

Валерий ЛОПАТИН, Богдан КОПЕЙ

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа,

Институт геотехнической механики НАН Украины, Днепрпетровск

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ИСКРОБЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ МОБИЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

**Резюме.** Оценка искробезопасности мобильных информационно-измерительных систем (МИИС) без применения взрывной камеры может состоять в вычислении (или измерении) такого параметра, который определяет воспламеняющую способность электрического разряда измерительного канала МИИС, который может возникнуть при коммутации. Определять значение искробезопасных параметров омических электрических цепей МИИС можно, используя значение минимальной воспламеняющей мощности. При оценке индуктивно-емкостных цепей МИИС следует учитывать разряды замыкания, которые могут быть оценены по величине запасенной электрической энергии, которая при пробое реализуется в электрический разряд. Для этого необходимо замерить величину максимального напряжения, до которого может зарядиться общая емкость электрической цепи МИИС.

## THEORETICAL METHOD FOR INTRINSIC SAFETY OF ELECTRIC CIRCUITS OF MOBILE INFORMATIVE-MEASURING SYSTEMS

**Summary.** Estimation on intrinsic safety of the mobile informative-measuring systems (MIMS) without application of explosive chamber can consist of calculation (or measuring) such parameter, which determines flame ability of electric charge of the measuring channel MIMS, which can arise up during commutation. Determining the value of intrinsic safety parameters of the omic electric chains MIMS is possible, using the value of minimum flame power. At estimation of the inductively-capacity chains of MIMS it is necessary to take into account the charge of shorting, they can be estimated on the size of the stocked electric energy which at a hasp will be realized in an electric charge. For this purpose it is necessary to measure the size of maximal tension to which the general capacity of the electric chain MIMS can be charged.

## 1. Введение

Тепловая теория распространения ламинарного пламени утверждает, что для воспламенения взрывчатых смесей (ВС) электрическим разрядом необходимо, чтобы выделенное разрядом тепло нагрело до температуры горения сферический объем, равный минимальному ядру пламени, способному к самораспространению. Это утверждение позволяет считать, что единственным критерием воспламенения ВС является энергия, выделившаяся в электрическом разряде за время формирования минимального ядра пламени данной ВС. Таким образом, оценка на искробезопасность мобильных информационно-измерительных систем (МИИС) без применения взрывной камеры может состоять в вычислении (или измерении) того параметра, который определяет воспламеняющую способность электрического разряда измерительного канала МИИС, который может возникнуть при коммутации.

## 2. Выбор критерия воспламеняющей способности электрического разряда электрических цепей мобильных информационно-измерительных систем

Вспользуемся результатами исследований по воспламенению взрывчатых смесей электрическими разрядами, сделанными А.Л. Трембицким [4] и полученной им зависимостью минимальной воспламеняющей энергии электрического разряда от его длительности. Полученная А.Л. Трембицким зависимость имеет четыре области.

Первая характеризует рост воспламеняющей энергии с уменьшением длительности электрического разряда. Возрастание энергии объясняется увеличением различного рода потерь энергии, обусловленных значительными температурными градиентами.

Вторая характеризуется постоянством воспламеняющей энергии. В этой области при изменении длительности электрического разряда в ряде случаев может иметь место непостоянство общей воспламеняющей энергии разряда. Это объясняется изменяющимися электрическими потерями в контактах при изменении тока разряда или переходом одного вида разряда в другой. Тем не менее, если вычесть потери в контактах, имеет место постоянство воспламеняющей энергии.

Третья характеризуется ростом воспламеняющей энергии и снижением воспламеняющей мощности (к концу области мощность электрического разряда становится равной нулю).

Четвертая характеризуется постоянством воспламеняющей мощности разряда.

Из вышесказанного понятно, что:

1. В областях 1 и 2 критерий воспламеняющей способности электрического разряда – его энергия.
2. В области 4 критерий воспламеняющей способности электрического разряда – его мощность.
3. Область 3 является переходной от энергетического критерия к мощностному.

При объективном рассмотрении существующих измерительных цепей (каналов) МИИС можно прийти к выводу, что все электрические цепи МИИС без искусственного сокращения длительности разряда могут быть объективно оценены на искробезопасность с использованием только одной третьей (переходной) области.

Поэтому в начале области условне искробезопасности измерительных цепей (каналов) МИИС запишется в виде

$$A_{\text{воспл}} = \int_0^{\theta} U_{\text{разр}} i_{\text{разр}} dt - \int_0^{\theta} U_{\text{заж}} i_{\text{разр}} dt \leq A_{\text{воспл. мин}}, \quad (1)$$

где  $A_{\text{воспл. мин}}$  – минимальная воспламеняющая энергия электрического разряда, определенная для ВШС при длительном электрическом разряде.

В конце области условие искробезопасности измерительных цепей (каналов) МИИС запишется в виде

$$P_{\text{воспл}} = \left( \int_0^T U_{\text{разр}} i_{\text{разр}} dt - \int_0^T U_{\text{заж}} i_{\text{разр}} dt \right) / T \leq P_{\text{воспл. мин}}, \quad (2)$$

где  $P_{\text{воспл. мин}}$  – минимальная воспламеняющая мощность электрического разряда, определенная для ВШС при длительном электрическом разряде.

Понятно, что значение  $P_{\text{воспл}}$  из условия (2) следует определять в диапазоне от  $\theta$  до  $T$ , при котором средняя мощность электрического разряда максимальна. Если для исследуемой цепи МИИС после  $\theta$  средняя мощность электрического разряда убывает,

то следует выбирать ее при длительности электрического разряда, равной  $\Theta$ . По предложенному критерию измерительная цепь (канал) МИИС будет искробезопасна, если будет удовлетворено хотя бы одно из условий по критерию энергии и мощности.

### 3. Оценка искробезопасности омических измерительных цепей МИИС

Исследование измерительных омических цепей (каналов) МИИС показало, что их оценку на искробезопасность следует вести исходя из условия:

$$P_{\text{воспл}} = A_{\text{воспл max}} T - \Theta \leq P_{\text{воспл min}}$$

Для омических измерительных цепей (каналов) МИИС простая и сложная цепи будут эквивалентны по воспламеняющей способности, если при одних коммутируемых (размыкаемых) токах в электрическом разряде выделяется одинаковое максимальное значение электрической энергии за время  $\Theta$

$$A_{\text{воспл max 1}} = A_{\text{воспл max 2}} \quad (3)$$

Вместо  $A_{\text{воспл max 1}}$  в (3) подставим его значение для простой омической электрической цепи МИИС

$$3/16 I E_{\text{эquiv}} \Theta [(E_{\text{эquiv}} - U_{\text{заж}})/E_{\text{эquiv}}]^2 = A_{\text{воспл max 2}}$$

откуда

$$E_{\text{эquiv}} = (16 A_{\text{воспл max 2}} / 3 I \Theta) \times [E_{\text{эquiv}} / (E_{\text{эquiv}} - U_{\text{заж}})]^2 \quad (4)$$

Рассмотрим предлагаемый подход на примере электрической цепи МИИС с защитой на базе диода Зенера (ДЗ). Электрическая цепь состоит из аккумулятора, ограничительного сопротивления и ДЗ, включенного параллельно выходным клеммам аккумулятора. Применим линейную модель роста напряжения на электрическом разрядном промежутке.

Электрический ток разряда в этом случае будет равен

$$i_{\text{разр}} = (E - U_{\text{разр}})/R = (E - U_{\text{разр}})/R - (pEt)/(RT), \quad (5)$$

где  $E$  – э.д.с аккумулятора,  $U_{\text{разр}}$  – напряжение электрического разряда,  $R$  – сопротивление аккумулятора.

Понятно, что электрический разряд прекратится при  $U_{\text{разр}}$ , равном напряжению стабилизации на ДЗ  $U_{\text{стаб}}$ . Тогда, исходя из этого, время существования электрического разряда будет равно

$$T = (U_{\text{стаб}} - U_{\text{заж}})T/pE \quad (6)$$

Вычислим электрическую энергию разряда за время  $T$ .

$$P_{\text{воспл}} = \int_0^{\Xi} U_{\text{разр}} i_{\text{разр}} dt - \int_0^{\Xi} U_{\text{заж}} i_{\text{разр}} dt = IE \Xi \{ [p(n-1)\Xi/2nT] - [(p\Xi^2)/3T^2] \}.$$

Подставим в него (6), тогда имеем

$$P_{\text{воспл}} = IET[(U_{\text{стаб}} - U_{\text{заж}})/pE] \times \{ [(n-1)(U_{\text{стаб}} - U_{\text{заж}})/2nE] - (U_{\text{стаб}} - U_{\text{заж}})^2/3E^2 \}. \quad (7)$$

Введем обозначение:  $E/U_{\text{стаб}} = \tilde{v}$ .

Исходя из того, что энергия электрического разряда обратно пропорциональна коэффициенту  $p$  и меньшей его величине соответствует большее значение энергии разряда, то максимум этой энергии будет при

$$p = (U_{\text{стаб}} - U_{\text{заж}})/E = (n - \tilde{v})/(\tilde{v}n). \quad (8)$$

Подставим в выражение (7) выражение (8), получим формулу для подсчета максимума электрической энергии разряда в омической цепи МИИС

$$P_{\text{воспл max}} = IET[(n - \tilde{v})(3\tilde{v}n - \tilde{v} - 2n)/6\tilde{v}^2 n^2]. \quad (9)$$

Вычислим эквивалентный э.д.с.  $E_{\text{эквив}}$  для аккумулятора с защитой на ДЗ для  $T = \Xi$

$$E_{\text{эквив}} = 8/9 [E_{\text{эквив}}/(E_{\text{эквив}} - U_{\text{заж}})]^2 \times [(U_{\text{стаб}} - U_{\text{заж}})/E \times (3E - U_{\text{заж}} - 2U_{\text{стаб}})]. \quad (10)$$

По формуле (10) можно определять значение искробезопасных параметров омических электрических цепей МИИС, используя значение минимальной воспламеняющей мощности. Например, для 8,5% - ной метано-воздушной ВШС она примерно равна 1 ВА [2].

Рассчитаем минимальный воспламеняющий ток омической электрической цепи МИИС применительно к метано-воздушной ВШС. Напряжение источника питания МИИС  $E = 12$  В, напряжение стабилизации стабилитрона типа КС162А примем 6,2 В, минимальное напряжение зажигания  $U_{\text{заж}} = 5,3$  В [3]. Очевидно, что для нашего примера  $E_{\text{эквив}}$  не зависит от величины размыкаемого тока.  $E_{\text{эквив}}$  определим из (10):  $E_{\text{эквив}} = 7,4$  В.

Напряжению 7,4 В соответствует воспламеняющий ток 0,66 А [6]. Справедливо полагаем, что он несколько занижен (на 20-30%), т.к. он определен как минимальный для искробразующего устройства, которое для данной электрической цепи МИИС не реализует наиболее опасные условия. Для реализации наиболее опасных условий для омической цепи МИИС со стабилитронной защитой, по нашему мнению, необходима меньшая скорость изменения напряжения.

По формуле (10) можно определять значение искробезопасных параметров омических электрических цепей МИИС, используя значение минимальной воспламеняющей мощности.

#### 4. Электроизмерительный метод оценки искробезопасности электрических цепей МИИС

Выше были рассмотрены критерии воспламеняющей способности электрического разряда и методы (принципы) оценки искробезопасности электрических цепей МИИС без взрывных камер. Предлагаемый критерий состоит в определении воспламеняющей способности электрического разряда, который теоретически может возникнуть в МИИС.

Существует электроизмерительная оценка искробезопасности электрических цепей МИИС. Возможны два способа измерения: прямой и косвенный способ измерения того параметра, который определяет воспламеняющую способность электрического разряда цепей МИИС.

Прямой способ более совершенный, так как он позволяет непосредственно определить максимум энергии электрического разряда за критериальное время, т.е. параметр, определяющий воспламеняющую способность электрического разряда электрической цепи МИИС. Трудности реализации такого подхода состоит в сложности создания электрической модели разряда, копирующей реальный разряд в МИИС, которая бы полностью соответствовала реальному искрообразованию и учитывала наиболее опасные шахтные условия.

Для реализации косвенного способа оценка может быть построена по принципу реакции электрической цепи МИИС на какую-либо модель электрического разряда. По реакции электрической цепи МИИС и по установленной связи определяют максимум энергии электрического разряда, выделяемой из оцениваемой цепи за критериальное время.

Известен прибор "Поиск" [4] предназначенный для электроизмерительной оценки искробезопасности индуктивных цепей применительно ко всем ВС.

Его параметры:

Длительность моделируемого разряда, мкс 100;300;1000 ± 5%.

Количество электричества, протекающее по модели разряда, А×мкс 1;3;10;30;100 ± 3%.

Напряжение на модели разряда, В 30;100;300  $\pm$  2%.

Погрешность определения энергии моделируемого разряда  $\pm$  5%.

Напряжение питания прибора, 220 В.

Входное сопротивление, 20 МОм.

Масса прибора, 5 кг.

Габариты, 950×350×250.

Из приведенных характеристик "Поиска" очевидно, что для наших целей он не годится.

Возникает задача исследований по созданию прибора для электроизмерительной оценки искробезопасности электрических цепей МИИС. Для создания электроизмерительного прибора для оценки искробезопасности электрических цепей МИИС необходимо решить вопрос электрических моделей разряда, точно учитывающих реальные шахтные или промысловые условия.

Проведенный выше анализ показал, что в качестве модели разряда для электрических цепей МИИС может быть принята модель линейного возрастания напряжения на разрядном промежутке [5]. При помощи такой модели могут быть определены максимум электрической энергии разряда за критериальное время и как следствие этих замеров мощность электрического разряда.

Смоделировать электрический разряд на вышеизложенном принципе в МИИС предлагается при помощи электрической емкости. Рост электрического напряжения на емкости при ее зарядке будет имитировать напряжение на разрядном промежутке электрической цепи МИИС. Изменяя величину емкости, мы сможем изменять длительность моделируемого электрического разряда.

При оценке индуктивно-емкостных цепей МИИС следует учитывать разряды замыкания. Разряды замыкания могут быть оценены по величине запасенной электрической энергии, которая при пробое реализуется в электрический разряд. Для этого необходимо измерить величину максимального напряжения, до которого может зарядиться общая емкость электрической цепи МИИС. Электрическая модель однопробойного электрического разряда и методика ее использования для оценки известны, например, в работе [1].

## 5. Выводы

1. Измерительная цепь (канал) МИИС является искробезопасной при соответствии или удовлетворении хотя бы одному условию по критериям энергии и мощности. Определять значение искробезопасных параметров омических электрических цепей МИИС можно, используя значение минимальной воспламеняющей мощности.

2. В качестве модели разряда для электрических цепей МИИС может быть принят линейный характер возрастания напряжения на разрядном промежутке. При помощи такой модели могут быть определены максимум электрической энергии разряда за критериальное время и, как следствие этих замеров, мощность электрического разряда. На вышеописанном принципе смоделировать электрический разряд в МИИС предлагается при помощи электрической емкости. Рост электрического напряжения на емкости при ее зарядке будет имитировать напряжение на разрядном промежутке электрической цепи МИИС. Изменяя величину емкости, мы сможем изменять длительность моделируемого электрического разряда. При оценке индуктивно-емкостных цепей МИИС следует учитывать разряды замыкания, они могут быть оценены по величине запасенной электрической энергии, которая при пробое реализуется в электрический разряд. Для этого необходимо измерить величину максимального напряжения, до которого может зарядиться общая емкость электрической цепи МИИС.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ерыгин А.Т.: Воспламенение взрывчатых смесей от электрического разряда и обеспечение искробезопасности электрических цепей, А.Т. Ерыгин.- М.: Наука, 1980, с. 143.
2. Искробезопасность электрических цепей В.С. Кравченко, В.И. Серов, А.Т. Ерыгин [и др.]- М: Наука, 1976, с. 212.
3. Лопатин, В.В. Моделирование электрических разрядов, возникающих в электрических цепях и влияющих на взрывобезопасность аппаратуры мобильных информационно-измерительных системных комплексов В.В. Лопатин, Геотехническая механика: Межвед. науч.-техн. сб. ИГТМ НАН Украины.- Днепропетровск, 2008.- Вып.74 –С. с. 30-235.
4. Трембицкий, А.Л. Исследование воспламенения метано-воздушной смеси электрическими разрядами переменной длительности/ В кн.: А.Л. Трембицкий Разработка и обогащение полезных ископаемых/ Ин-т проблем комплексного освоения недр АН СССР. - М., 1978, с. 83-87.



5. Widginton, D., Grossland D. Intrinsic safety of circuits, effects produces by interconnecting cables D. Widginton, D. Grossland, Electr. Res. Assoc., 1968, Rept. № 5246, p. 1-26.
6. Widginton, D. Some aspects of the design of intrinsically safe circuits. D. Widginton SMRE Res. Ret, 1987. - № 274, p. 5-32.

Recenzent: Doc. Ing. Josef Mazáč, CSc. HGF, VŠB-TU OSTRAVA