ОПТИМІЗАЦІЯ ШАХТНОГО ОСВІТЛЕННЯ З УРАХУВАННЯМ ГРАНИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ІСКРОБЕЗПЕКИ

А. Г. Мнухін

Запорізька державна інженерна академія

просп. Соборний, 226, м. Запоріжжя, 69006, Україна.

E-mail: anatoly.mnukhin@gmail.com

О. Ю. Гладков, С. В. Шманьов

ДП ВКФ «ШАТЛ»

вул. Тбіліська, 11, м. Кривий Ріг, 50005, Україна.

E-mail: gladkov55@ukr.net. E-mail: shutl.ua@gmail.com

Однією з умов високопродуктивної безпечної праці вугільних підприємств є хороша освітленість робочого простору. Масогабаритні показники та рівень вибухозахисту вживаної шахтної освітлювальної техніки не дозволяють повною мірою виконувати вимоги Правил безпеки у вугільних шахтах. Сучасні іскробезпечні системи освітлення, що приходять на їх зміну, здатні усунути не лише цей недолік, але і зберегти освітленість в аварійних ситуаціях. Розробка і експлуатація цих систем обумовлена з вибором оптимального перерізу і довжини контрольного кабелю, виходячи з достатньої кількості світильників, що забезпечують нормований рівень освітленості робочого простору. Методики, які при цьому враховували перевірку дотримання параметрів іскробезпеки, на сьогодні не розроблені. У роботі наведена методика визначення оптимальних функціонально-технічних характеристик шахтного освітлення з урахуванням граничних параметрів іскробезпеки, яка спрямована на підвищення рівня безпеки робіт для підприємств вугільної промисловості України.

Ключові слова: вугільна промисловість, системи освітлення, іскробезпека, світлодіодний світильник, енергія розряду, кабельна лінія.

ОПТИМИЗАЦИЯ ШАХТНОГО ОСВЕЩЕНИЯ С УЧЕТОМ ПРЕДЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИСКРОБЕЗОПАСНОСТИ

А. Г. Мнухин

Запорожская государственная инженерная академия

пр. Соборный, 226, г. Запорожье, 69006, Украина.

E-mail: anatoly.mnukhin@gmail.com

А. Ю. Гладков, С. В. Шманёв

ДП ПКФ «ШАТЛ»

ул. Тбилисская, 11, г. Кривой Рог, 50005, Украина.

E-mail: gladkov55@ukr.net. E-mail: shutl.ua@gmail.com

Одним из условий высокопроизводительного безопасного труда угольных предприятий является хорошая освещенность рабочего пространства. Массогабаритные показатели и уровень взрывозащиты, применяемой шахтной осветительной техники, не позволяют в полной мере выполнять требования Правил безопасности в угольных шахтах. Приходящие на их смену современные искро-

безопасные системы освещения способны устранить не только данный недостаток, но и сохранить освещенность в аварийных ситуациях. Разработка и эксплуатация данных систем обусловлена выбором оптимального сечения и длины контрольного кабеля, исходя из достаточного количества светильников, обеспечивающих нормируемый уровень освещенности рабочего пространства. Методики, которые при этом учитывали проверку соблюдения параметров искробезопасности, на сегодняшний день не разработаны. В работе приведена методика определения оптимальных функционально-технических характеристик шахтного освещения с учетом предельных параметров искробезопасности, направленная на повышение уровня безопасности работ для предприятий угольной промышленности Украины.

Ключевые слова: угольная промышленность, системы освещения, искробезопасность, светодиодный светильник, энергия разряда, кабельная линия.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Безпека і продуктивність праці у вугільних шахтах тісно пов'язані з якісним освітленням робочого простору у рамках заданих параметрів [1, 2]. Особливо важливим моментом є збереження освітленості в аварійних ситуаціях для полегшення робіт при порятунку людей і позначення шляхів безпечного виходу гірників з аварійної зони. На сьогодні, для забезпечення освітлення як локального, так і протяжних підземних виробіток, широко застосовують освітлювальні прилади (ВОП) в рудниковому вибухобезпечному виконанні РВ. Представниками такого роду ВОП являється світильники Ватра ЛСП- 01-16-033, Україна (рис. 1); EV - 1050, Білорусія (рис. 2); EV 35 UD LED (США) та ін.

Рисунок 1 – Світильник рудниковий вибухобезпечний Ватра ЛСП-01-16-033

Рисунок 2 – Вибухозахищений світильник серії EV-1050

У таких системах світильники виконані вибухозахищеними з щільним захистом «d», який диктує надлишкові масогабаритні показники і високу вартість. Тим самим обмежує застосування в умовах щільного робочого простору очисних і підготовчих виробок [3] тонких пластів. Живлення світильників здійснюється від мережі 127 В або 220 В, 50Гц спеціалізованих джерел живлення шахтних. Мережа, враховуючи її іскробезпечність, забезпечена електричними захистами від короткого замикання та струмів витоку [4]. Безперервний контроль цілісності заземлення таких світильників, який впливає, в тому числі на працез-

ОХОРОНА ПРАЦІ Й БЕЗПЕКА ВИРОБНИЦТВА НА ГІРНИЧИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

датність захисту від струмів витоку, проводиться тільки візуальним оглядом, тому що автоматичний безперервний контроль в джерелах живлення шахтних непередбачених [4]. Даний спосіб контролю практично неможливий в умовах підготовчих або очисних виробок через обмеження часу простою видобувного обладнання. Отже, в даних умовах, світильники не здатні гарантовано забезпечити безпеку їх експлуатації за нормами захисту від ураження електричним струмом [4] і є потенційним (неконтрольованим) джерелом виникнення пожеж або ураження людей електричним струмом. Крім того, вибухобезпечний рівень вибухозахисту світильників, яким вони забезпечені, не дозволяє реалізувати аварійне освітлення на їх базі, обмежує їх застосування на гірничодобувних підприємствах, де не допускається електроустаткування з рівнем вибухозахисту нижче особливого вибухобезпечного (РО). Наприклад, в очисних і підготовчих виробках пластів крутого падіння, небезпечних за газодинамічними явищами, а також у виробках з вихідним струменем повітря [4]. Аналіз напрямків в забезпеченні безпеки застосування електричної енергії в шахтах показав, що перспективним, на сьогоднішній день, є впровадження в електричних пристроях освітлення виду вибухозахисту «Іскробезпечне електричне коло « і »» [5, 6]. Оскільки ним повністю усуваються умови займання навколишнього середовища, ураження людей електричним струмом, виникнення пожеж, а також недоліки вищевикладеного способу забезпечення вибухобезпеки і відкривається можливість реалізації в світильниках аварійного (безперебійного) освітлення. Даний напрямок удосконалення стаціонарних освітлювальних систем, на сьогоднішній день, успішно впроваджується в шахтах України. Найбільш значущими, в частині досягнутого технічного рівня, представниками такого роду систем освітлення є, наприклад, пристрій освітлення гірничих машин типу УОГМ (Україна), комплекс освітлення очисного забою КООЗ (Україна), комплекс пристроїв освітлення шахтних протяжних виробок типу КУОШ (Україна). На практиці, при впровадженні даних систем освітлення, виникають певні труднощі у виборі перетину і довжини контрольного кабелю, враховуючи достатню кількість світильників, які забезпечують нормований рівень освітленості робочого простору. Пов'язано це з тим, що не всі наведені вище системи освітлення комплектуються кабелями, довжини освітлюваних виробок (робочого простору) і відповідно кількість необхідних світильників істотно відрізняються для різних шахт. Таким чином, при розробці та експлуатації іскробезпечних систем освітлення виникає необхідність в науково обґрунтованому підході визначення функціонально-технічних характеристик шахтного освітлення (кількості світильників, часу спрацьовування джерела живлення, перетину і довжини кабелю, включаючи падіння напруги на них) з урахуванням граничних параметрів іскробезпеки (максимальної енергії іскрового розряду в електричному колі, допустимої енергії займання). Розрахунок перетину від довжини кабелю, кількості світильників наведено в роботі [7], але він не враховує перевірку дотримання параметрів іскробезпеки.

Метою даної роботи є розробка методики, що дозволяє шляхом розрахунку оптимізувати шахтне освітлення з урахуванням граничних параметрів іскробезпеки.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Основним фактором, який сприяє розвитку процесу горіння та вибуху вибухонебезпечного середовища є запалювальна здатність електричної іскри, що з'являється при комутації електромережі з реактивними елементами. Завдяки тому, що фізична природа іскрового розряду і займання пов'язана з протіканням великої кількості фізико-хімічних процесів [6], визначення критеріїв займання є досить складною і актуальною задачею. У загальному випадку потрібно дослідження рівнянь перехідних процесів в електричних системах, що призводять до виникнення іскрових розрядів. Необхідно змодельовати виникнення та поведінку самого розряду, процес поширення фронту розряду, що підпалює. І, нарешті, - досліджувати поширення полум'я в самому середовищі з урахуванням її фізико-хімічних властивостей. Вирішенню цих задач присвячена робота [8], результати яких використані в даній статті при визначенні мінімальної енергії розряду, що запалює в функції від його тривалості. Величина енергії в розряді для простого індуктивного кола з урахуванням допущення про лінійний характер зниження струму може бути визначена за рівнянням В.С. Кравченко [9]:

$$W_p = (I - I_1) \cdot (U + 2I_1 R) \cdot T_p / 6 + L \cdot (I^2 - I_1^2) / 2, \quad (1)$$

де W_p – енергія розряду, Дж; I – сила струм в колі перед розмиканням, А; I_1 – сила струму обриву дуги, А; U – напруга джерела живлення, В; R , Ом и L , Гн – параметри електричного кола.

Струм обриву дуги I_1 – невідомий. Він залежить від матеріалу контактів і параметрів розрядного кола. У деяких випадках струм обриву може бути визначений при аналізі перехідного процесу в колі, що розмикається. У ГОСТ Р 51330.10-99 зазначено, що, якщо фактичне значення струму обриву невідоме, то використовується значення мінімального струму дугового розряду, що визначає фізичну можливість існування розряду. В цьому випадку оцінка іскробезпеки кола стає трохи більш жорсткою. У той же час відповідно (1) енергія розряду максимальна при виконанні умови:

$$\frac{\partial W_p}{\partial I_1} = 0. \quad (2)$$

Сила струму обриву дуги з урахуванням (2):

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

Вплив основних параметрів електричного кола та іскробезпечного джерела живлення (ІДЖ) на рівень вибухобезпеки освітлювальної установки для заданих умов експлуатації визначається з виразу (1) з урахуванням (3) по запалювальній здатності іскор, що виникають при комутації електричних кіл з реактивними елементами. На допустиму сумарну потужність світильників впливають: напруга джерела живлення U , сила струму в колі навантаження I , індуктивність лінії

ОХОРОНА ПРАЦІ Й БЕЗПЕКА ВИРОБНИЦТВА НА ГІРНИЧИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

живлення L та її опір R на ділянці довжини Dl , тривалість розряду T_p (на основі даних про пристрій захисту ІДЖ), які в сукупності і визначають енергію іскрового розряду.

Мінімальна допустима енергія займання в залежності від T_p для діапазону $T_p < 44$ мкс може прийматися згідно з рівнянням (4) [10].

$$W_{\text{доп}} = 5,804 \cdot (T_p)^{-0,718} \cdot 10^{-3}, \text{ Дж} \quad (4)$$

Дані двожильних однофазних контрольних кабелів наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Дані контрольних кабелів

Перетин мідного кабелю F , мм ²	Питомий опір r , Ом/км при 20° С	Питома індуктивність $L_{\text{уд}}$, мкГн/м
1,5	11,6	0,375
2,5	7	0,347
4	4,37	0,321

Сумарний опір і індуктивність кабельної лінії:

$$R_j = \frac{r}{1000} \cdot Dl + \frac{U_j}{I_j}, \text{ Ом} \quad (5)$$

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

де $j=1..5$, $U_j=12 \cdot j$ – ряд напруги джерела живлення, В; $I_j = P/U_j$ – ряд сили струму навантаження, А; Dl – загальна довжина кабелю, м; r – питомий опір (табл. 1), $L_{\text{уд}}$ – питома індуктивність (табл. 1).

На прикладі технічних характеристик комплексу КУОШ визначимо його оптимальні параметри при освітленні, наприклад, очисного забою, довжиною до 300 м.

Вихідні дані для розрахунку комплексу КУОШ представлені в табл. 2.

Таблиця 2 – Основні технічні характеристики комплексу КУОШ

Найменування параметрів	Значення
Максимальна іскробезпечна вихідна напруга холостого ходу ІДЖ (постійного струму), U_0 , не більше	36 В
Струм спрацьовування захисту ІДЖ, I_0 , не більше	3,3 А
Вихідна максимальна іскробезпечна потужність, P_0	118,8 Вт
Тривалість розряду ІДЖ, не більше	6 мкс
Діапазон вхідної напруги (постійного струму) світильників	від 21,5 до 48 В від $0,6U_0$ до $1,33U_0$
Потужність одного світильника, не більше	6,5 Вт
Радіус освітлюваної площі світильником з висоти 2 м	5,5 м
Освітленість світильника з висоти 1,5 м, не менше	15 Лк

ОХОРОНА ПРАЦІ Й БЕЗПЕКА ВИРОБНИЦТВА НА ГІРНИЧИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

Згідно табл. 2 при використанні 30 світильників, освітленість шахтної виробки з наступними параметрами: висота підвісу світильника - 1,5 м, ширина - 3,5 м, довжина - 300 м, відстань між світильниками - 10 м - буде становити не менше 5 люкс.

Заплановане розташування світильників і розподіл навантаження на канали з урахуванням довжини кабельної лінії здійснюється наступним чином (рис. 3).

Рисунок 3 – Схема підключення світильників системи освітлення

Сумарна потужність $P_{\text{сум}}$ 30 світильників становить не менше:

$$P_{\text{сум}} = P_{\text{світ}} \cdot n = 6,5 \cdot 30 = 195 \text{ Вт} , \quad (7)$$

де $P_{\text{світ}}$ – потужність одного світильника, Вт; n – кількість світильників, од.

Враховуючи P_0 (118,8 Вт) і пусковий струм світильників, які не перевищують 20% номінального струму навантаження, максимальна сумарна потужність навантаження, підключеної до одного каналу ІДЖ, не повинна перевищувати 97,5 Вт (15 шт.).

Приклад побудови залежностей W_p , Дж (її максимум відповідає W_{12m}), $W_{\text{доп}}$ (U , T_p) для електричних кіл з параметрами $F = 2,5 \text{ мм}^2$, $Dl = 300 \text{ м}$, $P = 118,8 \text{ Вт}$, L і R - відповідно до виразів (6), (7), $k = 1..30$, $T_p = k \text{ мкс}$ показаний на рис. 4. Таблиці зі значеннями $W_{12m}(U, T_p)$, $W_{\text{доп}}(U, T_p)$ наведені на рис. 5.

Т.ч. допустима безліч U , T_p з точки зору іскробезпеки знаходяться в області, де виконується умова $W_{\text{доп}} - W_{12m} \geq 0$.

Виявлені допустимі граничні значення тривалості розряду T_p джерела живлення (табл. 2) для різних рівнів напруг за даними рис. 4, 5. Аналогічним чином додатково виявлено і наведені в табл. 3 допустимі граничні значення тривалості розряду T_p для перетинів $F = 1,5 \text{ мм}^2$ і 4 мм^2 при $Dl = 300 \text{ м}$, $P = 118,8 \text{ Вт}$.

Рисунок 4 – Залежності величини максимуму енергії розряду (W_{12m}) і мінімальної допустимої енергії займання ($W_{доп}$) від напруги джерела живлення (U) і тривалості розряду (T_p)

а)					
j	1	2	3	4	5
1	$5.804 \cdot 10^{-3}$	$5.804 \cdot 10^{-3}$	$5.804 \cdot 10^{-3}$	$5.804 \cdot 10^{-3}$	$5.804 \cdot 10^{-3}$
2	$3.528 \cdot 10^{-3}$	$3.528 \cdot 10^{-3}$	$3.528 \cdot 10^{-3}$	$3.528 \cdot 10^{-3}$	$3.528 \cdot 10^{-3}$
3	$2.637 \cdot 10^{-3}$	$2.637 \cdot 10^{-3}$	$2.637 \cdot 10^{-3}$	$2.637 \cdot 10^{-3}$	$2.637 \cdot 10^{-3}$
4	$2.145 \cdot 10^{-3}$	$2.145 \cdot 10^{-3}$	$2.145 \cdot 10^{-3}$	$2.145 \cdot 10^{-3}$	$2.145 \cdot 10^{-3}$
5	$1.828 \cdot 10^{-3}$	$1.828 \cdot 10^{-3}$	$1.828 \cdot 10^{-3}$	$1.828 \cdot 10^{-3}$	$1.828 \cdot 10^{-3}$
6	$1.603 \cdot 10^{-3}$	$1.603 \cdot 10^{-3}$	$1.603 \cdot 10^{-3}$	$1.603 \cdot 10^{-3}$	$1.603 \cdot 10^{-3}$
7	$1.435 \cdot 10^{-3}$	$1.435 \cdot 10^{-3}$	$1.435 \cdot 10^{-3}$	$1.435 \cdot 10^{-3}$	$1.435 \cdot 10^{-3}$
8	$1.304 \cdot 10^{-3}$	$1.304 \cdot 10^{-3}$	$1.304 \cdot 10^{-3}$	$1.304 \cdot 10^{-3}$	$1.304 \cdot 10^{-3}$
9	$1.198 \cdot 10^{-3}$	$1.198 \cdot 10^{-3}$	$1.198 \cdot 10^{-3}$	$1.198 \cdot 10^{-3}$	$1.198 \cdot 10^{-3}$
10	$1.111 \cdot 10^{-3}$	$1.111 \cdot 10^{-3}$	$1.111 \cdot 10^{-3}$	$1.111 \cdot 10^{-3}$	$1.111 \cdot 10^{-3}$
11	$1.038 \cdot 10^{-3}$	$1.038 \cdot 10^{-3}$	$1.038 \cdot 10^{-3}$	$1.038 \cdot 10^{-3}$	$1.038 \cdot 10^{-3}$
12	$9.747 \cdot 10^{-4}$	$9.747 \cdot 10^{-4}$	$9.747 \cdot 10^{-4}$	$9.747 \cdot 10^{-4}$	$9.747 \cdot 10^{-4}$
13	$9.203 \cdot 10^{-4}$	$9.203 \cdot 10^{-4}$	$9.203 \cdot 10^{-4}$	$9.203 \cdot 10^{-4}$	$9.203 \cdot 10^{-4}$
14	$8.726 \cdot 10^{-4}$	$8.726 \cdot 10^{-4}$	$8.726 \cdot 10^{-4}$	$8.726 \cdot 10^{-4}$	$8.726 \cdot 10^{-4}$
15	$8.304 \cdot 10^{-4}$	$8.304 \cdot 10^{-4}$	$8.304 \cdot 10^{-4}$	$8.304 \cdot 10^{-4}$	$8.304 \cdot 10^{-4}$
16	$7.928 \cdot 10^{-4}$	$7.928 \cdot 10^{-4}$	$7.928 \cdot 10^{-4}$	$7.928 \cdot 10^{-4}$	$7.928 \cdot 10^{-4}$
17	$7.59 \cdot 10^{-4}$	$7.59 \cdot 10^{-4}$	$7.59 \cdot 10^{-4}$	$7.59 \cdot 10^{-4}$	$7.59 \cdot 10^{-4}$
18	$7.285 \cdot 10^{-4}$	$7.285 \cdot 10^{-4}$	$7.285 \cdot 10^{-4}$	$7.285 \cdot 10^{-4}$	$7.285 \cdot 10^{-4}$
19	$7.008 \cdot 10^{-4}$	$7.008 \cdot 10^{-4}$	$7.008 \cdot 10^{-4}$	$7.008 \cdot 10^{-4}$	$7.008 \cdot 10^{-4}$
20	$6.754 \cdot 10^{-4}$	$6.754 \cdot 10^{-4}$	$6.754 \cdot 10^{-4}$	$6.754 \cdot 10^{-4}$	$6.754 \cdot 10^{-4}$
21	$6.522 \cdot 10^{-4}$	$6.522 \cdot 10^{-4}$	$6.522 \cdot 10^{-4}$	$6.522 \cdot 10^{-4}$	$6.522 \cdot 10^{-4}$
$W_{доп}, Дж$					

б)					
j	1	2	3	4	5
1	0.012	$2.9 \cdot 10^{-3}$	$1.305 \cdot 10^{-3}$	$7.476 \cdot 10^{-4}$	$4.894 \cdot 10^{-4}$
2	0.012	$2.93 \cdot 10^{-3}$	$1.336 \cdot 10^{-3}$	$7.786 \cdot 10^{-4}$	$5.207 \cdot 10^{-4}$
3	0.012	$2.962 \cdot 10^{-3}$	$1.368 \cdot 10^{-3}$	$8.103 \cdot 10^{-4}$	$5.526 \cdot 10^{-4}$
4	0.012	$2.994 \cdot 10^{-3}$	$1.4 \cdot 10^{-3}$	$8.424 \cdot 10^{-4}$	$5.851 \cdot 10^{-4}$
5	0.012	$3.027 \cdot 10^{-3}$	$1.432 \cdot 10^{-3}$	$8.75 \cdot 10^{-4}$	$6.178 \cdot 10^{-4}$
6	0.012	$3.06 \cdot 10^{-3}$	$1.465 \cdot 10^{-3}$	$9.079 \cdot 10^{-4}$	$6.509 \cdot 10^{-4}$
7	0.012	$3.094 \cdot 10^{-3}$	$1.498 \cdot 10^{-3}$	$9.411 \cdot 10^{-4}$	$6.842 \cdot 10^{-4}$
8	0.012	$3.128 \cdot 10^{-3}$	$1.532 \cdot 10^{-3}$	$9.745 \cdot 10^{-4}$	$7.177 \cdot 10^{-4}$
9	0.012	$3.162 \cdot 10^{-3}$	$1.565 \cdot 10^{-3}$	$1.008 \cdot 10^{-3}$	$7.513 \cdot 10^{-4}$
10	0.012	$3.197 \cdot 10^{-3}$	$1.599 \cdot 10^{-3}$	$1.042 \cdot 10^{-3}$	$7.85 \cdot 10^{-4}$
11	0.012	$3.232 \cdot 10^{-3}$	$1.633 \cdot 10^{-3}$	$1.076 \cdot 10^{-3}$	$8.188 \cdot 10^{-4}$
12	0.012	$3.267 \cdot 10^{-3}$	$1.668 \cdot 10^{-3}$	$1.11 \cdot 10^{-3}$	$8.527 \cdot 10^{-4}$
13	0.012	$3.303 \cdot 10^{-3}$	$1.702 \cdot 10^{-3}$	$1.144 \cdot 10^{-3}$	$8.867 \cdot 10^{-4}$
14	0.012	$3.339 \cdot 10^{-3}$	$1.737 \cdot 10^{-3}$	$1.178 \cdot 10^{-3}$	$9.207 \cdot 10^{-4}$
15	0.012	$3.376 \cdot 10^{-3}$	$1.772 \cdot 10^{-3}$	$1.213 \cdot 10^{-3}$	$9.548 \cdot 10^{-4}$
16	0.012	$3.412 \cdot 10^{-3}$	$1.807 \cdot 10^{-3}$	$1.247 \cdot 10^{-3}$	$9.889 \cdot 10^{-4}$
17	0.012	$3.449 \cdot 10^{-3}$	$1.842 \cdot 10^{-3}$	$1.281 \cdot 10^{-3}$	$1.023 \cdot 10^{-3}$
18	0.012	$3.486 \cdot 10^{-3}$	$1.877 \cdot 10^{-3}$	$1.316 \cdot 10^{-3}$	$1.057 \cdot 10^{-3}$
19	0.012	$3.523 \cdot 10^{-3}$	$1.912 \cdot 10^{-3}$	$1.351 \cdot 10^{-3}$	$1.092 \cdot 10^{-3}$
20	0.012	$3.56 \cdot 10^{-3}$	$1.948 \cdot 10^{-3}$	$1.385 \cdot 10^{-3}$	$1.126 \cdot 10^{-3}$
21	0.012	$3.598 \cdot 10^{-3}$	$1.983 \cdot 10^{-3}$	$1.42 \cdot 10^{-3}$	$1.16 \cdot 10^{-3}$
$W_p, Дж$					

Рисунок 5 – Порівняння енергій: а) – $W_{доп}$, б) – W_{12m} в залежності від тривалості розряду (k) та напруги (j), кратно 12 В

ОХОРОНА ПРАЦІ Й БЕЗПЕКА ВИРОБНИЦТВА НА ГІРНИЧИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

Таблиця 3 – Результати розрахунків граничної тривалості розряду
в залежності від напруги джерела живлення

Напруга живлення постійного струму, В	Допустима енергія $W_{\text{доп}}$, Дж	Максимальна енергія розряду W_p , Дж	Гранична тривалість розряду T_p , мкс
$F=1,5 \text{ мм}^2$			
12	-	-	-
24	$3,528 \cdot 10^{-3}$	$3,163 \cdot 10^{-3}$	2
36	$1,603 \cdot 10^{-3}$	$1,572 \cdot 10^{-3}$	6
48	$1,111 \cdot 10^{-3}$	$1,106 \cdot 10^{-3}$	10
60	$9,747 \cdot 10^{-4}$	$8,957 \cdot 10^{-4}$	12
$F=2,5 \text{ мм}^2$			
12	-	-	-
24	$3,528 \cdot 10^{-3}$	$2,93 \cdot 10^{-3}$	2
36	$1,603 \cdot 10^{-3}$	$1,465 \cdot 10^{-3}$	6
48	$1,111 \cdot 10^{-3}$	$1,042 \cdot 10^{-3}$	10
60	$9,203 \cdot 10^{-4}$	$8,867 \cdot 10^{-4}$	13
$F=4 \text{ мм}^2$			
12	-	-	-
24	$3,528 \cdot 10^{-3}$	$2,715 \cdot 10^{-3}$	2
36	$1,435 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	7
48	$1,038 \cdot 10^{-3}$	$1,018 \cdot 10^{-3}$	11
60	$9,203 \cdot 10^{-4}$	$8,49 \cdot 10^{-4}$	13

Аналіз даних табл. 3 свідчить, що при наявній тривалості розряду джерела живлення КУОШ - 6 мкс можливо забезпечення іскробезпеки 15 світильників ($P_{\text{сум}} = 118,8 \text{ Вт}$) на довжині 300 м виробки з напругою живлення ІДЖ не менше 36 В для всіх розглянутих перетинів кабелю ($F = 1,5 \text{ мм}^2$, $F = 2,5 \text{ мм}^2$, $F = 4 \text{ мм}^2$). При цих параметрах ІДЖ різниця $W_{\text{доп}} - W_{12\text{м}}$ прагне до нуля, що підкреслює оптимальність вибраних технічних характеристик ІДЖ для розглянутих умов застосування. У разі зменшення вихідної напруги ІДЖ, наприклад, до 24 В тривалість розряду джерела живлення для забезпечення іскробезпеки повинна бути не більше 2 мкс, що вимагає перегляду його схеми технічних рішень в частині підвищення швидкодії та струму уставки I_0 . З метою виявлення допустимого граничного значення максимальної довжини кабелю, при якій забезпечується іскробезпека ІДЖ з 15 світильниками при фіксованих параметрах: $U = 24 \text{ В}$, $T_p = 6 \text{ мкс}$, $F = 2,5 \text{ мм}^2$, $P = 118,8 \text{ Вт}$, розраховується допустима безліч W_p (графік - рис. 6, дані - рис. 7, на яких $ii = 1..300$, $DL_{ii} = ii$, м). Допустима безліч DL_{ii} знаходиться в області, де дотримується умова $W_{\text{доп}} - W_{12\text{м}} \geq 0$.

Рисунок 6 – Залежності величини максимуму енергії розряду (W_{12m}) і мінімальної допустимої енергії займання ($W_{доп}$) від довжини лінії (Dl)

	$W_{12m}, \text{Дж}$	$W_{доп}, \text{Дж}$
$Dl, \text{м}$	1	2
142	$1.548 \cdot 10^{-3}$	$1.603 \cdot 10^{-3}$
143	$1.557 \cdot 10^{-3}$	$1.603 \cdot 10^{-3}$
144	$1.567 \cdot 10^{-3}$	$1.603 \cdot 10^{-3}$
145	$1.576 \cdot 10^{-3}$	$1.603 \cdot 10^{-3}$
146	$1.586 \cdot 10^{-3}$	$1.603 \cdot 10^{-3}$
147	$1.596 \cdot 10^{-3}$	$1.603 \cdot 10^{-3}$
148	$1.605 \cdot 10^{-3}$	$1.603 \cdot 10^{-3}$

Рисунок 7 – Порівняння енергій: $W_{доп}$ та W_{12m} в залежності від довжини лінії (Dl)

Аналіз даних рисунків 6 і 7 свідчить, що при наявній тривалості розряду джерела живлення - 6 мкс і напруги - 24 В можливо забезпечення іскробезпеки світильників на довжині 147 м виробки з перетином кабелю $F = 2,5 \text{ мм}^2$.

Важливим параметром, при виборі оптимальних технічних характеристик іскробезпечних систем освітлення протяжних виробок, є облік падіння (втрати) напруги в кабельній лінії при підключеному навантаженні.

Втрата напруги на ділянках лінії з підключеними світильниками ΔU_j (ділянка $Dl2$) і без них $\Delta U1_j$ (ділянка $Dl1$) визначається відповідно (8, 9):

$$\Delta U_j = \frac{U_0 - (\Delta U1_j + \sum_{i=1}^{N-1} 2 \cdot I_{i,j} \cdot r \cdot \frac{Dl2}{N})}{U_0} \cdot 100, \% \quad (8)$$

$$\Delta U_{1j} = 2 \cdot I_j \cdot r \cdot D_{l1}, \text{ В} \quad (9)$$

де $i=1 \dots N$; N – максимальна кількість світильників на канал, од; U_0 – максимальна іскробезпечна вихідна напруга холостого ходу ІДЖ, В; $I_{ij} = P_{ij}/U_{ij}$ – ряд струмів на локальних ділянках в кабельної лінії між світильниками, А; U_{ij} – ряд напруг на локальних ділянках кабельної лінії між світильниками з урахуванням втрати напруги до цієї ділянки, В; D_{l1} – довжина кабельної лінії без світильників (для каналу 1 $D_{l1}=0$), м; D_{l2} – довжина кабельної лінії з підключеними на однаковій відстані світильниками, м; $j=1..5$, $U_j=12 \cdot j$ – ряд напруги ІДЖ, В; $I_j = P/U_j$ – ряд струмів ІДЖ на початку кабельної лінії, А; r – питомий опір (табл. 1).

Підсумкові розрахунки (табл. 4) за викладеною методикою дозволили встановити межі допустимої іскробезпечної потужності світильників, рівні напруг, струмів кола і перетину контрольного кабелю довжиною 300 м (канал 2 рис. 3) і 150 м (канал 1 рис. 3) відповідно з урахуванням обмежень: $\Delta U < 40\%$ (из табл. 1), $T_p \leq 6$ мкс. Допустима безліч U, F, P знаходиться в області, де дотримується умова $W_{\text{доп}} - W_{12\text{м}} \geq 0$.

Таблиця 4 – Оптимальні характеристики шахтного освітлення
з урахуванням граничних параметрів іскробезпеки

Перетин мідного дроту $F, \text{ мм}^2$	Напруга живлення постійного струму $U, \text{ В}$	Допустима потужність світильників $P, \text{ Вт}$	$W_{12\text{м}}, \text{ Дж}$	$I, \text{ А}$	$\Delta U, \%$
1	2	3	4	5	6
Варіант підключення «Канал 2» (рис. 3)					
1,5	12	-	-	-	-
	24	32,5	$2,85 \cdot 10^{-4}$	1,35	38,3
	36	78	$7,212 \cdot 10^{-4}$	2,17	38,1
	48	143	$1,356 \cdot 10^{-3}$	2,98	38,3
	60	188,5	$1,556 \cdot 10^{-3}$	3,14	31,1
2,5	12	-	-	-	-
	24	58,5	$7,891 \cdot 10^{-4}$	2,44	39,8
	36	123,5	$1,575 \cdot 10^{-3}$	3,43	35,2
	48	162,5	$1,602 \cdot 10^{-3}$	3,39	24,8
	60	195	$1,55 \cdot 10^{-3}$	3,25	18,5
4	12	-	-	-	-
	24	84,5	$1,476 \cdot 10^{-3}$	3,52	34,2
	36	123,5	$1,47 \cdot 10^{-3}$	3,43	20,7
	48	162,5	$1,499 \cdot 10^{-3}$	3,39	14,9
	60	195	$1,454 \cdot 10^{-3}$	3,25	11,3

ОХОРОНА ПРАЦІ Й БЕЗПЕКА ВИРОБНИЦТВА НА ГІРНИЧИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

Продовження табл. 4					
1	2	3	4	5	6
Варіант підключення «Канал 1» (рис. 3)					
1,5	12	-	-	-	-
	24	91	$1,058 \cdot 10^{-3}$	3,79	38,0
	36	156	$1,442 \cdot 10^{-3}$	4,33	25,9
	48	208	$1,527 \cdot 10^{-3}$	4,33	18,3
	60	253,5	$1,543 \cdot 10^{-3}$	4,23	13,8
2,5	12	-	-	-	-
	24	117	$1,578 \cdot 10^{-3}$	4,88	27,1
	36	169	$1,561 \cdot 10^{-3}$	4,69	16
	48	221	$1,596 \cdot 10^{-3}$	4,6	11,3
	60	265	$1,585 \cdot 10^{-3}$	4,44	8,5
4	12	-	-	-	-
	24	117	$1,472 \cdot 10^{-3}$	4,88	16
	36	175,5	$1,565 \cdot 10^{-3}$	4,88	10
	48	227,5	$1,579 \cdot 10^{-3}$	4,74	7,1
	60	279,5	$1,546 \cdot 10^{-3}$	4,67	5,5

ВИСНОВКИ. Таким чином, запропонований і продемонстрований на прикладі метод дозволяє розрахунковим шляхом оптимізувати функціонально-технічні характеристики шахтного освітлення з урахуванням граничних параметрів іскробезпеки. Це сприяє розширенню сфери застосування іскробезпечних систем освітлення у вугільній промисловості всіх категорій за газом та пилом, та відповідно, до зниження травматизму, виключення вибухів і ураження людей електричним струмом.

ЛІТЕРАТУРА

1. Айзенберг Ю.Б. Справочная книга по светотехнике: монография. Москва: Энергоатомиздат, 1995. 528 с.
2. СОУ 10.1-00185790-002-2005. Правила технічної експлуатації вугільних шахт. Київ: Мінвуглепром України, 2006. 353 с.
3. Мезников А.В., Кудлай Р.А. Светильники забойные типа СЗ для очистных и проходческих забоев. *Уголь Украины*. 2013. № 10. С. 33–40.
4. НПАОП 10.0-1.01–10. Правила безпеки у вугільних шахтах. Київ: Держгірпромнагляд України, 2010. 432 с.
5. Кормильцев П.В., Бершадский И.А. Система искробезопасного шахтного освещения. *Наукові праці ДонНТУ*. 2014. № 1(16). С.90–94.
6. Давыдов В.В., Литствинский В.М., Гутер Л.Р. Создание шахтных стационарных осветительных приборов повышенной эффективности и безопасности. *Сборник трудов института Гипроуглеавтоматизация*. 2000. – С. 16–29.
7. Оглоблин А.В., Давыдов В.В. Искробезопасное шахтное освещение. *Горные науки и технологии*. 2011. № 11. С. 41–47.

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

9. Абраменко І.Г., Рой В.Ф., Бурма Н.Г. Проблеми вибухобезпечності електричних кіл освітлювальних установок. *Світлотехніка та електроенергетика*. 2011. №1. С. 60–64.

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

OPTIMISATION OF MINE LIGHTING IN RESPECT OF TERMINAL PARAMETER OF INTRINSIC SAFETY

A. Mnukhin

State Engineering Academy Zaporozhe

pr. Soborny, 226, Zaporozhe, 69006, Ukraine. E-mail: anatoly.mnukhin@gmail.com

A. Gladkov, S. Shmanyov

DP PKF «SHATL»

vul. Tbilisskaya, 11, Krivoi Rog, 50005, Ukraine.

E-mail: gladkov55@ukr.net. E-mail: shutl.ua@gmail.com

Purpose. Mass and dimensions parameters as well as level of explosion protection of mine lighting equipment applied do not make it possible to meet safety requirements for coal mines in full. This disadvantage is avoided in modern intrinsic safe lighting systems. Both the development and operation of such systems are caused by selecting the best cross-section and length of control cable proceeding from sufficient amount of lighting instruments which guarantee the standardized lighting level of work area. Presently, there are no methodologies developed which take into account the control of compliance with intrinsic safety parameters. The purpose of this research paper is to develop a methodology which makes it possible to optimize mine equipment by means of calculation taking into account the terminal parameter of intrinsic safety. **Methodology.** The results of theoretical research of discharge duration, action time of power sources with nonlinear volt-ampere characteristics as well as ignition capability of electric spark became basis for calculation of maximal energy in discharge as for simple inductive circuit permissible energy as function in discharge time. **Results.** The methodology developed makes it possible to determine maximum possible (optimal) functional specification for lighting systems proceeding from limitations associated with terminal parameter of intrinsic safety. Therewith the influence of power source parameters is considered (voltage, capacity, protection operating time), cable line (resistance, inductance), lights (total power consumption) as well as their connection type (line section with or without lights). In the calculation formula of decrease of voltage on line sections the DC-DC-effect of voltage converters is considered which generate current in reverse proportion for voltage by unchanged consumed power. **Originality.** For the first time one methodology combines the calculation of functional specification with assessment of intrinsic safety of mine lighting. **Conclusions.** The use of this methodology contributes to increasing scope of intrinsic

safe lighting systems in coal industry of all categories for gas and/or dust and therefore injury rate reduction, prevention of explosions and human injury by electric current. References 10, tables 4, figures 7.

Key words: coal industry, lighting systems, intrinsic safety, LED-light, discharge energy, cable line.

REFERENCES

1. Ayzenberg, Yu.B. (1995), "Spravochnaya kniga po svetotekhnike". [Book of reference on lighting engineering], M.: Energoatomizdat. 528 p.
2. SUC 10.1-00185790-002-2005. Coal mine regulations. [in force from 01.01.2007]. – K.: Minvugleprom Ukrainy publ., 2006. 353 p.
3. Meznikov, A.V. (2013), "Svetil'niki zaboynyye tipa SZ dlya ochistnykh i prokhodcheskikh zaboyev". [Coal face light fixture type C3 for working faces and drifting faces]. Ugol Ukrainy. Kyiv, 2013. №. 10. pp. 33-40.
4. NPAOP 10.0-1.01–10. Pravyla tekhnichnoyi ekspluatatsiyi vuhil'nykh shakht [Regulations for safety in coal mines]. [in force from 22.03.2010]. K.: Derzhgipromnaglyad Ukrainy, 2010. 432 p.
5. Kormiltsev, P.V. (2014), "Sistema iskrobezopasnogo shakhtnogo osveshcheniya". [Intrinsic safe mine lighting system] Naukovi pratsi DonNTU. Seriya "Elektrotekhnika i enerhetyka" [Research papers of DonNTU. Series "Electric engineering and electric power industry"]. Donetsk: DonNTU, Issue 1(16). pp. 90-94.
6. Davydov, V.V. (2000), "Sozdaniye shakhtnykh statsionarnykh osvetitel'nykh priborov povyshennoy effektivnosti i bezopasnosti" [Development of mine fixed lighting equipment with advance efficiency and security]. Sbornik trudov instituta Giprougleavtomatizatsiya [Collection of research papers of institute Giprougleavtomatizatsiya]. M., 2000. pp. 16-29.
7. Ogloblin, A.V. (2011), "Iskrobezopasnoye shakhtnoye osveshcheniye". [Intrinsic safe mine lighting]. Gornyye nauki i tekhnologii, M., 2011. №. 11. pp. 41-47.
8. Bershadsky, I.A. (2011), "Testirovaniye metoda beskamernoy teplovoy otsenki iskrobezopasnosti skhemy istochnika pitaniya", [Testing of method for cageless thermal assessment of intrinsic safety of power source scheme]. Vzryvozaschishchennoye elektrooborudovaniye: Sb. nauchnykh trudov UkrNIIVE [Explosion safe electrical equipment: collection of research papers of UkrNIIVE]. Donetsk, 2011. Pp. 230 – 240.
9. Abramenko, I.G. (2011), "Problemy vybukhobezpechnosti elektrychnykh kil osvitylyval'nykh ustanovok". [Questions of intrinsic safety of electric circuits of lighting equipment]. Svitlotekhnika ta elektroenerhetyka. №. 1. Pp. 60-64.
10. Kovalev, A.P. (2009), "Modelirovaniye parametrov razryada i raschetnaya otsenka iskrobezopasnosti pri razmykanii elektricheskoy tsepi". [Performance simulation of discharge and intrinsic safety estimation by electrical interrupting]. Journal «Elektrichestvo». Moscow, №. 11. Pp. 62-69.

Стаття надійшла 18.12.2018.