

УДК.621.314.6

И.А. БЕРШАДСКИЙ¹ (канд. техн. наук, доц.), **А.Ю. ГЛАДКОВ**²,
Л.С. СОЛОМАТИНА¹

¹ Государственное высшее учебное заведение

«Донецкий национальный технический университет»

² Государственный Макеевский научно-исследовательский институт по безопасности работ в горной промышленности
ibersh@rambler.ru

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ СЕРТИФИЦИРОВАНИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЯ БЛОКОВ ИСКРОЗАЩИТЫ РУДНИЧНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Обоснована возможность и создан новый принцип конструирования и проведения сертификационных испытаний аппаратуры с видом взрывозащиты «искробезопасная электрическая цепь», сущность которого состоит в разработке высокоточного способа расчетной оценки искробезопасности цепей разных классов сложной конфигурации, а также в использовании структурных безопасных элементов, таких как источники питания, линии связи и загрузка.

Ключевые слова: искробезопасность, дуговой разряд, электрическая цепь, тепловой взрыв, бескамерная оценка искробезопасности, источник питания, методы сертификации.

Постановка проблемы. «Искробезопасная электрическая цепь» является одним из видов обеспечения взрывобезопасности электрооборудования, которое по условиям эксплуатации должно функционировать во взрывоопасной атмосфере, и при любых повреждениях, находясь под напряжением, не вызывать недопустимых по условиям воспламенения взрывчатой смеси искры и нагрева.

В настоящее время в Украине, России и других странах основу оценки искробезопасности электрических цепей составляют экспериментальные испытания с помощью взрывных камер (ВК), заполненных испытательной взрывоопасной смесью, что соответствует международным стандартам [1].

Однако на практике были выявлены случаи, когда после испытаний на искробезопасность источника питания в агрессивной смеси с вероятностью воспламенения $6,25 \cdot 10^{-4}$ не обеспечивалась вероятность воспламенения $1 \cdot 10^{-6}$ в нормальных условиях. Это можно объяснить тем, что источники питания с динамической искрозащитой не подчиняется линейной зависимости логарифмов вероятности воспламенения и тока.

О необходимости развития, совершенствования и использования бескамерных методов оценки настоятельно рекомендует Международная электротехническая комиссия в своих стандартах на взрывозащищенное электрооборудование. Бескамерные методы оценки искробезопасности электрических цепей в сравнении с испытаниями во взрывной камере имеют значительные преимущества. Они состоят в более высокой достоверности и информативности получения воспламеняющих параметров, уменьшении времени испытаний, возможности в процессе оценки выбирать оптимальные с точки зрения обеспечения взрывобезопасности параметры электрооборудования [2].

Поэтому актуальна задача дальнейшего совершенствования и развития бескамерной оценки искробезопасности электрических цепей и расширение области ее применения.

Анализ предыдущих исследований и публикаций. В стандартах [1, 3] получила распространение оценка искробезопасности с помощью зависимостей минимального тока воспламенения от напряжения в омической цепи, тока от индуктивности и напряжения в индуктивной цепи, напряжения от емкости и сопротивления ограничительного резистора в емкостной цепи. Однако такие зависимости существуют лишь для некоторых простых цепей без шунтирования.

Рассмотренные теории зажигания взрывоопасных газовых смесей электрическими разрядами (электрическая и тепловая) и процессы протекания теплового взрыва, а также известные аналитические исследования моделей разогрева смеси и ее очагового зажигания выявили их основные недостатки, а именно: приближенный линейный учет изменения коэффициента температуропроводности в различных областях теплового поля; недостаточный диапазон опасных скоростей размыкания искрообразующего механизма (ИОМ); упрощенный подход к определению начального радиуса источника и температуры разряда; отсутствие сравнительного анализа результатов с экспериментальными данными и связи полученных результатов с распространенными на практике типами электрических цепей и параметрами ИОМ.

Недостатки используемых ранее законов линейного изменения во времени тока и напряжения разряда и уточненных на их основе нелинейных моделей разряда показаны А.Т. Ерыгиным. Они состоят в невозможности достоверной оценки по ним динамической вольт-амперной характеристики электрической дуги и необходимости обязательного использования экспериментальной информации для прогнозных расчетов.

© Бершадский И.А., Гладков А.Ю., Соломатина Л.С., 2013

С целью усовершенствования расчетных схем электрического разряда предлагается использовать модель дуги в виде «черного ящика» (ЧЯЩ) [4].

Формулирование цели статьи. Цель статьи состоит в оценке результатов разработанной методики бескамерной оценки искробезопасных параметров электрических цепей, которая может использоваться в качестве вспомогательного средства для количественного анализа коэффициентов искробезопасности при создании новых схем и принципов конструирования, а также при проведении предварительных сертификационных испытаний рудничного электрооборудования с видом взрывозащиты «искробезопасная электрическая цепь».

Изложение основного материала. В методике рассматриваются аварии (аварийные ситуации), связанные со взрывами на объектах горной промышленности, в шахтах и рудниках, опасных по внезапным выбросам газа и пыли. Источниками инициирования взрыва на рассматриваемых объектах являются:

- электрические разряды, возникающие при нормальной эксплуатации на размыкаемых соединениях, а также при техобслуживании электрооборудования под напряжением;
- электрические разряды при размыкании, закорачивании, обрыве и заземлении внешнего соединительного кабеля;
- искры от удара и трения при разрушении оборудования.

Значение воспламеняющей энергии должно быть уменьшено в число раз, необходимое для обеспечения требуемого коэффициента искробезопасности по току KI, напряжению KU или их комбинации [3, 5].

Зависимости минимальной воспламеняющей энергии W_v от скорости размыкания искрообразующего механизма v и времени существования разряда T_p получены путем математического моделирования на основе тепловой теории воспламенения для неподвижной среды газа и стационарных условий течения процесса воспламенения, что удовлетворяет оптимальным условиям взрыва метано-воздушной смеси [6].

Принимаем, что для обеспечения искробезопасности электрических цепей достаточно снизить мощность разряда или выделяющуюся в нем энергии до безопасного значения, а это позволяет осуществлять бескамерную оценку такой цепи.

Обобщенная методика включает в себя:

1. Уточненную математическую модель слаботокового электрического разряда размыкания с учетом изменения его параметров в процессе коммутации.
2. Расчет воспламеняющей способности слаботоковых омических и индуктивных цепей постоянного тока.
3. Расчет воспламеняющей способности слаботоковых цепей нагрузки с шунтами в виде эффективных гасящих контуров: а) индуктивная цепь с омическим шунтом; б) индуктивная цепь с диодным шунтом; в) индуктивная цепь со стабилизаторным шунтом.
4. Расчет искробезопасных параметров емкостных (индуктивно-емкостных) цепей по разрядам замыкания: а) разработка компьютерной модели оценки и тестирования типовых искробезопасных индуктивно-емкостных цепей; б) обоснование методики бескамерной оценки искробезопасности сложных индуктивно-емкостных цепей.

Для определения параметров искрового электрического разряда (энергия W_p , мощность P_p и длительность T_p), возникающего при известных параметрах электрической цепи и источников электроэнергии, а также при заданных условиях коммутации, используется модель, связывающая переходный процесс с заданной скоростью размыкания контактов, характеристикой разряда и его воздействием на образование ядра пламени. Для исследования режимов искробезопасных цепей применены структурные компьютерные объекты на основе программы схемотехнического моделирования MicroCAP 9.

Для проводимости дуги g получено:

$$\frac{1}{g} \left(\frac{dg}{dt} \right) = \frac{1}{\tau} \left(\frac{u_d i_d}{P_d} - 1 \right). \quad (1)$$

При компьютерном моделировании удобнее решать следующую систему уравнений на основе (1):

$$\begin{cases} \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\tau} \cdot \left(\frac{gu^2}{P_p} - 1 \right), \\ i = gu \end{cases} \quad (2)$$

Отводимая от дуги мощность P_d представляется упрощенно с использованием статической вольт-амперной характеристики дугового разряда $u_d = u_k + \left(a + \frac{b}{i_d} \right) vt$ в виде [6]:

$$P_d = \left[u_k + E_{д.ср} (i_d) l_d \right] i_d = i_d (u_k + avt) + bvt \quad (3)$$

где l_d - длина дугового разряда (межконтактное расстояние), мм; u_k - минимальное значение катодного падения напряжения; для катода, изготовленного из кадмия, $u_k = 8$ В; v - скорость размыкания контактов, мм/с;

a, b - коэффициенты, характеризующие условия получения характеристик для ограниченных диапазонов начального тока дугового разряда: $a=82,81$ В/мм, $b=2,42$ В·А/мм при $i_d = 0,024 \dots 0,1$ А и $a=43,89$ В/мм, $b=5,18$ В·А/мм при $i_d = 0,05 \dots 2$ А; t - время движения контактов, с; $E_{д,ср}$ - усредненное значение напряженности поля в столбе и анодной области дуги; u_d, i_d - напряжение столба и ток дуги.

Постоянная времени дуги τ зависит от тока разряда и радиуса столба. Если ограничиться температурами, не превышающими 10000 К (слаботочные цепи), можно использовать одночленную степенную аппроксимацию тепловых функций дуги, приведенную в [7] для воздуха при атмосферном давлении. Аналитическое выражение τ :

$$\tau = \frac{r_0^2 \cdot D_b \cdot (2\pi r_0 \sqrt{B_p})^{\frac{2(1-b)}{p+1}}}{i^{\frac{2(1-b)}{p+1}}}, \quad (4)$$

где r_0 - расчетный радиус столба дуги, см; коэффициенты $B_p = 1,76 \cdot 10^{-7}$, $b = 0,25$, $D_b = 0,18$, $p = 3,5$.

Необходимые параметры разряда в искробезопасной цепи заданной конфигурации получаем, используя MicroCAP модель, преимущества которой состоят в удобстве обработки результатов расчетов, возможности задания расчетной схемы в виде, близком к принципиальным схемам цепей электроники и физическому макетированию. Положительным моментом здесь следует считать возможность использования обширной библиотеки компонентов как зарубежных, так и отечественных производителей, а также редактор новых компонентов.

Рассмотрим особенности проведения вычислительных экспериментов в пакете MicroCap. Сопротивление резистора RD (рис. 1), моделирующего разряд размыкания, задано при помощи математического выражения:

$$RD = if(T < c_br, 1e-4, STP(c_br) \cdot 1 / EXP(I(LI))), \quad (5)$$

где T - текущее модельное время, с; c_br - момент начала коммутации цепи - размыкание ключа $SW1$, с; $STP(c_br)$ - функция, принимающая «1» при $T \geq c_br$ и «0» в остальных случаях; if (условие, параметр 1, параметр 2) - функция, принимающая значение параметра 1 при выполнении условия и параметра 2 в противоположном случае.

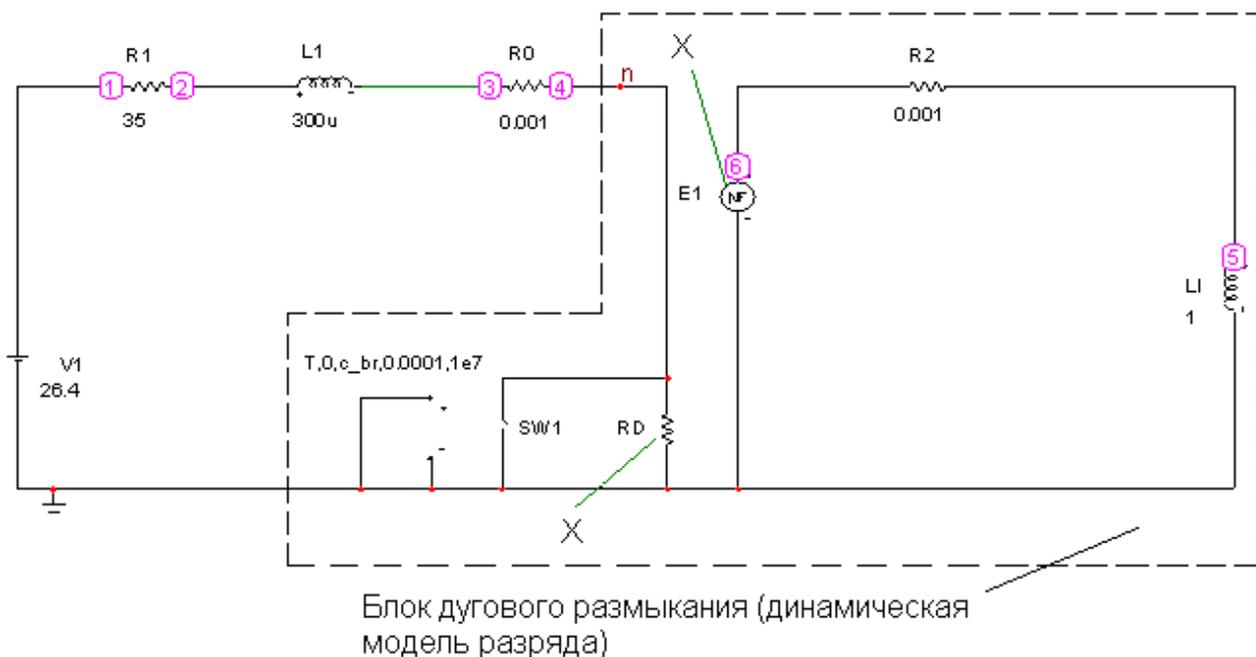


Рисунок 1 - Расчетная схема для оценки искробезопасности активно-индуктивной цепи

Ключ $SW1$ управляется по времени, что соответствует изменению сопротивления от 0,0001 Ом при $T < c_br$ (служит для моделирования замкнутых контактов электрической цепи до коммутации) к сопротивлению 10^7 Ом при $T \geq c_br$, следующему дифференциальному уравнению проводимости дуги (6).

Для формирования этой проводимости используем источник напряжения EI (рис. 1), который задает между узлами 6 и 0 напряжение $V(EI)$, соответствующее правой части 1-го уравнения системы (6):

$$V(EI) = \frac{d \ln g}{dt} = STP(c - br) \cdot (1 / \tau) \cdot ((EXP(I(LI))) \cdot V(RD)^2) / (I(R0) \cdot (8 + ad \cdot vs \cdot (T - c - br)) + bd \cdot vs \cdot (T - c - br)) - 1) \quad (6)$$

где ad и bd – коэффициенты вольт-амперной характеристики дуги [5]; vs – скорость коммутации; τ – постоянная времени дуги.

Ток через дополнительную индуктивность $LI = 1$ Гн определяет интеграл от напряжения источника $V(EI)$, т.е. $I(LI) = \ln(g)$. Соответственно, проводимость дуги $\exp(I(LI)) = g$ и сопротивление $RD = 1/\exp(I(LI))$.

По результатам накопленных данных вычислительного эксперимента получен массив точек в 3-х мерной области определения, связывающий энергию воспламенения разряда в метано-воздушной смеси W_b , мДж, его длительность T_p , мс (мкс) и скорость размыкания цепи v , м/с

Зависимость $W_b(v, T_p)$ аппроксимируется в логарифмической системе координат на каждом из участков в виде одной из двух форм представления:

$$W_b = b_i T_p^{k_i} \quad (\text{форма 1}) \quad (7)$$

$$W_b = e^{a_0 + a_1 \cdot \ln(T_p)} \quad , \quad v = 6,5; 4 \text{ м/с} \quad (\text{форма 2}) \quad (8)$$

$$W_b = a_0 + a_1 \cdot \ln T_p \quad , \quad v = 1,8; 0,9; 0,3; 0,11; 0,046 \text{ м/с}$$

где T_p – продолжительность разряда, выраженная в мкс при $v = 6,5; 4$ м/с и в мс при $v = 1,8; 0,9; 0,3; 0,11; 0,046$ м/с; W_b – воспламеняющая энергия разряда в мДж; i – номер участка, $i = \overline{1,3}$.

Для скоростей коммутации $v_1 = 6,5$ м/с и $v_2 = 0,046$ м/с коэффициенты b_i , k_i и a_0 , a_1 приведены в табл. 1.

Таблица 1 - Расчетные коэффициенты для определения воспламеняющей энергии метано-воздушной смеси W_b (скорость коммутации $v_1 = 0,046; 6,5$ м/с)

Скорость, м/с	Продолжительность разряда	Расчетное выражение, мДж	Участок					
			1		2		3	
6,5	$T1 \leq 44$ мкс; $T2 = (44..90]$ мкс; $T3 = (90..500]$ мкс	$W_p = b_i \cdot T^{k_i}$	$b1 = 5.804$	$k1 = -0.718$	$b2 = 0.37$	$k2 = 0$	$b3 = 0.014$	$k3 = 0.738$
0,046	$T2 = (2..5]$ мс; $T3 = (5..10]$ мс	$W_p = b_i \cdot T^{k_i}$	-	-	$b2 = 7.046$	$k2 = 0.109$	$b3 = 2.265$	$k3 = 0.829$

Количественную оценку воспламеняющей способности разрядов в исследуемой цепи можно получить, сравнив энергию W_p , поступающую в разряд, с воспламеняющей энергией W_b метано-воздушной смеси при одинаковой длительности разряда T_p и скорости коммутации v . Если соотношение $\frac{W_p}{W_b} \geq 1$ хотя бы на одном из

участков $i = \overline{1,3}$, то цепь признается искроопасной. Номер участка определяется, исходя из рекомендуемых диапазонов T_p (табл. 1).

Необходимо отметить, что аппроксимация в форме 2 приводит к более сильной регрессионной связи $W_b(v, T_p)$, поэтому ее рекомендуется использовать для определения опасности по воспламеняющей энергии. Регрессионная зависимость в форме 1 удобна для пересчетов воспламеняющих параметров более агрессивных, чем 8,3% - ная метано-воздушная смесь (в данной методике не рассматривается).

При определении энергии разряда размыкания, выделяемой в цепи с “опережающей защитой” в схемах блоков искрозащиты, работающих по принципу ограничения энергии разряда за счет скоростного перекрытия ключа, например, на мощном полевом транзисторе следует учитывать, что напряжение разряда размыкания VD перераспределяется за счет увеличения его падения на динамически возросшем сопротивлении транзистора.

Вследствие этого для определения энергии разряда необходимо принять за VD потенциал точки n относительно земли (рис. 1).

Выводы. 1. Впервые показана возможность использования для расчетной оценки искробезопасности слаботочных электрических цепей модели дугового разряда по уравнению Майра с учетом теплофизических параметров столба плазмы.

2. Усовершенствована математическая модель динамической вольт-амперной характеристики разряда с учетом зависимости постоянной времени тепловой ионизации плазмы от тока и радиуса столба дугового разряда, что позволило создать расчетные модели разрядов при различных видах коммутации, пригодных для оценки искробезопасности, в т.ч. и для систем с сокращенной длительностью разряда.

3. Результаты исследований использованы в нормативном документе «Методика расчетной оценки искробезопасности слаботочных цепей постоянного тока, схем и блоков искрозащиты рудничного электрооборудования», согласованном с Государственный Макеевский научно-исследовательский институт по безопасности работ в горной промышленности (МакНИИ).

4. Для семейства искробезопасных источников питания, работающих согласно указанному принципу действия, а также источника питания АГАТ ВН-24.30 (протокол испытаний №9146-И Испытательного центра МакНИИ, г. Макеевка) с различными уставками токов статической отсечки, выполнялись аналогичные экспертные оценки по методу. Результаты сравнения показали сходимость результатов на уровне 8%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IEC 60079-11 Ed. 5.0: Explosive atmospheres - Part 11: Equipment protection by intrinsic safety «i». – 2006. - 118 с.

2. Ерыгин. А.Т. О расширении области применения бескамерной оценки искробезопасности электрических цепей / А.Т. Ерыгин, А.Н. Шатило, А.Л. Трёмбицкий // Горный информационный аналитический бюллетень. - 2002. - №12. - С. 202 - 205.

3. Электрооборудование для взрывоопасных газовых сред. Часть 11. Искробезопасная электрическая цепь «i»: ГОСТ Р 52350.11. – [Введ. с 28.12.2005]. - М.: Стандартиформ, 2007. – 95 с.

4. Бершадский И.А. Тестирование метода бескамерной тепловой оценки искробезопасности схемы источника питания / И.А. Бершадский, Ал.А. Дубинский // Взрывозащищенное электрооборудование: Сб. научных трудов УкрНИИВЭ. - 2011. - С. 230 – 240.

5. Электрооборудование взрывозащищенное, Часть 11. Искробезопасная электрическая цепь «i»: ГОСТ Р 51330.10 – 99. - [Введ. с 01.01.2001]. – М.: Госстандарт России, 2000. – 118 с.

6. Ковалев А.П. Моделирование параметров разряда и расчетная оценка искробезопасности при размыкании электрической цепи / А.П. Ковалев, И.А. Бершадский, З.М. Иохельсон // Электричество. – 2009. - №11. – С. 62-69.

7. Крижанский С.М. К теории вольтамперной характеристики столба нестационарного дугового разряда высокого давления / С.М. Крижанский // Журнал технической физики. - 1965. - Вып. 10., т. 35.

REFERENCES

1. IEC 60079-11 Ed. 5.0: Explosive atmospheres - Part 11: Equipment protection by intrinsic safety «i», 2006. 118 p.

2. Erygin A.T., Shatilo A.N., Trembitckiy A.L. The extension of the scope of tubeless tyre evaluation of the intrinsically safe electric circuits. *Gornyj informacjonnyuy analiticheskiy bulleten*. M.: MGGU. 2002; №12: 202 - 205.

3. GOST P 52350.11 *Elektrooborudovanie dlya vzruvoopasnuyh gazovuyh sred. Chast 11. Iskrobezopasnaya elektricheskaya tsep «i»* [Electrical equipment for potentially explosive gas environments. Part 11. Intrinsically safe electrical circuit «i»]. – [Vved. c 28.12.2005]. – M.: Standartinform, 2007. 95 p.

4. Bershadskiy I.A. Testing method of tubeless tyre heat evaluation of the intrinsically safe circuit power supply. *Vzruvozaschischennoe elektrooborudovanie: Sb. Nauchnyh trudov UkrNIIVE*. Donetsk. 2011: 230 – 240.

5. GOST P 51330.10 – 99. *Elektrooborudovanie vzruvozaschischennoe, Chast 11. Iskrobezopasnaya elektricheskaya tsep «i»* [Explosion-proof electric equipment, Part 11. Intrinsically safe electrical circuit «i»]. - [Vved. c 01.01.2001]. – M.: Gosstandart Rossii, 2000. 118 p.

6. Kovalev A.P., Bershadskiy I.A., Iohelson Z.M. Simulation of the parameters of the discharge and the estimated intrinsic safety when opening an electric circuit. *Elektrichestvo*. 2009; №11: 62-69.

7. Kriganskiy S.M. To the theory of current-voltage characteristics of the pillars of non-stationary arc discharge high-pressure.– *Gurnal tehnichestkoy fiziki*, 1965. - Vup. 10. -v. 35.

I. А. БЕРШАДСЬКИЙ¹, О. Ю. ГЛАДКОВ², Л. С. СОЛОМАТИНА¹

¹ Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет»

² Державний Макіївський науково-дослідний інститут з безпеки робіт у гірничій промисловості

Розробка методики сертифікування і конструювання блоків іскрозахисту рудникового електрообладнання.

Обґрунтована можливість і створено новий принцип конструювання і проведення сертифікаційних випробувань апаратури з видом вибухозахисту «іскробезпечне електричне коло», сутність якого полягає у розробці високоточного способу розрахункової оцінки іскробезпеки ланцюгів різних класів складної конфігурації, а також у використанні структурних безпечних елементів, таких як джерела живлення, лінії зв'язку і навантаження.

Ключові слова: іскробезпека, дуговий розряд, електричний ланцюг, тепловий вибух, безкамерна оцінка іскробезпеки, джерело живлення, методи сертифікації.

I. BERSHADSKY¹, A. GLADKOV², L. SOLOMATINA¹

¹ State Institution of Higher Education "Donetsk National Technical University"

² Makeyevka State Research Institute for Safety in Mining Industry

Development of the Procedure of Certification and Design of Intrinsically Safe Blocks of Mine Electrical Equipment.

The article discusses the solution of actual scientific and applied problems. It is prevention of ignition of an explosive gas mix in the process of low-current circuit operation and the safety increase at the expense of development of scientific basis of the assessment, forecasting and synthesis of the ways of increasing the intrinsic safety of electric equipment, determination of regularities of development of thermal explosion from the electric spark discharge. Both research and practical findings became a basis for improvement of model of an arc regarding establishment of nature of change of a thermal constant of time from a current and length of an arch that allowed to increase considerably reliability of method for calculated assessment of spark safety of electric circuits of mine equipment with current-voltage characteristic in dynamic modes of switching. The technique of a settlement "method for calculated assessment of spark safety of electric circuits of a direct current, schemes and blocks of mine equipment", which allows carrying out with high precision tubeless estimates of devices with dynamic protection is developed and approved.

Key words: intrinsic safety, electric spark, electrical circuit, thermal explosion, tubeless intrinsically safe rating, power supply, certification methods