

УДК.621.314.6

И.А. Бершадский, канд. техн. наук, доц.

Донецкий национальный технический университет

Г.Л. Федоренко, инженер

ОАО Харьковский машиностроительный завод «Свет шахтера»

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИСКРОБЕЗОПАСНОСТИ ШАХТНЫХ ГОЛОВНЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ СВЕТИЛЬНИКОВ

В работе приведены соотношения для сравнительного анализа чувствительности датчиков короткого замыкания в искробезопасных аккумуляторных шахтных головных светильниках. Даются рекомендации по выбору их оптимальных параметров. Выполнено сравнение опасности искрения различных типов датчиков в аварийных режимах на основании разработанного метода «бескамерной тепловой оценки»

искробезопасность, аккумуляторный светильник, уравнение коммутации, энергия воспламенения, датчик, оценка опасности

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Для освещения подземных выработок шахт, учитывая специфические и особо тяжелые условия эксплуатации, необходимо применение рудничных светильников в специальном исполнении. Согласно правилам безопасности каждый подземный рабочий должен снаряжаться индивидуальными средствами освещения. С этой целью широкое распространение получили переносные аккумуляторные или шахтные головные светильники (ШГС).

Большинство аккумуляторных светильников содержат отдельную фару, закрепляемую на головной каске, и аккумуляторный блок на пояском ремне. Опыт эксплуатации головных светильников типа СГГ-3 с герметизированной батареей $4,5 \pm 1$ В и лампой накаливания с потребляемым током $0,5 \dots 1$ А показал, что наиболее опасным режимом, влияющим на их искробезопасные свойства, является короткое замыкание (КЗ) между жилами шнура. Его могут вызывать различные эксплуатационные причины: разрушение изоляции жил под воздействием масел, разрыв сердечника, повреждение оболочки, некачественная разделка жил под крышкой светильника. В некоторых случаях это приводит к загоранию шнура и корпуса светильника.

Согласно экспериментам, проведенным в работе [1], ток КЗ без принятия специальных мер превышает 6 А и может достигать 150 А. При замыкании в шнуре типа АПМ-2×1 указанный ток составляет

35,5...114 А. В то же время начальные токи заряда некоторых батарей могут достигать 7...10 А, поэтому при выборе защиты по нижним значениям тока КЗ могут появляться ложные срабатывания защиты при заряде.

В старых типах ШГС, не оснащенных специальными электронными блоками искрозащиты, для предотвращения опасности КЗ применялись плавкие вставки предохранителей. Так как разрываемый ток предохранителя превышает искробезопасное значение, его конструкция должна быть взрывобезопасной, что увеличивает габариты и вес светильника.

Дальнейшие исследования, проведенные в МакНИИ, показали, что защита плавким предохранителем эффективна только при протекании по шнуру длительных токов КЗ, приводящих к его загоранию. Это не исключает в полной мере опасность возникновения открытого искрения в поврежденном шнуре, последствием которого может стать зажигание метано-воздушной смеси.

Поэтому необходима дальнейшая разработка способов обеспечения искробезопасности схем ШГС.

В [1] установлено, что целесообразно защиту от КЗ выполнять быстродействующей с временем локализации повреждения, образуемого при замыкании остальных жил не более 7 мкс. Плавкая вставка обеспечивает время прегорания 18...90 мс в зависимости от тока, что намного выше промежутка времени замкнутого состояния контактирующих жил.

Современные ШГС характеризуются наличием в них источников света нового поколения – сверхъярких светодиодов со схемами искрозащиты и управления. Они имеют ряд преимуществ по сравнению с применяемыми в настоящее время аккумуляторными светильниками. Среди них можно выделить надежность (срок работы светодиода увеличен в 100 раз и составляет более 100 000 часов), экономичность (потребляемый ток уменьшен более чем в 2 раза), уменьшение массы и габарита более чем в 2 раза, способность адаптироваться к действующим зарядным станциям, обеспечение особо взрывобезопасного исполнения. К таким светильникам следует отнести, например, светильник шахтный особовзрывобезопасный головной СВГ8-01 (Харьковский машиностроительный завод «Свет шахтера»), предназначенный для индивидуального освещения рабочего места в подземных выработках шахт, опасных по газу и пыли любой категории. Исполнение по взрывозащите РО Иа С. Встроенный контролер

защищает от перезаряда и переразряда аккумуляторную батарею и управляет электронным блоком искрозащиты.

Анализ исследований и публикаций. В работах [2, 3] представлены подходы, используемые в современных электронных блоках искрозащиты ШГС. Последние содержат электронный ключ с точкой соединения с потребителем электроэнергии, ключ управления электронным ключом, выход которого подключен к управляющему входу электронного ключа, датчик сигнала при перегрузках и датчик сигнала при коммутации, включенные последовательно с электронным ключом в канал потребителя электроэнергии. Их выходы связаны со схемой управления электронным ключом.

Датчиками сигнала при перегрузках и датчиками сигнала при коммутации являются в 1-м варианте резистор и дроссель, во 2-м – трансформаторы, первичные обмотки которых включены последовательно с электронным ключом в канал потребителя электроэнергии, в 3-м варианте – насыщающийся трансформатор тока для выделения сигнала при перегрузках.

Сравнительная характеристика эффективности работы указанных блоков искрозащиты (БИЗ) не проводилась, и данные об оптимальных параметрах трансформаторов тока отсутствуют.

Постановка задачи. Настоящая статья является продолжением указанных работ. Цель статьи состоит в анализе способов, применяемых в блоках искрозащиты ШГС с электронным ключом и сравнении относительной чувствительности их воспринимающих узлов в динамических условиях работы.

Изложение материала и результаты.

Основные параметры цепей ШГС приведены в табл. 1 и проиллюстрированы расчетными схемами (рис. 1 и 2).

При возникновении дугового разряда в цепи добавляется сопротивление дуги R_d , которое независимо от рода тока можно считать чисто активным [4], но зависящим от напряжения дуги U_d и тока: $R_d = U_d / i$. Сопротивление дуги изменяется в широких пределах, однако целесообразно рассмотреть случай, при котором энергия устойчивой дуги максимальна. Исследованиями показано, что для этого сопротивление дуги должно быть равно сопротивлению нагрузки установившегося режима цепи, т.е. при коротком замыкании цепи $R_d = R_c$ [5].

В нормальном режиме работы в цепи содержится сопротивление R_n , которое обуславливает протекание тока нагрузки I_n . В случае воз-

никновения дугового разряда при обрыве сопротивление дуги принимается $R_d = R_n$.

Таблица 1 - Исходные данные для расчета блоков искрозащиты ШГС

Аккумуляторная батарея (АБ)	$U_{AB} = 4,5 \text{ В}$ $R_{BH} = 0,006 \text{ Ом}$ $X_{BH} = 0$		
Соединительная цепь	$R_c = 0,3 \text{ Ом}$ $L_c = 4 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$		
Нагрузка	$R_n = 5,4 \text{ Ом}$ $X_n = 0$		
Схема 1		Схема 2	
Датчик коммутации (ДК)	$R_d = 0,66 \text{ Ом}$	Числов витков обмоток трансформатора тока	- первичной $W_1 = 1$ виток - вторичная $W_2 > 1$ витка
		Коэффициент связи контуров	$a = 0,96$
		Взаимная индукция контуров L_1 и L_2	$M = a \sqrt{L_1 L_2} = 6,581 \cdot 10^{-5}$

Получим зависимости, определяющие величину динамического коэффициента чувствительности датчиков выделения сигнала БИЗ. Этот коэффициент определяется отношением относительного приращения выходной величины $\Delta y / y$ к относительному приращению входной величины $\Delta x / x$:

$$S_d = \frac{dy(t)/y(t)}{dx(t)/x(t)} = \frac{dy(t)/dx(t)}{y(t)/x(t)}$$

Его удобно выражать в безразмерных единицах. Относительный коэффициент чувствительности для преобразователя с пропорциональной характеристики $S_d = 1$.

Способ 1.

Расчетная схема блока искрозащиты с маркировкой БИЗ-4 представлена на рис.1.

Переходный процесс при коротком замыкании нагрузки определяется уравнением:

$$E = i \cdot R_{\text{ВН}} + 2 \cdot R_c \cdot i + i \cdot R_d + L_c \cdot \frac{di}{dt} \quad (1)$$

Решение представим в виде суммы установившейся и свободной составляющих: $i = i_y + i_{\text{св}}$.

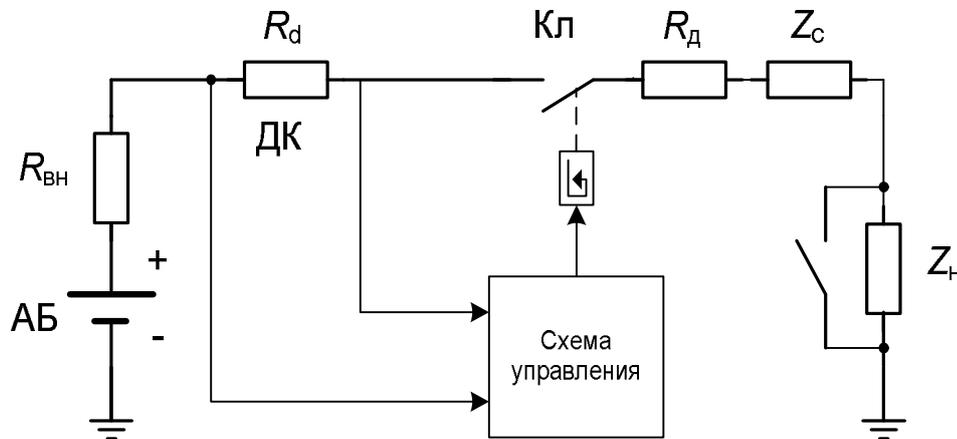


Рис. 1. Электрическая структурная схема шахтного головного аккумуляторного светильника с резистивным датчиком

После определения постоянной интегрирования A получим:

$$i(t) = \frac{E}{R} \left(1 - \frac{R_H}{R + R_H} e^{-t/\tau} \right) \quad (2)$$

Выходное напряжения датчика

$$u_d = i(t) \cdot R_d \quad (3)$$

Скорости изменения входного и выходного сигнала датчика:

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{E}{R} \cdot \frac{R_H}{(R_H + R)\tau} \cdot e^{-t/\tau} \quad (4)$$

$$\frac{du_d}{dt} = E \cdot \frac{R_d}{R} \cdot \frac{R_H}{(R_H + R)\tau} \cdot e^{-t/\tau} \quad (5)$$

Чувствительность датчика в динамическом режиме:

$$S_d = \frac{du_d(t)/dt}{u_d(t)} \cdot \frac{i(t)}{di(t)/dt} = 1, \text{ т.е. это датчик пропорционального типа.}$$

На рис. 2 показаны результаты расчетов по способу 1.

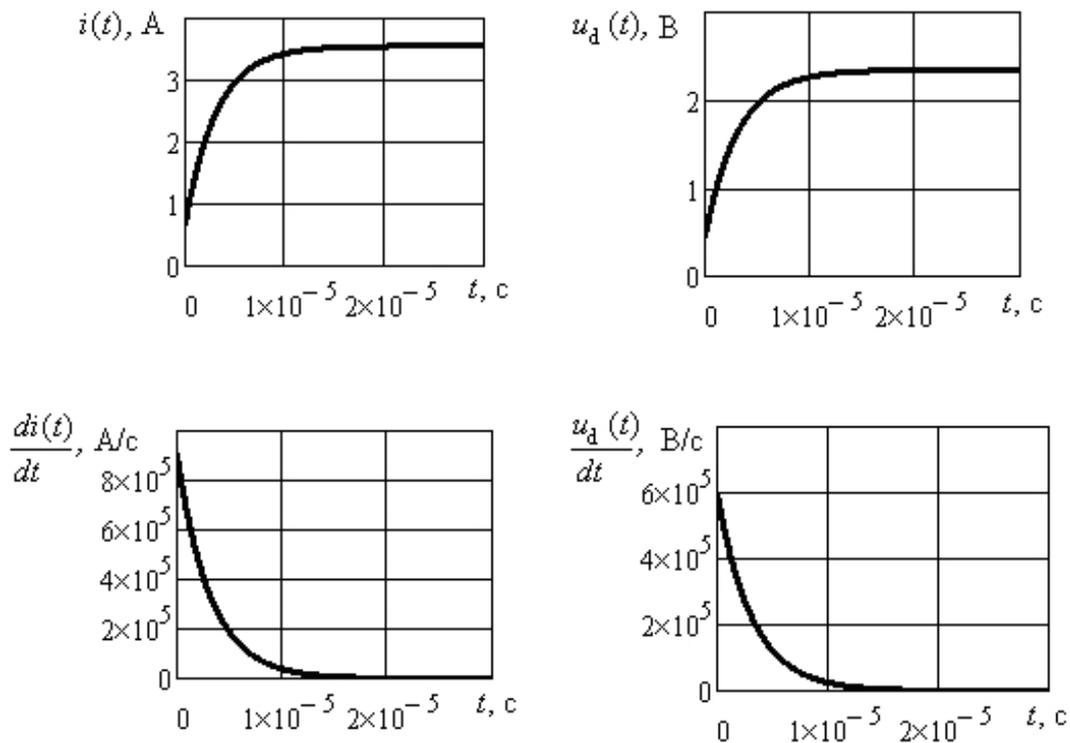


Рис. 2. Характеристики работы датчика по способу 1

Способ 2.

Рассмотрим переходный процесс ДК с маркировкой БИЗ-2, представляющем собой трансформатор тока (ТА1). К его вторичной обмотке подключен преобразователь сигнала при перегрузке или коммутации, который с помощью ряда дополнительных блоков действует на схему управления электронного ключа.

Расчетная схема представлена на рис. 3.

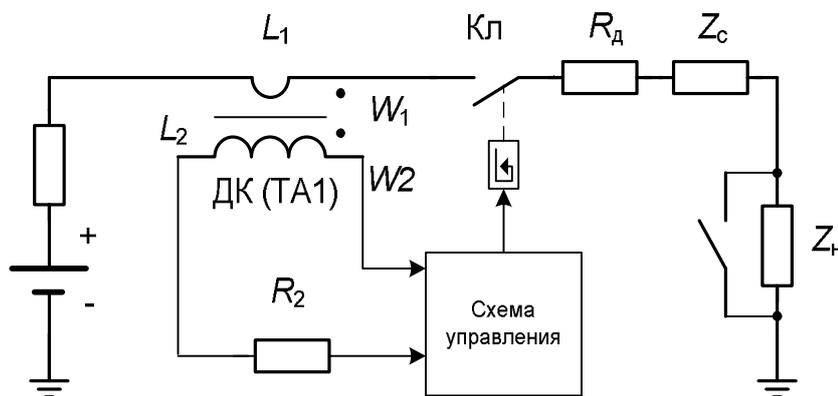


Рис. 3. Электрическая структурная схема шахтного головного аккумуляторного светильника с индуктивным датчиком

Индуктируемый во 2-ом контуре (L_2, R_2) ток i_2 определяется дифференциальным уравнением:

$$L_2 \frac{di_2}{dt} + R_2 i_2 + M \frac{di_1}{dt} = 0, \quad (6)$$

где $\frac{di_1}{dt} = k$ - скорость изменения тока в 1-й обмотке ТА1.

Решение уравнения (7) имеет вид:

$$i_2 = \frac{Mk}{R_2} \left(1 - e^{-\frac{R_2 t}{L_2}} \right) \quad (7)$$

Напряжение на 2-й обмотке w_2 (рис. 3) $u_2 = L_2 \frac{di_2}{dt}$ соответствует напряжению датчика $u_d(t)$.

$$u_d(t) = M \cdot k e^{-\frac{R_2 t}{L_2}}. \quad (8)$$

Найдем скорости изменения входного и выходного сигнала датчика $\frac{di_2}{dt}$ и $\frac{du_d}{dt}$:

$$\frac{di_2(t)}{dt} = M \frac{k}{L_2} e^{-\frac{R_2 t}{L_2}}, \quad (9)$$

$$\frac{du_d(t)}{dt} = -M \frac{k \cdot R_2}{L_2} e^{-\frac{R_2 t}{L_2}}. \quad (10)$$

Чувствительность датчика в динамическом режиме:

$$S_d = \frac{du_d(t)/dt}{u_d} \frac{i_2(t)}{di_2(t)/dt} = e^{\frac{R_2 t}{L_2}} \left(e^{-\frac{R_2 t}{L_2}} - 1 \right). \quad (11)$$

Из (12) следует, что необходимо найти отношение постоянной времени $\frac{L_2}{R_2}$ к длительности разряда $T = 7$ мкс, которое определяет величину чувствительности. Принимаем одинаковую скорость нарастания тока нагрузки $k = 99772$ А/с (рис. 2в), что соответствует моменту T развития аварийного режима (рис. 2 в).

В таблице 2 приведены результаты расчетов зависимости $S_d(L_2 / R_2 T)$ при постоянном сопротивлении $R_2 = 130$ Ом.

Указанные в табл. 2 параметры сети и нагрузки соответствуют критическому значению соотношения $\gamma = 1,446$. При $\gamma \leq \gamma_{кр}$ - $S_d \geq 1$, а при $\gamma > \gamma_{кр}$ - $S_d < 1$, т.е. динамическая чувствительность хуже по сравнению с пропорциональным датчиком по способу 1.

Это же соотношение соблюдается для других контрольных длительностей разряда T и производной тока $\frac{di(t)}{dt} = 0.0012 \text{ A/c}$.

Таблица 2 – Чувствительность датчика ШГС в зависимости от его параметров

$\gamma = L_2 / R_2 T$	L_2	S_d
1,033	0,00094	1,639
1,099	0,001	1,484
<1,446	0,00131	>1
2,198	0,002	0,576

На рис. 4 показаны результаты расчетов по способу 2.

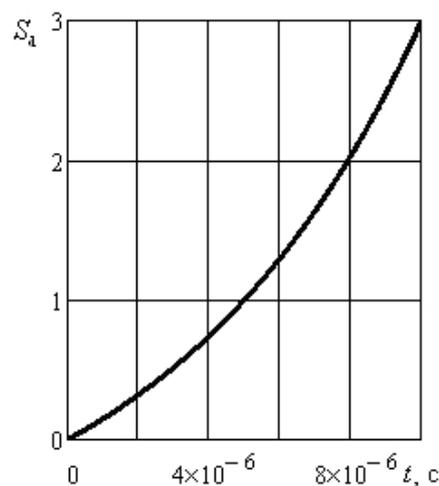


Рис. 4. Характеристики работы датчика по способу 2

Способ 3.

Динамические параметры блока искрозащиты могут быть повышены за счет уменьшения индуктивности 2-й обмотки трансформатора тока [3] вследствие его насыщения в аварийном режиме. Рассмотрим переходный процесс при коротком замыкании нагрузки для этого БИЗ.

Пусть изменение индуктивности 2-й обмотки ТА1 задается зависимостью

$$L_2(i) = L_0(1 + \mu\phi(i)), \quad (12)$$

где $L_0=0,00047$, $\mu = 1$, $\beta=70$, $\phi(i) = \frac{3 \sinh(2\beta i) - \sin(2\beta i)}{2\beta i \cosh(2\beta i) - \cos(2\beta i)}$.

Коэффициенты μ и β подбираются так, чтобы изменение L_2 происходило при токах, начиная с $0,02$ А, что следует из расчетов по способу 2.

Дифференциальное уравнение переходного процесса в цепи короткого замыкания нагрузки:

$$0 = L_2(i) \frac{di_2}{dt} + R_2 i_2 - M \frac{di_1}{dt};$$

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{-i_2 R_2 + M \cdot k}{L_2(i)}.$$

Начальный ток КЗ 2-й обмотки ТА1 $i(0)=0 \cong 10^{-5}$ А.

Решение нелинейного ДУ по методу Эйлера:

$$i_{2j+1} = i_{2j} + hf(i_{2j}, t_j) = i_{2j} - h \frac{i_{2j} R_2 - Mk}{L_2(i_{2j})}, \quad (13)$$

где $h = 0,5 \cdot 10^{-6}$ – шаг расчета по времени, с; $k = 99742$ А/с.

На рис. 5 показаны результаты расчета по способу 3, из которых следует, что динамическая чувствительность повысилась: $S_d = 1,869 > 1,639$.

Основываясь на приведенной выше методике, рекомендуется согласовывать параметры датчиков блоков искрозащиты ШГС, защищающих от коротких замыканий, с параметрами соединительной сети и нагрузки.

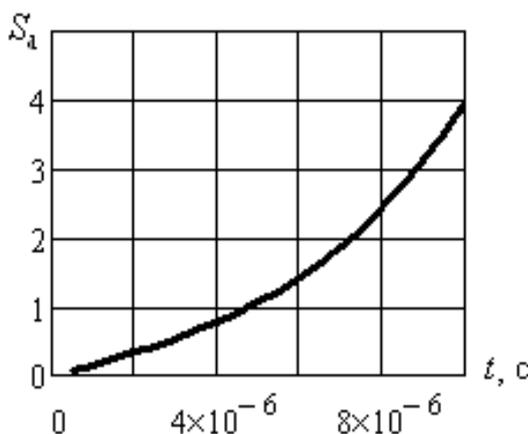


Рис. 5. Характеристики работы датчика по способу 3

Повышение динамических характеристик рассмотренных датчиков положительно влияет на ограничение параметров разряда в блоках искрозащиты ШГС. Оценка их аварийных режимов была получена с использованием моделей дугового разряда и метода «бескамерной тепловой оценки» изложенных в [6].

Результаты тестирования сведены в табл. 3. Они показывают, что блок искрозащиты БИЗ-2 во всех рассмотренных режимах работы (номинальных и аварийных) БИЗ-2 обеспечивают искробезопас-

ность светильников, так как энергия разрядов W не превышают минимальной энергии воспламенения метановоздушной смеси - 0,28 мДж. Блок искрозащиты БИЗ-4 обладает худшими параметрами и может обеспечить безопасную работу светильника только при номинальном токе, не превышающем 0,75 А.

Таблица 3 – Результаты оценки аварийных режимов блоков искрозащиты ШГС ($L_1=4$ мкГн)

U_{AB} , В	$I_{ном}$, А	$I_{кз}$, А	T_p , мксек	W , мкДж
БИЗ-2 (КЗ)				
4,5*1,5	0,75	1,714	12,999	13,104
4,5*1,5	1	2,221	30,183	28,985
БИЗ-2 (Обрыв)				
4,5*1,5	1,5	-	10,173	7,501
4,5*1,5	2	-	10,211	11,805
БИЗ-4 (КЗ)				
4,5*1,5	0,75	0,75	139,5	313,8
4,5*1,5	1	1	140,3	401,9

Примечание. T_p – время разряда от начала коммутации до убывания тока к величине 20 мА; W – энергия разряда размыкания при КЗ и обрыве. Необходимый по ГОСТ коэффициент запаса 1,5 обеспечивался путем увеличения питающего напряжения аккумуляторной батареи.

Выводы и направления дальнейших исследований.

1. На стадии проектирования и разработки целесообразно применять метод «бескамерной тепловой оценки» искробезопасности нового оборудования с требуемыми искробезопасными параметрами. Применение такого метода актуально при сравнительном сопоставлении различных способов обеспечения искробезопасности, в частности, измерительных органов узлов отключения при аварийных режимах ШГС.

2. Для обеспечения высокой чувствительности датчиков блоков искрозащиты ШГС необходимо выбирать коэффициент $\gamma < 1,446$.

3. Время отключения T_p БИЗ-2 меньше, чем у БИЗ-4 в среднем в 11 раз, а выделяемая энергия – в 22 раза.

В дальнейшем планируется использовать полученные результаты для разработки блоков искрозащиты аккумуляторных источников питания рудничного электрооборудования.

Список источников:

1. Ткачук С.П. Взрывопожаробезопасность горного оборудования / С.П. Ткачук, В.П. Колосок, С.А. Ихно. - К.: Основа, 2000. - 698с.
2. Блок іскрозахисту: пат. 5833 Україна, МПК E21 F09/00 / Липовецький Л.С., Бенін Є.Ю., Фельдман С.Д., Федоренко Г.Л., Левін І.Р. - №20040907343; заявл. 15.03.2005; опубл. в Бюл., 2005, №3 .
3. Іскробезпечне джерело живлення: пат. 49348 А Україна, МПК E21 F09/00 / Левін І.Р., Федоренко Г.Л. - №2001117798; заявл. 16.09.2002; опубл. в Бюл., 2002, №9.
4. Родштейн Л. А. Электрические аппараты низкого напряжения / Л. А. Родштейн. – М.: Энергия, 1964. – 363 с.
5. Колосюк А.В. Энергия дугового разряда в искробезопасной системе импульсного питания рудничного электрооборудования с однофазным выпрямлением тока / А.В. Колосюк, В.П. Колосюк //Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах. - 2009. - 2(24).- С.71-84.
6. Бершадский И.А. Симуляция переходных процессов в искробезопасных цепях горношахтного электрического оборудование и прогнозирование опасности воспламенения газовой смеси / И.А. Бершадский, Д.В. Северин // Вісті Донецького гірничого інституту.- 2008. - №2. - С. 178-183.

Стаття надійшла до редколегії 28.04.2011

Рецензент: зав. каф. ЕПМ ДонНТУ, д-р техн. наук, проф. О.П. Ковальов

І.А.Бершадський, Г.Л.Федоренко. Порівняльний аналіз способів забезпечення іскробезпеки шахтних головних акумуляторних світильників. У роботі наведені співвідношення для порівняльного аналізу чутливості дивачив короткого замикання в іскробезпечних акумуляторних шахтних головних світильниках. Даються рекомендації з вибору їхніх оптимальних параметрів. Виконано порівняння небезпеки іскріння різних типів дивачив в аварійних режимах на підставі розробленого методу "безкамерної теплової оцінки".

іскробезпека, акумуляторний світильник, рівняння комутації, енергія запалення, давач, оцінка небезпеки

I. Bershadsky, G. Fedorenko. Comparative analysis of methods on providing of short spark safety electric circuit shemes of mine head storage-battery lamps. This paper provides ratio for the comparative analysis of sensitivity of gauges of short circuit in spark safety electric circuit storage mine head fixtures are resulted. Recommendations for choice their optimum parametres are given. Danger comparison of various types of gauges in emergency operation on the basis of the developed method «tubeless thermal estimation» is executed

spark safety electric circuit, mine head storage-battery lamps, the switching equation, energy of ignition, the gauge, a danger estimation

© Бершадский И.А., Федоренко Г.Л., 2011