

УДК 621.311.16

### НЕОБХОДИМОЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЕ ЗАЩИТНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ ОСОБОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

**В. П. Колосюк, В. Н. Чебенко**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: bgd@kdu.edu.ua

Изложено обоснование методологии определения необходимого времени защитного отключения электрических цепей как средства предотвращения опасности дуговых или искровых разрядов. В качестве критерия безопасности принята минимальная энергия воспламенения взрывчатой метановоздушной смеси при дуговом коротком замыкании в электрической цепи взрывозащищенного электрооборудования, а также в рабочем режиме с учетом влияния индуктивности на условия коммутации. Обосновано применение токоограничительного резистора и раскрыта зависимость его сопротивления от напряжения источника и параметров цепи.

**Ключевые слова:** искрение, энергия, отключение, дуга, сопротивление.

### НЕОБХІДНА ШВИДКОДІЯ ЗАХИСНОГО ВИМКНЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ЛАНЦЮГІВ ОСОБЛИВО ВИБУХОБЕЗПЕЧНОГО ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

**В. П. Колосюк, В. М. Чебенко**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, Україна. E-mail: bgd@kdu.edu.ua

Приведено обґрунтування методології визначення необхідного часу захисного вимкнення електричних ланцюгів як засобу уникнення безпеки дугових або іскрових розрядів. Критерієм безпеки обрана енергія возгорання вибухової метаноповітряної суміші при дуговому короткому замиканні в електричному ланцюгу вибухозахищеного електрообладнання, а також у робочому режимі з урахуванням впливу індуктивності на умови комутації. Обґрунтовано застосування струмообмежувального резистора і розкрита залежність його опору від напруги джерела та параметрів ланцюга.

**Ключові слова:** іскріння, енергія, вимкнення, дуга, опір.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Согласно п. 1.16.3 ГОСТ 22782.0 для особовзрывобезопасного оборудования применяется как вид взрывозащиты «искробезопасная электрическая цепь» уровня «Иа», «Iа» по ГОСТ 22782.5. В таком электрооборудовании используется ряд конструктивных мер по ограничению величины энергетических параметров (тока, напряжения, мощности), применению искрозащитных элементов (токоограничивающих резисторов, шунтов и др.), обеспечению неповреждаемости (надежности) цепи и ее элементов и т.п., направленных на предотвращение образования искр и разрядов, способных воспламенить взрывчатую смесь газа с воздухом в условиях эксплуатации в угольных шахтах, опасных по метану.

## ОХОРОНА ПРАЦІ Й БЕЗПЕКА ВИРОБНИЦТВА НА ГІРНИЧИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

В последнее время, вследствие увеличения необходимой искробезопасной мощности в шахтном электрооборудовании уровня РО широко применяются ключевые схемы для осуществления прерывания токов, если величина тока превышает допустимое искробезопасное значение. Однако в действующих стандартах и технической литературе обоснование величины времени отключения цепи не изложено. Вместе с тем, при нерегламентированном времени отключения, энергия возможного искрения может превысить энергию воспламенения взрывоопасной смеси, что недопустимо, и предопределяет актуальность работы по определению необходимого времени отключения электрической цепи как средства искробезопасности.

Целью работы является обоснование методологии определения времени отключения цепи, при котором коммутационные разряды не вызовут воспламенение взрывчатой метановоздушной смеси.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Для решения поставленной цели определены следующие задачи:

1) обосновать энергетический критерий искробезопасности для разрядов в режиме отключения тока короткого замыкания или рабочего тока цепи;

2) определить зависимость необходимого времени отключения от параметров цепи с учетом выбранного критерия искробезопасности.

Как известно, воспламеняющая способность электрического искрения зависит от величины тока цепи, мощности источника питания и длительности разряда. Поэтому обобщенным критерием воспламеняющей способности может служить величина энергии электрического искрения или дугообразования, особенно если акцент делать на оценку роли длительности разряда, исходя из зависимости энергии от напряжения ( $U$ ) и тока цепи ( $I$ ), а также времени существования разряда ( $t$ ):

$$W = U \cdot I \cdot t . \quad (1)$$

Идея обеспечения искробезопасности путем ограничения длительности разряда быстрым отключением искрящей цепи заключается в том, чтобы энергия разряда ( $W$ ) была меньше минимальной воспламеняющей энергии смеси опасного газа с воздухом ( $W_{min}$ ), т.е. чтобы выполнялось соотношение  $W = W_{min} f(U \cdot I \cdot t)$ .

При переходных режимах, характерных для момента включения или отключения тока, прямая пропорциональности энергии от тока и напряжения нарушается, и решение задачи состоит в обосновании фактической функциональной зависимости времени отключения от параметров электрической цепи.

Согласно отечественным и зарубежным стандартам на взрывозащищенное электрооборудование под минимальной воспламеняющей энергией понимают энергию в электрической цепи, образующей искрящий разряд, который вызывает воспламенение взрывоопасной смеси с вероятностью  $10^{-3}$ . В ГОСТ Р 51330.10–99, гармонизированном со стандартом международной электротехнической комиссии (МЭК IEC 60079–11–11), дано следующее определение: «Минимальная воспламеняющая энергия (мощность) электрического разряда – энергия (мощность)

## ОХОРОНА ПРАЦІ Й БЕЗПЕКА ВИРОБНИЦТВА НА ГІРНИЧИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

электрического разряда, вызывающая воспламенение взрывоопасной смеси с вероятностью  $10^{-3}$  при испытании с использованием искрообразующего механизма», в соответствии с требованиями этого стандарта.

Это означает, что величина минимальной воспламеняющей энергии связана с вероятностью воспламенения, хотя в ряде литературных источников приведены значения минимальной воспламеняющей энергии без связи с вероятностью воспламенения (табл. 1), и на практике считается, что при значении энергии, меньшем минимальной воспламеняющей, воспламенение смеси не происходит.

Таблица 1 – Минимальная энергия воспламенения метановоздушной смеси

Авторы или источники публикаций	Минимальная энергия воспламенения, мДж (мВА·с)	Механизм воспламенения
Каймаков А.А. и др. [1]	0,28	Электрическая искра
Ткачук С.П., Колосюк В.П., Ихно С.А. [2]	0,28	Электрическая искра
Розловский А.Н. [3]	0,33	Взрывчатое вещество
ОСТ 12.1.24.294–86 Система стандартов безопасности труда. Оборудование горно-шахтное. Изделия неметаллические. Электростатическая искробезопасность. Общие требования и методы испытаний.	0,25	Электростатический разряд
Стандарт МЭК IEC 60079–2009	0,20	Стандартизованный искрообразующий механизм
ГОСТ Р 51330.10–79	0,35	Стандартизованный искрообразующий механизм
Дубнов Л.В. [5]	0,28	Электрическая искра

Наименьшее значение минимальной энергии 0,20 мДж приведено в стандарте МЭК из условий поджигания взрывчатой смеси от остаточного заряда на конденсаторе и может считаться нижней границей минимальной энергии воспламенения.

Однако, исходя из того, что в реальной электрической цепи всегда имеется некоторое сопротивление, ограничивающее величину тока при коротком замыкании, большее доверие вызывает значение минимальной энергии  $W_{min} = 0,28$  мДж, которое большинство авторов относит к режиму коммутации электрической цепи в наиболее взрывчатой метановоздушной смеси с поджиганием ее электрическими искрами коммутации.

Заметим, что во многих случаях опасность искрения и воспламенения

## ОХОРОНА ПРАЦІ Й БЕЗПЕКА ВИРОБНИЦТВА НА ГІРНИЧИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

взрывчатой смеси оценивают с учетом вероятности такого процесса. Так, по ГОСТ 22782.5, как и по гармонизированному со стандартом МЭК Российскому ГОСТ Р 51330.10–99, минимальные воспламеняющие параметры (ток, мощность, энергия) определяются как вызывающие воспламенение взрывоопасной смеси с вероятностью  $10^{-3}$ .

Отметим, что ГОСТ 12.1.010–78 мерой риска взрыва в случае технической или экономической целесообразности, определяет так, чтобы производственные процессы разрабатывались при обеспечении «вероятности воздействия опасных факторов взрыва на людей в течение года не выше  $10^{-6}$  на человека», причем по данным ГОСТ Р 51330.10–99 минимальная воспламеняющая энергия зависит не только от длительности разряда, но и от скорости размыкания контактов коммутируемой цепи (рис. 1) и её значение согласно графическим зависимостям может составлять от 0,25 до 15 мДж, что значительно превышает величину 0,28 мДж. Поэтому в концепции искробезопасности электрической цепи обычно переходят от минимальных воспламеняющих параметров (ток, мощность, энергия) к искробезопасным путем применения коэффициента искробезопасности. При этом величина искробезопасной энергии ( $W_u$ ) может быть определена путем уменьшения минимальной воспламеняющей энергии на величину коэффициента искробезопасности ( $K_u$ ):

$$W_u = \frac{W}{K_u}.$$

Для рудничных электроустановок, ориентируясь на метановоздушную взрывоопасную смесь, принимают  $K_u = 1,5$ .

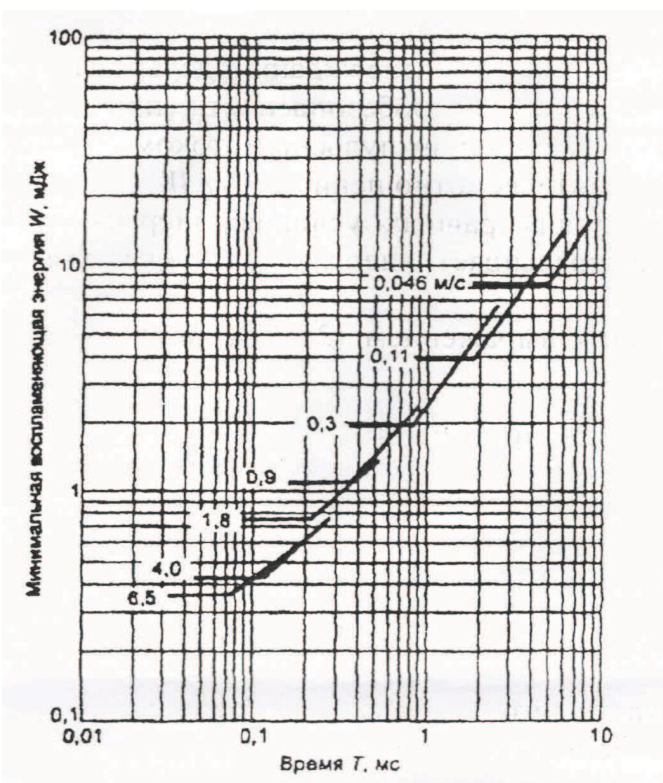


Рисунок 1 – Зависимости минимальной воспламеняющей энергии  $W$  от длительности разряда  $t$  и скорости размыкания контактов (указаны цифрами на графике)



## ОХОРОНА ПРАЦІ Й БЕЗПЕКА ВИРОБНИЦТВА НА ГІРНИЧИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

Если пользоваться данными рис. 1, то значение энергии из графика следует уменьшать на величину упомянутого коэффициента. При этом можно считать, что вероятность воспламенения составляет  $10^{-6}$ .

На основании изложенного определение необходимого времени отключения электрической цепи средствами защитного отключения напряжения целесообразно осуществлять по выражению (1), приняв минимальную энергию воспламенения  $W_{min} = 0,28$  мДж, а графики (рис. 1) можно использовать для оценки вероятности воспламенения, т.к. при значениях энергии по данным графиков обеспечивается вероятность воспламенения метановоздушной смеси  $10^{-3}$ , а при значениях, уменьшенных в  $K_u=1,5$  – вероятность  $10^{-6}$ .

Для раскрытия функциональной зависимости (1) рассмотрим процесс электрической коммутации, осуществляемый размыканием двух контактов цепи, приводящий к образованию дугового разряда на контактах при отключении тока короткого замыкания или рабочего тока цепи, при котором ток не прекращается в момент размыкания контактов, а продолжает протекать также и после этого по электрической дуге, и процесс коммутации заканчивается лишь после угасания дуги [6].

Искробезопасную цепь представим как цепь постоянного тока с активным сопротивлением  $R$  и индуктивностью  $L$  (рис. 2). Электрическая дуга, возникающая на коммутируемых контактах, характеризуется напряжением дуги  $U_\delta$ :

$$U_\delta = U - I \cdot R_\delta \quad (2)$$

Особенность выражения (2) состоит в том, что сопротивление дуги  $R_\delta$  является нелинейным и изменяется в широких пределах.

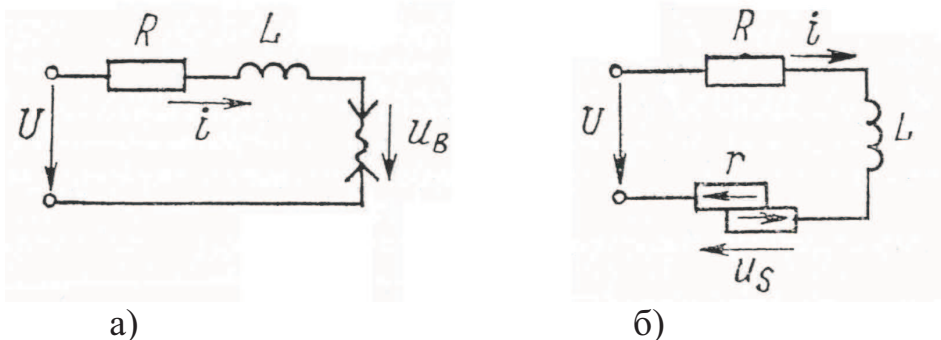


Рисунок 2 – Схема моделирования цепи постоянного тока при дуговом разряде:

а – имитация дуги нелинейным напряжением ( $U_\delta$ );

б – имитация нелинейного сопротивления дуги ( $r$ )

В работе [6] моделирование нелинейного сопротивления дуги выполнено с учетом того, что при размыкании выключателя в любой электрической цепи оно постепенно уменьшается, и затем падает до нуля либо контактное давление, либо площадь соприкосновения контактов (рис. 2,б). В предположении равномерного движения контактов в течение времени  $t_s$  отключения тока обосновано изменение сопротивления дуги по выражению [6]:

$$R_s = \frac{r}{1 - \frac{t}{t_s}} = \frac{r \cdot t_s}{t_s - t}, \quad (3)$$

где  $r$  – сопротивление контактов при полной площади их соприкосновения;  
 $t$  – текущее время от начала процесса размыкания контактов.

С учетом этого процесс отключения цепи постоянного тока описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$L \frac{di}{dt} + R \cdot i + \frac{rt_s}{t_s - t} \cdot i = U. \quad (4)$$

Третий член этого уравнения представляет собой напряжение на коммутируемых контактах:

$$U_s = \frac{rt_s}{t_s - t} i. \quad (5)$$

Электрическая энергия, рассеиваемая в течение всего периода отключения выключателя (работа коммутации), составляет:

$$A = \int_0^{t_s} U_s \cdot i \cdot dt.$$

С учетом выражения (4) работа коммутации будет

$$A = \int_0^{t_s} (U - R \cdot i - L \frac{di}{dt}) \cdot i dt = \int_0^{t_s} (U - R \cdot i) \cdot i dt - \int_I^0 L \cdot i di.$$

В работе [6] решение этого уравнения дано как максимальная работа коммутации:

$$A_{\max} = \frac{LI^2}{2} + \frac{RI^2}{6} \cdot t, \quad (6)$$

где  $I = \frac{U}{R}$  – установившееся значение тока.

При коротком замыкании в цепи ток  $I$  – это установившееся значение тока короткого замыкания ( $I = I_k$ ), в рабочем режиме ток  $I$  – это установившееся значение тока потребителя ( $I = I_p$ ).

Для определения необходимого времени отключения на основании условия (1) имеем следующее выражение:

$$W_{\min} \geq \frac{LI^2}{2} + \frac{RI^2}{6} t. \quad (7)$$

Из этого выражения могут быть предложены следующие формулы для определения необходимого времени отключения.

Время отключения в режиме короткого замыкания ( $t = t_k$ ), исходя из максимального тока, возникающего при коротком замыкании на зажимах источника ( $I = I_k$ ,  $R = R_k$ ), когда влияние индуктивности нагрузки не проявляется и  $L = 0$ ,

$$t_k = \frac{6W_{\min}}{I_k^2 R_k} \text{ с} \quad (8)$$

или

$$t_k = \frac{6W_{\min} R_k}{U^2}, \text{ с} \quad (9)$$

или

$$t_k = \frac{6W_{\min}}{P_k}, \text{ с} \quad (10)$$

где  $U$  – напряжение источника, В;

$R_k = \frac{U}{I_k}$  – внутреннее сопротивление источника или сопротивление в ре-

жиме к.з. с учетом примененного токоограничивающего резистора, Ом;

$P_k = U \cdot I_k$  – мощность цепи в режиме короткого замыкания, ВА.

В рабочем режиме в цепи протекает ток нагрузки ( $I = I_p$ ), а элементами цепи являются внутреннее сопротивление источника ( $R_k$ ), сопротивление нагрузки ( $R_p$ ) и её индуктивность ( $L$ ), поэтому  $R = R_k + R_p$  и

$$I_p = \frac{U}{R_{к.з.} + R},$$

а время ( $t = t_p$ ) отключения цепи в режиме короткого замыкания будет:

$$t_p = \frac{3}{R} \left( \frac{2W_{\min}}{I_p^2} - L \right), \text{ с} \quad (11)$$

или

$$t_p = 3 \left( \frac{2W_{\min}}{U^2} R - \frac{L}{R} \right), \text{ с}, \quad (12)$$

или

$$t_p = 3 \left( \frac{2W_{\min}}{P} - \frac{L}{R} \right), \text{ с} \quad (13)$$

где  $P = U \cdot I_p$  – мощность цепи в режиме нормальной работы нагрузки (потребителя), ВА.

Для каждой цепи время отключения должно удовлетворять искробезопасности как в режиме короткого замыкания, так и в рабочем режиме, когда оно зависит от индуктивности, или время отключения должно быть минимальным, чтобы в любом режиме работы обеспечивались условия безопасности.

В режиме короткого замыкания для определения времени отключения необходимо располагать заданным напряжением питания цепи ( $U$ ), а допустимый ток короткого замыкания определять исходя из регламентируемого стандартами искробезопасности минимального воспламеняющего тока ( $I_g$ ) по выражению

$$I_k = I_g \cdot K_n,$$

где  $K_n$  – коэффициент искробезопасности, принимаемый для взрывоопасной смеси метана с воздухом, равным  $K_n = 1,5$ .

## ОХОРОНА ПРАЦІ Й БЕЗПЕКА ВИРОБНИЦТВА НА ГІРНИЧИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

Для определения минимального воспламеняющего тока в ГОСТ 227825 и в стандарте IEC 20079–1 приведены графики минимальных воспламеняющих токов в зависимости от напряжения цепи, а в IEC 20079–1, кроме того, приведены таблицы допустимых токов короткого замыкания также в зависимости от напряжения цепи, с использованием которых составлена табл. 2, данные которой можно использовать для расчетов.

Внутреннее сопротивление источника (табл. 2) определено по значению напряжения и тока короткого замыкания или коэффициенту искробезопасности  $K_k=1,5$ :

$$R_k = \frac{UK_u}{I_k}, \text{ Ом.}$$

Сопротивление нагрузки ( $R_p$ ) может быть задано или, если нагрузка задана номинальным током ( $I_p$ ), то оно может быть определено исходя из напряжения по выражению:

$$R_p = \frac{U}{I_p} - R_k.$$

Таблица 2 – Допустимый ток короткого замыкания в зависимости от напряжения

Напряжение, В	Допустимый ток короткого замыкания $I_k$ , мА для под- группы (группы) при коэффициенте искробезопасности		Внутреннее сопротивление источника с уче- том токоограничи- вающего резистора ( $R_k$ ), Ом	Граничная индуктив- ность цепи, мГн
	1,0	1,5		
16,0	5000	3530,0	4,80	0,30
18,0	3170	2110,0	8,53	0,75
20,0	2274	1516,0	13,70	1,46
24,0	1057	704,7	34,00	6,80
28,0	773	515,3	54,30	12,70
36,0	434	289,3	124,40	40,10
42,0	331	220,7	190,30	69,00
45,0	286	190,7	236,00	92,40

Для цепей с индуктивностью не всегда необходимое минимальное время отключения соответствует режиму короткого замыкания, поскольку, несмотря на то, что ток в режиме к.з. больше тока рабочего режима, при определенной индуктивности требуется меньшее время отключения.

Определение предельной индуктивности, при которой требуется меньшее время отключения можно определить из граничных условий  $t_p \leq t_k$ , или используя выражения (10) и (13):



$$3\left(\frac{2W_{\min}}{p} - \frac{L}{R}\right) \leq \frac{6W_{\min}}{P_k} . \quad (14)$$

Определяя индуктивность ( $L$ ), получаем

$$L \leq R\left(\frac{1}{P_p} - \frac{1}{P_k}\right)6W_{\min} . \quad (15)$$

С учетом значений:  $R = \frac{U^2}{P_p}$ ;  $P_p = UI_p$ ;  $P_k = UI_k$

имеем:

$$L \leq 6W_{\min} \left(\frac{1}{I_p^2} - \frac{1}{I_p I_k}\right) \quad (16)$$

Следует учесть, что оптимальные энергетические условия соответствуют случаю, когда сопротивление источника равно сопротивлению нагрузки, т.е.  $R_k = R_p$ .

Для такого случая  $I_k = \frac{U}{R_k}$ ;  $I_p = \frac{U}{R_k + R_p} = \frac{U}{2R_k}$ , а, следовательно, оптимальные условия будут, когда  $I_p = \frac{I_k}{2}$ .

После необходимых преобразований получим:

$$L \geq \frac{12W_{\min}}{I_k^2} \text{ или } L \geq \frac{3W_{\min}}{I_p^2} . \quad (17)$$

При больших значениях индуктивности цепи, минимальное время отключения необходимо определять по рабочему режиму, используя формулы (11)–(13), а при меньших значениях – по режиму короткого замыкания, используя формулы (8)–(10). Однако при расчете времени отключения цепи защитой необходимо исходить из фактической индуктивности цепи, которая указана в технической документации на взрывозащищенное изделие или определять её проверенным методом измерения.

Расчетные значения граничных индуктивностей приведены в табл. 2.

Как пример рассчитаны значения необходимого времени отключения цепи для наиболее часто применяемых напряжений питания искробезопасных систем угольных шахт. Для режима короткого замыкания источника оно составляет в соответствии с формулами (8), (9), (10): при напряжении  $U = 24$  В и внутреннем сопротивлении  $R_k = 34$  Ом – 0,0991 мс; при напряжении  $U = 36$  В и  $R_k = 124,4$  Ом – 0,1612 мс и при напряжении  $U = 42$  В и  $R_k = 190,3$  Ом – 0,1812 мс.

Для рабочего режима расчетные значения времени отключения согласно формулам (11), (12), (13) при сопротивлении цепи  $R = 2R_k$  приведены в табл. 3.

**ОХОРОНА ПРАЦІ Й БЕЗПЕКА ВИРОБНИЦТВА НА ГІРНИЧИХ  
ПІДПРИЄМСТВАХ**

Таблица 3 – Необходимое время отключения для искробезопасности искрения  
в рабочем режиме цепи

Индуктивность цепи, Гн	Необходимое время отключения (мс) при напряжении цепи и сопротивлении		
	24,0 В и 34,0 Ом	36,0 В и 124,4 Ом	42,0 В и 190,3 Ом
0	0,1986	0,3225	0,3624
1	0,1542	0,3105	0,3546
2	0,1101	0,2984	0,3467
3	0,0660	0,2864	0,3338
4	0,0219	0,2743	0,3309
5	–	0,2623	0,3230
10	–	0,2070	0,2836
20	–	0,0815	0,2048
30	–	–	0,1240
40	–	–	0,0472
50	–	–	–

Из табл. 3 следует, что при определенной индуктивности цепи обеспечить искробезопасность разрядов не удастся, т. к. для этого требуется мгновенное отключение с временем, равным нулю (обозначено прочерками в табл. 3). Из полученных данных также видно, что в рабочем режиме имеются условия, когда необходимое время отключения может быть меньше времени отключения цепи в режиме короткого замыкания. Полученные данные свидетельствуют о том, что для отключения напряжения в искробезопасных цепях должны применяться ключевые элементы, имеющие большое быстродействие (менее 1 мс), т.к. релейные контактные могут обеспечить время отключения значительно больше 1 мс.

В практике из соображений искробезопасности прибегают к увеличению токоограничивающих сопротивлений.

Например, в Приложении А.3 стандарта IEC 60079–11 при оценке искробезопасности цепи напряжением  $U = 20$  В с индуктивностью  $L = 100$  мГн применен токоограничивающий резистор сопротивлением  $R = 3000$  Ом.

Можно предложить определение сопротивления токоограничивающего резистора определять, исходя из того, чтобы необходимое время отключения было всегда положительным. Это условие вытекает из формулы (12), что выражается неравенством:

$$\frac{2W_{\min}}{U^2} > \frac{L}{R},$$

Откуда сопротивление токоограничивающего резистора будет:

$$R \geq U \sqrt{\frac{L}{2W_{\min}}}, \quad \text{Ом}$$

или

$$R > 42U\sqrt{L}, \quad \text{Ом} \quad (18)$$

## ОХОРОНА ПРАЦІ Й БЕЗПЕКА ВИРОБНИЦТВА НА ГІРНИЧИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

В этой формуле  $L$  – это фактическая индуктивность цепи, а  $R$  – общее сопротивление источника с токоограничивающим резистором. Для цепи напряжением  $U = 24\text{В}$  сопротивление  $R = 320\text{ Ом}$ . В табл. 4 приведены расчетные значения времени отключения цепи напряжением 24 В согласно формуле (15) при значении  $R = 320\text{ Ом}$  и заданной индуктивности  $L=100\text{ мГн}$ , из которой видно, что увеличение сопротивления с 34 Ом до 320 Ом позволяет увеличить необходимое время отключения и расширить возможности защитного отключения цепей с большей индуктивностью по сравнению с данными табл. 3, полученным при  $R=2R_k=680\text{ Ом}$ .

Таблица 4 – Время отключения цепи при увеличенном сопротивлении токоограничивающего резистора

Индуктивность цепи напряжением 42 В при сопротивлении источника 320 Ом, мГн	Необходимое время отключения цепи в рабочем режиме, мс
0	0,9333
1	0,9240
10	0,8396
20	0,7458
30	0,6521
40	0,5583
50	0,4646

При этом в режиме короткого замыкания в цепи напряжением 24В при сопротивлении  $R=2R_k=320\text{ Ом}$  необходимое время отключения согласно формуле (9) будет  $t_k=0,9333\text{ мс}$ , т.е., соответствует необходимому времени отключения в рабочем режиме при  $L=0$ .

**ВЫВОДЫ.** Результаты проведенных исследований позволили сделать следующие выводы.

1. Для определения времени отключения электрических цепей по условиям невоспламенения метановоздушной взрывоопасной смеси искрами размыкания обосновано в качестве критерия применение минимальной воспламеняющей энергии 0,28 мДж.

2. Получены зависимости необходимого по условиям искробезопасности времени отключения электрических цепей от тока, напряжения, мощности источника, а также сопротивления и индуктивности цепи при коммутационных разрядах в режиме короткого замыкания и нормальной работы.

3. Рекомендовано при индуктивности, более граничной, необходимое быстрое действие определять по рабочему режиму коммутации, а при меньшей индуктивности – по коммутации тока короткого замыкания.

4. Предложена формула для определения по соображениям искробезопасности величины сопротивления токоограничивающего резистора источника питания в зависимости от напряжения цепи и величины её индуктивности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Взрывобезопасность рудничного электрооборудования / Под ред. А.А. Каймакова. – М.: Недра, 1982. – 207 с.
2. Взрывопожаробезопасность горного оборудования / С.П. Ткачук, В.П. Колосюк, С.А. Ихно. – К.: «Основа», 2000. – 695 с.
3. Розловский А.И. Основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами. – М.: Химия, 1980. – 376 с.
4. Анохин В.А. Компьютерное моделирование безопасных параметров рабочих мест горно-шахтного оборудования // Уголь Украины. – 2012. – № 10. – С. 23–26.
5. Промышленные взрывчатые вещества / Л.В. Дубнов, Н.С. Бахареvич, А.Н. Романов. – М.: Недра, 1973. – 320 с.
6. Рюденберг Р. Эксплуатационные режимы электроэнергетических систем и установок. – Л.: Энергия, 1980. – 578 с.

**NECESSARY SPEED PROTECTIVE TRIP SPECIALLY EXPLOSION  
PROTECTION ELECTRICAL**

**V. Kolosyuk, V. Chebenko**

Kremenchug Mykhailo Ostrohradskiy National University

vul. Pervomayskaya, 20, Kremenchug, 39600, Ukraine. E-mail: bgd@kdu.edu.ua

Study outlines the methodology for determining the time required for Barrier-off electric circuits, as a means of preventing dangerous-of arc or spark discharges. As a safety criterion adopted minimum ignition energy of the explosive methane-air mixture in an arc-fault in an electrical circuit electron-explosion-proof equipment of machines, as well as in the operating mode for the effects of inductance on switching conditions. The application of current limiting resistor and disclosed its dependence on the voltage source and the circuit parameters.

**Key words:** sparks, energy, trip, arc resistance.

REFERENCES

1. (1982) *"Vzryvobezopasnost' rudnichnogo elektrooborudovaniya"* [Mining Electrical Explosion], ed. A.A. Kaymakova, Nedra, Moscow, Russia.
2. Tkachuk, S.P., Kolosyuk, V.P., Ikhno, S.A. (2000) *"Vzryvo-pozharobezopasnost' gornogo oborudovaniya"* [Explosion-fire safety of mining equipment], Osнова, Kiev, Ukraine.
3. Rozlovskiy, A.I. (1980) *"Osnovy tehniky vzryvobezopasnosti pri rabote s goryuchimi gazami i parami"* [Basic techniques of explosion when working with flammable gases and vapors], Khimiya, Moscow, Russia.
4. Anikhin, V.A. (2012) Computer modeling jobs safe parameters of mining equipment, *Ukraine coal*, no. 10, pp. 23–26.
5. Dubnov, L.V., Bakharevich, N.S., Romanov, A.N. (1973) *"Promyshlennyye vzryvchatye veshchestva"* [Industrial Explosives], Nedra, Moscow, Russia.
6. Ryudenberg, R. (1980) *"Ekspluatatsionnye rezhimy elektroenergeticheskikh sistem i ustanovok"* [Operating conditions of electrical power systems and installations], Energiya, Leningrad, Russia.

Стаття надійшла 28.12.2014.