

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ,  
ВОЗНИКАЮЩИХ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ И ВЛИЯЮЩИХ НА  
ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ АППАРАТУРЫ МОБИЛЬНЫХ  
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМНЫХ  
КОМПЛЕКСОВ**

Викладено питання оцінювання чинників, що впливають на вибухонебезпечність апаратури мобільних інформаційно-вимірювальних системних комплексів в умовах газонасиченості гірського масиву на підставі модулювання та вимог безпеки.

**DESIGN OF ELECTRIC DIGITS ARISING UP IN ELECTRIC CHAINS  
AND MOBILE INFORMATION-AND-MEASURING SYSTEMS  
COMPLEXES INFLUENCING OF EXPLOSION HAZARD OF APPARATUS**

The question of evaluation of factors which influence on explosiveness of apparatus of mobile informatively-measuring system complexes in the conditions of газонасиченості of mountain range on the basis of modulation and requirements of safety is laid out

Общепринято считать, что наиболее эффективным и экономически оправданным видом взрывозащиты является искробезопасное исполнение, основанное на том, что электрические разряды малой энергии оказываются неспособными воспламенить взрывчатую смесь. Несмотря на успешное решение ряда актуальных практических вопросов, связанных с искробезопасностью в угольной промышленности, до настоящего времени не создана математическая модель электрических разрядов возникающих в электрических цепях мобильных информационно-измерительных системных комплексов (МИИСК), позволяющая на стадии проектирования оценить, его искробезопасность в условиях взрывоопасной шахтной смеси (ВШС). Процесс воспламенения ВШС от электрической энергии весьма сложен и мы предлагаем свое решение этой проблемы.

Для определения энергии электрической цепи МИИСК в электрический разряд воспользуемся экспериментально-теоретической моделью предложенной Э.Г. Коганом [1] и приведенной там же аналитической зависимости электрического напряжения на разрядном промежутке.

$$U = a + hvt + gvt/I \quad (1)$$

где  $a$  – электрическое напряжение, обеспечивающее напряженность электрического поля, необходимую для возникновения электрического разряда при межконтактных расстояниях, соизмеримых с длиной свободного пробега заряженных частиц;  $h$  – напряженность электрического поля, обеспечивающая определенную степень ионизации молекул ВШС путем неупругих соударений;  $v$  – скорость движения электрических контактов;  $t$  – время;  $g$  – мощность, выде-

ляемая на единице длины электрического разряда и обеспечивающая необходимую степень тепловой ионизации;  $i$  – ток электрического разряда.

Из анализа выражения (1) видно, что при постоянной скорости  $v$  рост электрического напряжения при электрическом разряде будет линейным при малом изменении тока  $i$  и нелинейным (выпуклостью вниз) – при существенном изменении тока в разряде за время  $t$  его существования. Изучение экспериментальных осциллограмм электрического напряжения электрического разряда размыкания, полученных другими исследователями [2,3,4] приводит нас к выводу, что закон изменения напряжения электрического разряда всегда нелинейен (выпуклостью вниз), а при некоторых параметрах электрической цепи близок к линейному.

Для моделирования наиболее опасных условий выберем такой рост электрического напряжения на разрядном промежутке, при котором из электрической цепи МИИСК выделяется максимум энергии за критериальное время. В этом случае, модель электрического разряда при малом линейном изменении тока может быть записана в виде

$$U_{разр} = U_{заж} + pEt/T \quad (2)$$

где  $U_{заж}$  – электрическое напряжение зажигания ВШС,  $p$  – коэффициент пропорциональности, показывающий во сколько раз в сравнении с э.д.с. источника питания  $E$  возрастает напряжение разряда  $U_{разр}$  за время его существования  $T$ .

Применяя эту модель электрического разряда, определим энергоотдачу из омической цепи МИИСК. Ток разряда в омической цепи МИИСК будет равен

$$i_{разр} = (E - U_{разр})/R = (E - U_{разр})/R - pEt/(TR) \quad (3)$$

где  $R$  – сопротивление омической цепи МИИСК.

Энергия электрического разряда за время его существования будет равна

$$A = \int_0^T U_{разр} i_{разр} dt = IET \left( \frac{n-1}{n^2} - \frac{p}{2n} + \frac{p(n-1)}{2n} - \frac{p^2}{3} \right), \quad (4)$$

где  $n = E/U_{заж}$ .

Определим значение коэффициента  $p$ , при котором энергия электрического разряда будет максимальна. Тогда

$$dA/dp = 0 = -1/2n + (n-1)/2n - 2p/3$$

Откуда:

$$p_{max} = 3(n-2)/4n$$

Подставим значение  $p_{max}$  в зависимость (4) получим максимум энергии электрического разряда

$$A_{max} = IET[(3n^2 + 4n - 4)/(16n^2)] \quad (5)$$

Зависимость (5) справедлива только при  $n \geq 2$ .

Максимальная энергия электрического разряда для случая  $1 \leq n \leq 2$  определяется из зависимости (4) при  $p = 0$ :

$$A_{max} = IET[(n - 1)n^2]$$

Реальная электрическая энергия разряда в электрических цепях МИИСК определится как разность общей энергии разряда и электрических потерь в контактах:

$$A_{реал} = A - \int_0^T U_{зак} i_{раз} dt = IET [(n - 1)p / (2n) - p^2/3] \quad (6)$$

Определим значение коэффициента  $p$ , при котором реальная энергия электрического разряда максимальна:

$$dA/dp = 0 = n - 1/2n - 2p/3$$

Откуда

$$p_{max} = 3(n - 1)/4n$$

Подставив полученное  $p_{max}$  в (6) получим максимум электрической энергии разряда

$$A_{реал. max} = IET[3(n - 1)^2/(16n^2)] \quad (7)$$

При нелинейном (выпуклостью вниз) изменении напряжения разряда в электрической цепи МИИСК его напряжение смоделируем в виде

$$U_{разр} = U_{зак} + pEt^2/T^2 \quad (8)$$

Тогда ток электрического разряда в омической цепи МИИСК будет равен

$$i_{разр} = (E - U_{разр})/R = I[(n - 1)/n - pt^2/T^2] \quad (9)$$

Электрическая энергия разряда за время его существования определяется:

$$A = \int_0^T U_{\text{разр}} i_{\text{разр}} dt = IET \left( \frac{n-1}{n^2} - \frac{2p}{3n} + \frac{p}{3} - \frac{p^2}{5} \right)$$

Рассчитаем значение коэффициента  $p_{\max}$ , при котором электрическая энергия разряда максимальна

$$dA/dp = 0 = 1/3 - 2/3n - 2p/5$$

Тогда

$$p_{\max} = 5(n-1)/6n,$$

а максимальное значение электрической энергии разряда

$$A_{\max} = IET[(5n^2 + 16n - 16)/(36n^2)]$$

Откуда реальная энергия электрического разряда

$$A_{\text{реал}} = A - \int_0^T U_{\text{заж}} i_{\text{раз}} dt = IET [3/p - p/(3n) - p^2/5]$$

Определим значение коэффициента  $p$ , при котором реальная энергия электрического разряда максимальна:

$$dA/dp = 0 = 1/3 - 1/3n - 2p/5$$

Откуда

$$p_{\max} = 5(n-1)/6n,$$

а, максимальное значение реальной энергии электрического разряда

$$A_{\text{реал. макс}} = 5/36[IET(n-1)^2/n^2] \quad (10)$$

Как видим, при линейной модели напряжения в электрических цепях МИИСК реальная электрическая энергия разряда существенно больше, чем при нелинейной модели в тех же цепях:

$$(3n^2 + 4n - 4)/16n^2 > (5n^2 + 16n - 16), \text{ а } 3/16 > 5/36.$$

Проанализируем реальную энергоотдачу из типовой одноконтурной цепи МИИСК с учетом индуктивности фидера (кабеля) в электрический разряд. Для охвата всех теоретически возможных видов выделения электрической энергии в разряд (в том числе и с линейным убыванием тока), смоделируем ток разряда в виде функции

$$i_{\text{разр}} = I[1 - (t/T)^a]$$

где  $a$  – показатель степени.

Энергия электрического разряда для такой цепи МИИСК будет иметь следующее выражение

$$A = \int_0^T (E - L di_{\text{разр}} / dt - i_{\text{разр}} R) I [1 - (t/T)^a] dt = IETa / (2a + 1)(a + 1) + LI^2 / 2 \quad (11)$$

Из выражения (11) видно, что индуктивная составляющая электрической энергии разряда не зависит от формы изменения тока разряда. Составляющая же энергии электрического разряда от источника электропитания МИИСК зависит от формы изменения тока в разряде, определяемого показателем степени  $a$  и максимальна при  $a = 2^{-1/2} \approx 0,707$ .

Проведенный анализ выражения (11) показал, что *когда совпадает длительность электрического разряда с временем формирования минимального ядра пламени ВШС и при непрерывном убывании тока в электрической цепи МИИСК именно линейная модель тока электрического разряда* реализует практически наиболее опасные условия искрообразования. Понятно, что на практике длительность электрического разряда чаще всего не совпадает со временем формирования минимального ядра пламени ВШС и разрядный ток не всегда линейно изменяется от своего установившегося значения.

Исследуем теоретически возможные случаи, когда длительность электрического разряда  $T$  будет больше времени формирования минимального ядра пламени  $\psi$ . Тогда за критическое время  $\psi$  энергия электрического разряда цепи МИИСК определится из выражения

$$A = IE\psi(a+1)(\psi/T)^a - IE\psi(2a+1)(\psi/T)^{2a} + I^2L/2[2(\psi/T)^a - (\psi/T)^{2a}] \quad (12)$$

Обозначим  $\psi/T$  через  $\beta$  а  $(IE\psi/6)/(I^2L/2)$  через  $\zeta$  тогда выражение (12) примет вид

$$A = LI^2/2[(6\zeta\beta^a)/(a+1) - (6\zeta\beta^{2a})/(2a+1) + 2\beta^a - \beta^{2a}] \quad (13)$$

Тогда энергия разряда электрической цепи МИИСК при линейной модели разрядов за критериальное время  $\psi$  будет равна

$$A_{\text{критер}} = IE\psi/6 + L(I^2/2) = L(I^2/2)(\zeta + 1) \quad (14)$$

Разделив (13) на (14) определим отношение энергии электрического разряда при любой модели разряда в электрических цепях МИИСК для наиболее опасной линейной модели:

$$\mu = A/A_{\text{критер}} = (6\zeta\beta^a)/(a+1)(\zeta+1) - (6\zeta\beta^{2a})/(2a+1)(\zeta+1) + (2\beta^a - \beta^{2a})/(\zeta+1) \quad (15)$$

Из (15) определим, при каком значении  $\beta$  выделяемая электрической цепью МИИСК во время разряда энергия максимальна т.е.

$$d\mu/d\beta = 0$$

Откуда

$$\beta^a = [(6\zeta + 2a + 2)(2a + 1)] / [(6\zeta + 2a + 1)(2a + 2)] \quad (16)$$

Подставив (16) в (15) получим  $\mu_{max}$

$$\mu_{max} = [(3\zeta + a + 1)^2(2a + 1)] / [(\zeta + 1)(a + 1)^2(6\zeta + 2a + 1)] \quad (17)$$

Используя выражение (17) определим, при каком значении  $a$ , электрическая энергия разряда электрической цепи МИИСК максимальна:

$$d\mu_{max}/da = 0$$

Откуда

$$a = \{[(9\zeta^2 + 2)]^{-1} - 3\zeta\} / 2 \quad (18)$$

Подставим (18) в (17), получим

$$\mu_{max,max} = \{0,5[(9\zeta^2 + 2)]^{-1} + 1,5\zeta + 1\}^2 \times \{[(9\zeta^2 + 2)]^{-1} - 3\zeta + 1\} / (\zeta + 1) \times \{0,5[(9\zeta^2 + 2)]^{-1} + 1,5\zeta + 1\} \times \{[(9\zeta^2 + 2)]^{-1} + 3\zeta + 1\} \quad (19)$$

Используя зависимость (19) можно приблизительно оценивать искробезопасность электрической цепи МИИСК как отношение максимумов энергии разрядов  $\mu_{max,max}$  при различных значениях  $\zeta$ .

## ВЫВОДЫ

Проведенное моделирование показало, что при совпадении длительности электрического разряда со временем формирования минимального ядра пламени ВШС и при условии непрерывного убывания тока в электрической цепи МИИСК **линейная модель тока электрического разряда** реализует практически наиболее опасные условия искрообразования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коган Э.Г. Вопросы оценки и обеспечения искробезопасности аппаратуры автоматизации горных машин: Автореф. канд. дис. М.: Моск. горн. ин-т, 05.26.01., 1972.
2. Серов В.И. Осциллографическое исследование разрядов размыкания в рудничных искробезопасных цепях/ Научные исследования по разработке угольных и рудных месторождений. М. Недра 1978, 246с.
3. Кравченко В.С. Электрическое искрение в воспламеняющейся рудничной атмосфере. М. Науч. тр. моск.горн. ин-та, 1976, 172с.
4. Петренко Б.А. Электрический разряд в искробезопасных цепях, М-Л, Энергия, 1986, Вып. 4, 304с.