

ОЦЕНКА ИСКРОБЕЗОПАСНОСТИ ОМИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Получены расчетные и аппроксимирующие зависимости минимального воспламеняющего тока от напряжения источника питания омической цепи для смесей I и II групп по ГОСТ 22782.5 и 47 % водородно-воздушной. Разработан алгоритм быстрого расчета минимального воспламеняющего тока омической цепи, в том числе с нелинейной нагрузочной характеристикой, основанный на анализе изменения коэффициента искробезопасности по энергии

Ключевые слова: оценка искробезопасности, омическая цепь, коэффициент искробезопасности

Постановка проблемы и её связь с научными и практическими задачами.

Используемая в настоящее время классификация электрических цепей предложена В. С. Кравченко [1]. Она основана на источнике поступления в разряд энергии. Так в омических цепях основная доля энергии поступает от источника питания. В индуктивных и емкостных цепях – от накопителя энергии, которым выступает соответственно индуктивность или емкость цепи. В смешанных цепях существенные доли составляет энергия, выделяемая как от источника питания, так и от реактивных элементов. В то же время по ГОСТ 22782.5 принято считать омической цепь индуктивностью менее 10^{-4} Гн.

Для оценки искробезопасности электрических цепей используются экспериментальные зависимости минимального воспламеняющего тока от напряжения источника питания [2, 3]. Однако эти зависимости имеют существенные отличия между собой, а для активизированной смеси (47 % водородно-воздушная) отсутствуют. Последняя смесь обеспечивает требуемый коэффициент запаса не менее 1,5 по току или напряжению без повышения параметров цепи при её испытаниях [2]. Низкая стабильность и высокая трудоемкость экспериментальной оценки искробезопасности электрических цепей способствовали развитию расчетного метода.

Цель настоящей работы: получить расчетные зависимости минимального воспламеняющего тока от напряжения источника питания омической цепи и разработать метод быстрого расчета минимального воспламеняющего тока для оценки искробезопасности омических цепей.

Изложение основного материала. Используя модель разряда [4], зависимость тока от напряжения омической цепи и значения воспламеняющей энергии при заданных скорости коммутации и длительности разряда [5], разработана программа в среде Mathcad для оценки искробезопасности омических цепей.

Начальная часть программы служит для ввода параметров исследуемой омической цепи (напряжения источника питания, тока короткого замыкания и напряжения открывания стабилитрона), в том числе с использованием искрозащиты на стабилитронах по [2] для формирования нелинейной нагрузочной характеристики. Модель стабилитрона принимается идеальной, то есть с нулевым внутренним сопротивлением в открытом состоянии и равным бесконечности – в закрытом. Если расчету подлежит простая омическая цепь, не содержащая стабилитрон, следует задать напряжение открывания стабилитрона равным или большим напряжения источника питания. Задаются также минимальная и максимальная скорости коммутации и количество расчетных точек в диапазоне изменения скорости коммутации. Исходные данные по скорости коммутации служат для определения массива значений скорости, в котором расчетные точки распределены равномерно в логарифмическом масштабе. Далее задаются значения коэффициентов модели разряда a , b , τ и начальные падения напряжения на разряде для расчета его вольтамперной характеристики и энергии [4

и 6]. Решение системы уравнений, описывающей исследуемую цепь, производится численным методом Рунге-Кутты (порядок погрешности на одном шаге h^5).

По заданным значениям скорости коммутации и вычисленным значениям длительности разрядов определяются минимальные значения воспламеняющей энергии для выбранных газовых смесей. Признаком окончания разряда может быть снижение его тока до значения менее 2 мА или достижение напряжением на разряде напряжения открывания стабилитрона. Коэффициент искробезопасности по энергии определяется отношением выделившейся в разряд энергии к минимальной воспламеняющей.

Использование методики и программы расчета позволяет получить зависимости минимального воспламеняющего тока от напряжения источника питания омической цепи для групп I и II (рис. 1). Видно, что по агрессивности 47 % водородно-воздушная смесь занимает место между этилено- и 20 % водородно-воздушной смесями (соответственно для подгрупп IIB и IIC).

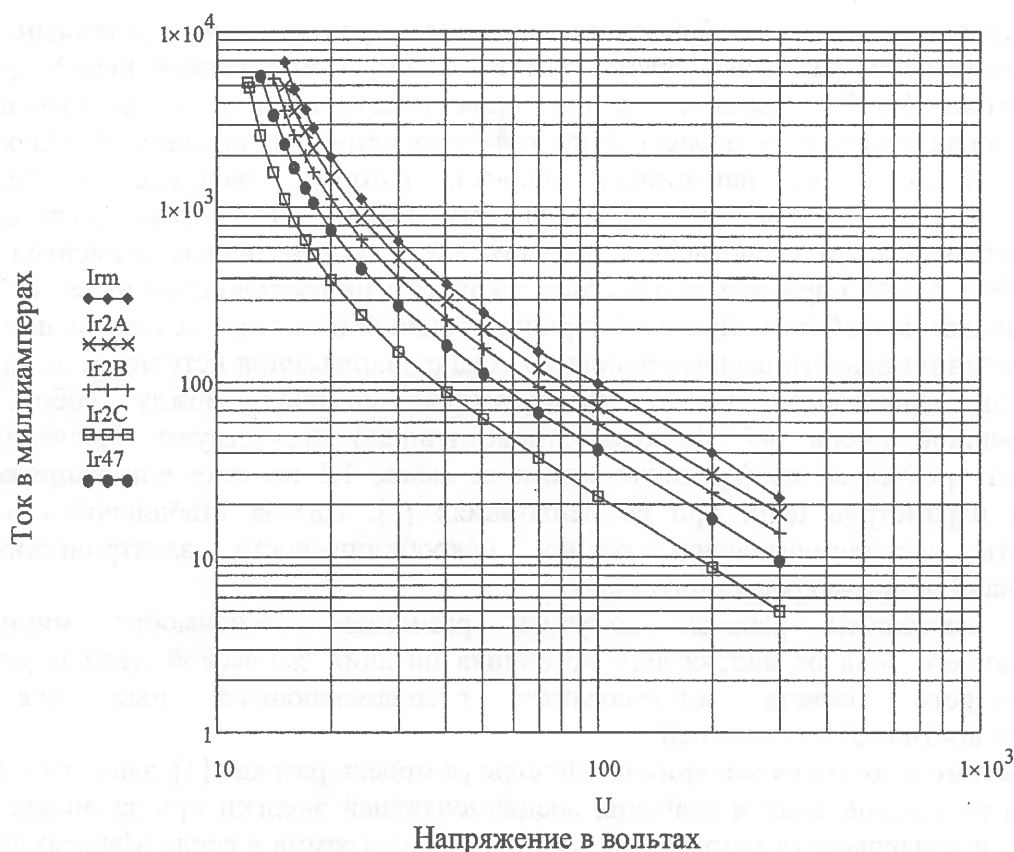


Рис. 1. Расчетные зависимости минимального воспламеняющего тока от напряжения омической цепи для:
Irm – группы I, *Ir2A* – подгруппы IIA, *Ir2B* – подгруппы IIB,
Ir2C – подгруппы IIC и *Ir47* – 47 % водородно-воздушной смеси

Характер графиков минимального воспламеняющего тока от напряжения омической цепи (рис. 1) одинаков для всех рассмотренных смесей. Полученные зависимости являются более точными, чем приведенные в ГОСТ 22782.5 и IEC60079-11, и могут быть использованы для оценки искробезопасности омических цепей.

Сравнение полученных расчетных значений минимального воспламеняющего тока с экспериментальными, приведенными в [2 и 3], можно выполнить с помощью критерия Фишера F оценки значимости регрессии, за которую могут быть приняты расчетные значения. Условие $F < F_{кр}$, свидетельствующее о том, что расчетные данные по сравнению с экспериментальными значимы в целом, выполняется для всех рассматриваемых смесей,

Все полученные коэффициенты регрессии значимы на уровне не ниже 0,002. Для повышения точности вычислений целесообразно не упрощать выражение (1), а сначала вычислить показатель степени, после чего возвести в степень.

Имея массивы напряжения источника питания U_{mr} и соответствующих ему минимальных воспламеняющих токов I_{mr} , можно с помощью интерполяции сплайнами, например, в среде Mathcad, получить значения минимальных воспламеняющих токов при любых значениях напряжения из заданного диапазона

$$I_{ri} := \text{interp}(\text{cspline}(U_{mr}, I_{mr}), U_{mr}, I_{mr}, XX)$$

где XX – массив значений напряжения, при которых определяются минимальные воспламеняющие токи.

Отношения минимального воспламеняющего тока для 8,3 % метано-воздушной смеси к минимальным воспламеняющим токам для рассмотренных смесей (рис. 2) достигают максимальных значений при минимальном напряжении источника питания.

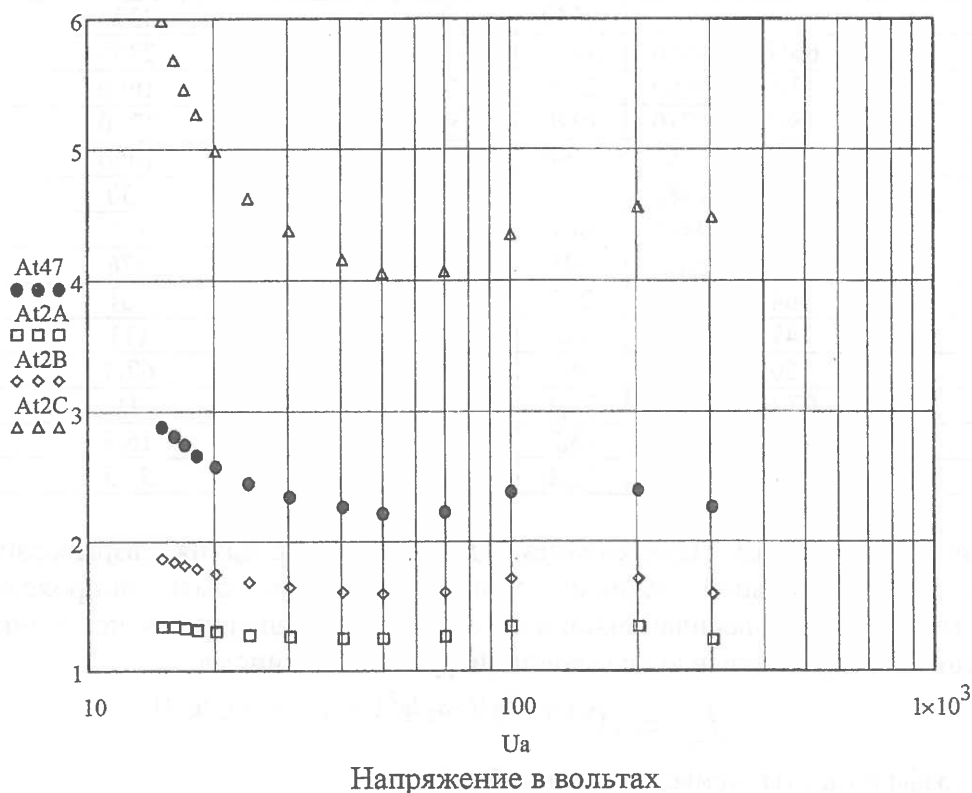


Рис. 2. Расчетные зависимости отношения минимального воспламеняющего тока для 8,3 % метано-воздушной смеси к минимальным воспламеняющим токам:
At47 – 47 % водородно-, At2A – пентано-, At2B – этилено- и At2C – 20 % водородно-воздушной смесей от напряжения источника питания омической цепи

Как практический, так и теоретический интерес могут иметь средние значения рассматриваемых отношений, для групп IА, IВ, IС и 47 % водородно-воздушной смеси соответственно равные 1,3; 1,7; 4,8 и 2,5. Отсюда видно, что 47 % водородно-воздушная смесь по сравнению с 8,3 % метано-воздушной является более активной (по току) не в 1,5 раза, как предполагается в ГОСТ 22782.5, а в среднем в 2,5 раза. Причем максимальное значение составляет 2,9, а минимальное – 2,2 раза.

кроме подгруппы ПС по [2]. Однако для этой подгруппы экспериментальные данные минимального воспламеняющего тока омической цепи по [2] имеют существенные отличия от приведенных в [3].

Для практического применения удобным может быть представление значений минимальных воспламеняющих токов для омической цепи в виде таблицы (табл. 1)

Таблица 1

Расчетные зависимости минимального воспламеняющего тока от напряжения омической цепи

Напряжение, В	Ток, мА для групп и подгрупп				
	I	ПА	ПВ	ПС	47 % водородно-воздушная смесь
12	-	-	-	5200	-
13	-	-	-	2570	5650
14	-	-	5340	1590	3390
15	6650	4950	3570	1110	2300
16	4740	3560	2590	834	1690
17	3590	2710	1990	656	1310
18	2830	2150	1590	537	1060
20	1930	1480	1110	387	750
24	1110	869	661	240	455
30	647	512	395	148	276
40	364	291	227	87,7	161
50	247	199	156	61,1	111
70	150	119	94	36,9	67,4
100	97,5	72,5	57,3	22,4	41
200	39,5	29,5	23,2	8,67	16,5
300	21,8	17,6	13,8	4,87	9,65

В связи с широким применением для проектирования взрывозащищенного оборудования вычислительной техники, полезными могут быть аппроксимирующие зависимости минимальных воспламеняющих токов I_{mv} от напряжения источника питания омической цепи U , полученные в виде степенной функции полинома

$$I_{mv} = 10^{a_0 + a_1 \cdot \lg U + a_2 \cdot \lg^2 U + a_3 \cdot \lg^3 U + a_4 \cdot \lg^4 U} \quad (1)$$

где $a_0 \dots a_4$ – коэффициенты, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты аппроксимирующей зависимости минимальных воспламеняющих токов от напряжения источника питания омической цепи

Коэффициенты	группа I	подгруппы			47 % водородно-воздушная смесь
		ПА	ПВ	ПС	
a_0	25,896	27,085	29,514	38,612	32,710
a_1	-41,899	-45,825	-51,917	-74,896	-60,005
a_2	28,797	32,918	38,194	58,246	45,242
a_3	-9,006	-10,812	-12,777	-20,302	-15,416
a_4	1,047	1,329	1,596	2,624	1,956

Оценка искробезопасной мощности источников питания с ограничительным резистором (омическая цепь) дает следующие результаты. Известно, что в данном случае в нагрузку может быть отдано не более $\frac{1}{4}$ мощности источника питания в режиме короткого замыкания. Кроме того, для получения искробезопасного тока необходимо минимальный воспламеняющий ток уменьшить в число раз, равное коэффициенту запаса. По требованиям [2 и 3] – в 1,5 раза. В результате определяется максимальная искробезопасная мощность, которая может быть передана в нагрузку (рис. 3).

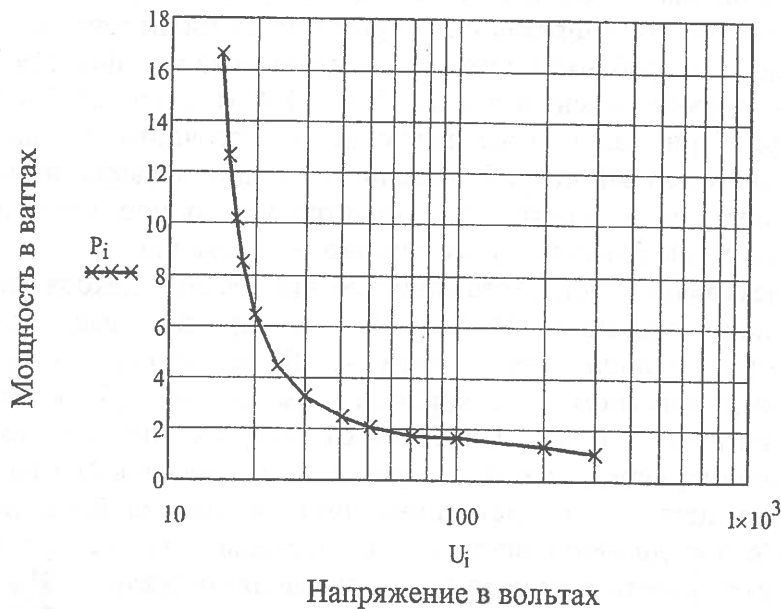


Рис. 3. Зависимость максимальной искробезопасной мощности нагрузки от напряжения источника питания омической цепи (8,3 % метано-воздушная смесь)

Максимальная мощность может быть передана в нагрузку при наиболее низком напряжении. Так при напряжении источника питания 15 В она составляет 16,6 Вт. А источник с напряжением 300 В может передать в нагрузку не более 1,1 Вт. В такой системе питания напряжение на нагрузке не стабилизировано и при максимальной мощности составляет половину напряжения источника питания. Поэтому, в случае необходимости получить в нагрузке максимальную искробезопасную мощность при напряжении на ней 24 В (2,1 Вт), ток нагрузки не может превысить 87 мА, что составляет половину тока короткого замыкания источника питания. Мощность, потребляемая от источника питания составит 8,4 Вт при его напряжении 48 В. Малые искробезопасная мощность и к. п. д. таких источников питания ограничивают область их применения единицами ватт при низких требованиях к качеству питания.

Более широкое применение до настоящего времени находят источники питания с ограничением тока резистором и выходного напряжения стабилизатором [6]. При этом напряжение на разряде в выходной цепи источника ограничивается напряжением открывания стабилизатора, которое выбирается более низким, чем напряжение источника питания. Существует диапазон токов нагрузки, в котором напряжение на ней стабилизировано на уровне качества, обеспечиваемого свойствами стабилизатора.

Ток разряда размыкания, возникающего при коммутации такого источника питания, уменьшается от тока короткого замыкания до тока, при котором открывается стабилизатор, после чего быстро снижается до нуля. Поэтому при одинаковых токах короткого замыкания в источнике со стабилизаторной защитой средний ток разряда выше, чем в простой омической цепи. Ограничение выходного напряжения стабилизатором позволяет передать в

нагрузку больший ток. Так при напряжениях источника питания и открывания стабилитрона соответственно равных 48 и 24 В для 8,3 % метано-воздушной смеси минимальным воспламеняющим является ток короткого замыкания 0,326 А (расчетное значение). Искробезопасное значение равно 0,217 А. Максимальная искробезопасная мощность в нагрузке составит 2,6 Вт при токе 108 мА. Это на 24 % выше, чем максимальная искробезопасная мощность в омической цепи без стабилитрона.

С увеличением напряжения источника питания максимальный ток, который можно передать в нагрузку, приближается к току короткого замыкания. При напряжении источника питания 1000 В и неизменном напряжении открывания стабилитрона получено расчетное значение максимального искробезопасного тока короткого замыкания 119 мА. В нагрузку может быть передан искробезопасный ток не более 116 мА, что на 7,4 % выше, чем в предыдущем примере. При таком токе нагрузки от источника питания потребляется мощность 116 Вт. Рассмотренный искробезопасный источник питания, несмотря на низкую целесообразность практической реализации, демонстрирует пример источника, в котором в нагрузку можно передать ток, близкий к току короткого замыкания.

Для питания электронных устройств широкое применение находят искробезопасные источники питания напряжением 12 В. Если в рассмотренном выше примере принять напряжение открывания стабилитрона равным 12 В, то можно получить следующие результаты. При искробезопасном токе короткого замыкания (8,3 % метано-воздушная смесь) 1,79 А в нагрузку может передаваться искробезопасный ток до 1,76 А. Искробезопасная мощность, передаваемая в нагрузку, может достичь 21,1 Вт.

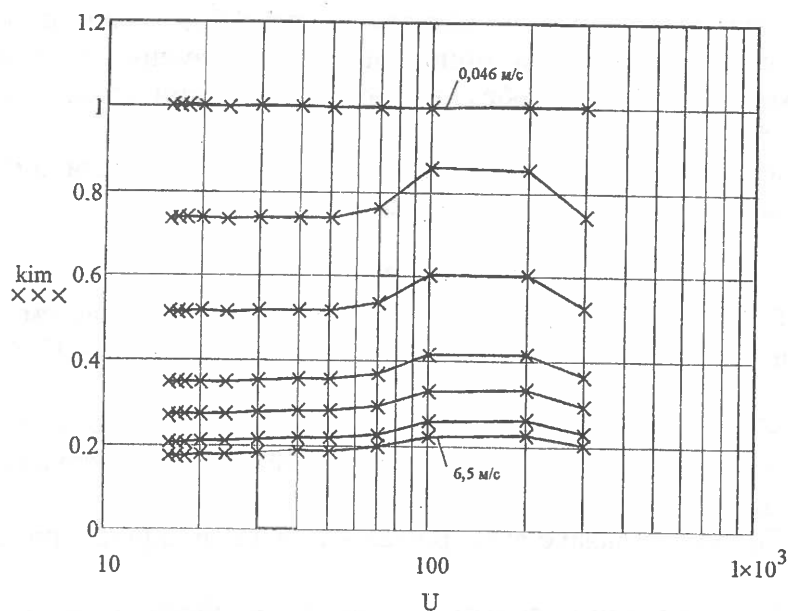
Однако выходная цепь такого источника питания должна быть искроопасна при испытаниях в 47 % водородно-воздушной смеси, поскольку для неё расчетное значение минимального воспламеняющего тока короткого замыкания составляет 731 мА.

Рассмотренные примеры показывают возможности как способа искрозащиты с помощью стабилитрона, так и разработанного расчетного метода оценки искробезопасности, который позволяет определить оптимальный вариант искробезопасного источника питания для конкретного случая.

Теоретический и практический интерес представляют исследования чувствительности метода оценки искробезопасности электрических цепей с помощью коэффициента искробезопасности по энергии. То есть, следует определить закономерность изменения коэффициента искробезопасности по энергии при изменении тока цепи. Для этого определены токи омической цепи, при которых коэффициенты искробезопасности по энергии для 8,3 % метано-воздушной смеси отличаются от единицы не более 1 %, и точные значения самих коэффициентов. Напряжение исследуемой цепи изменялось от 17 до 300 В. Определены коэффициенты искробезопасности по энергии, как при увеличении, так и при уменьшении токов цепи на 1, 5 и 10 %. То есть, исследовалось изменение коэффициентов искробезопасности по энергии в диапазоне токов, близких к минимальному воспламеняющему (рис. 4).

Данные на рис. 4 показывают, что практически отсутствует зависимость коэффициента искробезопасности по энергии от напряжения источника питания. Однако при скоростях коммутации от 0,11 до 6,5 м/с наблюдается некоторое увеличение исследуемых коэффициентов при напряжении 100 и 200 В. Ряд значений скорости коммутации соответствует предложенному в [6].

Установлено, что изменение средних значений коэффициента искробезопасности по энергии прямо пропорционально изменению тока цепи в диапазоне его вариации до 10 % от минимального воспламеняющего значения с коэффициентом 1,38. Поэтому принято, что коэффициент искробезопасности по энергии изменяется на 1,4 % на каждый процент изменения тока цепи.



Напряжение в вольтах

Рис. 4. Зависимости коэффициента искробезопасности по энергии для 8,3 % метано-воздушной смеси от напряжения источника питания омической цепи и скорости коммутации в диапазоне от 0,046 до 6,5 м/с. Минимальной скорости соответствует верхняя зависимость, максимальной – нижняя

Также высокой стабильностью отличаются нижние и верхние границы изменения коэффициента искробезопасности по энергии, равные соответственно 0,5 и 1,7 % на процент изменения тока цепи.

Практическим примером использования полученной зависимости изменения коэффициента искробезопасности по энергии от изменения тока цепи может быть быстрый расчет минимального воспламеняющего тока в цепи, состоящей из источника питания напряжением 1000 В, ограничительного резистора и стабилитрона напряжением открывания 12 В. Задано предполагаемое значение минимального воспламеняющего тока 1 А. Оценка проведена для 47 % водородно-воздушной смеси. Получено значение коэффициента искробезопасности по энергии 1,39, что на 39 % превышает искомый, равный единице. Поделив 39 на 1,4, определено необходимое изменение тока цепи – уменьшить на 27,9 %. Определено значение коэффициента искробезопасности по энергии при токе короткого замыкания 0,721 А – 0,98. То есть на 2 % ниже искомого значения. Увеличен ток на 1,43 % и получено искомое значение тока 0,731 А, при котором коэффициент искробезопасности по энергии равен 0,995. Приведенный пример показал, что всего трех расчетов занимающих время менее 10 минут, достаточно для точного определения значения минимального воспламеняющего тока цепи.

Примечательно, что разработанный метод определения минимального воспламеняющего тока омической цепи, в том числе с нелинейной нагрузочной характеристикой, позволяет быстро получить положительный результат для различных газовых смесей.

Выводы и результаты:

1. Получены расчетные и аппроксимирующие зависимости минимального воспламеняющего тока от напряжения источника питания омической цепи для смесей I и II групп по ГОСТ 22782.5 и 47 % водородно-воздушной.

2. Исследовано изменение коэффициента искробезопасности по энергии при изменении тока омической цепи вблизи минимального воспламеняющего значения ($\pm 10\%$). Установлено, что коэффициент искробезопасности по энергии изменяется на $1,4\%$ при изменении тока на 1% .

3. Разработан алгоритм расчетной оценки искробезопасности омических цепей, в том числе с нелинейной нагрузочной характеристикой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Кравченко В. С. Основы теории рудничных искробезопасных систем: Автореф. дис. на соиск. учен. степени докт. техн. наук / В. С. Кравченко. – М., 1953. – 36 с. – ИГД им. А. А. Скочинского.
2. ГОСТ 22782.5-78. Электрооборудование взрывозащищенное с видом взрывозащиты «Искробезопасная электрическая цепь». Технические требования и методы испытаний; Введ. с 01.01.80. – М.: Стандартиздат. – 1979. – 70 с.
3. IEC 60079-11 Ed. 5.0: Explosive atmospheres – Part 11: Equipment protection by intrinsic safety «i».
4. Диденко В. П. Современные подходы к оценке и обеспечению искробезопасности электрических цепей / В. П. Диденко // Уголь Украины. – 2007. – №9. – С. 39-42.
5. Valery P. Didenko Metoda szacowania możliwości zapłonu przez wyładowanie w obwodach iskrobezpiecznych / P. Valery // Innowacyjne i bezpieczne systemy mechanizacyjne do eksploatacji surowców mineralnych: KOMAG, Zakopane, 14-16. 11. 2006 r. tom 2. – S. 5-9.
6. Ерыгин А. Т. Методы оценки искробезопасности электрических цепей / А. Т. Ерыгин, Л. А. Трембицкий, В. П. Яковлев. – М.: Наука, 1984. – 256 с.

В.П. Діденко, к.т.н., с.н.с.

ОЦІНКА ІСКРОБЕЗПЕКИ ОМІЧНИХ ЛАНЦЮГІВ

Одержано розрахункові й апроксимуючі залежності мінімального запаловального струму від напруги джерела живлення омичного кола для сумішей I і II груп за ГОСТ 22782.5 і 47 % воднево-повітряної. Розроблено алгоритм швидкого розрахунку мінімального запаловального струму омичного кола, у тому числі з нелінійною навантажувальною характеристикою, заснований на аналізі зміни коефіцієнта іскробезпеки по енергії.

Ключові слова: Оцінка іскробезпеки, омичне коло, коефіцієнт іскробезпеки

V.P. Didenko, Candidate of Science (Engineering)

AN ASSESSMENT OF INTRINSICALLY SAFETY OF OHMIC CHAINS

The article deals with the estimated and approximate dependences of minimum igniting current on ohmic circuit power supply voltage for mixture of groups I and II according to GOST 22782.5 and 47 % of hydrogen-aerial mixture. An algorithm has been developed for quick estimation of minimum igniting current of ohmic circuit, including cases with nonlinear load characteristic, based on analyze of energy-related variations of intrinsic safety coefficient.

Key words: Estimation of the intrinsic safety, ohmic circuit, intrinsic safety coefficient