

УДК 621.316.9

И.А. БЕРШАДСКИЙ (канд. техн. наук, доц.), **Д.В. СЕВЕРИН**

Донецкий национальный технический университет

ibersh@rambler.ru

ПРЕДЕЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ РУДНИЧНОГО ГАЗА В ИСКРОБЕЗОПАСНЫХ ЕМКОСТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

In article the technique of a computer estimation intrinsically safe electrical circuit electric circuit of a miner electric equipment which contains capacitor elements is offered. It is established, that for research of the arc drawing in the environment of a metano-air mix studying of danger of three kinds of the categories is required: single breakdown in a contour with a capacitor element, limiting single breakdown at the disconnection category (sparkless switching) in a contour which contains a capacitor element, the spark (arc) breakdown of disconnection in an is active-inductive contour without capacity influence.

Искробезопасная электрическая цепь определяется как цепь, в которой разряды или термическое действие, возникающее в нормальном и аварийном режимах работы электрооборудования не вызывает зажигание метано-воздушной смеси. Несмотря на успешное решение ряда практических задач обеспечения искробезопасности, теория воспламенения взрывчатых смесей электрическими разрядами остается не разработанной в достаточной степени, что затрудняет оценку искробезопасности на этапах конструирования и проектирования искробезопасных электрических систем. [1]

Наиболее характерные элементы искробезопасных цепей приведены на рис.1. В большинстве встречающихся на практике случаев они могут быть сведены к контурам, состоящих из последовательно соединенных источника постоянного или переменного тока, омического сопротивления R , индуктивности L и искрообразующего (дугообразующего) механизма (рис. 1.а). Последний эквивалентуется математическими (компьютерными) моделями, отражающими характеристики разряда с последующей оценкой опасности электрического искрения во взрывоопасной газовой среде.

Цепь может также содержать конденсатор C или кабель, шунтирующий RL цепь (рис. 1.б) или разрядный промежуток (рис. 1.в).

В работе [1] приводится классификация искробезопасных цепей, которая с успехом может быть применена при исследовании электрических цепей на опасность воспламенения. Так, к классу индуктивных и безреактивных цепей относят цепи, не содержащие ёмкости, кроме как в форме собственной ёмкости катушки,

монтажа схемы и размыкающего приспособления, называемой собственной ёмкостью системы $C_0 = 10..300 \cdot 10^{-12} \Phi$ при $L \leq 10 \text{ Гн}$. Индуктивно-ёмкостными цепями считают цепи, содержащие ёмкость в форме конденсатора или кабеля с ёмкостью, большей C_0 .

Для разных классов искробезопасных цепей характерны различные виды искрообразования. В статье [2] приведена методика оценки опасности воспламенения индуктивно-активных цепей при однократном размыкании. В искробезопасности рассматриваются также однократное замыкание и прерывистое искрение. Такие два вида искрообразования используются при испытании цепей с заряженными конденсаторами в индуктивно-ёмкостных цепях, являясь для них наиболее агрессивными в отношении воспламенения взрывчатых газовых смесей. Это объясняется тем, что в отличие от однократного размыкания искровой разряд при прерывистом искрении возможен, если соблюдается условие:

$$U_{\max} < U_{\text{зж}} \quad (1)$$

где U_{\max} — максимальное напряжение на контактах, В;

$U_{\text{зж}}$ — напряжение зажигания самостоятельного разряда в газе, В.

Причина этого явления состоит в том, что при замыкании электрический разряд может произойти за счёт автоэлектронной эмиссии [3]. Исходя из пробойной характеристики для разрядов замыкания в функции расстояния между медными электродами $U_{\text{пр}} = f(l)$, получена таблица 1.

© И.А.Бершадский, Д.В. Северин, 2009

Таблица 1 – Пробивное напряжение при разрядах замыкания для медных электродов

$l, \text{ мм}$	0,020	0,026	0,047	0,096	0,178
$U_{np}, \text{ В}$	85,5	313,5	513	969	1425

Таким образом, при сближении электродов, соединенных с заряженным конденсатором происходит однопробойный искровой разряд. Такой же вид разряда наблюдается при прерывистом искрении в индуктивно-емкостных цепях, а также при однократном размыкании индуктивно-емкостной цепи в режиме, близком к безыскровой коммутации [3].

Переходные процессы (ток, напряжение разрядного промежутка) могут быть рассчитаны достаточно точно лишь при известных закономерностях изменения во времени мгновенного сопротивления разрядного промежутка r . К сожалению, для рассматриваемых низковольтных импульсных разрядов конденсаторной батареи такие закономерности в общем случае не были найдены.

В монографии [4] приводятся результаты осциллографирования разрядного напряжения и тока на электродах. Опыты показали, что напряжение на разрядном промежутке u_p в течение времени $t_1 = 10^{-9} \dots 10^{-8}$ с резко падает до определенного при данных параметрах цепи значения u_{p1} . Математическое выражение изменения тока разряда $i_p(t)$ можно получить, рассмотрев уравнения разрядной цепи, если известен характер изменения полного сопротивления разрядного промежутка $r(t)$ или характер изменения напряжения на разрядном промежутке $u_p(t)$. Более удобно для расчетов неоднородное дифференциальное уравнение 2-го порядка с постоянными коэффициентами, составленное относительно заряда q :

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = u_p(t) \quad (2)$$

Согласно [4] напряжение на разрядном промежутке уменьшается сначала (при $t=0..t_1$) достаточно быстро, затем оно продолжает падать по другому закону значительно медленнее. Это значит, что решение уравнения (2) следует искать для двух значений $u_p(t)$: $u_1(t)$ при $t=0..t_1$ и $u_2(t)$ при $t > t_1$.

$$\begin{cases} L \frac{d^2 q_1}{dt^2} + R \frac{dq_1}{dt} + \frac{q_1}{C} = u_1(t), t < t_1 \\ L \frac{d^2 q_2}{dt^2} + R \frac{dq_2}{dt} + \frac{q_2}{C} = u_2(t), t \geq t_1 \end{cases} \quad (3)$$

Начальные условия для второго уравнения системы (3) находятся при $t=t_1$: $q_1|_{t=t_1} = q_2|_{t=t_1}$, $\frac{dq_1}{dt}|_{t=t_1} = \frac{dq_2}{dt}|_{t=t_1}$.

Решив систему уравнений (3), получим аналитические выражения, описывающие закон изменения тока в послепробойный период $i_1(t)$, $i_2(t)$. Они зависят от функций $u_1(t)$ и $u_2(t)$. Из рассмотрения осциллограмм и графиков напряжения на разрядном промежутке следует, что изменение напряжения в цепи при аperiодическом разряде описываются экспоненциальными функциями:

$$u_2(t) = u_1|_{t=t_1} \exp[-m(t-t_1)] \text{ при } t \geq t_1 \quad (4)$$

$$u_1(t) = U_0 \exp(-pt) \text{ при } t < t_1 \quad (5)$$

В момент времени $t = t_1$: $u_1 = U_0 \exp(-pt_1)$, где $u_1(t) = u_2(t) = U_1$ при $t=t_1$. Из экспериментальных данных [4] известно, что для цепей без дополнительных активных сопротивлений $m \sim 10^6 \text{ с}^{-1}$, $p \sim 10^8 \text{ с}^{-1}$. Окончательные выражения для тока разряда, с учетом вышеизложенного:

$$i_1(t) = \left[\frac{CU_0 k_2}{2\alpha} - \frac{U_0}{2\alpha L(p+k_1)} \right] k_1 \exp(k_1 t) - \left[\frac{CU_0 k_1}{2\alpha} - \frac{U_0}{2\alpha L(p+k_2)} \right] k_2 \exp(k_2 t) + \frac{U_0}{2\alpha L} \frac{k_1}{p+k_1} \exp(-pt) - \frac{U_0}{2\alpha L} \frac{k_2}{p+k_2} \exp(-pt); \quad (6)$$

$$i_2(t) = \left[\frac{CU_0 k_2}{2\alpha} - \frac{U_0}{2\alpha L(p+k_1)} \right] k_1 \exp(k_1 t) - \left[\frac{CU_0 k_1}{2\alpha} - \frac{U_0}{2\alpha L(p+k_2)} \right] k_2 \exp(k_2 t) - \frac{U_0}{2\alpha L} \exp[-(p+k_1)t_1] \cdot \left[\frac{1}{m+k_1} - \frac{1}{p+k_1} \right] k_1 \exp(k_1 t) + \frac{U_0}{2\alpha L} \exp[-(p+k_2)t_1] \cdot \left[\frac{1}{m+k_2} - \frac{1}{p+k_2} \right] k_2 \exp(k_2 t) + \frac{U_0}{2\alpha L} \frac{k_1 \exp(-pt_1) \exp[-m(t-t_1)]}{m+k_1} - \frac{U_0}{2\alpha L} \frac{k_2 \exp(-pt_1) \exp[-m(t-t_1)]}{m+k_2}. \quad (7)$$

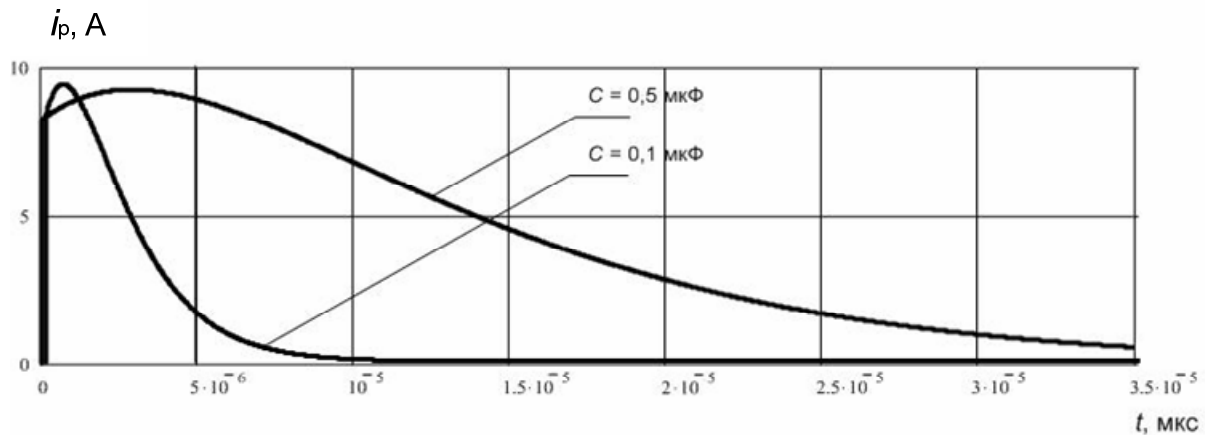
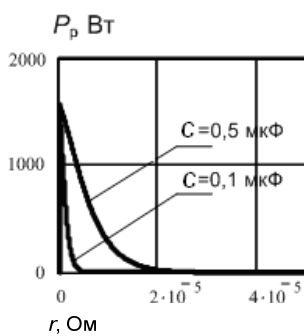
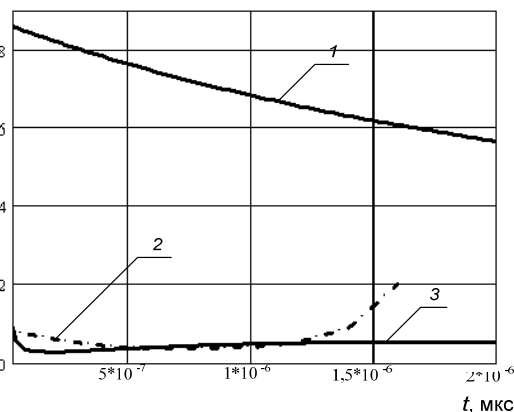


Рисунок 2 – Зависимости тока и мощности разрядного промежутка в емкостной искробезопасной цепи при замыкании: $R = 15 \text{ Ом}$, $U_0 = 314 \text{ В}$



При известных параметрах цепи C , U_0 , L , α , k_1 , k_2 , p , t можно получить кривые изменения тока разряда i_p , мощности P_p и сопротивления разрядного промежутка r от времени (рис.2, рис.3), где $k_{1,2} = -R/2L \pm \alpha$, $\alpha = \sqrt{R^2/4L^2 - 1/LC}$. Параметр t подбирался методом последовательных приближений. В результате производилось его уменьшение до тех пор, пока ток и напряжение разряда не затухали одновременно, т.е имитировался аperiodический разряд конденсатора на некоторое сопротивление искрового разряда r .



Затем, используя методику, изложенную в [2] оценивалась опасность электрического искрения в цепи по схеме рис. 1.в. при условии, что $L_p \approx 10^{-8} \text{ Гн}$. Результаты расчетов и их сравнение с данными ГОСТ [5] представлены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что длительность источника зажигания, возникающего при ёмкостном разряде замыкания растет с увеличением постоянной времени разрядного контура CR_p и при низких напряжениях источника U_0 может достигать нескольких тысяч микросекунд (например, при $U_0=50 \text{ В}$, $R_p=15 \text{ Ом}$ разряд длится $T_{\text{разр}}=1251 \text{ мкс}$). При таких $T_{\text{разр}}$ время моделирования воспламенения становится недопустимо большим. Для сокращения длительности расчетов учитывалось влияние минимального времени формирования устойчивого ядра пламени t_{min} . В некотором диапазоне времени $t' < t_{\text{min}}$ тепловая энергия воспламенения существенно не зависит от длительности источника зажигания:

Рисунок 3 - Зависимость сопротивления разрядного промежутка r от времени t : 1 – $U = 200 \text{ В}$, $C = 1 \text{ мкФ}$, $R = 5,6 \text{ Ом}$ (расчет); 2 – $U = 200 \text{ В}$, $C = 2 \text{ мкФ}$, $R = 0,18 \text{ Ом}$ (эксперимент); 3 – $U = 200 \text{ В}$, $C = 2 \text{ мкФ}$, $R = 0,18 \text{ Ом}$ (расчет).

$$W_{\text{разр}} = \text{const при } T_{\text{разр}} < t' < t_{\text{min}}. \tag{8}$$

Если же $T_{\text{разр}} > t_{\text{min}}$, в зоне источника тепла наступит стационарное распределение температуры и потоков газовой смеси, и воспламенение определяется лишь тепловой мощностью источника зажигания:

$$P_{\text{разр}} = \text{const при } T_{\text{разр}} > t' > t_{\text{min}}. \tag{9}$$

Область времени t' , где изменение длительности источника зажигания не сказывается на воспламенении зависит от основных параметров ядра пламени: $t' < t_{\text{min}}$, $t' = \gamma t_{\text{min}}$, $\gamma < 1$.

Численно t_{min} оценивается так:

$$t_{\text{min}} = \frac{d_{\text{min}}}{2v_{\text{пл}}} \approx 500 \text{ мкс для метановоздушной смеси.}$$

где d_{\min} – минимальный диаметр пламени, $d_{\min} \approx 2$ мм;
 $v_{пл}$ – скорость пламени, $v_{пл} \approx 2$ м/сек.

Известно из [3], что $\gamma \approx 0,4$, тогда $t' = 200$ мкс. Поэтому, ограничивая в расчетах $T_{разр} = 200..300$ мкс, получали заключение о факте воспламенения метановоздушной смеси со значительно меньшими затратами машинного времени.

Таблица 2 - Результаты расчета опасности электрического искрения цепей с заряженной емкостью C и добавочным активным сопротивлением в цепи разряда R_p

R_p , Ом	U_0 , В	C , мкФ		$W_{разр}$ мДж	$T_{разр}$ мкс	$P_{разр}$, Вт при $t=1 \cdot 10^{-6}$ с
		Расчет	ГОСТ			
0,01	314	0,04	0,095	1,7	5,9	198
5,6		0,4	0,4	9,9	17,8	2922
15		0,6	0,7	15,7	59,7	1476
0,01	85	0,8	0,95	2,5	6,2	292
5,6		4,2	3,5	9	150	301
15		5	6	10	390	114
0,01	50	2,8	3	3,2	9,26	467
5,6		7	10	5,2	22,8	105
15		18	20	12,4	1251	39,7

Схема, приведенная на рис. 1в, не содержащая дополнительных элементов L_p и R_p во вторичном контуре используется в искробезопасности также для определения опасности разрядов размыкания.

В [6] ошибочно, на наш взгляд, делается вывод о том, что при размыкании индуктивных электрических цепей нужно рассматривать только однопробойный искровой разряд, возникающий в процессе заряда ёмкости системы. Как будет показано ниже, неучет индуктивности и источника тока может привести к ошибкам при оценке воспламеняющей способности цепи. Чтобы убедиться в этом, ниже приводятся формулы, выведенные Б.А. Петренко [3] на основе решения дифференциальных уравнений в упомянутой выше цепи по 2-му закону Кирхгофа.

Мгновенное значение напряжения на ёмкости при безыскровой коммутации:

$$U_c = E - Ee^{-\delta t} \left(\delta - \frac{1}{RC} \sin(\omega t) + \cos(\omega t) \right), \quad (10)$$

где $\omega = \frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}$, $b = \frac{R}{2L}$.

Максимальное напряжение на ёмкости:

$$U_{\max} = E + I \sqrt{\frac{L}{C}} e^{-\frac{\delta \arcsin(\omega \sqrt{LC})}{\omega}} \approx 0,5E + \frac{E}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (11)$$

Необходимо для пробоя напряжение при размыкании:

$$U_{пр} = U_{зак} + kl = U_{зак} + kvt, \quad (12)$$

где $U_{зак}$ – напряжение зажигания самостоятельного разряда в газе, для воздуха $U_{зак} = 300$ В;
 k – прочность воздушного промежутка, $k = 5$ кВ/мм;
 v – скорость размыкания, мм/с.

Для электрической цепи с ёмкостью, не превышающей собственной ёмкости системы $C_0 = 10^{-10}$ Ф и параметрами $R = 100$ Ом, $L = 0,1$ Гн, $v = 2000$ мм/с, $E = 24$ В были построены графики зависимостей $u_c(t)$, $u_{пр}(t)$ – рис. 4

Очевидно, что пробой произойдет при пересечении указанных характеристик при напряжении, гораздо меньшим U_{\max} . В то же время длительный разряд индуктивности, возникающий между размыкаемыми контактами при данных параметрах цепи может быть опасен, что подтверждается характеристиками искробезопасности индуктивной цепи [5]: ток цепи 0,24А больше максимального допустимого воспламеняющего тока 0,12 А.

В то же время, величина максимального напряжения на контактах, рассчитанная по формуле (11) безыскровой коммутации может использоваться для оценки индуктивно-емкостных цепей в режимах оптимальной скорости размыкания. При этом в разрядном промежутке выделится максимальная энергия однопробойного искрового разряда:

$$W_{\max} = \frac{1}{2} C U_{\max}^2 \quad (13)$$

Под оптимальной скоростью размыкания будем понимать такую, при которой пробой происходит в момент, соответствующий первому максимуму напряжения U_c . Графически это выглядит как пересечение кривой нарастания напряжения U_c и линии электрической прочности U_{np} . Рассмотрим ту же схему (рис. 1в) с параметрами $R = 100$ Ом, $L = 0,1$ Гн, $v = 2000$ мм/с, $C = 0,01 \cdot 10^{-6}$ Ф, $E = 24$ В.

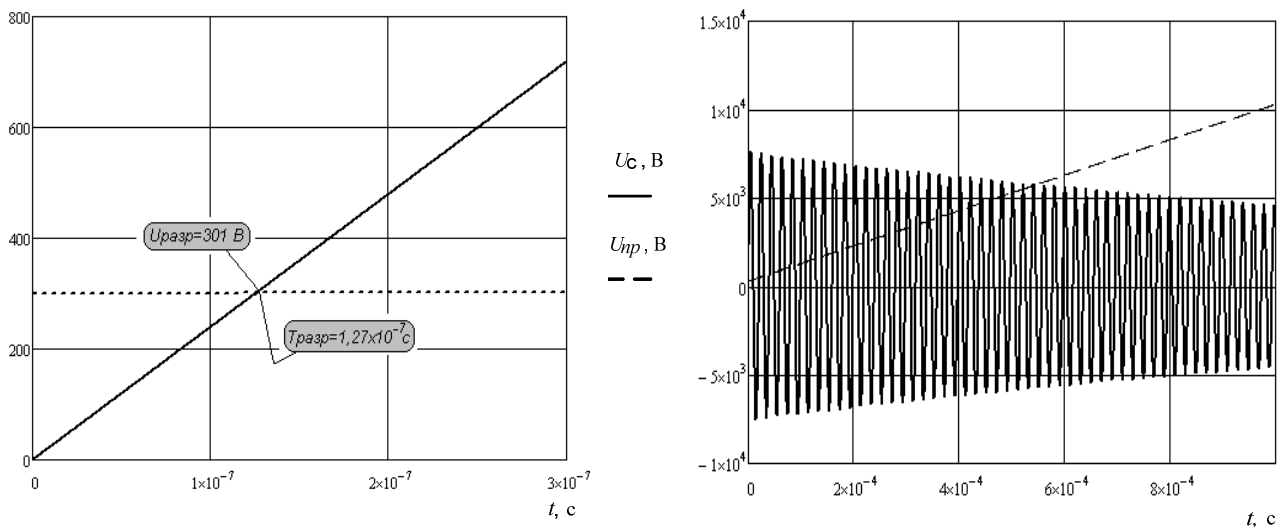


Рисунок 4 – Зависимости напряжения на емкости U_c и пробивного напряжения U_{np} от времени при безыскровом размыкании электрического контура с ёмкостью при $C = 10^{-10}$ Ф

Зависимости $u_c(t)$, $u_{np}(t)$ приведены на рис. 5, из которых видно, что пробой происходит при напряжении, близком к U_{\max} . Согласно (13) $W_{\max} = 2,92$ мДж, а $P_{\max} = W_{\max}/T_{\text{разр}} = 2,92 \cdot 10^{-3}/2,49 \cdot 10^{-5} = 117$ Вт.

Далее оценка опасности электрического искрения проводится по методике, изложенной в [2], которая показывает, что цепь с такими параметрами в режиме предельного однопробойного разряда (безыскровая коммутация) будет опасна в отношении воспламенения метано-воздушной смеси.

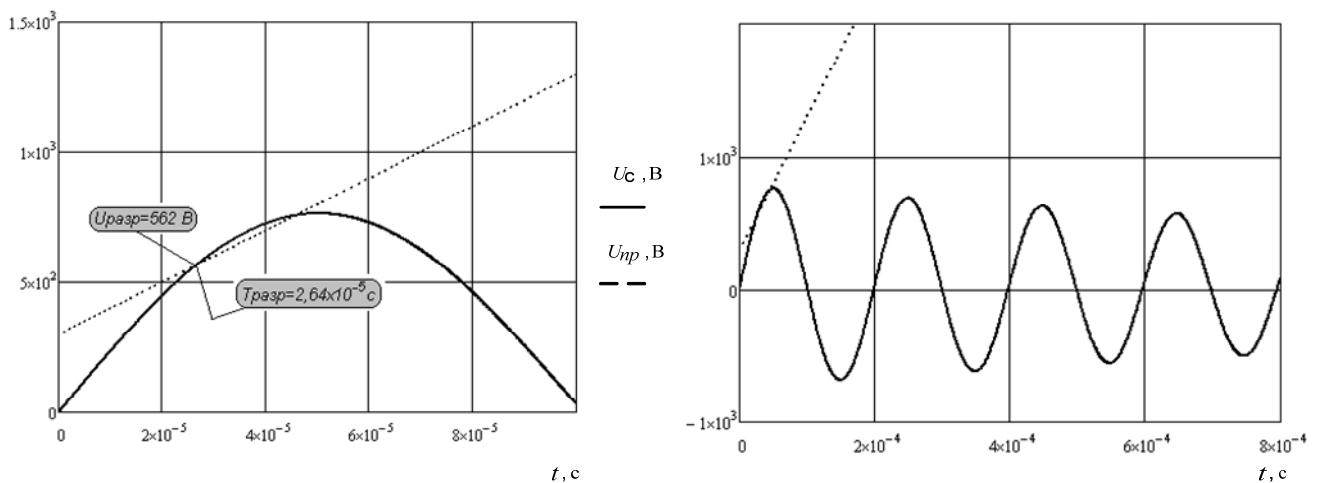


Рисунок 5 - Зависимости напряжения на емкости U_c и пробивного напряжения U_{np} от времени при безыскровом размыкании электрического контура с ёмкостью при $C = 0,01 \cdot 10^{-6}$ Ф

Выводы:

1. Для компьютерной оценки искробезопасных индуктивно-ёмкостных электрических цепей предлагается их испытание на математической имитационной модели по 3-м видам разрядов:

- однопробойный разряд замыкания ёмкостного элемента контура;
- предельный однопробойный разряд размыкания (безыскровая коммутация) в контуре, содержащем ёмкостный элемент;
- искровой (дуговой) разряд размыкания в активно-индуктивном контуре без учета влияния ёмкости.

В качестве критерия воспламенения принимается наиболее опасный вид разряда.

2. В электрической цепи с ёмкостью, близкой к собственной ёмкости системы наиболее опасным является искровой (дуговой) разряд размыкания активно-индуктивного контура.

3. Определение опасности электрического искрения по разрядам замыкания в ёмкостных и активно-ёмкостных контурах в первом приближении может быть проведено на основании методики [4] с учётом предлагаемого предварительного подбора постоянной времени затухания аperiodического переходного процесса в контуре, содержащем переменное активное сопротивление разрядного промежутка искрового разряда.

Список литературы

1. Коган Э.Г. Способы и средства обеспечения искробезопасности рудничного электрооборудования/ Коган Э.Г. - М.: Недра, 1988. - 101 с.
2. Иохельсон З.М. Влияние параметров искры на воспламенение метановоздушной смеси/ З.М. Иохельсон, И.А.Бершадский // Уголь Украины. – 2007. - №9. –С. 44-46.
3. Петренко Б.А. Электрический разряд в искробезопасных цепях / Б.А. Петренко // Механизация и автоматизация в горной промышленности. - М.: Госгортехиздат, 1963. - Вып. 3. - С. 300 – 317.
4. Намитоков К.К. Электроэрозионные явления/ Намитоков К.К. – М.: Энергия, 1978. – 456 с.
5. Электрооборудование взрывозащищенное. Ч.11. – Искробезопасная электрическая цепь: ГОСТ Р 51330.10 – 99 (МЭК 60079 – 11 – 99). – [Введ. с 1999-09-12] – М.: Изд-во стандартов, 1999. - (Государственный стандарт России).
6. Фурманов Б.М. Научные основы, методы оценки и обеспечения искробезопасности горного слаботочного электрооборудования/ Фурманов Б.М. - М.: Недра, 1970. – 150 с.

Надійшла до редколегії 13.05.2009

Рецензент: Ковальов О.П.

И.А. БЕРШАДСКИЙ, Д.В. СЕВЕРИН

Донецкий национальный технический университет

Предельные условия воспламенения рудничного газа в искробезопасных емкостных электрических цепях. В статье предложена методика компьютерной оценки искробезопасности электрических цепей рудничного электрооборудования, которые содержат емкостные элементы. Установлено, что для исследования опасности искрения в среде метано-воздушной смеси необходимо определение степени опасности трех видов разрядов: однопробойный разряд замыкания в контуре с емкостным элементом, предельный однопробойный разряд размыкания (безыскровая коммутация) в контуре, который содержит емкостный элемент, искровой (дуговой) разряд размыкания в активно-индуктивном контуре без учета влияния емкости.

Методика, оценка, искробезопасность, электрическая цепь, рудничное электрооборудование

І.А.БЕРШАДСЬКИЙ, Д.В.СЕВЕРИН

Донецький національний технічний університет

Граничні умови запалення рудничного газу в іскробезпечних ємнісних електричних колах. У статті запропонована методика комп'ютерної оцінки іскробезпеки електричних кіл рудничного електроустаткування, що містять ємнісні елементи. Встановлено, що для дослідження небезпеки іскріння в середовищі метано-повітряної суміші необхідно визначення ступеня небезпеки трьох видів розрядів: однопробійний розряд замикання в контурі з ємнісним елементом, граничний однопробійний розряд розмикання (безіскрова комутація) у контурі, що містить ємнісний елемент, іскровий (дуговий) розряд розмикання в активно-індуктивному контурі без обліку впливу ємності.

Методика, оцінка, іскробезпека, електричне коло, рудникове електрообладнання