УДК 621.316.542.622.012.622.8 DOI: 10.21440/0536-1028-2020-5-116-132

Метод оценки и прогнозирования перенапряжений при дуговых однофазных замыканиях на землю в сетях 6–10 кВ как средство повышения уровня электробезопасности на горных предприятиях

Кузьмин Р. С.[1]*, Кузьмин И. С.[1], Меньшиков В. А.[1], Кузьмин С. В.[1], Куликовский В. С.[1]
[1] Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия
e-mail: rutas2004@list.ru

Реферат

Введение. *Основной причиной многоместных повреждений изоляции являются перенапряжения в режиме однофазных замыканий на землю (ОЗЗ). Следовательно, оценка и прогнозирование перенапряжений при ОЗЗ в сетях 6–10 кВ является актуальной задачей, решение которой позволит выбрать эффективные методы и средства по ограничению перенапряжений и улучшить условия электробезопасности.*

Цель работы. *Совершенствование методов оценки и прогнозирования перенапряжений придуговых ОЗЗ в сетях 6–10 кВ горных предприятий.*

Методология. *В статье показано, что существующие гипотезы не в полной мере отражают факторы, влияющие на возникновение максимальных перенапряжений в режиме дугового ОЗЗ в сетях 6–10 кВ, так как не учитывают величину емкостного тока ОЗЗ, условия горения дуги, время существования ОЗЗ и мощность двигателей и трансформаторов.*

Результаты. *Получены зависимости, отражающие взаимосвязь кратности перенапряжения от указанных факторов, которые можно использовать для оценки и прогнозирования перенапряжений в сети 6–10 кВ с различными режимами нейтралей и на их основе обосновывать рациональный режим нейтрали с позиции эффективного ограничения перенапряжений в режиме дугового ОЗЗ.*

Выводы. *Подтверждено, что с позиций электробезопасности сети 6–10 кВ с резистивным или комбинированным режимами нейтралей на горных и горноперерабатывающих предприятиях создают условия для более безопасной эксплуатации технологических комплексов и электрооборудования, так как позволяют снизить максимальные кратности перенапряжений в два раза и тем самым уменьшить количество повторных пробоев изоляции в режиме ОЗЗ.*

Ключевые слова: *горные предприятия; сети 6–10 кВ; однофазное замыкание на землю; перенапряжение; режим нейтрали; электробезопасность.*

Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) в системах электроснабжения 6–10 кВ горных предприятий являются основным видом аварий, так как на долю ОЗЗ приходится от 65 до 76 % аварийных отключений в сетях 6–10 кВ [1, 2].

Установлена взаимосвязь между количеством ОЗЗ в сетях 6–10 кВ и электротравматизмом на угольных разрезах. С ростом количества ОЗЗ увеличивается общий электротравматизм [3]. Основными причинами ОЗЗ являются естественное старение изоляции [3, 4], перенапряжения в режиме ОЗЗ [5, 6] и коммутационные перенапряжения [7–11].

Рассмотрим влияние перенапряжений в режиме ОЗЗ на возможность повторных пробоев изоляции и на рост количества ОЗЗ.

Как правило, ОЗЗ сопровождаются горением дуги, что приводит к возникновению перенапряжений в системе электроснабжения. Каждое третье ОЗЗ в сетях 6 кВ карьеров и угольных разрезов приводит к дополнительному пробою изоляции кабельно-воздушных линий, трансформаторов или электродвигателей, т. е. к образованию многоместных повреждений [12].

Образование многоместных повреждений изоляции электроприемников и кабельно-воздушных линий способствует увеличению количества ОЗЗ и зон, где могут возникнуть опасные напряжения прикосновения и шага. Следовательно, перенапряжения в режиме ОЗЗ негативно влияют на электробезопасность эксплуатации электрооборудования и систем электроснабжения на горных предприятиях.

Для обоснования и выбора эффективных методов и средств ограничения перенапряжений при дуговых ОЗЗ необходимо достоверно оценить величину возможных перенапряжений и сопоставить ее с возможностью пробоя изоляции. Основным показателем величины перенапряжений является их кратность. Кратность перенапряжений в режиме ОЗЗ – это отношение максимально возможной величины перенапряжения к амплитудному значению фазного напряжения, т. е.

$$K_{\text{пер}} = \frac{U_{\max}}{U_{\text{ф}m}},$$

где $U_{\max}$ – максимально возможное значение перенапряжения, В; $U_{\text{ф}m}$ – амплитудное значение фазного напряжения, В.

Данный показатель не совсем удобен для практического использования, так как на всех линиях, электрооборудовании, трансформаторах и электродвигателях указывается номинальное напряжение. Наиболее рациональным и практическим является показатель кратности, отражающий отношение максимально возможной величины перенапряжения к номинальному значению, т. е.

$$K_{\text{пн}} = \frac{U_{\max}}{U_{\text{н}}}, \tag{1}$$

где $U_{\text{н}}$ – номинальное напряжение сети, В.

Принимая во внимание, что

$$U_{\text{н}} = \sqrt{3}U_{\text{ф}}; \qquad U_{\text{ф}} = \frac{U_{\text{ф}m}}{\sqrt{2}}; \qquad U_{\text{н}} = \sqrt{3}\frac{U_{\text{ф}m}}{\sqrt{2}},$$

выражение (1) может быть представлено в виде:

$$K_{\text{пн}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\frac{U_{\text{п}\max}}{U_{\text{ф}m}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}K_{\text{пф}} = 0,82K_{\text{пф}}.$$

Согласно исследованиям И. Я. Эпштейна и А. Ф. Гончарова, применительно к условиям горной отрасли допустимые значения кратностей перенапряжений для изоляции трансформаторов, электродвигателей и кабельных линий, включая разделки и муфты, соответственно равны 4,3; 2,4; 4,3 при условии, что срок эксплуатации не превышает 5 лет. Если срок эксплуатации трансформаторов, электро-

двигателей и кабельных линий более 5 лет, тогда допустимая кратность перенапряжений соответственно будет равна 2,8; 1,8; 2,8, а для разделок кабеля и кабельных муфт данный показатель составит 2,5 [13, 14]. Очевидно, что если кратности перенапряжений в режиме ОЗЗ в реальных условиях эксплуатации систем электроснабжения горных предприятий будут превышать допустимые значения, потребуется разработка технических мероприятий и средств по их ограничению. Поэтому первостепенной задачей является оценка и прогнозирование перенапряжений в режиме ОЗЗ.

В период до 1990 г. существовало три основные гипотезы возникновения перенапряжений при дуговых ОЗЗ в сетях с изолированным режимом нейтрали: Петерсена, Петерса–Слепяна и Белякова–Джуварлы.

По гипотезе Петерсена, дуга гаснет при переходе тока высокочастотных колебаний через ноль и вновь зажигается через полпериода промышленной частоты в момент максимума напряжения на поврежденной фазе, т. е. перенапряжения возрастают от зажигания к зажиганию электрической дуги. Подобный режим, основанный на «идеализированном» поведении дуги, в реальных условиях маловероятен, но позволяет получить предельные значения перенапряжений, величина которых не будет превышать значение [15]:

$$U_{\text{п max}} = U_{\text{ф}m}\frac{1,5+(1-k)(1-d)}{1-\frac{2}{3}(1-k)(1-d)},$$

где $U_{\text{ф}m}$ – амплитуда фазного напряжения, В; k – коэффициент, учитывающий взаимосвязь межфазной емкости $C_{\text{мф}}$ и фазной емкости $C_{\text{ф}}$ сети; d – коэффициент, учитывающий демпфирующие свойства сети, определяемый частотой колебания и активным сопротивлением сети.

Применительно к воздушно-кабельным сетям 6–10 кВ карьеров и разрезов $d = 0,1$ и $k = 0,1$, следовательно $U_{\text{п max}} = 5,02U_{\text{ф}m}$, кратность перенапряжений в таком случае составит $K_{\text{пн}} = 4,12$.

Согласно гипотезе Петерса–Слепяна, дуга гаснет при переходе через ноль тока промышленной частоты и зажигается вновь при максимальном значении напряжения промышленной частоты на поврежденной фазе. Перенапряжения при этом возрастают значительно медленнее по сравнению с ростом напряжений согласно гипотезе Петерсена, а максимальная величина перенапряжений не будет превышать значения [15]:

$$U_{\text{п max}} = 1,5U_{\text{ф}m} + 2,2U_{\text{ф}m}(1-k)(1-d).$$

Согласно данной гипотезе, при принятых ранее значениях k и d величина перенапряжений при ОЗЗ в сетях 6–10 кВ карьеров и разрезов может достигать значения $U_{\text{п max}} = 3,12U_{\text{ф}m}$, а кратность перенапряжений составит $K_{\text{пн}} = 2,56$.

Согласно исследованиям Н. Н. Белякова и И. М. Джуварлы, в реальных кабельных сетях процесс горения дуги и возникновения перенапряжений не отвечает ни гипотезе Петерсена, ни гипотезе Петерса–Слепяна. Согласно гипотезе Белякова–Джуварлы, дуга может гаснуть как при первом, так и при последующем переходе через ноль высокочастотного тока, а также при переходе через ноль тока промышленной частоты. Максимальное значение перенапряжений определяется выражением [15]:

$$U_{\text{п max}} = 1,5U_{\text{ф}m} + 2U_{\text{ф}m}(1-k)(1-d).$$

Для условий систем электроснабжения карьеров и разрезов максимальная величина перенапряжений в режиме ОЗЗ, согласно последней гипотезе, не превысит значения $U_{\text{п max}} = 3{,}28U_{\text{ф}m}$, а кратность перенапряжений составит 2,69.

Согласно гипотезам Петерса–Слепяна и Белякова–Джуварлы, перенапряжения в режиме дугового ОЗЗ не должны приводить к пробою изоляции кабельных линий и трансформаторов, так как максимальная кратность перенапряжений равна 2,56 и 2,69 соответственно и не превышает допустимое значение 2,8.

По гипотезе Петерсена, при дуговых ОЗЗ возможен пробой изоляции кабельных линий и трансформаторов со сроком эксплуатации более 5 лет, так как максимальная кратность перенапряжений может достичь 4,12, что превышает допустимую величину, равную 2,8. В то же время изоляция кабельных линий и трансформаторов со сроком эксплуатации до 5 лет должна выдерживать перенапряжения в режиме ОЗЗ.

Анализ статистики отказов за период с 2006 по 2015 г. указывает на то, что практически 27 % пробоев изоляции кабельных линий и трансформаторов происходит из-за перенапряжений в режиме ОЗЗ. При этом около 10 и 17 % приходится на пробои изоляции кабельных линий и трансформаторов со сроком эксплуатации до и более 5 лет соответственно [1].

Это обстоятельство указывает на то, что в режиме дугового ОЗЗ могут возникать перенапряжения с кратностью, превышающей допустимую величину, равную 4,3, которая соответствует кабельным линиям и трансформаторам со сроком эксплуатации до 5 лет.

В работах М. П. Дергилева и В. К. Обабкова показано, что перенапряжения в режиме дугового ОЗЗ с кратностью от 3,77 до 5,08 могут возникать в электрических сетях 6–10 кВ при токах замыкания на землю в диапазоне 7–24 А на резонансных частотах от 2 до 22 кГц в точках подключения индуктивной нагрузки, в роли которой могут выступать трансформаторы и электродвигатели [16]. Результаты данных исследований получены на физической модели сети и частично объясняют возможность пробоя изоляции кабельных линий и трансформаторов со сроком эксплуатации до 5 лет.

Данные исследования позволили установить тенденцию влияния мощности нагрузки, величины емкостного тока ОЗЗ на величину перенапряжений и указать места возникновения максимально возможных перенапряжений, но не в полной мере учитывают время существования ОЗЗ и условия среды, в которой происходит горение дуги.

Авторами статьи в период с 2000 по 2015 г. были выполнены обширные измерения токов и перенапряжений в режиме ОЗЗ в сетях 6–10 кВ горных и горноперерабатывающих предприятий.

Измерение токов ОЗЗ выполнялось прямым методом: непосредственным замыканием одной из фаз сети на землю через выключатель резервной ячейки РУ 6–10 кВ [4].

Применительно к сетям с изолированным режимом нейтрали измеренный ток ОЗЗ принимается равным емкостному току ОЗЗ, т. е.

$$I_{\text{ОЗЗ}} = I_{\text{C}}.$$

В сетях с резистивным режимом нейтрали одновременно фиксировался полный ток ОЗЗ ($I_{\text{ОЗЗ}}$) и активный ток, протекающий через резистор I_{R}. В этом случае емкостная реактивная составляющая тока ОЗЗ рассчитывалась по формуле:

$$I_{\text{P}} = I_{\text{C}} = \sqrt{I_{\text{ОЗЗ}}^2 - I_{\text{R}}^2}. \qquad (2)$$

Таблица 1. Результаты обработки статистических данных по перенапряжениям в режиме дугового ОЗЗ в сетях 6–10 кВ с изолированным режимом нейтрали

Table 1. The results of processing statistical data on overvoltages in the arc SPGSC mode in 6–10 kV networks with isolated neutral mode

№ п.п	Условия горения электрической дуги и время существования ОЗЗ	Статистические параметры	Величина емкостного тока ОЗЗ, А										
			1	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
1	Изоляция.	$\overline{X}_{ср}$	1,823	2,176	2,359	2,502	2,745	2,883	2,835	2,459	1,739	1,553	1,485
	Действия защиты – сигнал или отключение с выдержкой времени более 0,1 с.	D	1,124	1,766	1,886	2,323	2,588	2,613	2,699	2,098	1,118	0,799	0,756
		S	1,06	1,329	1,373	1,524	1,609	1,616	1,643	1,449	1,057	0,894	0,869
	Время существования ОЗЗ более 0,2 с	V	0,582	0,611	0,582	0,609	0,586	0,561	0,579	0,589	0,608	0,575	0,585
		Δ	0,864	1,121	1,398	1,477	1,693	1,659	1,717	1,432	1,131	0,707	0,781
		K_{max}	2,68	3,25	3,75	4,0	4,3	4,35	4,32	3,82	2,86	2,25	2,23
2	Открытый воздух.	$\overline{X}_{ср}$	1,707	2,141	2,246	2,336	2,341	2,349	2,131	1,893	1,599	1,533	1,467
	Действия защиты – сигнал или отключение с выдержкой времени более 0,1 с.	D	0,931	1,637	1,758	1,754	1,846	1,987	1,6	1,516	0,906	0,724	0,729
		S	0,965	1,279	1,326	1,324	1,359	1,41	1,265	1,231	0,952	0,851	0,853
	Время существования ОЗЗ более 0,2 с	V	0,565	0,598	0,59	0,567	0,58	0,6	0,594	0,65	0,595	0,555	0,582
		Δ	0,896	1,041	1,186	1,214	1,272	1,262	1,39	1,212	1,131	0,677	0,703
		K_{max}	2,6	3,16	3,42	3,55	3,61	3,63	3,52	3,1	2,63	2,2	2,16
3	Изоляция.	$\overline{X}_{ср}$	1,665	1,83	2,063	2,039	2,038	2,134	1,962	1,849	1,721	1,505	1,431
	Действия защиты – отключение без выдержки времени.	D	0,908	1,228	1,349	1,466	1,682	1,642	1,271	0,979	0,858	0,735	0,777
		S	0,953	1,108	1,161	1,211	1,297	1,281	1,127	0,989	0,926	0,857	0,882
	Время существования ОЗЗ менее 0,2 с	V	0,572	0,606	0,565	0,594	0,636	0,6	0,575	0,535	0,538	0,57	0,616
		Δ	0,927	1,083	1,102	1,109	1,196	1,043	1,048	0,822	0,719	0,685	0,652
		K_{max}	2,58	2,83	3,0	3,12	3,25	3,18	3,0	2,67	2,43	2,18	2,08
4	Открытый воздух.	$\overline{X}_{ср}$	1,667	1,833	2,085	2,059	2,034	2,129	1,957	1,843	1,719	1,512	1,427
	Действия защиты – отключение без выдержки времени.	D	0,897	1,214	1,333	1,483	1,692	1,661	1,285	0,999	0,857	0,744	0,777
		S	0,947	1,102	1,154	1,218	1,301	1,289	1,133	0,999	0,926	0,863	0,881
	Время существования ОЗЗ менее 0,2 с	V	0,568	0,601	0,554	0,591	0,639	0,605	0,579	0,542	0,539	0,571	0,617
		Δ	0,908	0,907	0,896	1,042	1,184	1,055	1,026	0,814	0,714	0,678	0,651
		K_{max}	2,56	2,73	2,98	3,1	3,22	3,17	2,98	2,65	2,42	2,18	2,08

Измерение тока ОЗЗ в сетях с компенсированным режимом нейтрали производилось со включенным и отключенным дугогасящим реактором (ДГР), фиксировался ток, протекающий через ДГР, когда реактор был подключен к сети. Это позволило определить характер реактивного тока ОЗЗ и рассчитать степень расстройки ДГР. Величина и характер реактивного тока ОЗЗ определялись по формуле:

$$I_{\text{Р}} = I_{\text{С}} - I_{\text{L}}, \tag{3}$$

где $I_{\text{С}}$ – измеренное значение тока ОЗЗ, при отключенном ДГР, А; I_{L} – величина зафиксированного тока, протекающего через реактор в режиме ОЗЗ, А.

Степень расстройки ДГР оценивалась по выражению:

$$\gamma = \frac{I_{\text{С}} - I_{\text{L}}}{I_{\text{L}}} \cdot 100\ \%.$$

Отрицательное или положительное значение степени расстройки реактора соответственно указывает на то, что ДГР работает в режиме перекомпенсации или недокомпенсации емкостного тока ОЗЗ.

В сетях с комбинированным режимом нейтрали сети одновременно фиксировался полный ток ОЗЗ ($I_{\text{ОЗЗ}}$), токи, протекающие через резистор (I_{R}) и ДГР (I_{L}). Измерения производились при включенном и отключенном ДГР. Это позволило определить емкостную составляющую и характер реактивного тока ОЗЗ.

Емкостная составляющая определялась по формуле (2) по результатам измерений при отключенном ДГР, а величина и характер реактивной составляющей тока ОЗЗ оценивались по выражению (3), в котором емкостная составляющая тока ОЗЗ была рассчитана по формуле (2).

Для измерения перенапряжений создавалось искусственное дуговое ОЗЗ. Измерения производились как на секциях шин РУ 6–10 кВ, так и на вводах самого удаленного электродвигателя или трансформатора от секции шин РУ.

Для создания дугового ОЗЗ использовались раздвижные медные электроды, установленные на опорном изоляторе диаметром 3 мм, допускающие регулировку воздушного зазора между электродами от 1 до 25 мм. Это позволило имитировать горение дуги на открытом воздухе.

Горение дуги в изоляции кабелей создавалось с помощью медного хомута, который охватывал внешний диаметр полуметрового образца кабеля, силовые жилы которого были заземлены. Предварительно в изоляции кабеля высверливалось отверстие диаметром 1–2 мм до силовых жил кабеля.

Обработка статистических данных по перенапряжениям производилась на основе средних значений, дисперсий, среднеквадратичных отклонений и коэффициента вариации, что позволило проверить выборки статических данных на однородность и тем самым оценить влияние режима нейтрали сети, условий горения дуги, длительность существования ОЗЗ, величины емкостного тока ОЗЗ, степень расстройки ДГР и соотношения добавочного активного тока к реактивному току в режиме ОЗЗ на величину кратности перенапряжений.

Для сетей с изолированным режимом нейтрали в табл. 1 приведены результаты обработки статистических данных по перенапряжениям в режиме дугового ОЗЗ при емкостных токах ОЗЗ 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 и 50 А. В таблице приняты следующие обозначения: $\overline{X}_{\text{ср}}$ – среднее значение; D – дисперсия; S – среднеквадратичное отклонение; V – коэффициент вариации; Δ – ширина до-

верительного интервала; K_{max} – максимальная величина кратности перенапряжения. Оценка перенапряжений производилась по трем фазам сети.

Проверка выборок на однородность проводилась по трем критериям: сравнению средних значений t_x, дисперсий t_s и по критерию Пирсона $P\{\chi^2\}$ [17].

Вероятность Пирсона $P\{\chi^2\}$ указывает на то, с какой достоверностью выборки можно объединять.

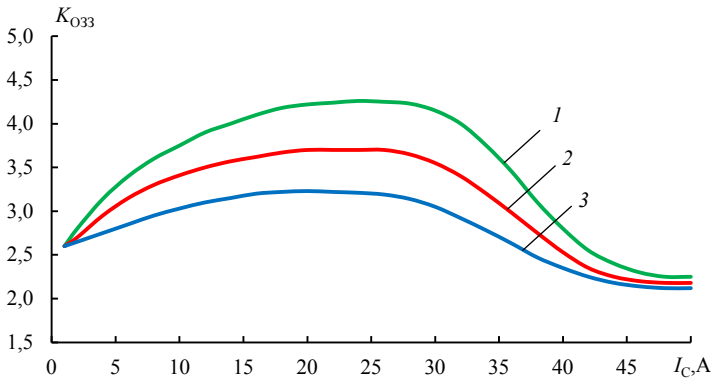

Рис. 1. Изменение кратности перенапряжений в режиме ОЗЗ на зажимах электродвигателей и трансформаторов 6(10)/0,4 кВ в зависимости от величины емкостного тока замыкания на землю, времени существования ОЗЗ и условий горения дуги:
1 – условия горения дуги – изоляция кабеля, обмотки двигателя (трансформатора), действия защиты – сигнал или отключение с выдержкой времени более 0,1 с; *2* – условия горения дуги – открытый воздух, действия защиты – сигнал или отключение с выдержкой времени более 0,1 с; *3* – условия горения дуги – изоляция кабеля, открытый воздух, действия защиты – отключение без выдержки времени

Fig. 1. Change in the frequency of overvoltage in the SPGSC mode at the terminals of electric motors and transformers 6(10)/0.4 kV, depending on the value of the capacitive current of the ground short circuit, the time of SPGSC existence and arc burning conditions:
1 – arc burning conditions – insulation of the cable, motor winding (transformer), protection actions – signal or shutdown with a time delay of more than 0.1 s; *2* – arc burning conditions – open air, protection actions – signal or shutdown with a time delay of more than 0.1 s; *3* – arc burning conditions – cable insulation, open air, protection actions – shutdown without delay

Выборки объединяются в том случае, если одновременно выполняются три условия:

$$t_x \le 3; \qquad t_s \le 3; \qquad P\{\chi^2\} \ge 0,05. \tag{4}$$

Если одно из условий (4) не выполняется, выборки объединять нельзя. Объединение выборок указывает на то, что данный фактор не оказывает существенного влияния на кратность перенапряжений. Если выборки не объединяются, тогда фактор, по которому происходило объединение выборок, влияет на величину перенапряжений в режиме дугового ОЗЗ.

Проверка выборок на экстремальность позволила выявить, принадлежит или не принадлежит максимальное значение исследуемой величины к генеральной совокупности исходных данных, т. е. является ли максимальное значение перенапряжений для определенных условий закономерной величиной или является неточностью, допущенной при измерении данной величины.

В результате статистической обработки данных и проверки выборок на однородность и экстремальность установлено, что производственные условия и тех-

нологические процессы не оказывают существенного влияния на величину перенапряжений в режиме ОЗЗ, так как t_x и t_s соответственно не превышали 1,86 и 0,45, а критерий Пирсона $P\{\chi^2\}$ превышал 0,24.

Установлено, что среда горения электрической дуги и время существования ОЗЗ не оказывают влияния на величину перенапряжений, если линия с ОЗЗ отключается от сети в течение времени, не превышающего 0,2 с, т. е. защита от ОЗЗ действует на отключение без выдержки времени. В этом случае происходит объединение выборок статистических данных, приведенных в табл. 1 (п. п. 3 и 4), так как параметры t_x и t_s не превышали значений 2,69 и 0,076 соответственно, а критерий Пирсона $P\{\chi^2\}$ был более 0,1.

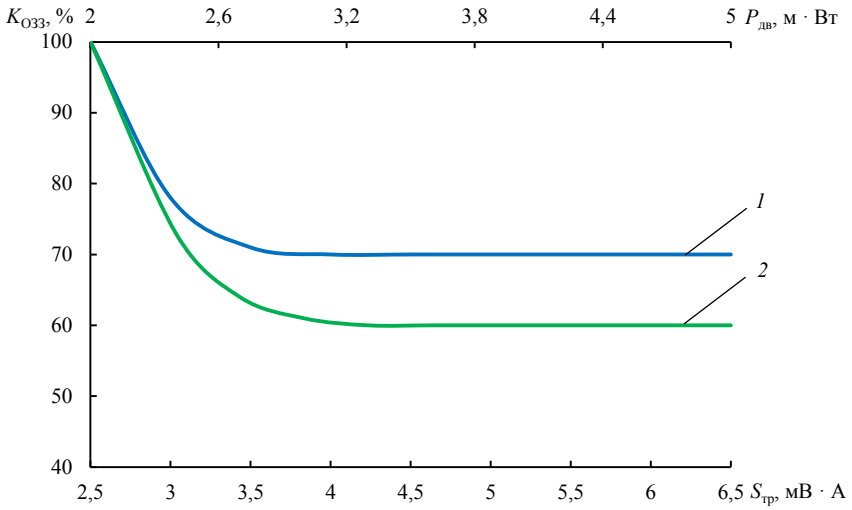

Рис. 2. Снижение кратности перенапряжений на зажимах двигателей – *1* и на вводах трансформаторов – *2* от максимальных значений, приведенных на рис. 1, в зависимости от мощности трансформатора или двигателя

Fig. 2. Reducing SPGSC overvoltage frequency at the terminals of the motors – *1* and at the inputs of the transformers – *2* from the maximum values shown in fig. 1, depending on the power of the transformer or motor

Следует также отметить, что среда, в которой возникает дуговое ОЗЗ, и время его существования не влияют на величину перенапряжений, если емкостный ток ОЗЗ менее 5 А или превышает 45 А, так как $t_x < 1{,}73$; $t_s < 0{,}132$, а $P\{\chi^2\} > 0{,}12$.

В диапазоне емкостных токов от 5 до 45 А при времени существования ОЗЗ более 0,2 с среда, в которой горит электрическая дуга при ОЗЗ, существенно влияет на величину перенапряжений. Кроме этого, значительное влияние на величину перенапряжений оказывает величина емкостного тока ОЗЗ.

Наибольшие перенапряжения с кратностью 4,30–4,35 наблюдаются при емкостных токах ОЗЗ в диапазоне от 20 до 30 А при условии, что произошел пробой изоляции кабеля, электродвигателя или трансформатора, а защита от ОЗЗ действует на сигнал. Если защита будет действовать на отключение и время существования ОЗЗ будет менее 0,2 с, при прочих равных условиях кратность перенапряжений не превысит 3,25.

Минимальная кратность перенапряжений, не превышающая 2,25, возникает при емкостных токах ОЗЗ более 45 А. Это связано с тем, что при весьма большом токе дуга горит устойчиво, падения напряжения на дуге сравнительно мало, и вследствие большой остаточной проводимости при проходе тока через ноль не успевает восстанавливаться сколько-нибудь значительная электрическая прочность изоляции.

Таблица 2. Результаты обработки статистических данных по перенапряжениям в режиме дугового ОЗЗ в сетях 6–10 кВ с компенсированным режимом нейтрали

Table 2. Results of processing statistical data on overvoltages in the arc SPGSC mode in 6–10 kV networks with compensated neutral mode

Условия горения электрической дуги и время существования ОЗЗ	Емкостный ток ОЗЗ I_C, А	Индуктивный ток ДГР I_L, А	Степень расстройки ДГР γ, %	$\overline{X}_{ср}$	D	S	V	Δ	K_{max}
Изоляция. Действия защиты – отключение без выдержки времени. Время существования ОЗЗ менее 0,2 с	30	31	–3	1,48	1,233	1,11	0,75	0,783	2,25
		32	–6	1,602	1,335	1,155	0,73	0,848	2,42
		33	–9	1,643	1,416	1,19	0,724	0,899	2,53
		35	–14	1,839	1,735	1,317	0,716	1,102	2,85
		38	–21	2,083	1,871	1,368	0,657	1,188	3,25
		40	–25	2,185	2,006	1,416	0,648	1,274	3,43
		29	+3	1,589	1,482	1,217	0,766	0,941	2,51
		27	+11	2,208	2,096	1,448	0,656	1,331	3,52
		26	+15	2,317	2,15	1,466	0,633	1,365	3,65
		25	+20	2,432	2,32	1,523	0,626	1,473	3,85
		24	+25	2,481	2,31	1,52	0,613	1,457	3,95
Изоляция. Действия защиты – сигнал или отключение с выдержкой времени более 0,1 с. Время существования ОЗЗ более 0,2 с	40	41	–2,4	1,457	1,184	1,088	0,747	0,752	2,2
		42	–5	1,575	1,285	1,134	0,743	0,816	2,33
		44	–9	1,632	1,395	1,181	0,724	0,886	2,51
		47	–15	1,879	1,743	1,320	0,703	1,107	2,92
		50	–20	2,005	1,786	1,336	0,667	1,134	3,12
		53	–25	2,173	2,011	1,418	0,653	1,277	3,41
		39	+2,5	1,590	1,455	1,206	0,759	0,924	2,5
		38	+5	1,849	1,746	1,321	0,715	1,109	2,94
		36	+11	2,196	2,101	1,449	0,660	1,334	3,51
		35	+14	2,303	2,153	1,467	0,637	1,367	3,62
		33	+21	2,448	2,291	1,514	0,618	1,455	3,87
		32	+25	2,478	2,350	1,553	0,619	1,492	3,94
Открытый воздух. Действия защиты – сигнал или отключение с выдержкой времени более 0,1 с. Время существования ОЗЗ более 0,2 с	50	51,5	–3	1,476	1,269	1,126	0,763	0,806	2,24
		53	–6	1,608	1,392	1,179	0,744	0,884	2,43
		55	–9	1,635	1,428	1,195	0,731	0,907	2,52
		59	–15	1,888	1,687	1,299	0,688	1,082	3,93
		62,5	–20	1,998	1,847	1,359	0,680	1,173	3,11
		67	–25	2,180	1,997	1,413	0,648	1,268	3,42
		48,5	+3	1,594	1,523	1,234	0,774	0,967	2,52
		47,5	+5	1,842	1,754	1,321	0,717	1,108	2,93
		45	+11	2,167	2,131	1,46	0,674	1,353	3,51
		43,5	+15	2,311	2,137	1,462	0,633	1,357	3,64
		41,5	+20	2,435	2,277	1,509	0,620	1,446	3,86
		40	+25	2,466	2,329	1,526	0,619	1,479	3,93

При достаточно малом токе, величина которого не превышает 1 А, дуга горит неустойчиво, и после одного или нескольких повторных зажиганий и погасаний, несколько раздувшись за счет тепловых потоков воздуха, дуга гаснет окончательно, изоляция восстанавливает свою электрическую прочность, и сеть восстанавливает свой нормальный режим работы. При этом кратность перенапряжений в сетях 6 кВ горных предприятий не превышает 2,7.

На рис. 1 представлены зависимости изменения кратности перенапряжений при возникновении дугового ОЗЗ в сетях 6–10 кВ с изолированным режимом нейтрали.

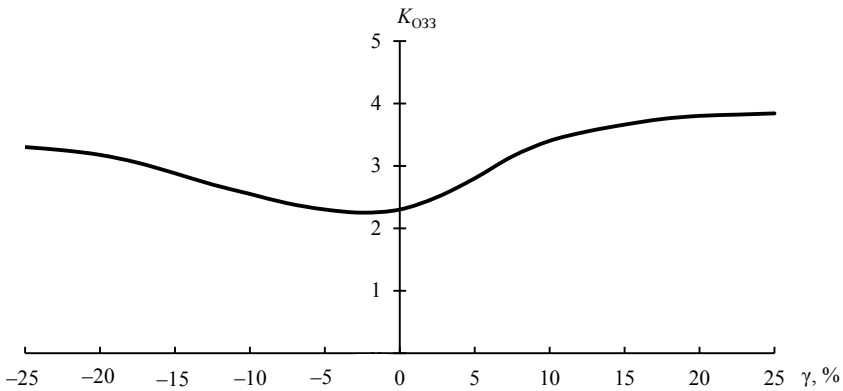

Рис. 3. Зависимость кратности перенапряжений в режиме ОЗЗ от степени расстройки дугогасящего реактора в сетях 6–10 кВ с компенсированным режимом нейтрали
Fig. 3. The dependence of SPGSC overvoltage frequency on the degree of arcing reactor detuning in 6–10 kV networks with compensated neutral mode

Результаты исследования также подтвердили, что перенапряжения большой кратности возникают в местах сосредоточения больших индуктивностей: зажимы электродвигателей мощностью до 2,0 мВт, ввода трансформаторов 6(10)/0,4 мощностью до 2,5 мВ · А. С дальнейшим увеличением мощности двигателей или трансформаторов кратность перенапряжений снижается согласно зависимостям, представленным на рис. 2. Например, для трансформаторов мощностью 6,3 мВ · А кратность перенапряжений снижается на 35 %, а для двигателей мощностью 5 мВт – на 30 %.

Кратность перенапряжений в приключательных пунктах и на секциях шин 6(10) подстанций 35/6 или 110/6 кВ может быть меньше на 14–17 % и 28–30 % по сравнению с данными, приведенными на рис. 1.

Следовательно, зависимости, представленные на рис. 1, могут быть использованы для оценки максимальных перенапряжений в режиме дугового ОЗЗ в сетях 6–10 кВ с изолированным режимом нейтрали.

Перенапряжения в приключательных пунктах и на секциях шин подстанций можно рассчитать по формуле:

$$K_{\max} = nK_{ОЗЗ},$$

где $K_{ОЗЗ}$ – максимальная кратность перенапряжений, принятая по зависимостям, представленным на рис. 1; n = 0,86 – для приключательных пунктов; n = 0,72 – для секций шин подстанций.

В табл. 2 приведены результаты обработки статистических данных по перенапряжениям в режиме дугового ОЗЗ в сетях 6–10 кВ с компенсированным режимом нейтрали.

Проверка выборок на однородность показала, что выборки объединяются только при близких по величине и знаку степенях, вне зависимости от условий горения дуги и времени существования ОЗЗ, расстройки ДГР, так как параметры t_x, t_s и $P\{\chi^2\}$ соответственно находятся в диапазонах 0,023–1,74; 0,002–0,142; 0,12–0,89. В противном случае выборки не объединяются, так как $t_x > 3{,}2$; $0{,}159 < t_s < 1{,}05$; а $P\{\chi^2\} < 0{,}04$. Это указывает на то, что в сетях 6–10 кВ с компенсированным режимом нейтрали кратность перенапряжений в режиме ОЗЗ зависит в основном от степени расстройки дугогасящего реактора и практически не зависит от времени существования ОЗЗ и условий горения дуги.

Таблица 3. Выборочные результаты статистических данных по перенапряжениям в режиме дугового ОЗЗ в сетях 6–10 кВ с резистивным режимом нейтрали
Table 3. Selected results of statistical data on overvoltages in the arc SPGSC mode in 6–10 kV networks with resistive neutral mode

Условия горения электрической дуги и время существования ОЗЗ	$U_н$, кВ	Емкостный ток ОЗЗ I_C, А	Статистические параметры	Добавочный активный ток ОЗЗ $I_а$, А				
				1	5	10	15	20
Изоляция. Действия защиты – отключение без выдержки времени. Время существования ОЗЗ менее 0,2 с	6	20	$\overline{X}_{ср}$	2,681	1,996	1,507	1,473	1,424
			D	2,25	1,5	1,381	1,076	1,069
			S	1,5	1,225	1,15	1,037	1,034
			V	0,56	0,614	0,78	0,704	0,726
			Δ	1,429	0,954	0,877	0,683	0,679
			K_{max}	4,1	2,94	2,38	2,15	2,1
			$I_{ОЗЗ}$, А	20	20,6	22,3	25	28,4
			$I_а/I_р$	0,05	0,25	0,5	0,75	1
Открытый воздух. Действия защиты – сигнал. Время существования ОЗЗ более 0,2 с	10	10	$\overline{X}_{ср}$	2,651	1,545	1,396	1,354	–
			D	1,762	1,373	1,085	1,074	–
			S	1,327	1,172	1,042	1,036	–
			V	0,501	0,759	0,746	0,765	–
			Δ	1,119	0,872	0,689	0,682	–
			K_{max}	3,76	2,41	2,08	2,03	–
			$I_{ОЗЗ}$, А	10	11,2	14,2	18	–
			$I_а/I_р$	0,1	0,5	1	1,5	–

На рис. 3 приведена зависимость перенапряжений в режиме ОЗЗ от степени расстройки ДГР в сетях 6–10 кВ с компенсированным режимом нейтрали.

Минимальная кратность перенапряжений в сети с компенсированным режимом нейтрали будет находиться в диапазоне 2,2–2,5 при условиях, что расстройка дугогасящего реактора не будет превышать 3 %, а защита от ОЗЗ будет обладать 100 % селективностью. При ложной работе защиты от ОЗЗ, которая приводит к отключению неповрежденных линий, сеть с компенсированным режимом нейтрали переходит в режим перекомпенсации, перенапряжения возрастают, а их кратность становится соизмеримой с кратностью перенапряжений в сетях с изолированным режимом нейтрали.

В табл. 3 и 4 приведены выборочные результаты обработки статистических данных по перенапряжениям в сетях 6–10 кВ с резистивным и комбинированным

режимами нейтралей, отражающие влияние времени существования ОЗЗ, условий горения дуги и соотношения активной и реактивной составляющих тока ОЗЗ. Объединение выборок происходит при близких значениях отношения активной составляющей $I_а$ к реактивной составляющей $I_р$ тока ОЗЗ для конкретного режима нейтрали сети и при условии, что $I_а/I_р \geq 0{,}8$ независимо от режима нейтрали сети (резистивный или комбинированный). В противном случае выборки не объединяются.

Таблица 4. Выборочные результаты статистических данных по перенапряжениям в режиме дугового ОЗЗ в сетях 6–10 кВ с комбинированным режимом нейтрали
Table 4. Selected results of statistical data on overvoltages in the arc SPGSC mode in 6–10 kV networks with a combined neutral mode

Условия горения электрической дуги и время существования ОЗЗ	$U_н$, кВ	$I_С$, А	I_L, А	$I_р$, А	γ, %	$I_а$, А	$I_а/I_р$
Открытый воздух. Действия защиты – сигнал. Время существования ОЗЗ более 0,2 с	10	30	32	–2	–6,25	5	2,5
			35	–5	–14,3	5	1
			40	–10	–25	5	0,5
Изоляция. Действия защиты – отключение без выдержки времени. Время существования ОЗЗ менее 0,2 с	6	50	55	–5	–8,3	5	1
			60	–10	–16,6	5	0,5
			65	–15	–23	5	0,33

Условия горения электрической дуги и время существования ОЗЗ	$\overline{X}_{ср}$	D	S	V	Δ	K_{max}
Открытый воздух. Действия защиты – сигнал. Время существования ОЗЗ более 0,2 с	1,362	1,17	1,082	0,794	0,743	2,0
	1,446	1,022	1,011	0,699	0,649	2,09
	1,662	1,041	1,02	0,614	0,661	2,32
Изоляция. Действия защиты – отключение без выдержки времени. Время существования ОЗЗ менее 0,2 с	1,437	1,003	1,002	0,697	0,637	2,07
	4,654	1,026	1,013	0,613	0,652	2,3
	1,833	1,054	1,026	0,560	0,669	2,5

Это указывает на то, что в сетях с резистивным или комбинированным режимом нейтрали кратность перенапряжений зависит от соотношения активной составляющей и реактивной и не зависит от времени существования ОЗЗ, условий горения дуги. На рис. 4 приведены зависимости кратности перенапряжений в режиме ОЗЗ для сетей 6–10 кВ с резистивным и комбинированным режимом нейтрали. В сетях с резистивным режимом нейтрали на величину перенапряжений не влияет ложная работа защит от ОЗЗ [18]. В случае ложной работы защиты от ОЗЗ в сети с резистивным режимом нейтрали произойдет отключение неповрежденной линии, емкость сети снизится, что приведет к уменьшению реактивной составляющей тока ОЗЗ и к росту отношения активной составляющей к реактивной, а следовательно, к дальнейшему снижению перенапряжений. При условии, что отношение активной к реактивной составляющей тока ОЗЗ более 0,8, максимальная кратность перенапряжений не превысит 2,1. Это позволит обеспечить безопасную эксплуатацию трансформаторов, кабельных линий, включая кабельные муфты и разделки кабелей в режиме ОЗЗ, так как максимальная кратность перенапряжений не превышает допустимые значения, а для двигателей требуются дополнительные технические решения для защиты изоляции обмоток в режиме ОЗЗ.

Сопоставляя результаты исследований, представленных на рис. 1–3, можно утверждать, что в сетях с резистивным и комбинированным режимами нейтралей существуют условия для минимизации перенапряжений в режиме ОЗЗ, а следовательно, для снижения вероятности пробоя изоляции электроустановок и поражения электрическим током персонала, занятого эксплуатацией технологического оборудования и электрических сетей в горной отрасли.

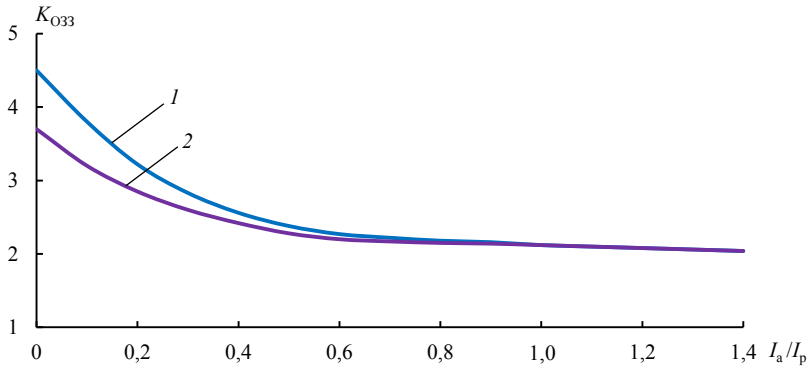

Рис. 4. Зависимость кратности перенапряжений в режиме ОЗЗ для сетей 6–10 кВ с резистивным и комбинированным режимами нейтрали от соотношения активной и реактивной составляющих тока ОЗЗ:
1 – резистивный режим нейтрали; *2* – комбинированный режим нейтрали
Fig. 4. The dependence of SPGSC overvoltage frequency for 6–10 kV networks with resistive and combined neutral modes on the ratio of the active and reactive components of the SPGSC current:
1 – resistive neutral mode; *2* – combined neutral mode

Выводы. На основании изложенного можно сделать следующие основные выводы.

Гипотезы Петерсена, Петерса–Слепяна, Белякова–Джуварлы не в полной мере отражают факторы, влияющие на возникновение максимальных перенапряжений в режиме дугового ОЗЗ в сетях 6–10 кВ, так как не учитывают величину емкостного тока ОЗЗ, условия горения дуги, время существования ОЗЗ и индуктивность двигателей и трансформаторов.

Зависимости, представленные на рис. 1–3, можно использовать для оценки и прогнозирования перенапряжений в сети 6–10 кВ с различными режимами нейтралей.

В сетях 6–10 кВ с изолированным режимом нейтрали условия горения дуги не влияют на величину перенапряжений, если время существования ОЗЗ менее 0,2 с, т. е. когда защиты от ОЗЗ действуют на отключение без выдержки времени. В этом случае основным фактором, влияющим на величину перенапряжений, является значение емкостного тока ОЗЗ, а максимальные перенапряжения с кратностью 3,00–3,25 наблюдаются, если емкостный ток ОЗЗ находится в диапазоне от 10 до 30 А. При времени существования ОЗЗ более 0,2 с на величину перенапряжений начинает оказывать влияние и среда, в которой горит дуга. Максимальные перенапряжения с кратностью 3,25–4,35 возникают при горении дуги в изоляции, если емкостный ток ОЗЗ находится в диапазоне от 5 до 35 А, а если дуга горит на открытом воздухе, то кратность перенапряжений будет находиться в диапазоне 3,16–3,63.

В сетях 6–10 кВ с компенсированным режимом нейтрали основными факторами, влияющими на величину перенапряжений, являются величина расстройки

ДГР и в каком режиме (перекомпенсации или недокомпенсации) находится ДГР. С увеличением расстройки ДГР кратность перенапряжений увеличивается и может достигать значений от 3,11 до 3,95, если расстройка ДГР находится в диапазоне от 20 до 25 %, что соизмеримо с перенапряжениями в сетях с изолированным режимом нейтрали. При прочих равных условиях в режиме перекомпенсации кратность перенапряжений меньше, чем в режиме недокомпенсации.

В сетях 6–10 кВ с резистивным или комбинированным режимами нейтрали основным фактором, влияющим на величину перенапряжений, является отношение $I_а / I_р$. Минимизация перенапряжений достигается при условии, что $I_а / I_р \geq 0{,}8$. В этом случае кратность перенапряжений не превышает 2,1, что практически в 2 раза меньше максимальных кратностей перенапряжений в сетях с изолированным или компенсированным режимами нейтралей и позволяет обеспечить более безопасную эксплуатацию электрооборудования технологических комплексов и установок на горных предприятиях.

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. Кузьмин С. В., Зыков И. С., Майнагашев Р. А., Ящук К. П. Анализ аварийности в системах электроснабжения горно-металлургических предприятий Сибири // Горное электрооборудование и электромеханика. 2009. № 3. С. 23–25.

3. 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. 113–124.

4. Гладилин Л. В., Щуцкий В. И., Бацежев Ю. Г., Чеботаев Н. И. Электробезопасность в горнодобывающей промышленности. М.: Недра. 1977. 327 с.

5. Широковец А., Козлачков М., Сазонов В., Хадыев И., Дмитриев И., Панкратов Г., Тимощенко С. Комбинированное заземление нейтрали. Фактор повышения эксплуатационной надежности сетей 6–35 кВ // Новости электротехники. 2016. № 6(102). С. 13–26.

6. Рыжкова Е. Н., Фомин М. А., Жармагамбетова М. С. О критериях выбора режима резистивного заземления нейтрали в сетях 6–35 кВ // Промышленная энергетика. 2013. № 11. С. 23–30.

7. Назаров В. Резистивное заземление нейтрали в сетях 6–35 кВ. Ретроспектива и будущее // Новости электротехники. 2014. № 2(86). С. 16–24.

8. Гаврилова Е. В., Кузьмин С. В., Меньшиков В. А., Коровина М. В. Влияние типа и мощности электродвигателей и типа выключателей на величину коммутационных перенапряжений, возникающих в сетях 6–10 кВ горнодобывающих предприятий // Горное оборудование и электромеханика. 2011. № 3. С. 6–9.

9. Tanguy A., Ryadi M., Hurlet P. Specifications and testing of very large power transformers concerning qualification of short-circuit capability of new designs and new materials // CIGRE SC A2 Colloquium with the participation of SC A3 & SC B3, report FP0644. Shanghai, 2015.

10. Morán L., Espinoza J., Ortíz M., Rodríguez J., Dixon J. Practical problems associated with the operation of ASDs based on active front end converters in power distribution systems // Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference : 39th IAS Annual Meeting, Seattle, 2004. Vol. 4. P. 2568–2572.

11. Feng D., Lu M., Lan J., Sun L. Research on switching operation transient electromagnetic environment of substations in a coal mine // IET Generation, Transmission & Distribution. 2016. Vol. 10. Iss. 13. P. 3322–3329.

12. Медведева М. Л., Кузьмин С. В., Кузьмин И. С., Шманев В. Д. Причины возникновения коротких и однофазных замыканий на землю в сетях горных предприятий // Известия вузов. Горный журнал. 2017. № 5. С. 65–74.

13. Гончаров А. Ф., Эпштейн И. Я., Кузьмин С. В., Попон Ю. Н. Влияние RC-защиты от коммутационных перенапряжений на условие электробезопасности // Известия вузов. Горный журнал. 1989. № 8. С. 32–36.

14. Эпштейн И. Я., Гончаров А. Ф., Попов Ю. Н. Импульсная прочность изоляции экскаваторных электродвигателей // Горный журнал. 1991. № 9. С. 36–39.

15. Базуткин В. В., Ларионов В. П., Пинталь Ю. С. Техника высоких напряжений. Изоляция и перенапряжения в электрических системах. М.: Энергия, 1986. 465 с.

16. Дергилев М. П., Обобков В. К. Перенапряжения в сетях 6–10 кВ. Перенапряжения с двигательной нагрузкой при различных способах заземления нейтрали // Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтралей сетей 6–35 кВ: тр. II Всерос. науч.-техн. конф. Новосибирск, 2002. С. 106–112.

17. Методика сбора и обработки статистической информации о надежности шахтного электрооборудования. М.: ИГД им. Скочинского, 1975. 75 с.

18. Кучумов Л., Кузнецов А., Червочков Д. Переходное сопротивление в месте ОЗЗ. Влияние на режимные параметры и рабочие сигналы защит от ОЗЗ // Новости электротехники. 2017. № 4(106). С. 22–34.

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
Кузьмин Илья Сергеевич – старший преподаватель кафедры электрификации горно-металлургического производства Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета. E-mail: r1ml@inbox.ru
Куликовский Валерий Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электрификации горно-металлургического производства Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета. E-mail: kvs47@yandex.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2020-5-116-132

Method of assessment and prediction of overvoltage caused by single-phase arc ground short circuits in the 6–10 kV mains, as a way of increasing the electrical safety level in mining facilities

Roman S. Kuzmin[1], Ilia S. Kuzmin[1], Vitalii A. Menshikov[1], Sergei V. Kuzmin[1], Valerii S. Kulikovskii[1]
[1] Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Abstract

Introduction. *Overvoltage caused by single-phase ground short circuits are the main reason of multiple breakdowns of insulation. Assessment and forecast of overvoltage in SPGSC in the 6–10 kV mains is therefore a relevant task, and the solution to this problem will make it possible to select effective methods and means of limiting overvoltage and improve the conditions of electrical safety.*

Research aim *is to improve the methods of assessing and forecasting overvoltage of arch SPGSC in the 6–10 kV mains of mining facilities.*

Methodology. *This article provides analysis of current hypothesis and methods for the assessment of overvoltages in the single-phase ground short circuit (SPGSC) mode. Currently the hypothesis of Peterson, Peters–Slepyan, Belyakov–Djuvarl does not fully reflect the factors that affect the maximum overvoltage emergence of the single-phase arc ground short circuits in the 6–10 kV mains, because they don't take into account the capacitive current value of SPGSC, arc combustion conditions, lifetime of SPGSC, inductance of engines and transformers.*

Results. *There have been obtained dependences that show the dependences of frequency with which overvoltage happens from the factors that were mentioned above. The shown dependences can be used for calculation and assessment of overvoltage in the 6–10 kV mains with different neutral modes to justify the need for activities that will protect electrical systems, transformers, electrical engines from overvoltage in the SPGSC mode and considering its lifecycle.*

Summary. *It was established that from the electrical safety positions of 6–10 kV mains with resistive or combined modes of neutrals on mining and extractive facilities create conditions for the safer exploitation of technological complexes, facilities and electrical equipment, because it can reduce maximum overvoltage ratios by half and thus reduce the number of repeated breakdown of insulation in the SPGSC mode.*

Key words: *mining facilities; 6–10 kV mains; single-phase ground short circuit; overvoltage; neutral mode; electrical safety.*

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. 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 elektrooborudovanie i elektromekhanika = Mining Equipment and Electromechanics*. 2009; 3: 23–25. (In Russ.)

3. 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: 113–124. (In Russ.)

4. Gladilin L. V., Shchutskii V. I., Batsezhev Iu. G., Chebotaev N. I. *Electrical safety in mining*. Moscow: Nedra Publishing; 1977. (In Russ.)

5. Shirokovets A., Kozlachkov M., Sazonov V., Khadyev I., Dmitriev I., Pankratov G., Timoshchenko S. Integrated neutral grounding. A factor of boosting 6–35 kV network security. *Novosti elektrotekhniki = News of Electrical Engineering*. 2016; 6(102): 13–26. (In Russ.)

6. Ryzhkova E. N., Fomin M. A., Zharmagambetova M. S. On the criteria of selecting the mode of resistive grounding of neutral in 6–35 kV networks. *Promyshlennaia energetika = Industrial Power Engineering*. 2013; 11: 23–30. (In Russ.)

7. Nazarov V. Resistive grounding of neutral in 6–35 kV networks. Retrospective view and future. *Novosti elektrotekhniki = News of Electrical Engineering*. 2014; 2(86): 16–24. (In Russ.)

8. Gavrilova E. V., Kuzmin S. V., Menshikov V. A., Korovina M. V. The effect of the type and power of electromotors and the types of circuit breakers on the value of switching surge in 6–10 kV networks of mining facilities. *Gornoe elektrooborudovanie i elektromekhanika = Mining Equipment and Electromechanics*. 2011; 3: 6–9. (In Russ.)

9. Tanguy A., Ryadi M., Hurlet P. Specifications and testing of very large power transformers concerning qualification of short-circuit capability of new designs and new materials. *CIGRE SC A2 Colloquium with the participation of SC A3 & SC B3, report FP0644*. Shanghai, 2015.

10. Morán L., Espinoza J., Ortíz M., Rodríguez J., Dixon J. Practical problems associated with the operation of ASDs based on active front end converters in power distribution systems. *Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference: 39th IAS Annual Meeting, Seattle, 2004*. Vol. 4. P. 2568–2572.

11. Feng D., Lu M., Lan J., Sun L. Research on switching operation transient electromagnetic environment of substations in a coal mine. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2016; 10(13): 3322–3329.

12. Medvedeva M. L., Kuzmin S. V., Kuzmin I. S., Shmanev V. D. Reasons for short circuits and single-phase ground faults in the networks of mining enterprises. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2017; 5: 65–74. (In Russ.)

13. Goncharov A. F., Epshtein I. Ia., Kuzmin S. V., Popon Iu. N. The effect of RC-protection from switching surge on the condition of electrical safety. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 1989; 8: 32–36. (In Russ.)

14. Epshtein I. Ia., Goncharov A. F., Popov Iu. N. Impulse insulation strength of excavators' electromotors. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 1991; 9: 36–39. (In Russ.)

15. Bazutkin V. V., Larionov V. P., Pintal Iu. S. High-voltage engineering. *Insulation and overvoltage in electrical systems*. Moscow: Energia Publishing; 1986. (In Russ.)

16. Dergilev M. P., Obobkov V. K. Overvoltage in 6–10 kV mains. Overvoltage with motive load under various means of neutral grounding. In: *Limitation of overvoltage and 6–35 kV networks neutral grounding modes: proc. 2nd All-Russian sci-pract. conf.* Novosibirsk: 2002. P. 106–112. (In Russ.)

17. *Method of collecting and processing statistical information on the reliability of shaft electric equipment*. Moscow: A. A. Skochinsky Institute of Mining; 1975. (In Russ.)

18. Kuchumov L., Kuznetsov A., Chervochkov D. Transient resistance at the site of SPGSC. Effect on the mode parameters and working signals of protection from SPGSC. *Novosti elektrotekhniki = News of Electrical Engineering*. 2017; 4(106): 22–34. (In Russ.)

Received 18 July 2019

Information about authors:

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

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

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

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

Valerii S. Kulikovskii – PhD (Engineering), Associate Professor, associate professor of the Department of Electrification of Mining and Smelting Engineering, Institute of Mining, Geology and Geotechnology of the Siberian Federal University. E-mail: kvs47@yandex.ru

Для цитирования: Кузьмин Р. С., Кузьмин И. С., Меньшиков В. А., Кузьмин С. В., Куликовский В. С. Метод оценки и прогнозирования перенапряжений при дуговых однофазных замыканиях на землю в сетях 6–10 кВ как средство повышения уровня электробезопасности на горных предприятиях // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 5. С. 116–132. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-5-116-132
For citation: Kuzmin R. S., Kuzmin I. S., Menshikov V. A., Kuzmin S. V., Kulikovskii V. S. Method of assessment and prediction of overvoltage caused by single-phase arc ground short circuits in the 6–10 kV mains, as a way of increasing the electrical safety level in mining facilities. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 5: 116–132 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2020-5-116-132