

Witalij Skoropacki, Adam Lipowczan, Bolesław Meinhardt

ORGANIZACJA AWARYJNEGO OŚWIETLENIA W KOPALNIACH METANOWYCH

Streszczenie

Stosowanie oświetlenia elektrycznego wyrobisk podziemnych i stanowisk pracy w kopalniach metanowych ograniczone jest wymaganiami bezpieczeństwa przeciwwybuchowego. Zgodnie z przepisami eksploatacyjnymi w przypadku stwierdzenia w wyrobisku podziemnym zawartości metanu powyżej 2% należy niezwłocznie wyłączyć sieć elektryczną, unieruchomić maszyny i urządzenia oraz wycofać ludzi z zagrożonych wyrobisk. Wymaganie to dotyczy również oświetlenia roboczego na podziemnych stanowiskach pracy i dróg ewakuacyjnych. Wyłączenie zasilania powoduje wyłączenie oświetlenia, w tym także wskazującego kierunki dróg ewakuacyjnych. Ewakuacja załogi w takich sytuacjach możliwa jest jedynie przy oświetleniu dostarczonym przez osobiste lampy nałęczmowe pracowników. W sytuacjach awaryjnych bierne wskaźniki dróg ewakuacyjnych, wykonane z materiałów odbaskowych, często nie spełniają oczekiwań, gdyż wymagają oświetlenia odrębnym źródłem światła pobudzającym odbicie, przy czym emitowane przez nie światło odbite jest często zbyt słabo widoczne, zwłaszcza w wyrobisku zapyłonym lub zadymionym.

Przedstawiono koncepcję awaryjnego oświetlenia w kopalniach metanowych, przeprowadzono analizę systemu awaryjnego oświetlenia z wykorzystaniem drabinkowej i szeregowej konfiguracji pod kątem spełnienia wymagań energetycznych dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 94/9/WE (ATEX 100A). Omówiono aspekty realizacji technicznej drabinkowej i szeregowej konfiguracji takiego systemu. Ustalono, że diody LED, ze względu na swoje parametry techniczne i niezawodnościowe, znakomicie nadają się do realizacji awaryjnego oświetlenia wyrobisk podziemnych i stanowisk pracy w kopalniach metanowych.

Organisation of emergency lightening in methane mines

Abstract

Electric lightening applicable in underground mines and work positions in methane mines is limited by claims of counterexplosive safeties. It belongs to operational regulations in case of affirmation in underground over 2% methane contents immediately should exclude power lines, stop indicate machine and recapture people from threatened underground. It concerns also underground work positions and evacuation ways. Exclusion of supplying, causes exclusion of lightening, including directions of evacuation ways. Evacuation of crew is possible in such situations at lightening supplied by personal helm lamps. Indicators of evacuation ways in passive emergency conditions, from reflection materials executed, they do not grant expectations often, because they require illumination separate source incentive reflection enlightened, issued is reflected visible at that by it slightly enlightened often far too, especially in ashed underground or fill with smoke.

Presented concept of emergency lightening in methane mines, lead analysis of system of emergency lightening with utilisation of ladder and chain configuration under account of implementation of energy claim of directive of the European Parliament and Council 94/9/WE (ATEX 100A). It discuss aspects of technical realisation of such ladder and chain configuration system. It establish, that LED diodes, from respect on technical parameters and reliability, they be suitable superbly for realisation of emergency lightening in underground and work positions in methane mines.

WPROWADZENIE

Jednym z istotnych czynników wpływających na bezpieczeństwo pracy w kopalniach jest prawidłowe oświetlenie otoczenia i stanowisk pracy. Wymagania dotyczące oświetlenia zostały określone w normach i przepisach eksploatacyjnych (Rozporządzenie Ministra Gospodarki 2002; Rozporządzenie Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej 2003).

Stosowanie oświetlenia elektrycznego jest ograniczane z uwagi na bezpieczeństwo przeciwwybuchowe. Zgodnie z (Rozporządzenie Ministra Gospodarki 2002), w razie stwierdzenia w wyrobisku podziemnym zawartości metanu powyżej 2% należy niezwłocznie wyłączyć sieć elektryczną, unieruchomić maszyny i urządzenia oraz wycofać ludzi z zagrożonych wyrobisk. Wymaganie to dotyczy również oświetlenia roboczego podziemnych stanowisk pracy i dróg ewakuacyjnych. Wyłączenie zasilania powoduje wyłączenie oświetlenia, w tym także wskazującego kierunku dróg ewakuacyjnych. Ewakuacja załogi w takich sytuacjach możliwa jest jedynie przy oświetleniu dostarczonym przez osobiste lampy nahełmowe pracowników. Należy podkreślić, że w sytuacjach awaryjnych także bierne wskaźniki dróg ewakuacyjnych, wykonane z materiałów odblaskowych, nie spełniają oczekiwań, gdyż wymagają oświetlenia odrębnym źródłem światła pobudzającym odbicie, przy czym emitowane przez nie światło odbite jest często zbyt słabo widoczne, zwłaszcza w wyrobisku zapyłonym lub zadymionym.

W obowiązujących normach dotyczących oświetlenia w zakładach górniczych nie zostały określone parametry oświetlenia awaryjnego, mimo że stosowanie takiego oświetlenia podlega wymaganiom dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 94/9/WE (ATEX 100A) i zharmonizowanych z nią norm (Dyrektywa Parlamentu Europejskiego 1994; PN-EN-50014; PN-EN-50020; PN-EN 50039).

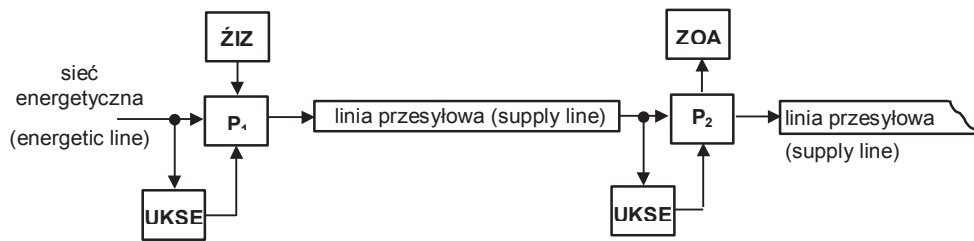
Opracowaną koncepcję awaryjnego oświetlenia w kopalniach metanowych przeanalizowano pod kątem spełniania energetycznych wymagań dyrektywy *ATEX*. Realizacja tej koncepcji stanowi jeden ze sposobów poprawy bezpieczeństwa i komfortu pracy w zakładach górniczych, i zarazem minimalizacji skutków zagrożeń naturalnych i technicznych.

1. KONCEPCJA AWARYJNEGO OŚWIETLENIA W KOPALNIACH METANOWYCH

Stanowiska pracy w przestrzeniach zagrożonych wybuchem, zwłaszcza w kopalniach metanowych, są oświetlane z wykorzystaniem prądu przemiennego o częstotliwości przemysłowej, o niskim napięciu (zwykle 230 V AC) z wykorzystaniem kabli metalowych. Transformacja napięcia do wartości używanej do zasilania sprzętu oświetleniowego jest dokonywana za pomocą ognioszczelnych zespołów transformatorowych.

Systemowa realizacja awaryjnego oświetlenia środowiska pracy w przestrzeniach zagrożonych wybuchem wymaga ciągłej kontroli wartości napięcia na wejściu każdego obwodu zasilania oświetlenia. W przypadku zaniku (wyłączenia) zasilania,

następuje automatyczna separacja tego obwodu od sieci energetycznej i podłączenie go do źródła zasilania iskrobezpiecznego. W najnowszych rozwiązaniach jest również kontrolowana wartość napięcia roboczego oświetlenia i w przypadku zaniku (wyłączenia) tego zasilania dokonuje się separacji źródeł roboczego oświetlenia i podłączenia obwodu przesyłania energii oświetlenia do awaryjnych emiterów światła widzialnego, takich jak matryce oświetleniowe składające się z półprzewodnikowych, laserowych emiterów światła widzialnego lub świecących kabli optycznych posiadających wykonanie iskrobezpieczne. Schemat systemu awaryjnego oświetlenia, ilustrujący opisaną koncepcję, przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat blokowy systemu awaryjnego oświetlenia UKSE – układ kontroli sieci energetycznej, P – przełącznik, ŻIZ – źródło iskrobezpiecznego zasilania, ZOA – zespół oświetleniowy awaryjny

Fig. 1. Block scheme of emergency lighting system UKSE – arrangement of energetic network control, P – switch, ŻIZ – source of secure spark power, ZOA – group of emergency lighting

Napięcie robocze oświetlenia na wejściu i wyjściu odcinka linii przesyłowej jest kontrolowane za pomocą układów kontroli napięcia sieci energetycznej (UKSE). Podczas działania oświetlenia roboczego, kiedy na pierwszym wejściu przełącznika (P_1) jest określona wartość napięcia oświetlenia roboczego, źródło iskrobezpiecznego zasilania (ŻIZ) jest odseparowane od linii przesyłowej. Wyjście linii przesyłowej jest dołączone do pierwszego wejścia drugiego przełącznika (P_2), a z jego drugiego wyjścia jest podawana energia oświetlenia roboczego. W przypadku zaniku napięcia roboczego oświetlenia na wyjściu sterującym pierwszego UKSE powstaje sygnał sterujący, wskutek którego przełącznik P_1 powoduje podłączenie linii przesyłowej do źródła ŻIZ. Drugi UKSE, podłączony na wyjściu linii przesyłowej również wygeneruje sygnał sterujący, wskutek tego drugi przełącznik P_2 spowoduje podłączenie zespołu oświetlenia awaryjnego (ZOA) do linii przesyłowej. Energia awaryjnego oświetlenia będzie dostarczana w sposób iskrobezpieczny od ŻIZ przez przełącznik P_1 , linią przesyłową do przełącznika P_2 i dalej do zespołu oświetleniowego ZOA oraz do następnego odcinka linii przesyłowej. W przypadku pojawienia się napięcia oświetlenia roboczego system awaryjnego oświetlenia przejdzie w stan czuwania.

2. TECHNICZNE ASPEKTY REALIZACJI AWARYJNEGO OŚWIETLENIA W KOPALNIACH METANOWYCH

Techniczna realizacja oświetlenia awaryjnego w kopalniach metanowych wymaga zapewnienia autonomiczności i przeciwwybuchowości o poziomie iskrobezpieczeństwa kategorii „I_a” systemu oświetlenia awaryjnego.

Spełnienie wymagania autonomii zasilania powinno być oparte na przesłankach racjonalnych. Oświetlenie awaryjne powinno być w miarę tanie, niezawodne i łatwe w eksploatacji. Jak wspomniano wyżej zapewnienie przeciwwybuchowości w wykonaniu iskrobezpiecznym związane jest ze spełnieniem wymagań dyrektywy ATEX i zharmonizowanych z nią norm (Dyrektywa Parlamentu Europejskiego 1994; PN-EN-50014; PN-EN-50020; PN-EN-50039).

Zasilanie emiterów światła widzialnego, zgodnie z koncepcją wykorzystania zdalnego zasilania, jest realizowane za pomocą linii przesyłowych oświetlenia roboczego. W tym przypadku zapewnienie iskrobezpieczeństwa obwodu zasilania polega na uwzględnieniu następujących czynników (Skoropacki W. 1999):

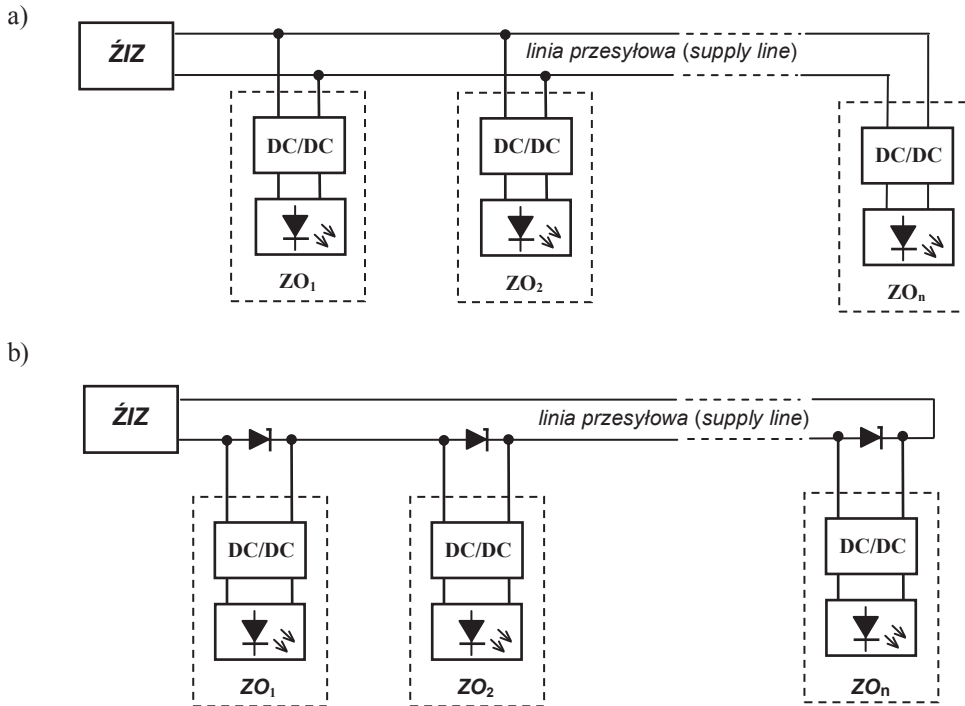
- liczby i parametrów elementów obwodu elektrycznego magazynujących energię elektryczną lub magnetyczną,
- wartości energii elektrycznej lub magnetycznej zgromadzonej w poszczególnych elementach, w stanie ustalonym pracy obwodu elektrycznego,
- parametrów zewnętrznego źródła zasilania,
- topologii obwodu elektrycznego,
- warunków transformacji energii elektrycznej lub magnetycznej, zgromadzonej w poszczególnych elementach obwodu elektrycznego, w energię cieplną w punkcie komutacji awaryjnej.

Zasilanie zespołów oświetleniowych w jednej sekcji awaryjnego oświetlenia prądem stałym może być zrealizowane za pomocą następujących sposobów:

- przy równoległym podłączeniu zespołów oświetleniowych do linii przesyłowej,
- w tzw. układzie drabinkowym (rys. 2a),
- przy szeregowym połączeniu zespołów w obwód zasilania (rys. 2b).

Jako medium do przesyłania energii zasilania roboczego oświetlenia najczęściej są stosowane przewody (tory) metalowe górniczego kabla sygnalizacyjnego w izolacji i powłoce polwinitowej z ekranami indywidualnymi na żyłach roboczych typu YnKGSY lub YnOGYekm (prod. Tele-Fonika) lub YnHOBY (prod. DRUT-PLAST). Przekrój znamionowy żył stosowanych do oświetlenia roboczego z reguły wynosi $2,5 \text{ mm}^2$, rzadziej $4,0 \text{ mm}^2$.

Dla wymienionych kabli uśrednione wartości parametrów jednostkowych (rezystancja R_j , pojemność C_j i indukcyjność L_j) torów przesyłowych utworzonych z dwóch przyległych żył roboczych o przekroju 2 mm^2 i $4,0 \text{ mm}^2$ odpowiednio wynoszą: $R_j = 16,8 \text{ } \Omega/\text{km}$, $C_j = 81 \text{ nF/km}$, $L_j = 0,4 \text{ mH/km}$ i $R_j = 10,0 \text{ } \Omega/\text{km}$, $C_j = 92 \text{ nF/km}$, $L_j = 0,38 \text{ mH/km}$.



Rys. 2. Schemat blokowy sekcji awaryjnego oświetlenia: *a* – z równoległym podłączeniem zespołów oświetleniowych, *b* – z szeregowym połączeniem zespołów oświetleniowych, ŻIZ – źródło iskrobezpiecznego zasilania, ZO – zespół oświetleniowy

Fig. 2. Block scheme of emergency lightening section: *a* – with parallel connection lightening units, *b* – with chain connection lightening units, ŻIZ – source of secure spark power, ZO – lightening unit

Warunki iskrobezpiecznego zasilania jednej sekcji oświetlenia awaryjnego zbudowanej z zespołów oświetleniowych składających się z diod LED, można określić w podany poniżej sposób:

Moc pobierana przez zespół oświetlenia awaryjnego zależy od liczby stosowanych emiterów światła widzialnego, diod LED, od ich światłości i typu (barwy świecenia). Dla standardowych diod LED przyjmuje się następujące napięcia:

czerwona dioda LED	żółta dioda LED	zielona dioda LED	niebieska dioda LED	biała dioda LED
1,2V (1,2–2,1)	2,8V (2,0–2,8)	3,0V (2,1–3,0)	3,5V (3,5–5,0)	3,6V (3,5–4,0)

Jedna sekcja oświetlenia awaryjnego długości l , zawiera n zespołów oświetleniowych. W celu uproszczenia można założyć, że parametry jednostkowe odcinków toru metalowego są równe, tzn. $R_{T_1} = r_{T_2} = \dots = r_{T_n} = r_j l / n$, $C_{j_1} = r_{j_2} = \dots = r_{j_n} = r_j$, $L_{j_1} = r_{j_2} = \dots = r_{j_n} = r_j$, a admitancja wejściowa każdego zespołu oświetleniowego $Y_{oz_1} = r_{oz_2} = \dots = r_{oz_n} = r_{oz}$ ($Y_{oz} = 1/R_{oz}$).

Należy podkreślić, że maksymalna dopuszczalna wartość napięcia prądu stałego na wejściu toru macierzystego lub pochodnego, który jest wykorzystywany do przesyłania energii elektrycznej na odległość, jest ograniczona ze względów porażeniowych do wartości: $U_{we} = U_{dop} = 10V DC$ (Skoropacki W. 1999); Skoropacki W. 2003). Przy zapewnieniu iskrobezpieczeństwa obwodu zdalnego zasilania przez ograniczenie prądu i napięcia, wartość natężenia prądu w linii przesyłowej nie może przekroczyć minimalnej wartości zapalającej. W tabelicy 1 przedstawiono minimalne wartości natężenia prądu zapalającego, w obwodzie rezystancyjnym (grupa I) dla współczynnika bezpieczeństwa $k = 1,5$, w zależności od napięcia zasilającego (PN-EN-50020).

Tablica 1. Zależność minimalnego prądu zapalającego od napięcia w obwodzie rezystancyjnym

U_{we}, V	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
I_{zap}, A	3,5	1,6	0,5	0,26	0,18	0,12	0,103	0,087	0,066	0,058

Zgodnie z metodą *Cauera* (Bolkowski S. 1998) rezystancję wejściową R_{we} sekcji awaryjnego oświetlenia można wyrazić za pomocą wzoru

$$R_{we} = R_{r_1} + \frac{1}{Y_{oz_1} + \frac{1}{R_{r_2} + \frac{1}{Y_{oz_1} + \dots + \frac{1}{R_{r_n} + \tau_{oz_n}}}}} \quad (1)$$

W stanie ustalonym prąd I_T na wejściu sekcji oświetlenia awaryjnego jest równy $I_T = U_{we}/R_{we}$, gdzie U_{we} – jest wartością napięcia na wejściu sekcji oświetlenia awaryjnego.

W tablicach 2–5 przedstawiono wartości natężenia prądu I_T na wejściu jednej sekcji oświetlenia awaryjnego o różnej długości l , który może być wymuszony dla różnych wartości napięć na wejściu U_{we} i różnych wartości mocy elektrycznej P_{od} pobieranej przez poszczególne zespoły oświetleniowe, przy drabinkowej konfiguracji systemu oświetlenia awaryjnego. Obliczenia przeprowadzono z uwzględnieniem sprawności przetwornic DC/DC $\eta = 0,86$ (wartości podane w polach zaznaczonych niebieskim kolorem odpowiadają wartościom iskrobezpiecznym dla obwodów rezystancyjnych z liniowymi układami ochronnymi). Niewypełnione pola w tych tablicach świadczą o ograniczeniach technicznych podczas realizacji oświetlenia awaryjnego, ponieważ w tych przypadkach przy napięciu na wejściu toru przesyłowego $U_{we} < 20 V DC$, większość energii zasilania jest tracona na rezystancji samego toru.

Tablica 2. Natężenie prądu I_T na wejściu linii przesyłowej dla różnych wartości napięć wejściowych U_{we} , długości l i różnej liczby zespołów oświetleniowych n ($R_j = 16,8 \Omega/\text{km}$, $P_{od} = 0,5 \text{ W}$) przy konfiguracji drabinkowej

U_{we}		10 V DC			20 V DC			30 V DC			40 V DC			50 V DC			60 V DC			
		n			n			n			n			n						
		5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15	
$I_T, \text{ A}$	$l, \text{ km}$	0,1	0,30	0,61	–	0,15	0,30	0,45	0,10	0,20	0,30	0,07	0,15	0,21	0,06	0,13	0,18	0,05	0,11	0,16
		0,2	0,31	–	–	0,15	0,30	0,46	0,10	0,20	0,30	0,07	0,15	0,21	0,06	0,13	0,19	0,05	0,11	0,16
		0,3	0,33	–	–	0,15	0,31	0,46	0,10	0,20	0,32	0,07	0,16	0,21	0,06	0,13	0,19	0,05	0,11	0,16
		0,4	0,35	–	–	0,15	0,31	0,46	0,10	0,21	0,34	0,07	0,16	0,22	0,06	0,13	0,19	0,05	0,11	0,16
		0,5	0,35	–	–	0,15	0,32	0,47	0,10	0,31	0,34	0,07	0,16	0,22	0,07	0,14	0,20	0,06	0,12	0,17

Tablica 3. Natężenie prądu I_T na wejściu linii przesyłowej dla różnych wartości napięć wejściowych U_{we} , długości l i różnej liczby zespołów oświetleniowych n ($R_j = 16,8 \Omega/\text{km}$, $P_{od} = 1,0 \text{ W}$) przy konfiguracji drabinkowej

U_{we}		10 V DC			20 V DC			30 V DC			40 V DC			50 V DC			60 V DC			
		n			n			n			n			n						
		5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15	
$I_T, \text{ A}$	$l, \text{ km}$	0,1	0,63	–	–	0,31	0,62	1,12	0,20	0,37	0,56	0,14	0,28	0,42	0,12	0,23	0,34	0,09	0,19	0,28
		0,2	0,72	–	–	0,32	0,64	1,16	0,20	0,40	0,64	0,14	0,30	0,48	0,12	0,24	0,38	0,09	0,20	0,32
		0,3	0,79	–	–	0,32	0,65	–	0,21	0,45	0,67	0,15	0,61	0,52	0,12	0,27	0,41	0,09	0,22	0,34
		0,4	0,90	–	–	0,33	0,68	–	0,21	0,48	0,73	0,25	0,36	0,54	0,12	0,28	0,44	0,10	0,24	0,36
		0,5	–	–	–	0,33	0,73	–	0,21	0,54	0,54	0,15	0,38	0,59	0,12	0,30	0,47	0,10	0,24	0,40

Tablica 4. Natężenie prądu I_T na wejściu linii przesyłowej dla różnych wartości napięć wejściowych U_{we} , długości l i różnej liczby zespołów oświetleniowych n ($R_j = 16,8 \Omega/\text{km}$, $P_{od} = 1,5 \text{ W}$) przy konfiguracji drabinkowej

U_{we}		10 V DC			20 V DC			30 V DC			40 V DC			50 V DC			60 V DC			
		n			n			n			n			n						
		5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15	
$I_T, \text{ A}$	$l, \text{ km}$	0,1	0,95	–	–	0,45	0,91	1,34	0,29	0,58	0,89	0,22	0,45	0,67	0,18	0,35	0,54	0,15	0,29	0,45
		0,2	1,10	–	–	0,46	0,94	–	0,29	0,58	1,02	0,22	0,48	0,76	0,18	0,38	0,61	0,15	0,32	0,51
		0,3	–	–	–	0,47	1,02	–	0,30	0,62	1,06	0,22	0,51	0,80	0,18	0,42	0,64	0,15	0,35	0,54
		0,4	–	–	–	0,48	1,06	–	0,31	0,72	1,15	0,22	0,57	0,86	0,18	0,45	0,70	0,15	0,38	0,58
		0,5	–	–	–	0,49	1,08	–	0,31	0,78	1,25	0,23	0,61	0,91	0,18	0,48	0,74	0,15	0,40	0,61

Tablica 5. Natężenie prądu I_T na wejściu linii przesyłowej dla różnych wartości napięć wejściowych U_{we} , długości l i różnej liczby zespołów oświetleniowych n ($R_j = 16,8 \Omega/\text{km}$, $P_{od} = 2,0 \text{ W}$) przy konfiguracji drabinkowej

U_{we}		10 V DC			20 V DC			30 V DC			40 V DC			50 V DC			60 V DC			
		n			n			n			n			n						
		5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15	
$I_T, \text{ A}$	$l, \text{ km}$	0,1	1,34	–	–	0,60	1,16	–	0,39	0,77	1,2	0,29	0,60	0,90	0,24	0,47	0,73	0,19	0,38	0,60
		0,2	–	–	–	0,62	1,29	–	0,40	0,86	1,37	0,30	0,64	1,03	0,24	0,51	0,82	0,20	0,43	0,68
		0,3	–	–	–	0,66	–	–	0,41	0,90	1,42	0,30	0,69	1,07	0,24	0,56	0,86	0,20	0,47	0,73
		0,4	–	–	–	0,67	–	–	0,43	1,06	–	0,30	0,77	1,16	0,24	0,60	0,94	0,20	0,51	0,77
		0,5	–	–	–	0,69	–	–	0,44	1,12	–	0,30	0,81	1,24	0,24	0,64	0,98	0,20	0,55	0,81

W przypadku szeregowego włączenia n zespołów oświetleniowych w obwód awaryjnego oświetlenia (rys. 2b), jednakowych odbiornikach energii elektrycznej oraz przy ich równomiernym rozmieszczeniu $U_{Z_1} = I_{Z_2} = \dots = I_{Z_n} = I_Z$, równanie napięć w sekcji awaryjnego oświetlenia można zapisać w sposób następujący

$$U_{WE} = i(U_{T_i} + I_Z) \quad (2)$$

gdzie:

U_{T_i} – spadek napięcia na i -tym odcinku linii przesyłowej,

U_Z – napięcie stabilizacji diody Zenera.

Moc elektryczna pobierana przez i -ty zespół oświetleniowy jest równa $P_{od} = I_Z^2 / R_{od}$, przy pobieranym prądzie $I_{zo} = I_{od} / U_Z$.

W tabelicy 6 przedstawiono wartości prądu I_T na wejściu jednej sekcji awaryjnego oświetlenia o różnej długości l , który może być wymuszony dla różnych wartości U_Z oraz różnych wartościach mocy elektrycznej P_{od} , pobieranej przez poszczególne zespoły oświetleniowe, przy ich szeregowym włączeniu w obwód awaryjnego zasilania. Obliczenia przeprowadzono z uwzględnieniem sprawności przetwornic DC/DC $\eta = 0,86$ (wartości zaznaczone niebieskim kolorem odpowiadają wartościom iskrobezpiecznym dla obwodów rezystancyjnych z liniowymi układami ochronnymi).

Tablica 6. Natężenie prądu I_T na wejściu linii przesyłowej ($R_j = 16,8 \Omega/\text{km}$) dla różnych wartości napięć wejściowych U_{we} , długości l , różnej liczby n i mocy P_{od} zespołów oświetleniowych, przy ich szeregowym połączeniu w obwód awaryjnego zasilania

		$P_{od} = 0,5 \text{ W}$			$P_{od} = 1,0 \text{ W}$			$P_{od} = 1,5 \text{ W}$			$P_{od} = 2,0 \text{ W}$			
		n			n									
		5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15	
$U_Z, \text{ V}$		11,0	5,1	3,6	11,0	5,1	3,6	11,0	5,1	3,6	11,0	5,1	3,6	
$I_T, \text{ A}$	$l, \text{ km}$	0,1	0,05	0,11	0,14	0,11	0,22	0,28	0,16	0,33	0,42	0,20	0,44	0,56
		0,2	0,06	0,12	0,16	0,12	0,23	0,32	0,17	0,36	0,48	0,21	0,46	0,64
		0,3	0,07	0,13	0,16	0,13	0,26	0,33	0,18	0,39	0,48	0,22	0,52	0,66
		0,4	0,08	0,14	0,17	0,14	0,28	0,34	0,20	0,42	0,51	0,24	0,56	0,68
		0,5	0,09	0,15	0,17	0,15	0,30	0,34	0,26	0,45	0,52	0,26	0,60	0,68

Ze względu na krótkie odcinki sekcji awaryjnego oświetlenia oraz wartości rezystancji jednostkowych R_j należy oczekiwać, przy organizacji awaryjnego oświetlenia z wykorzystaniem górniczego kabla sygnalizacyjnego o przekroju żył $4,0 \text{ mm}^2$, zbliżonych wartości natężenia prądu I_T .

Długość pojedynczej sekcji awaryjnego oświetlenia z reguły jest mniejsza niż 500 m. W takim przypadku wartość napięcia zasilania jednej sekcji awaryjnego oświetlenia należy wybrać w zakresie 20–30 V DC, w odróżnieniu od organizacji

zdalnego zasilania na odległość powyżej kilku kilometrów z wykorzystaniem kabla telekomunikacyjnego, gdzie korzystna jest praca przy maksymalnej dopuszczalnej wartości napięcia na wejściu linii przesyłowej, ograniczona ze względów porażeniowych (Skoropacki W. 2003).

Iskrobezpieczeństwo jednej sekcji oświetlenia awaryjnego można, wyjątkowo, w ograniczonej liczbie przypadków, zapewnić za pomocą liniowych układów zabezpieczających, tzn. przez jej podłączenie do źródła zasilania za pośrednictwem rezystora. W przypadku stosowania zespołów oświetleniowych o zwiększonej wartości pobieranej mocy, zapewnienie iskrobezpieczeństwa każdej sekcji oświetlenia awaryjnego należy zapewnić przez zastosowanie układów zabezpieczenia z nieliniową charakterystyką wyjściową.

Przykładowo, dla pojedynczego, typowego zespołu oświetlenia awaryjnego zawierającego 12 diod LED pobierane natężenie prądu, przez pojedynczą diodę wynosi około 35 mA, uwzględniając straty energii elektrycznej na rezystorach ograniczających i sprawność przetwornicy DC/DC $\eta = 0,86$, moc energii elektrycznej zużywanej przez jeden zespół oświetlenia awaryjnego wyniesie około 1,5 W.

Wyniki obliczeń, zestawione w tablicy 6, pozwalają również na stwierdzenie, że przy budowaniu układów zasilania zespołów oświetleniowych w konfiguracji szeregowej należy dążyć do zmniejszenia wartości napięcia wejściowego przez stosowanie diod stabilizujących o mniejszej wartości napięcia Zenera.

Ze względu na stosunkowo małą długość pojedynczej sekcji oświetlenia awaryjnego ($l \leq 0,5$ km) energia elektryczna, która może być zmagazynowana w linii przesyłowej, jest maksymalna przy $U_{we} = 60$ V DC i jest równa $W_E = I_{we}^2 C_j l / 2 = 0,7 \mu\text{J}$.

Z kolei w stanie ustalonym energia pola magnetycznego toru W_M osiąga wartość maksymalną przy natężeniu prądu $I_T = 1,34$ A (tabl. 4) i jest równa $W_M = L_j I_T^2 l / 2 = 0,18$ mJ.

Z tego wynika, że pojemność i indukcyjność jednostkowa dwuprzewodowej linii górniczego kabla sygnalizacyjnego o przekroju żył $2,5 \text{ mm}^2$ nie jest decydującym czynnikiem dla iskrobezpieczeństwa obwodów elektrycznych grupy I, ponieważ energia elektromagnetyczna zgromadzona w odcinku linii przesyłowej długości 500 metrów jest mniejsza od minimalnej wartości zapłonu mieszaniny metanu z powietrzem (PN-EN-50020).

Przy konstrukcji zasilania iskrobezpiecznego zespołów oświetleniowych z wykorzystaniem obwodu elektrycznego o parametrach rozłożonych (linii przesyłowej), wymagane jest zgodnie z (PN-EN-50020), aby maksymalny stosunek indukcyjności obciążenia L_o do rezystancji obciążenia R_o jakie mogą być przyłączone do źródła zasilania z liniową charakterystyką wyjściową, tzn. z rezystorem ograniczającym, nie przekraczał

$$\zeta = \frac{L_o}{R_o} \leq \frac{8eR_w + \sqrt{64 \cdot e^2 R_w^2 - 2 \cdot U_\infty^2 L_w}}{4,5 \cdot U_\infty^2} \mu\text{H}/\Omega \quad (3)$$

gdzie:

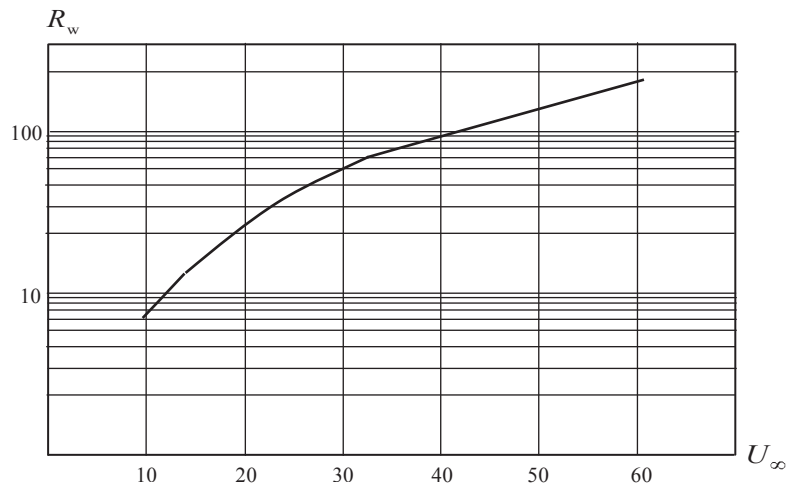
- e – minimalna energia zapłonu dla konkretnej grupy urządzeń (grupa I – 525 μJ),
- U_∞ – napięcie wyjściowe nieobciążonego źródła zasilania,
- R_w – rezystancja wewnętrzna źródła zasilania,
- L_w – indukcyjność wewnętrzna źródła zasilania odniesiona do zacisków wyjściowych.

Dla kabla sygnalizacyjnego stosowanego do oświetlenia roboczego o przekroju żył roboczych 2,5 mm² i 4 mm² oraz długości $l = 500$ m stosunek ζ odpowiednio wynosi $\zeta = 47,6 \mu\text{H}/\Omega$ i $\zeta = 70 \mu\text{H}/\Omega$.

Zapewnienie iskrobezpieczeństwa można osiągnąć za pomocą rezystora ograniczającego, tzn. z wykorzystaniem źródła zasilania o dużej rezystancji wewnętrznej do której można zaliczyć rezystor ograniczający. Zależność $R_w(U_\infty)$ ze wzoru (3) określa się jako

$$R_w = \frac{32eL_w + 9\zeta^2 U_\infty^2}{16e\zeta} \quad (4)$$

Wykresy zależności $R_w(U_\infty)$ dla urządzeń grupy I przy przesyłaniu energii zasilania na odległość $l = 500$ m do zespołów oświetleniowych ulokowanych w strefie zagrożonej wybuchem za pomocą kabla sygnalizacyjnego (przekrój roboczych żył 2,5 mm², $R_j = 16,8 \Omega/\text{km}$, $L_j = 400 \mu\text{H}/\text{km}$) przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Dopuszczalne minimalne wartości rezystancji wewnętrznej źródeł zasilania przy organizacji zdalnego zasilania czujników z wykorzystaniem toru metalowego górniczego kabla sygnalizacyjnego

Fig. 3. Admissible minimal values of internal resistance source power at organisation of remote powering sensor with utilisation of metal mining gauge of signalling cable

Obliczenia wykonano z uwzględnieniem indukcyjności wewnętrznej źródła zasilania $L_w = 20 \mu\text{H}$ (na przykład, przy stosowaniu filtru ograniczającego emisję w zakresie wysokich częstotliwości). Z rysunku 3 wynika, że w celu zapewnienia iskrobezpieczeństwa jednej sekcji oświetlenia awaryjnego o poziomie „i_a”, przy napięciu wejściowym w zakresie 20–30 V DC należy na wyjściu źródła zasilania stosować rezystor ograniczający o wartości ponad 20 Ω . Wynika stąd, że przy szeregowym włączeniu zespołów oświetleniowych w obwód zasilania można stosunkowo łatwo zapewnić jego iskrobezpieczeństwo przez zastosowanie źródła prądowego. Dodatkowym efektem jest zapewnienie stabilności prądu w sekcji zasilania awaryjnego oraz możliwość stosowania typowych zespołów oświetleniowych.

3. PÓLPRZEWODNIKOWE EMITERY PROMIENIOWANIA WIDZIALNEGO DLA OŚWIETLENIA AWARYJNEGO

Diody LED mogą być zasilane ze źródła napięcia stałego lub przemiennego. Napięcie zasilania jednej diody nie przekracza wartości 3,5 V, dzięki temu są one znakomitymi emiterami światła widzialnego, doskonale nadającymi się do budowy awaryjnego oświetlenia w kopalniach metanowych.

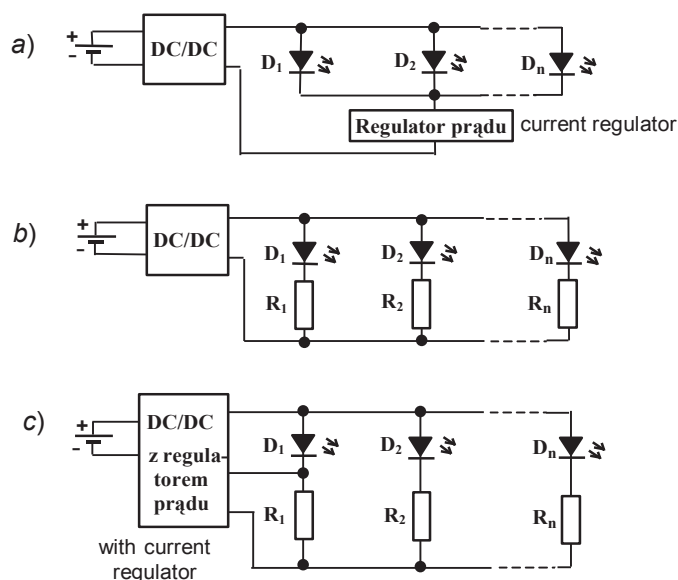
Producenci półprzewodnikowych źródeł światła, do których również są zaliczane diody LED deklarują, że okres ich pracy wynosi do 100 tysięcy godzin lub 11 lat ciągłej pracy. Są to elementy kilkakrotnie przewyższające żywotność typowego układu oświetlenia roboczego. Mała emisja ciepła oraz bardzo duża odporność na wstrząsy i warunki klimatyczne, zapewniają dużą niezawodność układów oświetlenia i sygnalizacji. Tak duża trwałość powoduje, że przy projektowaniu matrycy oświetleniowej lub sygnalizacyjnej nie musi być uwzględniana możliwość wymiany emiterów światła, co zapewnia możliwość wytworzenia całego modułu oświetlenia w wykonaniu przeciwwybuchowym kategorii „i_a”. Naturalne kolory diod: biały, czerwony, żółty oraz niebieski, a także brak promieniowania UV powodują, że źródła światła widzialnego nie wymagają filtrów barwnych wprowadzających straty strumienia świetlnego. Również światłość diod LED jest wystarczająca, aby je stosować do oświetlenia awaryjnego i sygnalizacji.

Sprawność przetwarzania energii elektrycznej w energię świetlną przez diody LED o rząd przewyższa sprawność żarówek, lamp wyładowczych i kilkakrotnie przewyższa sprawność innych źródeł światła widzialnego, na przykład lamp sodowych, rtęciowych i innych.

W związku ze stałym rozwojem technologii produkcji diod LED i ich coraz niższą ceną można przypuszczać, że w przyszłości oświetlenie robocze podziemnych wyrobisk i stanowisk pracy w kopalniach węgla kamiennego i w innych zakładach górniczych wykonywane będzie z zastosowaniem takich źródeł światła. Stosowanie takiej technologii pozwoli na realizację techniczną zespołu oświetleniowego o zwartej, w pełni zahermetyzowanej i niezawodnej konstrukcji, spowoduje to znacznie mniejsze zużycie energii elektrycznej i obniżenie kosztów eksploatacji, jak również ułatwi sprostanie wymaganiom ekologicznym, w tym wymaganiom dyrektyw Unii Europejskiej 94/9WE (ATEX 100A), 2002/95/EC (RoHS) i 2002/96/EC (WEEE).

Do niedogodności związanych z zastosowaniem diod LED do celów oświetlenia awaryjnego i sygnalizacji należy zaliczyć ich jeszcze stosunkowo wysoką cenę oraz złożoność układów zasilania i sterowania matrycą oświetleniową.

Grupę z diod typu LED można zasilac równolegle lub szeregowo. Schematy funkcjonalne trzech podstawowych układów równoległego zasilania diod LED są przedstawione na rysunku 4.

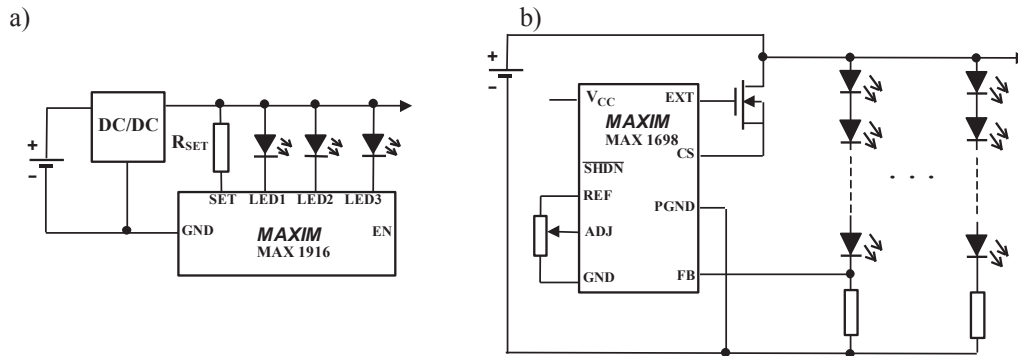


Rys. 4. Schematy funkcjonalne równoległego zasilania diod LED: a – prąd przez każdą z diod regulowany niezależnie, b – natężenie prądów ustalane za pomocą rezystorów wyrównawczych, c – natężenie prądu regulowane z wykorzystaniem spadków napięcia na jednym z rezystorów wyrównawczych

Fig. 4. Schemes of functional parallel powering of LED diodes: a – current by all of diodes adjusted independently, b – intensity current established by assistance of levelling resistors, c – intensity current adjusted with utilisation of decrease of tension on one of levelling resistors

W rozwiązaniu układowym, przedstawionym na rysunku 4a, prąd przez każdą z diod LED jest regulowany niezależnie. W układzie zasilania, przedstawionym na schemacie funkcjonalnym (rysunku 4b) natężenia prądów są ustalane za pomocą rezystorów wyrównawczych. Z kolei, w układzie przedstawionym na rysunku 4c natężenie prądu płynącego przez poszczególne diody LED jest regulowane z wykorzystaniem spadku napięcia na jednym z rezystorów wyrównawczych. Zasilanie jak na rysunku 4 – najczęściej stosowane – jest oparte na wykorzystaniu specjalnie wykonanych układów scalonych. Dla przykładu, na rysunku 5a przedstawiono układ zasilania trzech diod z wykorzystaniem układu scalonego typu MAX1916, przy czym różnica natężeń prądów pobieranych przez poszczególne diody nie przekracza 0,3%. Na rysunku 5b natomiast przedstawiono układ zasilania kilkunastu diod z wykorzystaniem układu scalonego o większej wydajności prądowej, typu MAX 1698.

Podstawową zaletą połączenia diod LED w układzie szeregowym jest to, że przez wszystkie diody płynie wspólny prąd i osiąga się jednakową jasność świecenia oraz większą sprawność zespołu oświetleniowego. Wadą takiego zasilania jest stosunkowo wysoka wartość napięcia zasilania i mniejsza niezawodność, ponieważ uszkodzenie jednej diody typu „rozwarcie” powoduje „zgaśnięcie” całej gałęzi szeregowo połączonych diod.



Rys. 5. Zasilanie diod LED z wykorzystaniem specjalnie wykonanych układów scalonych: a – układ typu MAX 1916, b – układ typu MAX 1698

Fig. 5. Powering of LED diodes with utilisation executed specially integrated matches: a – match type MAX 1916, b – match type MAX 1698

4. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych rozważań sformułowano następujące wnioski:

- Parametry techniczne i niezawodnościowe diod LED powodują, że znakomicie nadają się one do konstrukcji awaryjnego oświetlenia wyrobisk podziemnych i stanowisk pracy w kopalniach metanowych.
- Celowe jest wykorzystywanie linii przesyłowych oświetlenia roboczego do budowy układów oświetlenia awaryjnego.
- Drabinkowa konfiguracja sekcji oświetlenia awaryjnego zapewnia większą sprawność przesyłania energii elektrycznej dla większej (>10) liczby zespołów oświetleniowych i mocy elektrycznej pobieranej przez poszczególne zespoły ponad 1,5 W. Wadą takiej konfiguracji jest rozrzut wartości impedancji wejściowych zespołów oświetleniowych. Pociąga to za sobą konieczność stosowania indywidualnych zasilaczy ze stabilizacją napięcia wyjściowego w szerokim zakresie wahań napięcia na wejściu zespołu oświetleniowego. Przy mniejszej liczbie zespołów oświetleniowych i pobieranej mocy nieprzekraczającej 1,5 W bardziej efektywna staje się konfiguracja jednej sekcji oświetlenia awaryjnego z wykorzystaniem szeregowego połączenia zespołów oświetleniowych. W takim przypadku korzystne jest stosowanie źródła prądowego jako zasilacza centralnego, zapewniającego stabilność prądu w obwodzie zasilania i możliwość stosowania jednakowych zespołów oświetleniowych.

- W celu zapewnienia iskrobezpieczeństwa na poziomie „i_a” korzystne jest stosowanie wartości napięcia na wejściu sekcji awaryjnego oświetlenia w zakresie napięć 20–40 V DC.

Literatura

1. Bolkowski S. (1998): Teoria obwodów elektrycznych. Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
2. Dyrektywa parlamentu europejskiego i rady 94/9/we z dnia 23.03.1994 w sprawie ujednoczenia przepisów prawnych państw członkowskich dotyczących urządzeń i systemów ochronnych przeznaczonych do użytku w przestrzeniach zagrożonych wybuchem, GIG, Katowice 1999 r.
3. EN-50039/1995. Electrical Apparatus for Potentially Explosive Atmospheres. Intrinsic Safe Electrical Systems „i”.
4. PN-EN-50014. Urządzenia elektryczne w przestrzeniach zagrożonych wybuchem. Wymagania ogólne.
5. PN-EN-50020. Urządzenia elektryczne w przestrzeniach zagrożonych wybuchem. Wykonanie iskrobezpieczne „i”.
6. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 28 czerwca 2002 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych (Dziennik Ustaw Nr 139, p.1169, 2002 r.)
7. Rozporządzenie Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 28 lipca 2003 r. w sprawie zasadniczych wymagań dla urządzeń i systemów ochronnych przeznaczonych do użytku w przestrzeniach zagrożonych wybuchem. Dziennik Ustaw Nr 143, p. 1393, 2003 r.
8. Skoropacki W. (1999): *Problemy zwielokrotnienia torów naturalnych kopalnianej sieci telekomunikacyjnej*. Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa Górnictwo i Środowisko Nr 837.
9. Skoropacki W. (2003): *Wybór sposobu zdalnego zasilania urządzeń telemetrycznych i telekomunikacyjnych funkcjonujących w strefach zagrożonych wybuchem*. Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa Nr 3.

Recenzent: dr inż. Stanisław Trzcionka