

УДК 621.316.93.027.001.5:622

О.А. ДЕМЧЕНКО, канд. техн. наук, зам. директора по науч. работе,
Л.А. МУФЕЛЬ, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник; МакНИИ,
г. Макеевка

ОГРАНИЧЕНИЕ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В НИЗКОВОЛЬТНЫХ СЕТЯХ ПОДЗЕМНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Впервые дано обоснование применения устройств ограничения тока к.з. в низковольтных сетях подземного электроснабжения. Приведены технические решения устройств токоограничения. Содержатся требования, регламентирующие разработку устройств токоограничения.

Ключевые слова: ток, короткое замыкание, низковольтная сеть, токоограничение, передвижная трансформаторная подстанция, кабель, ПВХ-изоляция, реактор, дуга, фаза, гашение, требование, безопасность.

Ограничение токов короткого замыкания (к.з.) в электрических системах необходимо для снижения уровней токов к.з., сохранения живучести и эксплуатационной надежности всех элементов конструкции таких систем.

Данная проблема особенно актуальна в связи с высокой плотностью нагрузки в отдельных технологических процессах и значением тока к.з., превышающем предельные коммутационные способности отключающих аппаратов.

Целью статьи является обоснование технических решений устройств ограничения тока к.з. и разработка требований, регламентирующих токоограничение в низковольтных шахтных сетях.

В низковольтных сетях напряжением до 1140 В включительно подземного электроснабжения ограничение токов к.з. как в зарубежных странах, так и в Украине до настоящего времени не предусматривалось. Вызвано это было тем, что известные решения токоограничения резко снижают параметры электроснабжения (падение напряжения превышает 10% от номинального значения). Проведенные расчеты (табл.1) показали, что использование в шахтах серийно выпускаемых реакторов возможно только при переходе на напряжение 3000 В и выше. Кроме того, такие реакторы имеют большие габариты, что ограничивает возможность их применения в подземных выработках.

Разработке и применению устройств токоограничения, приемлемых для применения в шахтах, препятствовало также повсеместное использование максимальной токовой защиты (МТЗ), с помощью которой формируется первичный сигнал для защитного отключения поврежденного участка кабельной сети в случае возникновения в нем к.з. Для обеспечения заданной чувствительности к повреждениям и зоны действия МТЗ необходимо, чтобы ток в режиме к.з. имел максимальное значение, в том числе в самой удаленной точке сети. Поэтому использование устройств токоограничения было недопустимо.

Таблица 1

Параметры забойных машин при различных значениях напряжения
в участковой сети

Номинальное значение, $U_{н}, В$	Электрические параметры сети	Установленная мощность электропривода, $P_{н}, кВт$			
		200	400	600	800
660	Номинальный ток, $I_{н}, А$	220	437	656	874
	Падение напряжения на реакторе, $\Delta U_{р}, \%$	10	20	30	41,3
	Падение напряжения в линии, $\Delta U_{л}, \%$	6,6	13	19	26,4
	Суммарное падение напряжения в линии, $\Delta U_{\Sigma}, \%$	17	23	50	67,7
1140	Номинальный ток, $I_{н}, А$	127	254	380	500
	Падение напряжения на реакторе, $\Delta U_{р}, \%$	3,5	6,9	10	13,7
	Падение напряжения в линии, $\Delta U_{л}, \%$	2,2	4,4	6,6	8,8
	Суммарное падение напряжения в линии, $\Delta U_{\Sigma}, \%$	5,7	11	17	22,5
3300	Номинальный ток, $I_{н}, А$	44	85	130	175
	Падение напряжения на реакторе, $\Delta U_{р}, \%$	0,4	0,8	1,3	1,6
	Падение напряжения в линии, $\Delta U_{л}, \%$	0,2	0,5	0,8	1,05
	Суммарное падение напряжения в линии, $\Delta U_{\Sigma}, \%$	0,6	1,3	2,1	2,6

Примечание: расчеты выполнены при длине кабеля 300 м и индуктивном сопротивлении реактора $x_p = 0,3 \text{ Ом}$.

Рост уровней токов к.з. обусловлен созданием новой добычной и проходческой техники повышенной энерговооруженности, увеличением мощности трансформаторов главной поверхностной подстанции и передвижных трансформаторных подстанций, включением в эксплуатацию новой линий электроснабжения и электроприемников. Сказанное обусловило увеличение мощности к.з. в подземной сети шахты в два раза в сравнении с ранее нормированным значением, которое составляет сейчас 100 МВА [1].

Изложенное обосновывает необходимость развития направления по разработке устройств ограничения токов к.з., приемлемых для применения в шахтных низковольтных электрических сетях. Весьма актуально использование устройств токоограничения в кабельных линиях, прокладываемых в очистных и проходческих забоях, в условиях которых имеется большая вероятность их повреждения.

Решение проблемы ограничения токов при к.з. в подземных низковольтных сетях приобрело особую значимость, так как именно короткие замыкания – наиболее частая причина взрывов и пожаров в шахтах.

В настоящее время разработана и серийно выпускается новая токовая защита для обнаружения к.з. в кабельных сетях, которая впервые предусматривает новые признаки (величины) для распознавания режима к.з. [2]. Существенно, что данная защита не требует увеличенного значения тока при к.з. для поддержания ее устойчивой работы. Применение такой токовой защиты открывает возможности для реализации решений, направленных на ограничение токов к.з. в низковольтных электрических сетях.

Устройства токоограничения в зависимости от принятых схемно-технических решений предусматривают ограничение уровня токов к.з. на сравнительно небольшое значение и глубокое ограничение токов к.з. К устройствам небольшого ограничения относятся стандартные токоограничивающие реакторы, включаемые в электрическую сеть последовательно. Такие устройства имеют сравнительно низкую стоимость и нашли широкое практическое применение в высоковольтных электрических сетях.

Устройства глубокого токоограничения в нормальном режиме обладают малым сопротивлением, а при к.з. – требуемым. К ним относятся устройства, используемые резонансы токов и напряжений, а также устройства быстрого отключения на базе силовой электроники и взрывного действия.

Проблему ограничения токов к.з. в низковольтных электрических сетях наиболее эффективно можно решить, выполнив оптимизацию структуры электрической сети с целью установления отдельных видов электрооборудования и кабелей, схемные и конструктивные решения которых могут быть разработаны с обеспечением токоограничения в аварийных режимах. Здесь, прежде всего, существенно произвести выбор оптимальной

схемы выдачи мощности от источников питания (передвижные трансформаторные подстанции (ПТП), агрегаты питания маломощных потребителей, источники питания вторичных цепей пониженного напряжения), поскольку они определяют структуру и параметры сети, включая значения токов к.з.

Если агрегаты питания и источники питания вторичных цепей разработаны с учетом фактической мощности подключенной к ним нагрузки, то ПТП созданы на разные мощности без учета мощности конкретной нагрузки. Основным недостатком выпускаемых ПТП является сосредоточение выходной мощности на одной обмотке пониженного напряжения.

Как известно, ток к.з. ($I_{к.з.}$) на вторичной обмотке трансформатора равен:

$$I_{к.з.} = \frac{100\% S_{ном}}{\sqrt{3} U_{ном} U_{к.з.} \%} \quad (1)$$

Из выражения (1) следует, что для снижения (ограничения) тока к.з. необходимо: уменьшить выходную мощность ($S_{ном}$) на вторичной обмотке трансформатора, увеличить значение напряжения питания ($U_{ном.}$) на вторичной обмотке и напряжение короткого замыкания ($U_{к.з.} \%$). Из приведенных величин наиболее эффективно для ограничения токов к.з. снижение выходной мощности ($S_{ном}$) трансформатора. Значительно меньшие возможности для этого использование таких величин как $U_{ном}$ и $U_{к.з.}$, поскольку первая величина для эксплуатируемой сети является постоянной, а значение $U_{к.з.}$ не должно превышать 5,5% [3].

Оценивая вышеизложенное, следует считать, что сосредоточение суммарной выходной мощности на одной обмотке, как это сейчас осуществляется в конструкции выпускаемых ПТП, недопустимо, поскольку это способствует росту тока, особенно в режиме к.з. Использование единичной мощности трансформатора на одной обмотке низкого напряжения для мощных подстанций (более 630 кВА) не обосновано как по токовой нагрузке, так и с учетом структуры схем электроснабжения машин очистного и проходческого забоев.

Предусматривая в ПТП расщепление обмотки низшего напряжения, можно оптимально распределить (выдать) выходную мощность с делением сети на отдельные независимые направления питания электроприемников. При таком делении сети низшего напряжения достигается снижение выходной мощности, адекватной мощности подключенных электроприемников и, как следствие, ограничение токов к.з. до значений, не превышающих допустимые уровни для параметров установленного электрооборудования и для разрыва токов к.з. коммутационными аппаратами.

Добиться токоограничения в электрической сети можно, предусмотрев специальные конструктивные решения в кабелях электроснабжения и

использование ПВХ-пластиката для изоляции жил и защитной оболочки. Так, в кабеле КГЭШуС-ПБ, в отличие от известных решений, предусмотрено расщепление основных жил с диаметральной расположением проводов каждой жилы по периметру кабеля. При такой структуре жил в кабеле, в случае возникновения к.з., повреждению подвергается только один провод каждой жилы. В результате шунтирования места к.з. неповрежденными проводами жил и увеличения сопротивления короткозамкнутого контура до места к.з. ввиду того, что данный контур образован проводами небольшого сечения в сравнении с сечением жилы в целом, происходит ограничение токов к.з. в 1,3...1,8 раза (рис.1) в зависимости от длины кабеля [4,5]. Кроме того, здесь не учтено, что на снижение тока к.з. положительно сказывается шунтирование места к.з. с помощью неповрежденных проводов основных жил.

Исследования режима к.з. в кабелях марки КГЭШ (изоляция жил и оболочка из резины) и КГЭШуС-ПБ (изоляция жил и оболочка из ПВХ-пластиката) показали очень интересные результаты (рис. 2 и рис. 3). Область горения электрической дуги под оболочкой характеризуется малым объемом. Дуга горит в среде, насыщенной продуктами горения соответственно резиновой и ПВХ изоляции.

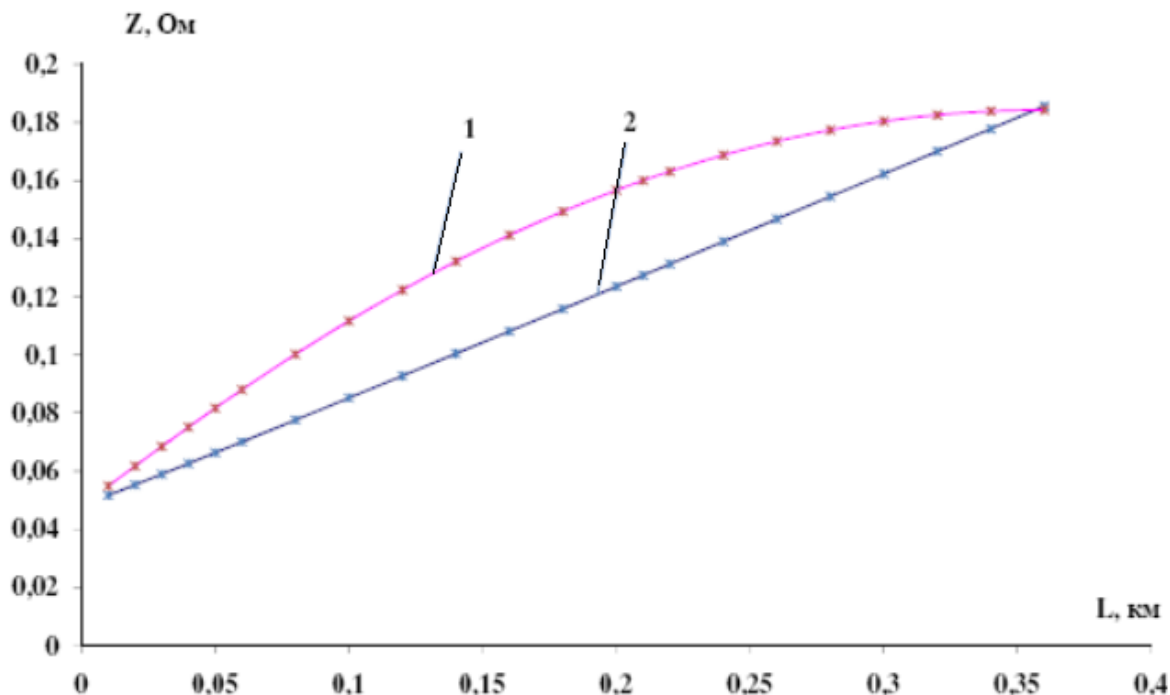


Рис. 1. Кривые зависимости полного сопротивления (Z) сети от расстояния до точки к.з.

1 – кривая зависимости полного сопротивления фазы сети с кабелем КГЭШуС-ПБ от расстояния до точки к.з.;

2 – кривая зависимости полного сопротивления фазы сети с кабелем КГЭШ от расстояния до точки к.з.

Ввиду того, что приток свежей воздушной смеси в область горения невозможен, то процессы термического разложения изоляции превалируют над процессом горения (окисление кислородом). Длительность дугового к.з. в кабеле КГЭШ (рис.2) составляет не менее 100 мс и определяется временем срабатывания защитного отключения, а в кабеле КГЭШуС-ПБ не превышает 30 мс (рис. 3). Последнее свидетельствует о том, что прекращение горения дуги происходит раньше срабатывания коммутационного аппарата и, что показательно, также наблюдается ограничение тока к.з. до 3200 А в сравнении с кабелем КГЭШ, для которого ток к.з. составляет 5700 А.

Обусловлено это тем, что в кабеле КГЭШу-ПБ процессы диффузии и рекомбинации в условиях малого замкнутого промежутка обеспечивают деионизацию дугового участка, вплоть до гашения электрической дуги.

Вызвано это также тем, что при воздействии высокой температуры ПВХ-пластикаты и другие пластические материалы выделяют большое количество водорода, который воздействуя на дугу, производит ее гашение [3, 4, 5]. Изложенное обосновывает тот факт, что ПВХ-пластикат обладает свойствами гашения электрической дуги.

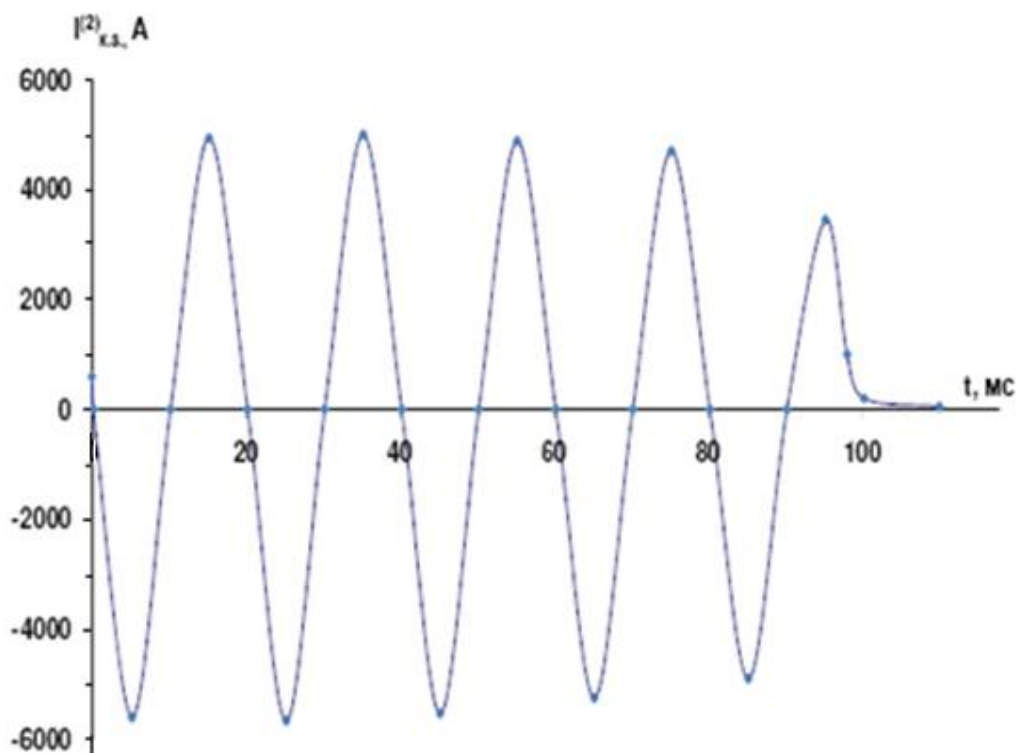


Рис. 2. Осциллограмма тока к.з. в кабеле КГЭШ

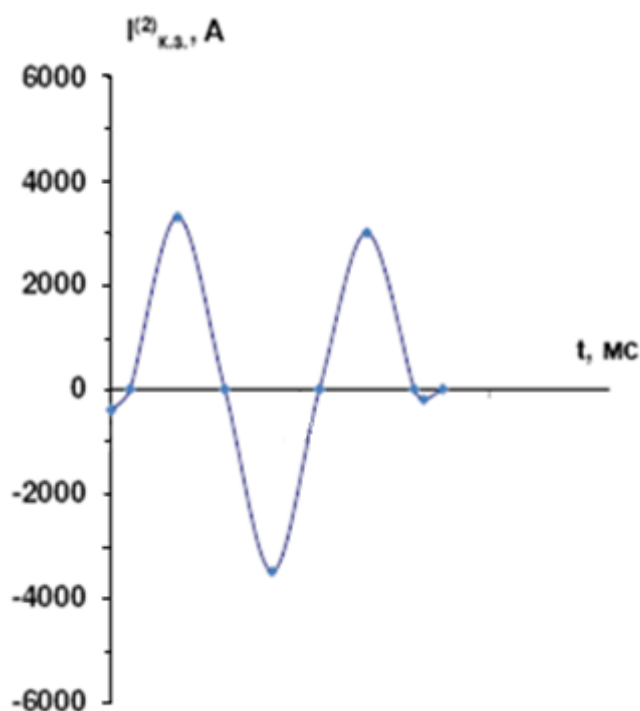


Рис. 3. Осциллограмма к.з. в кабеле КГЭШуС-ПБ

Наряду с рассмотренными схемными и конструктивными решениями отдельных видов электрических изделий, входящих в структуру систем электроснабжения, ограничение токов к.з. решается также с помощью специальных устройств ограничения токов к.з., которые используют следующие методы токоограничения:

- введение в каждую фазу сети увеличенного значения сопротивления, например, с помощью индуктивных реакторов;
- быстродействующее отключение за время, не превышающее 10 мс, с помощью средств силовой полупроводниковой техники и взрывного действия;
- автоматическое изменение сопротивления электрической сети от минимального значения в нормативных режимах и требуемого в режиме к.з.;
- повышение напряжения короткого замыкания в понижающих трансформаторах;
- применение материалов, обладающих свойствами гашения электрической дуги;
- обеспечение резонансов токов и напряжений в электрической сети.

Особый интерес и практическое значение имеет индуктивный реактор, включенный в каждую фазу и состоящий из двух обмоток с заданной индуктивностью и специальной схемой их соединения. Работа устройства

иллюстрируется следующими осциллограммами. На рис. 4 приведен режим двухфазного к.з. без токоограничения с максимальным значением тока к.з. 4910 А. Характер изменения токов к.з. в электрической сети с включенным устройством токоограничения показан на рис.5. Из этой осциллограммы видно, что время действия опасного тока сведено к минимуму (не более 3,5 мс), а значение тока к.з. не превышает 1400 А. Устройство с такими токовременными характеристиками не допускает развития ударного тока и, следовательно, возникновения электродинамических процессов, а сниженное значение тока обеспечивает устойчивую работу электрической системы и коммутационных аппаратов, которые не рассчитаны на разрыв больших токов к.з. Экспериментально также подтверждено, что устройство не оказывает влияния на параметры сети электроснабжения как в пусковом, так и в установленном режиме работы сети, что свидетельствует об отсутствии потерь напряжения и мощности в указанных режимах.

Преимущества данного устройства перед выпускаемыми промышленностью реакторами делают его альтернативным решением для создания устройств токоограничения в низковольтных сетях подземных электрических сетей напряжением 660 и 1140 В.

Оценивая приведенные токовременные характеристики предложенного авторами индуктивного реактора нового типа, можно сделать вывод о том, что применение такого устройства создает условия для безопасного применения электрической энергии в шахтах, опасных по газу или пыли.

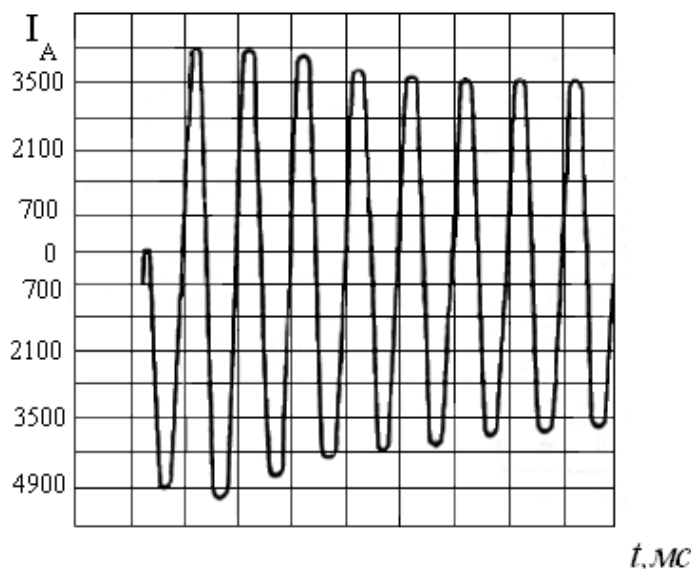


Рис. 4. Осциллограмма тока двухфазного к.з. в электрической сети без токоограничения (показан ток в одной фазе)

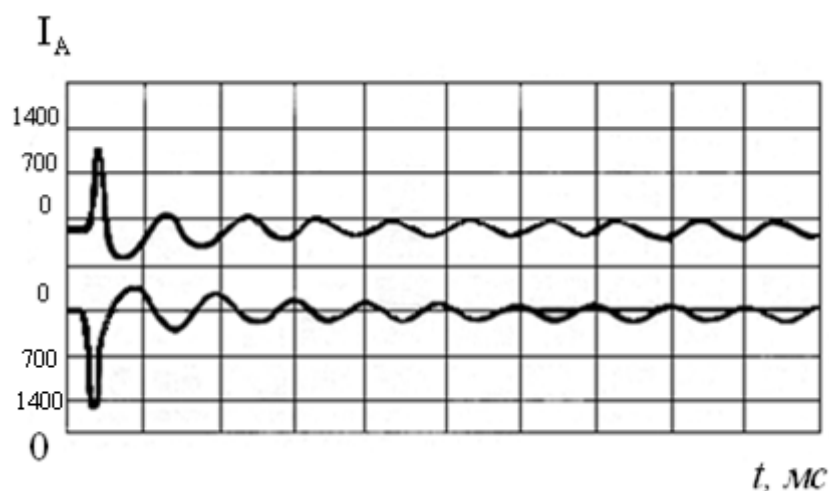


Рис. 5. Осциллограмма токов к.з. в электрической сети с устройством токоограничения (показан ток в двух фазах)

Изучение литературных источников [6, 7] и отдельных технических решений позволили обосновать предварительные требования к таким устройствам. Требования охватывают решения, которые наиболее эффективны для обеспечения безопасности применения электрических систем в шахтах.

Содержание основных требований следующее:

1. Устройство токоограничения (далее устройство) должно устойчиво работать в низковольтных сетях электроснабжения горношахтного оборудования напряжением 660 и 1140 В частотой 50 Гц.

2. Устройство не должно влиять на работу защиты от к.з. и на изменения параметров электрических сетей в нормативных режимах.

3. Устройство должно изготавливаться в виде отдельного изделия во взрывобезопасном исполнении или в виде отдельного блока, встраиваемого в передвижные трансформаторные подстанции и другое оборудование.

4. Устройство должно выполнять функцию глубокого ограничения тока к.з. Для разработки устройства рекомендуется использовать эффект токоограничения, основанный на изменении сопротивления электрической сети от минимального значения в нормальном режиме и требуемом в режиме к.з., а также с использованием других методов ограничения токов к.з.

5. Устройство должно обеспечивать:

- постоянную готовность к работе без выполнения управляющих сигналов и коммутаций;

- автоматическое включение в работу в течение первого полупериода тока в режиме к.з.;

- ограничение тока к.з. за время не более 10 мс с целью недопущения развития ударного тока и действия электродинамических нагрузок;
- снижение тока к.з. до значений не выше пускового тока электропривода;
- самовосстановление устройства в нормальное состояние после выполнения защитного ограничения тока к.з. в электрической сети;
- падение напряжения в устройстве в номинальном режиме работы не должно превышать 2% от номинального значения напряжения;
- индикацию о температуре нагрева основных исполнительных узлов.

ВЫВОДЫ

В статье впервые обосновано направление работ по выполнению токоограничения в низковольтных сетях подземного электроснабжения. При этом установлено, что: с внедрением новой токовой защиты от к.з. стало возможным использование устройств ограничения токов к.з. в низковольтных шахтных электрических сетях; токоограничение можно реализовать как с помощью схемных решений отдельных видов электрооборудования (трансформаторные подстанции, силовые кабели), так и специальных устройств; глубокое ограничение токов к.з. можно получить с помощью индуктивного реактора, состоящего из двух обмоток с заданной индуктивностью и включенных между собой так, что достигается снижение тока в режиме к.з. до значений менее пускового тока за время не более 3,5 мс. Кроме того, впервые разработаны требования к устройствам токоограничения, которые регламентируют параметры, нормы и требования для разработки таких устройств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила безопасности в угольных шахтах: НПАОП 10.0-1.01-10.– Офиц. изд. – К: Охрана труда, 2010 – 431 с. – (Нормативный документ Госгорпромнадзора Украины).
2. Новая стратегия безопасности применения электрической энергии в шахтах / [А. М. Брюханов, Л. А. Муфель, А. Б. Кац, А. А. Дубинский] // Уголь Украины. – 2012. – № 9. – С.12-14.
3. Селищев А. Н. Шахтные сухие трансформаторы и передвижные подстанции/ А. Н. Селищев. – М.: Недра, 1968. – 440 с.
4. Демченко О. А. Обоснование параметров взрывопожаробезопасности гибких силовых кабелей для электроснабжения участков угольных

шахт: дис. канд. техн. наук, специальность 25.06.01 / Демченко Олег Александрович. – Макеевка, 2010. – С. 102-109.

5. Расследование и предотвращение аварий на угольных шахтах / [А. М. Брюханов, В. И. Бережинский, В. П. Коптиков, [В. П. Колосюк, А. Г. Мнухин]; под общ. ред. А. М. Брюханова. Донецк: Вебер (Донецкое отд-ние.), 2007. – Том III.– С. 505-534.

6. Стернин В. Г. Токоограничивающие реакторы / В. Г. Стернин, А. К. Карпенский. – Л.: Энергия, 1965. – С. 256.

7. Гладилин Л. В. Основы электроснабжения горных предприятий / Л. В. Гладилин. – М: Недра, 1970. – С.256.

Получено: 15.11.2013

Вперше дано обґрунтування застосування пристроїв обмеження струму к.з. у низьковольтних мережах підземного електропостачання. Наведено технічні рішення пристроїв струмообмеження. Містяться вимоги, що регламентують розробку пристроїв струмообмеження.

Ключові слова: струм, коротке замикання, низьковольтна мережа, струмообмеження, пересувна трансформаторна підстанція, кабель, ПВХ-ізоляція, реактор, дуга, фаза, гасіння, вимога, безпека.

The justification of the usage of fault-current limiting devices in low-voltage distribution network of underground power supply systems has been set out for the first time. The technical solutions for current limiting devices have been given. The research paper contains requirements which regulate development of current limiting devices.

Keywords: current, short circuit, low-voltage system, current limiting, mobile voltage transforming plant, cable, PVC insulation, reactor, arc, phase, blow-out, requirement, safety.