

УДК 621.316.9

**А.Ю. ГЛАДКОВ, зав. лаб.,**

**О.Г. БОЛТУНОВ, зав отд.,**

**С.Л. ТАРАСЕНКО, зав отд.; МакНИИ, Макеевка**

## **МЕТОД РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ ОСВЕЩЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИХ ИСКРОБЕЗОПАСНОСТИ**

*Предложен метод расчета параметров систем освещения для оценки их искробезопасности, основанный на определении максимальной энергии разряда, предельной мощности в зависимости от длительности разряда, длины кабеля и сечения питающего кабеля, токов срабатывания защиты искробезопасные блоки питания (ИБП).*

**Ключевые слова:** искробезопасные системы освещения, искробезопасные блоки питания, максимальная энергия разряда, длительность разряда, ток срабатывания защиты ИБП.

В условиях подземных выработок угольных шахт, опасных по газу и пыли, применение искробезопасных систем освещения является приоритетным решением, поскольку они полностью устраняют условия воспламенения окружающей среды и поражения людей электрическим током.

Наиболее эффективным методом достижения искробезопасности светильников является применение энергоэффективных светодиодных технологий LED, а также питание LED светильников от искробезопасного источника, обеспечивающего динамическую искрозащиту взрывозащищенного электрооборудования, применяемого на предприятиях со взрывоопасной атмосферой [1, 2].

Для повышения искробезопасной мощности в искробезопасных блоках питания применяют динамическую защиту, которая не ограничивает мощность цепи в номинальном режиме, а срабатывает по сигналу датчика начала разряда и лимитирует энергию, поступающую из элементов цепи в разряд, только в момент аварийной коммутации за счет сокращения времени ее выделения.

В настоящее время имеются указанные искробезопасные блоки питания (ИБП) и защиты, которые теоретически могут применяться для питания светодиодных светильников. Однако метод расчета параметров си-

стем освещения для оценки их искробезопасности в настоящее время не разработан.

Целью статьи является обоснование метода расчета параметров систем освещения для оценки их искробезопасности.

В статье представлен научно обоснованный метод определения параметров (количество светильников, допустимая искробезопасная мощность, допустимая длительность существования искрового разряда, допустимая искробезопасная энергия разряда, допустимые сечение и длина питающего кабеля) системы освещения участка шахтной проходки длиной до 300 м.

Исходные данные для расчета представлены в табл. 1.

Таблица 1

## Исходные данные системы освещения

Наименование параметра	Величина
Выходное напряжение холостого хода ИБП (постоянного тока), не более	34 В
Ток срабатывания защиты ИБП, не более	3,5 А
Выходная максимальная мощность ИБП	119 Вт
Длительность разряда ИБП, не более	6 мкс
Диапазон входного напряжения (постоянного тока) светильников	от 18 до 34 В
Потребляемая мощность светильника, не более	6,5 Вт
Радиус освещаемой площади светильником с высоты 2 м	5,5 м
Освещенность светильника с высоты 2 м, не менее	2 Лк
Норма освещенности очистного забоя, не менее	2 Лк

Из табл. 1 видно, что для освещения 300 м шахтной выработки необходимо не менее 30 светодиодных светильников (по 15 светильников на один канал питания). Полученная средняя освещенность составляет 2 Лк, что соответствует требуемым нормам. Суммарная мощность  $P_{\text{сум}}$  одного канала ИБП, рассчитанного для освещения очистного забоя, составляет не менее:

$$P_{\text{сум}} = P_{\text{свет}} \cdot N = 6,5 \cdot 15 = 97,5 \text{ Вт}, \quad (1)$$

где  $P_{\text{свет}}$  – потребляемая мощность одного светильника, Вт;

$N$  – количество светильников, определенное расчетом, на один канал, шт.

Распределение нагрузки на каналы с учетом длины кабельной линии представлено на рис. 1.

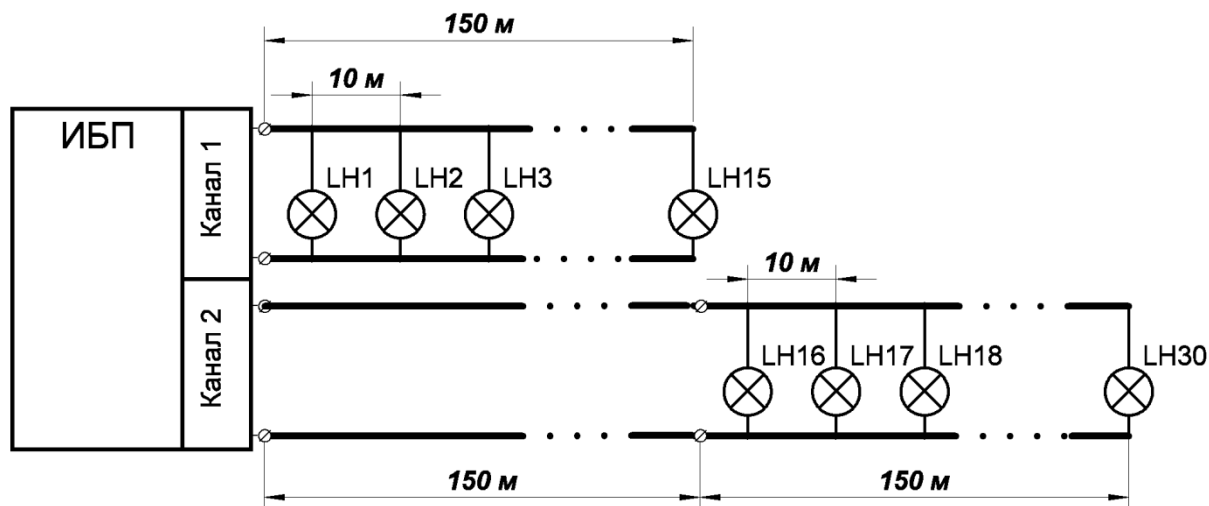


Рис. 1. Схема подключения светильников

Величина энергии в разряде для простой индуктивной цепи с учетом допущения о линейном характере убывания тока может быть определена по уравнению В.С. Кравченко [3]:

$$W_p = \frac{(I - I_1) \cdot (U + 2 \cdot I_1 \cdot R) \cdot T_p}{6} + \frac{L \cdot (I^2 - I_1^2)}{2}, \text{ Вт}, \quad (2)$$

где  $W_p$  – энергия разряда, Дж;  $I$  – ток в цепи перед размыканием, А;  $I_1$  – ток обрыва дуги, А;  $U$  – напряжение источника питания, В;  $T_p$  – длительность разряда, с;  $R$ ,  $L$  – параметры электрической цепи, Ом, Гн соответственно.

Согласно (2) энергия разряда максимальна при выполнении условия:

$$\frac{\partial W_p}{\partial I_1} = 0, \quad (3)$$

ток обрыва дуги:

$$I_1 = \frac{1}{2} \cdot T_p \cdot \frac{2 \cdot R \cdot I - U}{3 \cdot L + 2 \cdot R \cdot T_p}, \quad \text{А} \quad (4)$$

Минимальная допустимая энергия воспламенения  $W_{доп}$  в зависимости от  $Tp$  для диапазона  $Tp < 44$  мкс может приниматься согласно выражению [4]:

$$W_{доп} = 5,804 \cdot (Tp)^{-0.718} \cdot 10^{-3}, \text{ Дж.} \quad (5)$$

Данные питающих кабелей приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры двухжильного контрольного кабеля

Сечение медного кабеля $F$ , мм <sup>2</sup>	Удельное сопротивление $r$ , Ом/км при 20 <sup>0</sup> С	Удельная индуктивность $L_{уд}$ , мкГн/м
1,5	11,60	0,375
2,5	7,00	0,347
4,0	4,37	0,321

Суммарное сопротивление и индуктивность кабельной линии:

$$R = \frac{r}{1000} \cdot Dl + \frac{U}{I}, \quad \text{Ом,} \quad (6)$$

$$L = L_{уд} \cdot Dl \cdot 10^{-6}, \quad \text{Гн} \quad (7)$$

где  $r$  – удельное сопротивление;  $Dl$  – общая длина кабеля;  $U$  – напряжение холостого хода источника питания;  $I = P/U$  – ток в нагрузке (табл. 2),  $L_{уд}$  – удельная индуктивность (табл. 2).

Влияние основных параметров электрической цепи и источника питания на уровень взрывобезопасности системы освещения для заданных условий эксплуатации определяется из выражения (2) с учетом (4), (6), (7) по воспламеняющей способности искр, возникающих при коммутации электрических цепей системы освещения с реактивными элементами. На допустимую суммарную мощность системы освещения влияют: напряжение источника питания  $U$ , ток в цепи нагрузки  $I$ , индуктивность питающей линии  $L$  и ее сопротивление  $R$  на участке длины  $Dl$  (приблизительно светильник принимается в качестве активной нагрузки), длительность разряда  $Tp$  (на основе данных об устройстве защиты ИБП), которые в совокупности и определяют энергию искрового разряда.

Результаты расчета максимальной энергии разряда  $W_p$ , минимальной допустимой энергии воспламенения  $W_{доп}$  от длительности разряда  $T_p$  (в диапазоне от 2 мкс до 40 мкс) для электрических цепей с параметрами  $U=34В$ ,  $F=1,5\text{ мм}^2$ ,  $2,5\text{ мм}^2$ ,  $4\text{ мм}^2$ ,  $Dl=300\text{ м}$  при максимальной мощности источника питания  $P=119\text{ Вт}$  приведены на рис. 2.

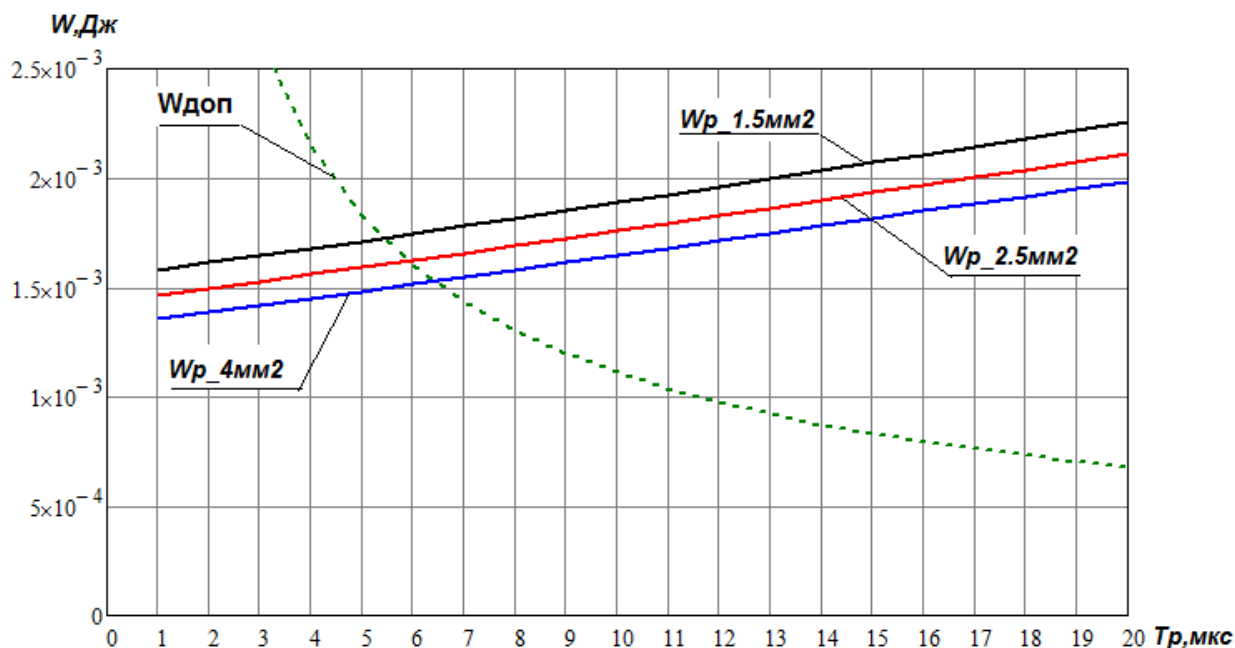


Рис. 2. Зависимости величины максимума энергии разряда  $W_p$ , минимальной допустимой энергии воспламенения  $W_{доп}$  от длительности разряда  $T_p$  для технологической среды «метановоздушная смесь»

Допустимое множество  $T_p$ ,  $Dl$ ,  $P$  находится в области, где соблюдается условие:

$$W_{доп} - W_p \geq 0. \quad (8)$$

По рис. 2 с учетом (8) определяются предельные длительности разряда  $T_p$  для обеспечения допустимой искробезопасной мощности системы освещения. При использовании кабеля сечением  $1,5\text{ мм}^2$   $T_p = 5\text{ мкс}$ ;  $2,5\text{ мм}^2$  —  $T_p = 5\text{ мкс}$ ;  $4\text{ мм}^2$  —  $T_p = 6\text{ мкс}$ . Исходя из чего применение кабеля сечением  $1,5\text{ мм}^2$  и  $2,5\text{ мм}^2$  не обеспечит искробезопасность системы освещения при исходных параметрах  $T_p$ ,  $Dl$ .

Результаты расчета максимальной энергии разряда  $W_p$  от длины кабеля  $Dl$  (до 300 м) для электрических цепей с параметрами  $F=1,5\text{ мм}^2$ ,  $2,5\text{ мм}^2$ ,  $4,0\text{ мм}^2$ ,  $T_p=6\text{ мкс}$  при максимальной мощности источника пита-

ния  $P=119$  Вт и напряжении  $U=34$ В приведены на рис.3.

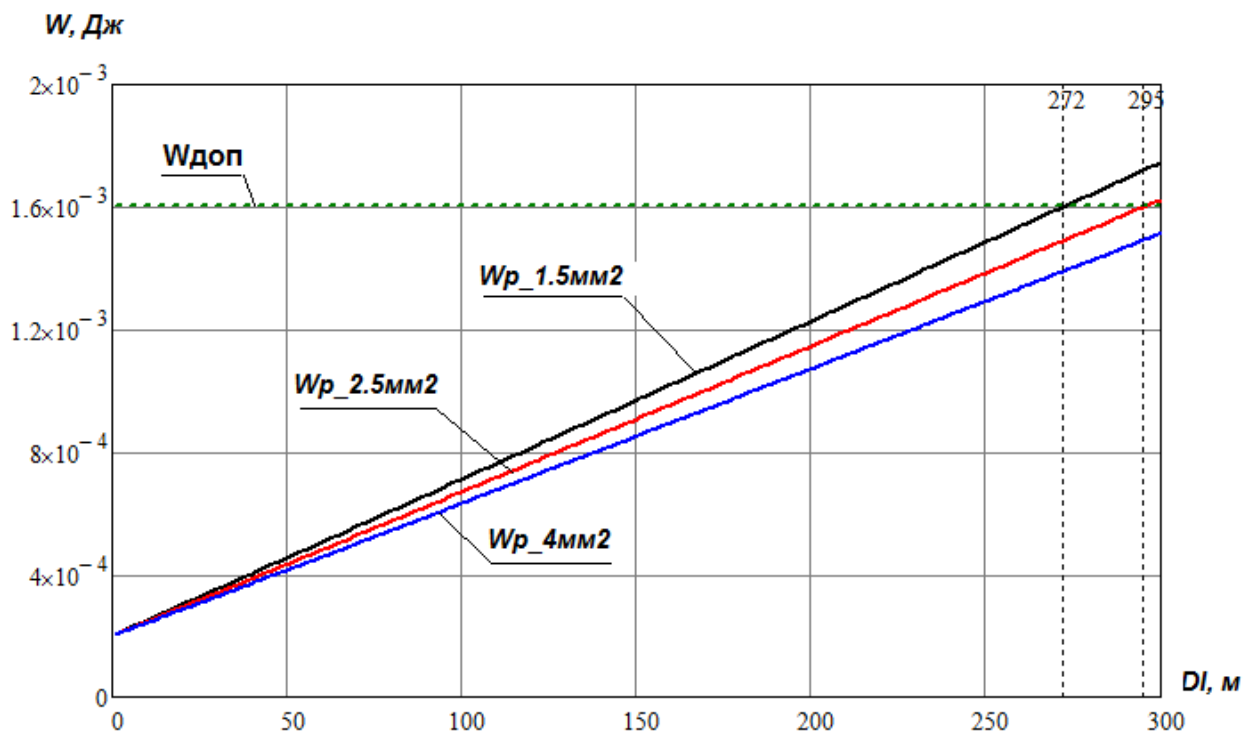


Рис. 3. Зависимости величины максимума энергии разряда  $W_p$  от длины кабеля  $Dl$  для технологической среды «метановоздушная смесь»

По рис. 3 с учетом (8) определяются предельные длины кабеля  $Dl$  для обеспечения максимально допустимой искробезопасной мощности системы освещения. При использовании кабеля сечением  $1,5 \text{ мм}^2$   $Dl = 272\text{м}$ ;  $2,5 \text{ мм}^2$  —  $Dl = 295\text{м}$ ;  $4,0 \text{ мм}^2$  —  $Dl > 300\text{м}$ . Исходя из чего, для обеспечения искробезопасности системы освещения при длине 300 м необходимо применять кабель сечением  $4,0 \text{ мм}^2$ .

Результаты расчета максимальной энергии разряда  $W_p$ , минимальной допустимой энергии воспламенения  $W_{доп}$ , максимальной искробезопасной мощности нагрузки  $P$  от тока нагрузки  $I$  (в диапазоне от 0,5 А до 5 А) для электрических цепей с параметрами  $F=1,5 \text{ мм}^2$ ,  $2,5 \text{ мм}^2$ ,  $4,0 \text{ мм}^2$ ,  $Dl=300 \text{ м}$ ,  $T_p=6 \text{ мкс}$ ,  $U=34\text{В}$  приведены на рис. 4.

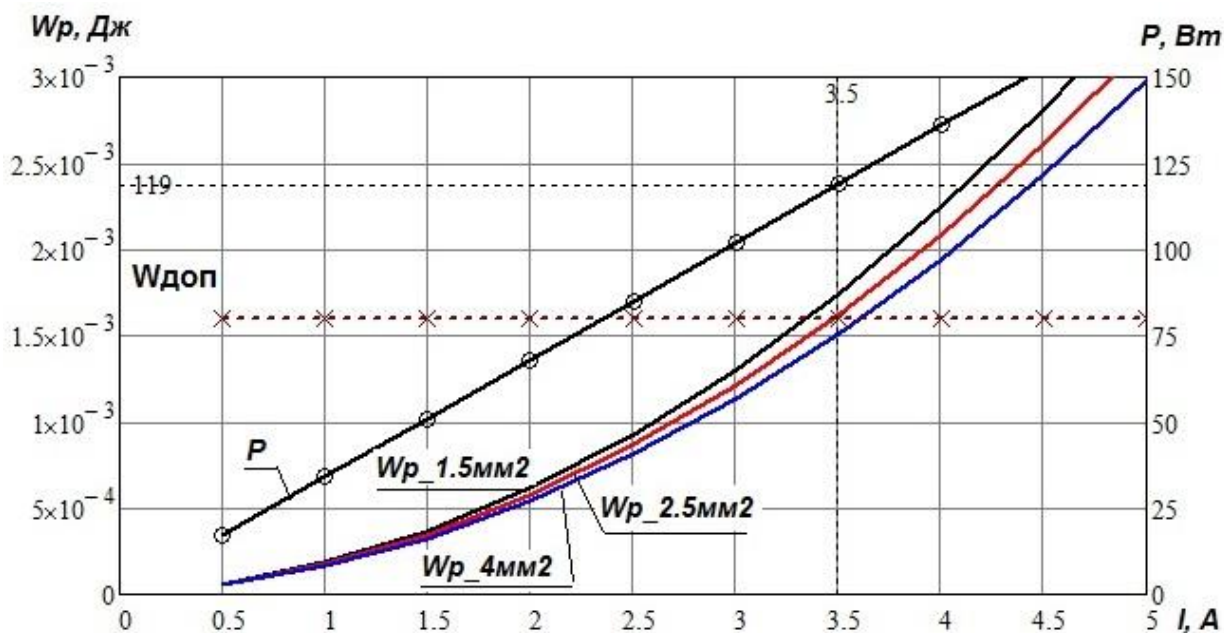


Рис. 4. Зависимости величины максимума энергии разряда  $W_p$ , минимальной допустимой энергии воспламенения  $W_{доп}$ , максимальной искробезопасной мощности нагрузки  $P$  от тока нагрузки  $I$  для технологической среды «метановоздушная смесь»

По рис. 4 с учетом (8) определяются предельные токи срабатывания защиты ИБП и допустимая искробезопасная мощность нагрузки  $P$  системы освещения с длиной кабеля 300 м. При использовании кабеля сечением  $1,5 \text{ мм}^2$   $I = 3,3 \text{ А}$ ,  $P = 112 \text{ Вт}$ ;  $2,5 \text{ мм}^2$  –  $I = 3,5 \text{ А}$ ,  $P = 119 \text{ Вт}$ ;  $4,0 \text{ мм}^2$  –  $I = 3,6 \text{ А}$ ,  $P = 122 \text{ Вт}$ . Таким образом, для обеспечения искробезопасности системы освещения при *длине 300 м* и применении кабеля  $1,5 \text{ мм}^2$  необходимо уменьшить ток срабатывания защиты ИБП до 3,3 А, но при этом максимальная мощность нагрузки должна быть не более 112 Вт. Для обеспечения искробезопасности системы *освещения при длине 300 м*, учитывая исходные данные (табл. 1); мощность нагрузки – 119 Вт, ток срабатывания защиты ИБП – 3,5 А, необходимо применять кабель с сечением  $2,5 \text{ мм}^2$  и  $4,0 \text{ мм}^2$ .

Потеря напряжения в линии постоянного тока определяется:

$$\Delta U = \Delta U_1 + \sum_{i=1}^{N-1} 2 \cdot I_i \cdot r \cdot \frac{Dl_2}{N}, \quad \text{В}, \quad (9)$$

$$\Delta U_i = 2 \cdot I_i \cdot r \cdot D_{i1}, \quad \text{В},$$

где  $i = 1 \dots N$ ,  $N$  – максимальное количество светильников на канал;

$I_i = P_i / U_i$  – токи на локальных участках в кабельной линии между светильниками;

$U_i$  – напряжение на локальных участках кабельной линии между светильниками с учетом потери напряжения до данного участка;

$D_{i1}$  – длина кабельной линии без светильников (для канала 1  $D_{i1} = 0$ );

$D_{i2}$  – длина кабельной линии с подключенными на одинаковом расстоянии светильниками;

$U$  – напряжение холостого хода источника питания (табл. 2).

Расчеты потери напряжения в линии при нагрузке 97,5 Вт (15 светильников) с учетом схемы подключения (рис. 1) приведены в табл. 3.

Таблица 3

#### Потеря напряжения в линии с учетом ограничений $T_r \leq 6$ мкс

Сечение медного провода $F$ , мм <sup>2</sup>	Длина кабельной линии $D_1$ , м	Мощность нагрузки $P$ , Вт	$W_p$ , Дж	$I$ , А	$\Delta U$ , В	Относительная потеря напряжения $\delta U$ , %
Вариант подключения «Канал 1» (рис.1)						
1,5	150	97,5	$6.79 \cdot 10^{-4}$	2,87	6,2	18,1
2,5			$6.38 \cdot 10^{-4}$		3,6	10,5
4,0			$6.01 \cdot 10^{-4}$		2,2	6,4
Вариант подключения «Канал 2» (рис.1)						
1,5	300	97,5	$1.2 \cdot 10^{-3}$	2,87	19,8	58,4
2,5			$1.12 \cdot 10^{-3}$		10,5	30,9
4,0			$1.05 \cdot 10^{-3}$		6,2	18,4

Исходя из полученных величин потери напряжения, применение кабеля с сечением 1,5 мм<sup>2</sup> приведет к нарушению функциональных характеристик системы освещения. Оптимальным является применение кабеля сечением более 2,5 мм<sup>2</sup>.



## ВЫВОДЫ

Метод расчета параметров систем освещения для оценки их искробезопасности основан на определении максимальной энергии разряда, предельной мощности в зависимости от длительности разрядов, длины кабеля, токов срабатывания защиты ИБП, сечения питающего кабеля. Метод позволяет: произвести прогнозирование искробезопасности системы освещения по заданным для нее исходным данным, определить граничные значения параметров, обеспечивающих искробезопасность системы освещения с последующей оценкой имеющегося запаса или корректировкой исходных данных с целью их оптимизации, оценить работоспособность системы освещения по падению напряжения на участках кабельной линии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айзенберг Ю. Б. Справочная книга по светотехнике / Ю.Б. Айзенберг – М.: Энергоиздат, 1995. – С. 335-346.
2. Кормильцев П.В. Система искробезопасного шахтного освещения // П. В. Кормильцев, И. А. Бершадский // Наукові праці ДонНТУ. – Серія "Електротехніка і енергетика". – Донецьк: ДонНТУ, 2014. – Вип. 1(16). – С.90-94.
3. Абраменко І. Г. Проблеми вибухобезпечності електричних кіл освітлювальних установок / І. Г. Абраменко, В. Ф. Рой, Н. Г. Бурма // Світлотехніка та електроенергетика. – 2011. – №1. – С. 60-64.
4. Бершадский И. А. Развитие научных основ и методов создания искробезопасного электрооборудования для повышения безопасности труда горнорабочих: дис. д-ра техн. наук: спец. 05.26.01/ Бершадский И. А. – Донецк, 2014. – 343 с.

Получено: 14.04.15

*Запропоновано метод розрахунку параметрів систем освітлення для оцінки їхньої іскробезпеки, що заснований на визначенні максимальної енергії розряду, граничної потужності залежно від тривалості розряду, довжини кабелю та перетину живильного кабелю, струмів спрацьовування захисту іскробезпечних блоків живлення (ІБЖ).*

**Ключові слова:** іскробезпечні системи освітлення, іскробезпечні блоки живлення, максимальна енергія розряду, тривалість розряду, струм спрацьовування захисту ІБЖ.

*The article suggests a method for calculation of lighting systems' specifications to ensure their intrinsic spark-hazard safety, which is based upon finding of: a maximum energy of the electric discharge, an ultimate wattage versus the discharge duration, the cable length, the feeding cable's cross-section, and the protection trip current for the intrinsic-safe power source.*

**Keywords: intrinsically spark-hazard safe lighting systems, intrinsic-safe power sources, maximum discharge energy, discharge duration, intrinsic-safe power source's protection trip current.**