и ограничения перегрузок электрооборудования и кабельных линий.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Медведева М. Л., Кузьмин С. В., Кузьмин И. С., Шманев В. Д. Анализ и прогноз аварийности распределительных сетей и электроприемников 6–10 кВ горной отрасли // Надежность и безопасность энергетики. 2017. Т. 2. № 2. С. 120–125.

2. Пичуев А. В., Петухов В. И. Анализ причин электротравматизма на горных предприятиях // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: труды XXI Всерос. науч.-техн. конф. Томск: Скан, 2015. С. 198–200.
3. Ляхомский А. В., Купинов А. Г. Анализ электротравматизма на предприятиях горной отрасли // ГИАБ. 2016. № 2. Спец. вып. 7. С. 3–10.
4. Кузьмин С. В., Зыков И. С., Майнагашев Р. А., Яшук К. П. Анализ аварийности в системах электроснабжения горно-металлургических предприятий Сибири // Горное электрооборудование и электромеханика. 2009. № 3. С. 23–25.
5. Кузьмин С. В., Гаврилова Е. В., Барышников Д. В. Влияние процесса дугогашения в высоковольтных выключателях на величину коммутационных перенапряжений, возникающих в сетях 6–10 кВ горнодобывающих предприятий // Горное электрооборудование и электромеханика. 2009. № 2. С. 38–41.
6. Кузьмин С. В., Меньшиков В. А., Гаврилова Е. В., Коровина М. В., Кузьмин И. С. Влияние типа и мощности электродвигателей и типа выключателей на величину коммутационных перенапряжений, возникающих в сетях 6–10 кВ горнодобывающих предприятий // Горное электрооборудование и электромеханика. 2011. № 3. С. 6–9.
7. Гаврилова Е. В. Совершенствование методов оценки, прогнозирования и средств ограничения коммутационных перенапряжений в системах электроснабжения 6–10 кВ: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2011. 20 с.
8. Гаврилова Е. В., Кузьмин С. В., Майнагашев Р. А., Немков С. В. Опыт эксплуатации средств защиты от коммутационных перенапряжений в системах электроснабжения 6 кВ горных предприятий // Горное оборудование и электромеханика. 2011. № 4. С. 53–54.
9. Качесов В. Е. Эскалация перенапряжений в вакуумных выключателях при отключении электродвигателей и их предотвращение с помощью RC-цепочек // Электричество. 2008. № 6. С. 24–35.
10. Кузьмин Р. С. Совершенствование методов и средств снижения однофазных замыканий на землю в распределительных сетях 6–35 кВ промышленных предприятий: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2006. 24 с.
11. Барышников Д. В. Экспресс-методы оценки и прогнозирования коммутационных перенапряжений в системах электроснабжения 6–10 кВ промышленных предприятий: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2010. 18 с.
12. Меньшиков В. А. Методология исследования коммутационных перенапряжений в системах электроснабжения промышленных предприятий напряжением 6–10 кВ и разработка мероприятий и средств по их ограничению: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2006. 22 с.
13. Homce G. T., Cawley J. C. Electrical injuries in the US mining industry, 2000–2009 // Transactions of Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. 2013. Vol. 334. No. 1. P. 367–375.
14. Rappaport E. Does grounding make a system safe? Analyzing the factors that contribute to electrical safety // IEEE Industry Applications Magazine. 2015. Vol. 21. Iss. 3. P. 48–57.
15. Wei Xiangrong. Coal enterprise safety culture on the development of modern miners. Contemporaryminers. Apr. 2011.

Поступила в редакцию 18 июля 2019 года

#### Сведения об авторах:

**Кузьмин Сергей Васильевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры электрификации горно-металлургического производства Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета. E-mail: rutas2004@list.ru

**Кузьмин Роман Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры электрификации горно-металлургического производства Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета. E-mail: rutas2004@list.ru

**Меньшиков Виталий Алексеевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры электрификации горно-металлургического производства Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета. E-mail: menshikov\_va@mail.ru

**Умецкая Екатерина Владимировна** – кандидат технических наук, доцент кафедры электрификации горно-металлургического производства Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета. E-mail: e.v\_gavrilova@mail.ru

**Кузьмин Илья Сергеевич** – старший преподаватель кафедры электрификации горно-металлургического производства Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета. E-mail: r1ml@inbox.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2020-1-113-123

### Single-phase ground short circuits in the 6–10 kV mains and electrical traumas in the coal mines

Kuzmin Sergei V.<sup>1</sup>, Kuzmin Roman S.<sup>1</sup>, Menshikov Vitalii A.<sup>1</sup>, Umetskaia Ekaterina V.<sup>1</sup>, Kuzmin Iliia S.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

### Abstract

**Introduction.** This article provides analysis of electrical traumas and single-phase ground short circuits (SPGSC) in the 6–10 kV electrical systems in the period from 1995 to 2018. It has been shown that reduction in the number of SPGSC will improve electrical safety at coal mines.

Research aim is to determine the interrelation between the indicated factors based on the statistical data in the 6–10 kV mains of coal mines according to SPGSC minor and moderate electrical traumas.

**Methodology.** Coal production, development of single-phase ground short circuit and changes in numbers of injuries in the period from 1995 to 2018 have been analyzed making it possible to vividly and qualitatively estimate the dynamics of changes in coal output, the number of SPGSC, electrical traumas and determine the interrelation between these parameters. The discovered interrelation between SPGSC and electrical traumas allows to handle the problem of improving the electrical safety more seriously by means of reducing the number of SPGSC.

**Results.** This article shows the main reasons of single-phase ground short circuit incidence depending on time. The article shows the main ways to lower the amount of single-phase ground short circuit in the 6–10 kV electrical systems of coal mines.

**Summary.** Significant reduction in the number of single-phase ground short circuit in the 6–10 kV electrical systems and, as a consequence, reduction of electrical traumas at coal mines can be achieved by means of effectively limiting switching overvoltage, overvoltage in the mode of single-phase ground short circuit, reaching high selectivity of protection from ground short circuit and improving the quality of electrical energy, and limiting the overloading of electrical equipment and cables.

**Key words:** coal mine; 6–10 kV electrical system; single-phase ground short circuits; electrical traumas.

### REFERENCES

1. Medvedeva M. L., Kuzmin S. V., Kuzmin I. S., Shmanev V. D. Analysis and forecast of accident rate of 6–10 kV distribution grids and power consumers in the mining sector. *Nadezhnost i bezopasnost energetiki = Safety and Reliability of Power Industry*. 2017; 2 (2): 120–125. (In Russ.)
2. Pichuev A. V., Petukhov V. I. Analysing the reasons for electrical traumas at mining enterprises. In: *Power industry: effectiveness, reliability, and safety: Proceedings of 21st All-Russian Sci. and tech. Conf.* Tomsk: Skan Publishing; 2015. p. 198–200. (In Russ.)
3. Liakhomskii A. V., Kupinov A. G. Analysis of electro traumatism on mining enterprises. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2016; 2 (7): 3–10. (In Russ.)
4. Kuzmin S. V., Zykov I. S., Mainagashev R. A., Iashchuk K. P. The analysis of the accident rate in the system of supplying the mining and metallurgical enterprises of Siberia with the 6–10 kV electric power. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika = Mining Equipment and Electromechanics*. 2009; 3: 23–25. (In Russ.)
5. Kuzmin S. V., Gavrilova E. V., Baryshnikov D. V. The influence of the arc extinction process in high-voltage switches on the commutation overvoltage value appearing in the 6–10 kV circuits of mining enterprises. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika = Mining Equipment and Electromechanics*. 2009; 2: 38–41. (In Russ.)
6. Kuzmin S. V., Menshikov V. A., Gavrilova E. V., Korovina M. V., Kuzmin I. S. The influence of the type and capacity of electric motors and the type of switches on the value of commutation overvoltage appearing in circuits of 6–10 kV at mining enterprises. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika = Mining Equipment and Electromechanics*. 2011; 3: 6–9. (In Russ.)
7. Gavrilova E. V. *Improving the techniques of estimating the forecast and services limiting switching overvoltages in circuits of 6–10 kV: PhD in Engineering Abstr. of Diss.* Krasnoyarsk; 2011. (In Russ.)
8. Gavrilova E. V., Kuzmin S. V., Mainagashev R. A., Nemkov S. V. The experience of operating the protection means against the commutation overvoltage in the systems of supplying mining companies with 6 kV electric power. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika = Mining Equipment and Electromechanics*. 2011; 4: 53–54. (In Russ.)
9. Kachesov V. E. Escalation of overvoltages in vacuum circuit breakers during disconnection of electric motors and preventing them using RC-circuits. *Elektrichestvo = Electricity*. 2008; 6: 24–35. (In Russ.)
10. Kuzmin R. S. *Improving the methods and means of reducing single-phase ground short circuits in distribution circuits of 6–35 kV in industrial plants: PhD in Engineering Abstr. of Diss.* Krasnoyarsk; 2006. (In Russ.)
11. Baryshnikov D. V. *Express methods of estimating and forecasting switching overvoltage in 6–10 kV circuits in industrial plants: PhD in Engineering Abstr. of Diss.* Krasnoyarsk; 2010. (In Russ.)
12. Menshikov V. A. *Methodology of investigating switching overvoltage in 6–10 kV circuits of industrial plants and the means of restricting it: PhD in Engineering Abstr. of Diss.* Krasnoyarsk; 2006. (In Russ.)
13. Homce G. T., Cawley J. C. Electrical injuries in the US mining industry, 2000–2009. *Transactions of Society for Mining, Metallurgy, and Exploration*. 2013; 334 (1): 367–375.
14. Rappaport E. Does grounding make a system safe? Analyzing the factors that contribute to electrical safety. *IEEE Industry Applications Magazine*. 2015; 21 (3): 48–57.
15. Wei Xiangrong. Coal enterprise safety culture on the development of modern miners. *Contemporaryminers. Apr.* 2011.

**Information about authors:**

**Kuzmin Sergei V.** – PhD (Engineering), associate professor of the Department of Electrification of Mining and Smelting Engineering, Institute of Mining, Geology and Geotechnology, Siberian Federal University. E-mail: rutas2004@list.ru

**Kuzmin Roman S.** – PhD (Engineering), associate professor of the Department of Electrification of Mining and Smelting Engineering, Institute of Mining, Geology and Geotechnology, Siberian Federal University. E-mail: rutas2004@list.ru

**Menshikov Vitalii A.** – PhD (Engineering), associate professor of the Department of Electrification of Mining and Smelting Engineering, Institute of Mining, Geology and Geotechnology, Siberian Federal University. E-mail: menshikov\_va@mail.ru

**Umetskaia Ekaterina V.** – PhD (Engineering), associate professor of the Department of Electrification of Mining and Smelting Engineering, Institute of Mining, Geology and Geotechnology, Siberian Federal University. E-mail: e.v\_gavrilova@mail.ru

**Kuzmin Iliia S.** – senior lecturer, Department of Electrification of Mining and Smelting Engineering, Institute of Mining, Geology and Geotechnology, Siberian Federal University. E-mail: r1ml@inbox.ru

**Для цитирования:** Кузьмин С. В., Кузьмин Р. С., Меньшиков В. А., Умецкая Е. В., Кузьмин И. С. Однофазные замыкания на землю в сетях 6–10 кВ и электротравматизм на угольных разрезах // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 1. С. 113–123. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-1-113-123

**For citation:** Kuzmin S. V., Kuzmin R. S., Menshikov V. A., Umetskaia E. V., Kuzmin I. S. Single-phase ground short circuits in the 6–10 kV mains and electrical traumas in the coal mines. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal.* 2020; 1: 112–123 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2020-1-113-123