

inż. W. N. STOJAN

Państwowy Instytut Naukowo-Badawczy

ds. Bezpieczeństwa Prac w Przemysle Górniczym

(MakNII – Makeevskiy nauchno-issledovatel'skiy institut)

Makiejewka (Ukraina)

# Bezawaryjna praca zasilania elektrycznego systemów lokalnej wentylacji jako środek zapewnienia bezpieczeństwa wybuchowego ślepych wyrobisk w kopalniach węgla

*Artykuł ma na celu uzasadnienie potrzeby zwiększenia bezpieczeństwa wybuchowego w ślepych wyrobiskach dzięki zapewnieniu bezawaryjnej pracy zasilania elektrycznego wentylatorów wentylacji odrębnej poprzez wprowadzenie zasady selektywności zabezpieczeń przed upływem prądu do ziemi.*

## 1. PRZEDSTAWIENIE PROBLEMU W ŚWIETLE ZADAŃ BADAWCZO-WDROŻENIOWYCH

---

W przemyśle górniczym Ukrainy podstawowymi czynnikami urazowymi, które obniżają poziom bezpieczeństwa pracy, są wybuchy gazu i pyłu, których udział stanowi 20% całkowitej liczby wypadków.

Podstawową przyczyną wybuchów gazu jest zagazowanie ślepych wyrobisk spowodowane nagłymi zatrzymaniami wentylatorów wentylacji odrębnej (WWO), lokalne nagromadzenie metanu na końcowych odcinkach ścian, od strony zrobów i w sąsiedztwie skrawających organów kombajnów przy szybkim urabianiu węgla, niedostateczne przewietrzanie i koagulacja pyłu. Przy częstych i krótkotrwałych zatrzymaniach WWO mieszanina metanu i powietrza może w dość krótkim czasie osiągnąć stężenie grożące wybuchem, a źródłami zapłonu gazu i pyłu mogą być zwarcia (iskrzienia) w urządzeniach elektrycznych, podziemne pożary, iskrzenie tarciove przy oddziaływaniu narzędzia skrawającego kombajnu na twarde skały.

Zasady bezpieczeństwa w kopalniach węgla regulują wymagania, dotyczące przewietrzania wyrobisk ślepych, a w *Instrukcji dotyczącej zasilania elektrycznego i stosowania urządzeń elektrycznych w wentylowanych za pomocą WWO wyrobiskach ślepych kopalni, zagro-*

*zonych wybuchem gazu* przedstawiono zasady rozmieszczenia urządzeń elektrycznych w schematach zasilania elektrycznego. Mimo to, jak pokazuje praktyka, liczba wypadków w wyrobiskach ślepych kopalni nie przejawia tendencji spadkowej.

## 2. SFORMUŁOWANIE ZADANIA BADAWCZEGO

---

Przedmiotem podjętej pracy było badanie czynników, wpływających na ciągłość przewietrzania wyrobisk ślepych, w celu udoskonalenia środków zapewnienia bezawaryjnej pracy zasilania elektrycznego wentylatorów odrębnej wentylacji, co spowodowałoby podwyższenie poziomu bezpieczeństwa wybuchowego w wyrobiskach ślepych oraz obniżenie liczby wypadków i urazów w zakładach górniczych.

W celu rozwiązania przedstawionego problemu należało przeanalizować specyfikę pracy systemów wentylacji odrębnej i wpływ na ich pracę urządzeń technologicznych przodka. Na przykład urządzenia do przewietrzania wyrobisk ślepych (UPWŚ [AITT]) bezpośrednio wpływają na bezawaryjną pracę urządzeń technologicznych przodka, gdyż w przypadku awarii UPWŚ zostaje odcięte zasilanie maszyn przodkowych i mechanizmów poprzez odłączenie urządzenia gru-

powego. Jednak niezadziałanie UPWŚ nie narusza pracy zasilania elektrycznego WWO, ponieważ rozruszniki WWO są podłączone do sieci do urządzenia grupowego, na który oddziałuje UPWŚ.

Jednocześnie niezadziałanie urządzeń technologicznych, powodujące odcięcie zasilania, wpływa na pracę zarówno roboczego, jak i rezerwowego WWO. W danym kontekście duże znaczenie ma typ awaryjnej sytuacji (zwarcie, upływ prądu, nieprawidłowe działanie urządzeń i in.), do której doprowadziło to czy inne uszkodzenie. Z reguły schematy zasilania elektrycznego są zbudowane w taki sposób, że zwarcia rozłączne powodowane przez rozruszniki technologicznych odbiorników prądu nie wpływają na pracę WWO. Jednak w określonych sytuacjach awaryjnych (niesprawność urządzeń zabezpieczenia prądowego innych urządzeń) mogą one spowodować odcięcie zasilania WWO.

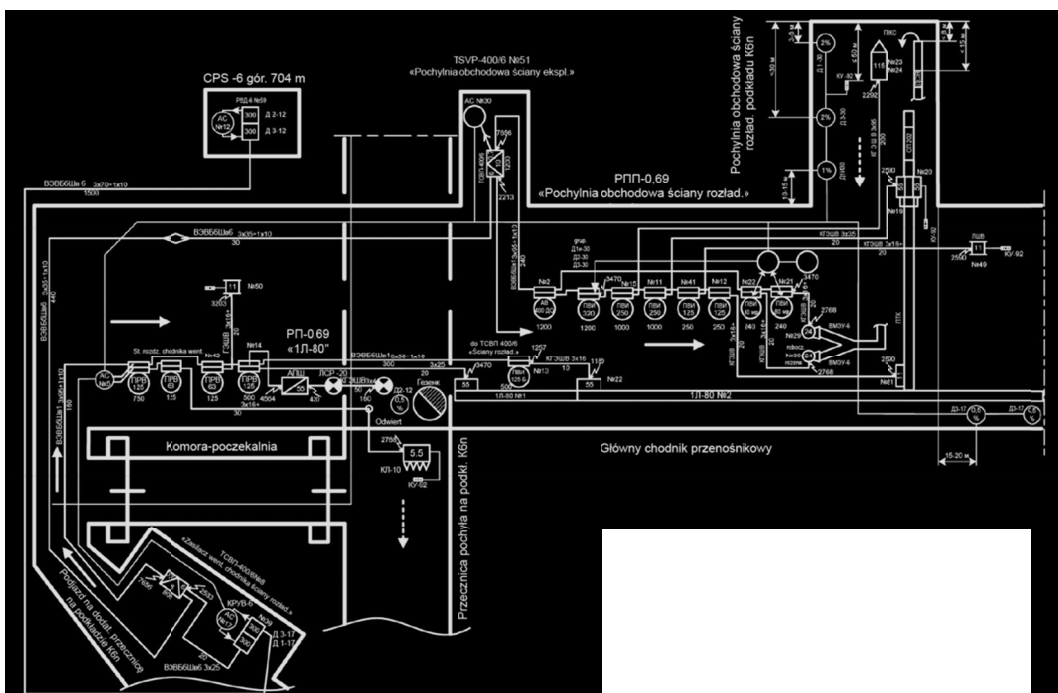
Przy dostatecznej skuteczności urządzeń elektrycznych i kabli podstawową rolę w zapewnieniu bezawaryjnego przewietrzania wyrobisk ślepych bez wątplenia pełni zasada redundancji roboczego WWO ( $WWO_{ROB}$ ). Przy głębokiej redundancji rezerwowego WWO ( $WWO_{REZ}$ ) jest zasilany z osobnej podziemnej ruchomej stacji (PRS) niezależnej od układu zasilania elektrycznego maszyn technologicznych danego przodka. W przypadku odłączenia roboczego WWO aparatura kontrolna przewietrzania wyrobisk ślepych [1] umożliwia automatyczne wznowienie przewietrzania za pomocą rezerwowego WWO. Należy jednak zwrócić uwagę na to, że dla wyrobisk o długości do 200 m dopuszczalne jest zasilanie  $WWO_{REZ}$

z rozrusznika rezerwowego podłączonego do tej samej podstacji, co urządzenia technologiczne przodka chodnikowego lub wybierkowego (urządzenia odstawy, punkty załadunkowe itd.). To zaś radykalnie obniża niezawodność przewietrzania i jest uwarunkowane przez zwiększenie częstotliwości działania zabezpieczeń, szczególnie przed upływem prądu do ziemi. Powoduje to jednoczesne odłączenie napięcia zasilania zarówno od odbiorników prądu urządzeń technologicznych, jak i WWO.

W celu bardziej obiektywnego wskazania przyczyn naruszeń bezawaryjnej pracy zasilania elektrycznego wyrobisk ślepych przez trzy lata prowadzono badania pracy urządzeń elektrycznych trzech wyrobisk w jednej z kopalni Donieckiego Zagłębia Węglowego. Schematy zasilania elektrycznego wskazanych odcinków pokazano na rysunkach 1-3 [7].

Podczas badań urządzenia elektryczne zostały podzielone na grupy ze względu na napięcie siłowe oraz na podgrupy ze względu na wykonanie konstrukcji, miejsce eksploatacji oraz typy odbiorników energii elektrycznej. W procesie badawczym dokumentowano również datę i czas trwania niesprawności, jej przyczynę oraz czas wznowienia działania.

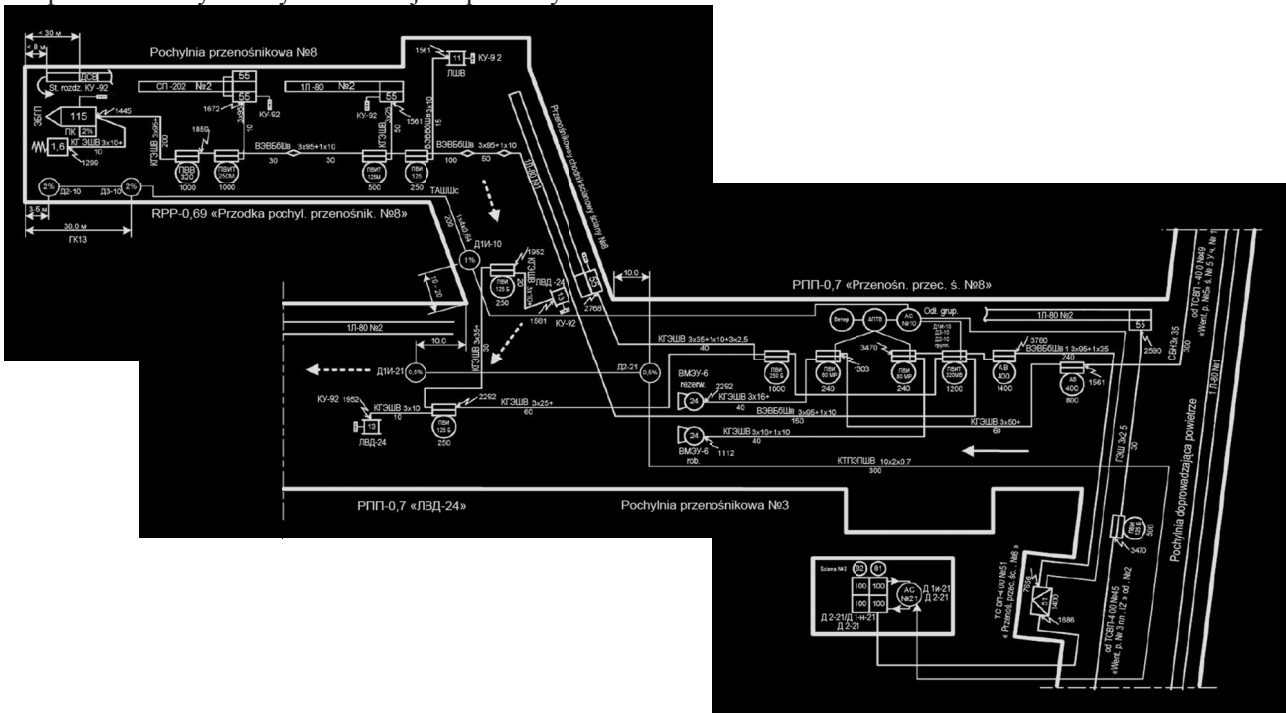
Odcinki te poddano dodatkowym badaniom, gdyż w ich przypadku schematy zasilania elektrycznego wentylacji wyrobisk ślepych odznaczają się istotnymi cechami. Na schemacie przedstawionym na rys. 1.  $WWO_{ROB}$  i  $WWO_{REZ}$  typu VMEU-6 [BMЭУ-6] są zasilane z jednego układu zasilania z urządzeniem technologicznym (kombajn GPKS [ГПКС], przenośnik SP-202 [СП-202], kołowrót LSHV [ЛШВ] itd.).



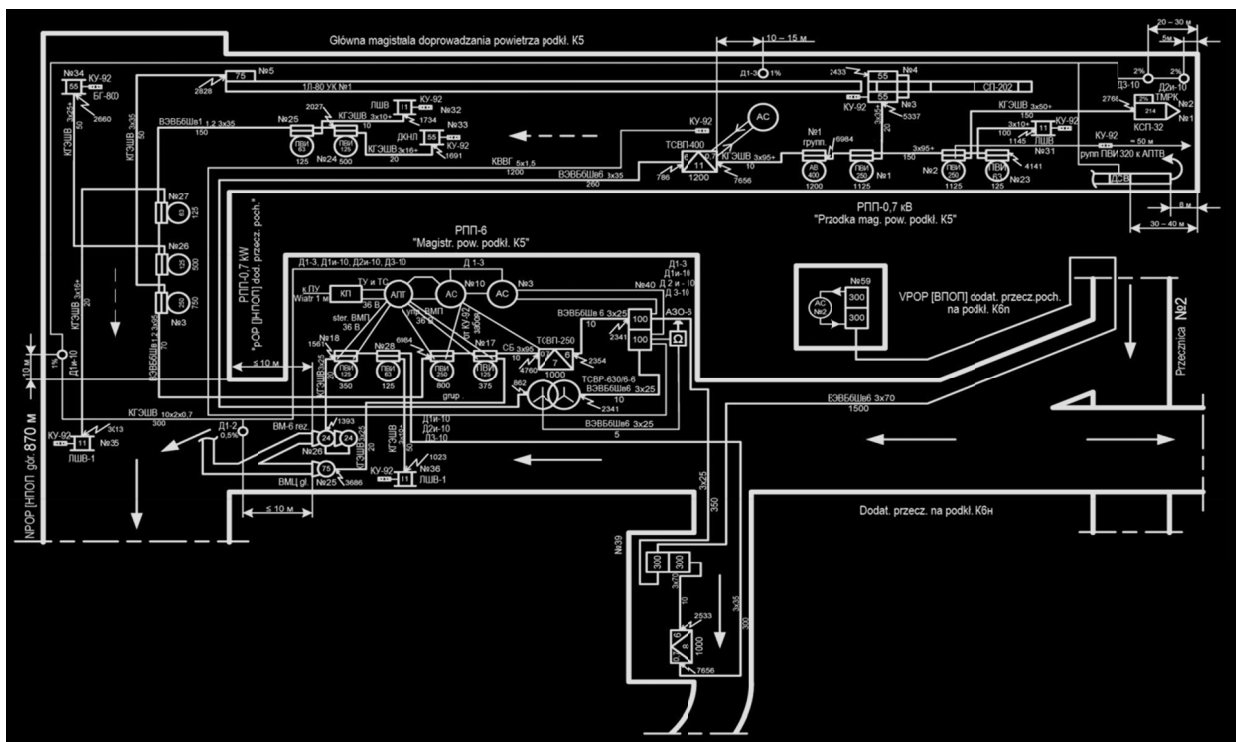
Rys. 1. Schemat zasilania elektrycznego pochylni obchodowej ściany w podkładzie K6n [7]

Na schemacie pokazanym na rysunku 2. WWO<sub>ROB</sub> typu VMEU-6 [ВМЭУ-6] i urządzenia technologiczne (kombajn EBGП [ЭБГП], przenośnik 1L-80 [1Л-80], kołowrót LVD-24 [ЛВД-24] itd.) znajdują się we wspólnym obwodzie zasilania elektrycznego, ale WWO<sub>REZ</sub> jest zasilany z osobnej stacji z innego poziomu. Schemat zasilania elektrycznego systemu przewietrzania i technologicznych odbiorników prądu przedstawiony na rysunku 3. jest podobny do

schematu zasilania przedstawionego na rysunku 2., z tą różnicą, że dla wyrobiska ślepego o długości ponad 200 m zastosowano osobne zasilanie urządzeń technologicznych za pomocą transformatora rozdzielczego TSVR-630/6-6 [ТСВР-630/6-6] i stacji transformatorowej TSVP-400 [ТСВП-400], co wyklucza oddziaływanie zabezpieczeń w sieci niskiego napięcia na proces przewietrzania.



Rys. 2. Schemat zasilania elektrycznego pochylni transportowej ściany nr 8 podkładu 12' [7]



Rys. 3. Schemat zasilania elektrycznego przekopu głównej wentylacji doprowadzającej powietrze do wyrobisk podkładu K5 [7]

### 3. WYNIKI BADAŃ

Analiza wyników badań pokazała, że urządzenia elektryczne, charakteryzujące się częstymi awariami, są podłączone do sieci niskiego napięcia zasilania elektrycznego, przy czym uszkodzeniom najczęściej ulegają kable niskiego napięcia, urządzenia zabezpieczeń gazowych, urządzenia uruchamiające i silniki elektryczne. Przerwy w pracy WWO<sub>ROB</sub> miały miejsce 172 razy, z czego 134 to niesprawności spowodowane uszkodzeniami sieci niskiego napięcia systemu zasilania elektrycznego, w tym 61 – z powodu upływu prądu do ziemi, co stanowi 35,5% całkowitej liczby wyłączenia WWO<sub>ROB</sub> z powodu niesprawności sieci niskiego i wysokiego napięcia systemu zasilania, i 45,5% – z powodu niesprawności tylko sieci niskiego napięcia systemu zasilania. Należy zaznaczyć, że całkowita liczba uszkodzeń wyłącznie urządzeń elektrycznych systemu przewietrzania to 53 przypadki, co stanowi 10,6% ogólnej liczby niesprawności i świadczy o wyższej niezawodności eksploatacyjnej urządzeń elektrycznych systemu zasilania elektrycznego WWO w porównaniu z urządzeniami systemu zasilania elektrycznego technologicznych odbiorników prądu w pochylni.

Dane statystyczne badań pokazały, że jednoczesne odłączenie roboczego i rezerwowego WWO z powodu niesprawności systemu zasilania elektrycznego miało miejsce 64 razy. Przy czym 45 przypadków zaobserwowano na odcinku, gdzie obydwa WWO były podłączone do jednego systemu zasilania elektrycznego, z jednej PRS. Duża część upływów prądu

(13 z 14), z powodu których jednocześnie odłączane były WWO<sub>ROB</sub> i WWO<sub>REZ</sub>, miała miejsce na odcinku, gdzie obydwa WWO podłączone były do jednego systemu zasilania elektrycznego z technologicznymi odbiornikami prądu z jednej PRS. Taki schemat zasilania elektrycznego został zrealizowany na odcinku pochylni obchodowej ściany rozładunkowej podkładu K6n (rys. 1).

Dla dwóch innych odcinków, gdzie schematy z zasilaniem WWO<sub>REZ</sub> i WWO<sub>ROB</sub> są realizowane z osobnych stacji zasilania, upływy prądu w obwodzie zasilania WWO<sub>ROB</sub> nie mają wpływu na pracę WWO<sub>REZ</sub>. Na tych odcinkach jednoczesne odłączenie roboczego i rezerwowego WWO z powodu niesprawności systemu zasilania elektrycznego niskiego napięcia zaobserwowano tylko raz.

Należy zwrócić uwagę na to, że istotną przyczyną naruszenia zasilania elektrycznego WWO<sub>ROB</sub> na rozpatrywanych odcinkach są upływy prądu do ziemi, mające miejsce nie w obwodzie zasilania WWO, a w technologicznych odbiornikach prądu przodka, powodujące odłączenie automatycznego wyłącznika PRS. Ich liczba wyniosła 59, co stanowi 96,7% liczby upływów prądu, powodujących zatrzymanie WWO<sub>ROB</sub>. Nabiera to szczególnego znaczenia dla odcinków, gdzie roboczy i rezerwowy WWO są podłączone do jednego obwodu zasilania razem z technologicznymi odbiornikami prądu przodka i upływy prądu prowadzą w nich do wyłączenia od razu obydwu WWO.

Rezultaty przeprowadzonych badań zostały przedstawione w tabeli 1.

**Tabela 1.**

#### Rezultaty obserwacji pracy systemów lokalnej wentylacji trzech wyrobisk ślepych kopalni [7]

№ lp.	Nazwa wskaźnika	Dane dotyczące wyrobiska				
		Pochylnia obchodowa ściany rozładunkowej podkładu K6n	Pochylnia przenośnikowa ściany nr 8 podkładu I2'	Przekop główny wentylacyjny do podkładu K5	Łącznie dla trzech wyrobisk	Średnia na wyrobisko
1	Ogólna liczba wyłączeń roboczego WWO	55	78	31	172	57,3
2	Liczba wyłączeń roboczego WWO z powodu upływów prądu do ziemi	14	31	16	61	20,3
3	Liczba wyłączeń roboczego WWO z powodu prądów zwarciovych	9	13	2	23	7,6
4	Liczba jednoczesnych wyłączeń roboczego i rezerwowego WWO	45	12	7	64	21,3
5	Liczba włączeń rezerwowego WWO	12	63	35	110	36,7
6	Liczba jednoczesnych odłączeń roboczego i rezerwowego WWO	13	0	1	14	4,7
7	Ogólna liczba niesprawności wyłącznie urządzeń elektrycznych systemu lokalnej wentylacji	19	21	13	53	17,7
8	Czas trwania przerw w zasilaniu elektrycznym roboczego WWO, h	149,0	203,0	116,3	468,3	156,1
9	Czas trwania przerw w zasilaniu elektrycznym roboczego WWO z powodu niesprawności systemu zasilania wysokiego napięcia, h	100,3	151,4	69,5	323,5	107,8
10	Czas trwania pracy rezerwowego WWO z powodu niesprawności zasilania elektrycznego roboczego WWO, h	27,4	151,4	103,5	280,3	93,4



Czynności wpływające na obniżenie lub usunięcie wyżej wskazanych przyczyn powinny być ukierunkowane na podwyższenie bezawaryjności systemu zasilania elektrycznego poprzez podwyższenie stopnia niezawodności pracy poszczególnych elementów. Praktycznie to zadanie jest jednak trudne do wykonania i w najbliższym czasie raczej nie będzie możliwe wprowadzenie do kopalni urządzeń elektrotechnicznych, urządzeń elektrycznych i kabli, dla których częstotliwość występowania niesprawności jest bliska zeru.

Z drugiej strony, jak pokazuje praktyka, do naruszenia pracy WWO prowadzą nie tylko same niesprawności, a ich konsekwencje – awarie w urządzeniach technologicznych i działanie zabezpieczeń mających na celu ich uniknięcie w przypadku selektywności ich pracy (wybiórczego wyłączenia).

Podczas gdy urządzenia zabezpieczeń nadprądowych, wbudowane do każdego urządzenia komutacyjnego, zapewniają selektywne odłączenie uszkodzonego elementu, to w istniejących na chwilę obecną urządzeniach zabezpieczeń przed upływami prądu do ziemi, wbudowywanych do stacji transformatorowych i oddziałujących na jej wyłącznik automatyczny, taka funkcja nie została przewidziana. Do tego konstrukcja eksploatowanych w kopalniach stacji transformatorowych umożliwia podłączenie i zabezpieczenie przed upływami prądu do ziemi tylko jednego przyłączonego urządzenia. Dlatego przy upływie prądu urządzenie zabezpieczające powoduje wyłączenie wszystkich odbiorników prądu podłączonych do tej stacji. Nawet jeżeli każdy rozrusznik posiada przekaźnik blokujący upływu prądu, potrzebny jest czas na zlokalizowanie uszkodzonego odcinka sieci i usunięcie przyczyny upływu prądu oraz na ponowne włączenie ręczne automatycznego wyłącznika stacji i uruchomienie rozrusznika WWO.

Powstaje pytanie, o ile razy zwiększy się niezakłócone działanie systemu przewietrzania, jeżeli stworzone zostaną warunki „niezależności” zasilania i działania zabezpieczeń przed upływami prądu do ziemi dla linii zasilania elektrycznego WWO i technologicznych odbiorników prądu, aby upływ prądu w systemie zasilania elektrycznego technologicznych odbiorników prądu nie powodował odłączenia napięcia z WWO. Dlatego celowe jest rozpatrzenie i matematyczne uzasadnienie z punktu widzenia teorii niezawodności pracy systemu zasilania elektrycznego odrębnej wentylacji (ZOW) w zestawie z urządzeniami technologicznymi przodka oraz aparaturą i urządzeniami zabezpieczeń i sterowania.

Modelowanie ZOW przodków rozpoczyna się od sporządzenia schematu strukturalnego niezawodności, tj. poglądowego przedstawienia warunków zdol-

ności roboczej systemu. Przy tworzeniu schematów strukturalnych niezawodności ZOW przodków należy uwzględnić niżej wymienione cechy szczególne podziemnych sieci elektrycznych.

Jak zauważono w publikacjach [2-4] i potwierdzono obserwacjami, większość niesprawności (ponad 90%) przypada na część układu niskiego napięcia, co daje podstawę do nieuwzględniania niesprawności części powierzchniowej układu wysokiego napięcia systemu zasilania, przynajmniej do centralnej podziemnej stacji (CPS), tj. podstawę do uznania układu zasilania do CPS za całkowicie niezawodny.

Praktycznie wszystkie odbiorniki prądu w przodkach są połączone jednym łańcuchem technologicznym w funkcjonalny system, co pozwala uznać je, z punktu widzenia niezawodności, za połączone szeregowo. Dodatkowych odbiorników prądu, które nie mają bezpośredniego wpływu na funkcjonowanie ZOW, przy obliczeniach niezawodności można nie uwzględniać.

W celu zbudowania matematycznego modelu niezawodności działania ZOW opracowano schemat strukturalny zasilania elektrycznego odcinka i jego model probabilistyczny (rys. 4). Na bezawaryjność systemu zasilania elektrycznego lokalnej wentylacji ma również wpływ aparatura zabezpieczeń gazowych. Urządzenia APTW [*AITTB, urządzenia kontroli przepływu powietrza w wyrobiskach ślepych – przyp. tłumacza*], które nie mają wpływu na zasilanie elektryczne systemu lokalnej wentylacji, nie zostały uwzględnione w danym modelu. Z punktu widzenia wpływu sytuacji awaryjnych roboczy i rezerwowy WWO są połączone szeregowo i przedstawione jako jeden blok strukturalny nr 3.

Prawdopodobieństwo bezawaryjnej pracy układu zasilania elektrycznego lokalnej wentylacji  $P_{SWL}$  w tym przypadku będzie mieć postać:

$$P_{CMH}(t) = \prod_{i=1}^5 P_i(t), \quad (1)$$

gdzie:

$P_i(t)$  – prawdopodobieństwo bezawaryjnej pracy bloku strukturalnego  $i$  w czasie  $t$ ,  $i = 1...5$ :

$$P_i(t) = e^{-\omega_i t},$$

gdzie:

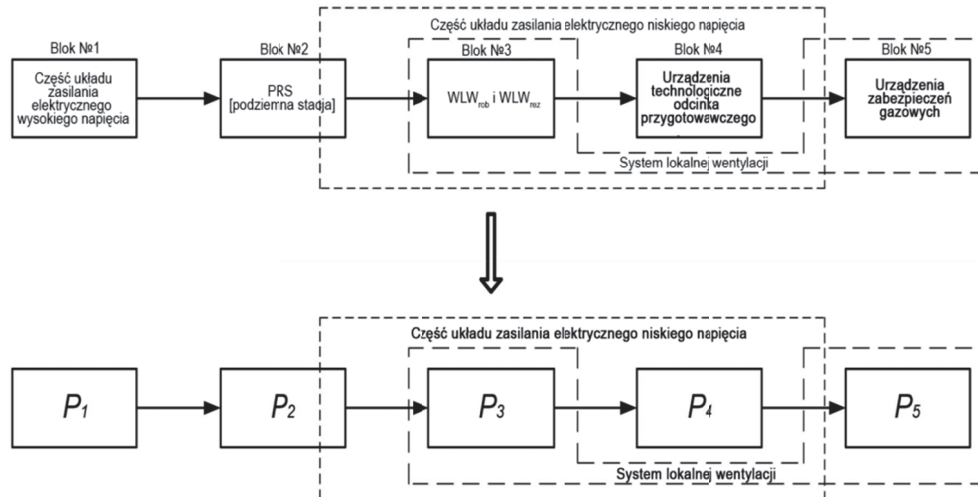
$\omega_i$  – intensywność strumienia uszkodzeń bloku strukturalnego  $i$ .

Dla uproszczenia formy zapisu wzorów i wyrażeń matematycznych  $P(t)$  zastąpione zostanie przez  $P$ .

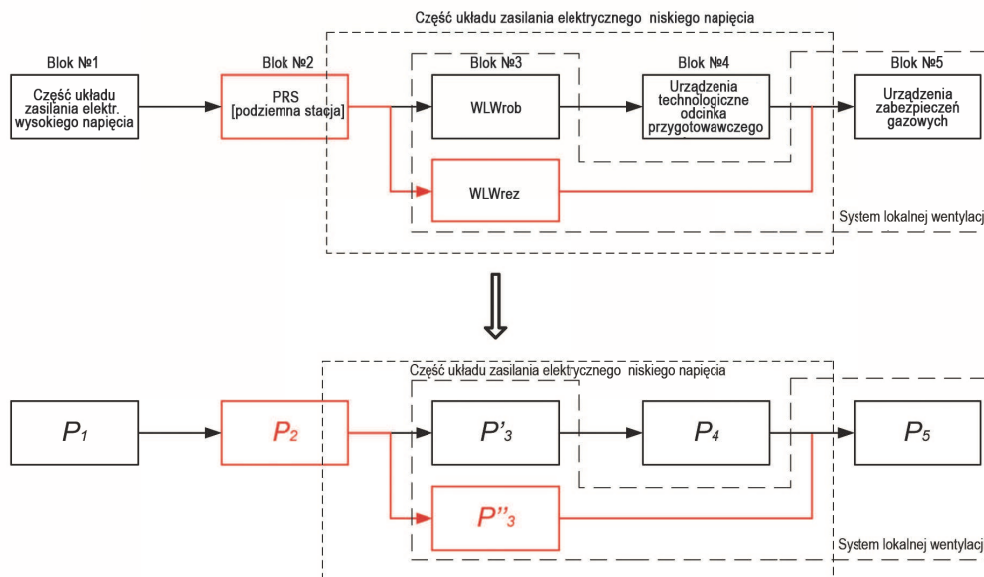
Z uwagi na to, że najmniej niezawodnym blokiem strukturalnym z pokazanych na schemacie na rys. 4. jest blok nr 4 (Urządzenia technologiczne odcinka przygotowawczego), celowe jest wykluczenie lub przynajmniej obniżenie wpływu uszkodzeń i sytuacji awaryjnych w urządzeniach technologicznych na pracę WWO – priorytetowego odbiornika pod

względem bezawaryjnego działania zasilania elektrycznego.

Zmodyfikowany schemat strukturalny zasilania elektrycznego odcinka przygotowawczego i jego model probabilistyczny w tym przypadku przyjmie formę przedstawioną na rys. 5.



Rys. 4. Schemat strukturalny zasilania elektrycznego odcinka przygotowawczego i jego model probabilistyczny (opracowanie własne)



Rys. 5. Zmodyfikowany schemat strukturalny zasilania elektrycznego odcinka przygotowawczego i jego model probabilistyczny (opracowanie własne)

Przy tym, uwzględniając szeregowe i równoległe połączenie elementów oraz zgodnie z ustaleniami poczynionymi w publikacjach [3, 5], prawdopodobieństwo bezawaryjnej pracy układu lokalnej wentylacji jest równe:

$$P'_{CMII} = P_1 * P_2 * [1 - (1 - P'_3 * P_4)(1 - P''_3)] * P_5 \quad (2)$$

Po modyfikacji uzyskujemy:

$$P'_{CMII} = P_1 * P_2 * P'_3 * P_5 + P_1 * P_2 * P'_3 * P_4 * P_5 - P_1 * P_2 * P'_3 * P_4 * P''_3 * P_5 \quad (3)$$

Skuteczność takiej zmiany konfiguracji ZOW może zostać oceniona na podstawie zwiększenia prawdopodobieństwa jej bezawaryjnego działania, zapewnionego dzięki wprowadzeniu zmiany. Oceny tej można dokonać za pomocą wskaźnika  $K_{ZOW} [K_{CMII}]$ , wskazującego zwiększenie prawdopodobieństwa bezawaryjnej pracy zmodyfikowanego ZOW w stosunku do prawdopodobieństwa bezawaryjnej pracy układów działających w chwili obecnej. W schematach zasilania elektrycznego zbudowanych według algorytmu (3) wskaźnik zwiększenia prawdopodobieństwa bezawaryjnego działania zmodyfikowanego ZOW jest tym wyższy, im „bardziej niezależny” pod względem zabezpieczeń jest układ zasilania elektrycznego wentylacji od układu zasilania urządzeń technologicznych.

Byłoby to najbardziej aktualne wtedy, gdyby taką „niezależność” (selektywność wyłączenia) posiadały ogólnosięciowe urządzenia zabezpieczenia przed wpływem prądu do ziemi. Dlatego, jeżeli do istniejącego algorytmu działania zabezpieczeń przed wpływami prądu zostanie wprowadzona funkcja selektywności, wówczas wskaźnik  $K_{ZOW} [K_{CMII}]$  faktycznie określi skuteczność jej działania przy eksploatacji w ogólnym układzie zasilania elektrycznego wentylatorów lokalnej wentylacji i technologicznych odbiorników prądu. Zwiększenie prawdopodobieństwa bezawaryjnej pracy przy wprowadzeniu zmienionego algorytmu zasilania elektrycznego ZOW, wyrażone za pomocą wskaźnika  $K_{ZOW} [K_{CMII}]$ , przyjmie następującą postać:

$$K_{CMII} = \frac{P'_{CMII}}{P_{CMII}}, \quad (4)$$

$$K_{CMII} = \frac{P_1 \cdot P_2 \cdot P_3'' \cdot P_5 + P_1 \cdot P_2 \cdot P_3' \cdot P_4 \cdot P_5 - P_1 \cdot P_2 \cdot P_3' \cdot P_4 \cdot P_3'' \cdot P_5}{P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 \cdot P_5} \quad (5)$$

Po modyfikacji uzyskujemy:

$$K_{CMII} = \frac{P_3'' + P_3' \cdot P_4 - P_3' \cdot P_4 \cdot P_3''}{P_3 \cdot P_4}, \quad (6)$$

uwzględniając, że  $P_3 \approx (P_3')^2$  i  $P_3 \approx (P_3'')^2$  lub  $P_3 \approx \sqrt{P_3'}$  i  $P_3 \approx \sqrt{P_3''}$  oraz  $P_4 < 1$ ,  $P_3'' < 1$ ,  $P_3' < 1$  i  $P_3 < 1$ , to wyrażenie dla  $K_{CMII}$  zostaje uproszczone do postaci:

$$K_{CMII} = \frac{1}{P_3'' \cdot P_4} + \frac{1}{P_3'} - 1$$

lub

$$K_{CMII} = \frac{1}{\sqrt{P_3''} \cdot P_4} + \frac{1}{\sqrt{P_3'}} - 1 > 1. \quad (7)$$

Tym sposobem, przy wprowadzeniu nowej zasady budowy ZOW, zwiększenie prawdopodobieństwa bezawaryjnej pracy ZOW będzie wynosić więcej niż 1

– oznacza to, że prawdopodobieństwo jego bezawaryjnej pracy zawsze się zwiększa. Znając charakterystyki bezawaryjnej pracy ZOW, można obliczyć zwiększenie bezpieczeństwa wybuchowego wyrobiska ślepego przy realizacji zasady selektywności zabezpieczeń przed prądem upływowym.

Wybuch w środowisku metanowym to przypadkowe zdarzenie, które może mieć miejsce przy wspólnym zajściu dwóch niezależnych zdarzeń: powstania mieszaniny wybuchowej przy zagazowaniu wyrobisk i pojawienia się źródła zapłonu. Prawdopodobieństwo wybuchu można określić na podstawie wzoru:

$$Q_{B3p} [Q_{wyb}] = Q_{3ar} [Q_{zag}] \cdot Q_{uo} [Q_{zap}], \quad (9)$$

gdzie:

- $Q_{B3p} [Q_{wyb}]$  – prawdopodobieństwo wybuchu w wyrobisku ślepym,
- $Q_{3ar} [Q_{zag}]$  – prawdopodobieństwo zagazowania wyrobiska,
- $Q_{uo} [Q_{zap}]$  – prawdopodobieństwo pojawienia się źródła zapłonu w urządzeniach lub kablach.

W przypadku zastosowania wyłączenia zabezpieczającego lub wyłączenia zabezpieczającego z selektywnością zabezpieczeń przed prądem upływowym energia elektryczna jest odłączana przed uszkodzeniem kabla i urządzeń elektrycznych albo w miejscu, w którym się one znajdują, następuje zagazowanie. Można przyjąć, że przy uszkodzeniu układu wyłączania zabezpieczającego wybuch jest możliwy z prawdopodobieństwem:

$$Q'_{B3p} [Q'_{wyb}] = Q_{3ar} [Q_{zag}] \cdot Q_{uo} [Q_{zap}] \cdot Q_o [Q_{mwz}], \quad (10)$$

gdzie:

- $Q'_{B3p} [Q'_{wyb}]$  – prawdopodobieństwo wybuchu przy niezadziałaniu wyłączenia zabezpieczającego,
- $Q_o [Q_{mwz}]$  – prawdopodobieństwo niezadziałania wyłączania zabezpieczającego.

Zmniejszenie prawdopodobieństwa wybuchu można ocenić według stosunku:

$$k = Q_{B3p} [Q_{wyb}] / Q'_{B3p} [Q'_{wyb}] = 1 / Q_o [Q_{mwz}] \quad (11)$$

Ze wzoru (1) można wnioskować, że prawdopodobieństwo wybuchu w wyrobisku ślepym jest odwrotnie proporcjonalne do prawdopodobieństwa niezadziałania wyłączania zabezpieczającego. Praktyczną wartość przedstawia prawdopodobieństwo bezawaryjnego wyłączania zabezpieczającego, tj. wielkość  $P_o [P_{bwz}]$  wyrażana wzorem:

$$P_o [P_{bwz}] = 1 - Q_o [Q_{mwz}]. \quad (12)$$

Wówczas krotność zmniejszenia prawdopodobieństwa wybuchu wynosi:

$$k = 1 / (1 - P_o [P_{bwz}]) \quad (13)$$

Konsekwentnie prawdopodobieństwo wybuchu w wyrobisku ślepych jest również odwrotnie proporcjonalne do prawdopodobieństwa bezawaryjnej pracy układu wyłączania zabezpieczającego.

Stosując analogiczne rozważania, można obliczyć wielokrotność zmniejszenia prawdopodobieństwa wybuchu przy zastosowaniu zasady selektywnego wyłączania uszkodzonego przyłączenia. Jeżeli przyjmując, że  $P'_o [P'_{bsz}]$  – to prawdopodobieństwo bezawaryjnej pracy selektywnego zabezpieczenia przed wpływem prądu do ziemi – wówczas krotność zmniejszenia prawdopodobieństwa wybuchu przyjmie postać:

$$k' = 1 / (1 - P'_o [P'_{bsz}]) \quad (14)$$

Analizując wyrażenia (10-14), można zauważyć, że prawdopodobieństwo wybuchu przy bezawaryjnej pracy układu wyłączania zabezpieczającego zmniejsza się zawsze, a przy zastosowaniu wyłączania zabezpieczającego z selektywną zasadą działania oczywiste jest, że jego wartość będzie znacznie niższa. Nawet przy normowanym prawdopodobieństwie bezawaryjnej pracy tradycyjnego zabezpieczenia przed wpływem prądu do ziemi, którego niezawodność jest reglamentowana [6], oraz niezawodności urządzeń elektrycznych, wchodzących w układ zasilania elektrycznego wentylacji, zabezpieczenie selektywne powinno zwiększyć niezawodność zasilania elektrycznego i bezpieczeństwo wybuchowe wyrobisk ślepych w kopalniach. Otrzymane zależności matematyczne zostały potwierdzone obliczeniami na podstawie rezultatów obserwacji w warunkach eksploatacji. Rezultaty obliczeń znajdują się w tabeli 2.

**Tabela 2.**

**Wskaźniki obliczeniowe niezawodności zasilania elektrycznego ZOW wyrobisk ślepych w kopalni**  
(opracowanie własne)

Lp.	Nazwa przedka chodnikowego kopalni	Wskaźniki niezawodności zasilania elektrycznego SWL									
		istniejący układ zasilania elektrycznego					układ zasilania elektrycznego z zastosowaniem selektywnej zasady działania zabezpieczenia przed wpływem prądu				
		Intensywność strumienia uszkodzeń, 1/h	Średnia ilość wykonanej pracy między uszkodzeniami, $\bar{t}_{CMH}$ , h	Średni czas regeneracji, $\bar{T}_{BCMH}$ , h	Długość przerw w zasilaniu elektrycznym ZOW na rok, h	Prawdopodobieństwo bezawaryjnego działania w ciągu 720 h, P(720)	Intensywność strumienia uszkodzeń, 1/h	Średnia ilość wykonanej pracy między uszkodzeniami, $\bar{t}'_{CMH}$ , h	Średni czas regeneracji, $\bar{T}'_{BCMH}$ , h	Długość przerw w zasilaniu elektrycznym ZOW na rok, h	Prawdopodobieństwo bezawaryjnego działania w ciągu 720 h, P(720)
1	Pochylnia obchodowa ściany rozładunkowej podkładu K6n	$2,67 \times 10^{-3}$	374,5	3,13	73,2	0,146	1,33E-03	753,9	3,59	41,7	0,385
2	Pochylnia przenośnikowa ściany nr 8 podkładu I2'	$1,19 \times 10^{-3}$	840,5	3,56	37,1	0,425	1,18E-03	844,6	3,57	37,0	0,426
3	Przekop główny wentylacyjny do podkładu K5	$1,12 \times 10^{-3}$	894,7	3,57	34,9	0,447	1,12E-03	896,3	3,57	34,9	0,448

Analizując dane z tabeli 2., można wywnioskować, że tylko dla odcinka wskazanego na rysunku 1. ma miejsce znaczne zwiększenie poziomu bezawaryjnego działania zasilania elektrycznego ZOW przy wprowadzeniu selektywnej zasady zabezpieczenia przed wpływem prądu. Jest to uwarunkowane tym, że w wyjściowym układzie zasilania elektrycznego roboczy i rezerwowy WWO są zasilane z jednej PRS i jednocześnie są wyłączane przez zabezpieczenia przed wpływem prądu do ziemi, a w schemacie z selektywnością zabezpieczenia przed

wpływem prądu wentylator rezerwowy będzie działać i nie zostanie wyłączony przez zabezpieczenia, jeżeli awaria będzie miała miejsce w linii technologicznych odbiorników prądu.

Jednocześnie za pomocą obliczeń otrzymano wskaźniki  $K_{ZOW} [K_{CMT}]$  za miesiąc działania (720 godzin) oraz wskaźniki zwiększenia bezpieczeństwa wybuchowego przy zastosowaniu tradycyjnego zabezpieczenia i zabezpieczenia selektywnej zasady działania. Uzyskane wartości przedstawiono w tabeli 3.



Tabela 3.

**Wartości obliczeniowych wskaźników zwiększenia bezawaryjnego działania zasilania elektrycznego WWO<sub>ROB</sub> ZOW i zwiększenia bezpieczeństwa wybuchowego wyrobisk ślepych (opracowanie własne)**

Lp.	Nazwa przodka chodnikowego	$\frac{P'_{\text{ВМП}}(720)}{P_{\text{ВМП}}(720)}$	$\frac{P'_{\text{СМП}}(720)}{P_{\text{СМП}}(720)}$	$k$	$k'$
1	Pochylnia obchodowa ściany rozładunkowej podkładu K6n	1,14	2,63	1,17	1,63
2	Pochylnia przenośnikowa ściany nr 8 podkładu I2'	2,71	1,03	1,74	1,74
3	Przekop główny wentylacyjny do podkładu K5	1,43	1,01	1,81	1,81

Dane tabeli 3. świadczą o znacznym zwiększeniu bezpieczeństwa wybuchowego wyrobiska ślepego odcinka nr 1 przy zastosowaniu selektywnego zabezpieczenia przed upływem prądu do ziemi.

Na odcinkach nr 2 i 3 zastosowano głęboką redundancję WWO<sub>ROB</sub>, tj. WWO<sub>ROB</sub> i WWO<sub>REZ</sub> są podłączone do dwóch osobnych stacji transformatorowych i stanowią niezależne układy zasilania elektrycznego niskiego napięcia. Przy tym wprowadzenie selektywnego zabezpieczenia przed upływem prądu w obwodzie WWO<sub>ROB</sub> nie powoduje znacznego zwiększenia ogólnego bezawaryjnego działania zasilania elektrycznego ZOW i bezpieczeństwa wybuchowego redundantowanych pod względem wentylacji wyrobisk ślepych. Zwiększenia bezawaryjnego działania zasilania elektrycznego WWO<sub>ROB</sub> należy jednak oczekiwać zawsze, a w niektórych przypadkach – o ponad 2 razy.

#### 4. PODSUMOWANIE

1. Istotną przyczyną naruszeń w działaniu zasilania elektrycznego WWO są upływy prądu do ziemi, które stanowią 35% całkowitej liczby niesprawności, przy czym 96,7% upływów prądu przypada na urządzenia elektryczne układu zasilania technologicznych odbiorników prądu.
2. W tradycyjnym układzie zasilania ZOW z WWO<sub>REZ</sub> zasilanym z jednej stacji transformatorowej razem z WWO<sub>ROB</sub> bez selektywnego działania zabezpieczeń przed upływem prądu naruszenia przewietrzania mają miejsce co najmniej cztery razy częściej w porównaniu z układami redundancji WWO zasilanymi z różnych stacji transformatorowych.
3. Liczba uszkodzeń urządzeń elektrycznych układów lokalnej wentylacji stanowi nie więcej niż 11% całkowitej liczby uszkodzeń w układzie zasilania elektrycznego wyrobiska ślepego, co świadczy o celowości i konieczności oddzielenia zasilania elektrycznego układów lokalnej wentylacji od układu

zasilania elektrycznego technologicznych odbiorników prądu.

4. Uzasadniona jest metodologia określania bezpieczeństwa wybuchowego wyrobiska ślepego na podstawie prawdopodobieństwa bezawaryjnego działania układu wyłączania zabezpieczającego, które są wartościami odwrotnie proporcjonalnymi.
5. Udowodniono, że prawdopodobieństwo bezawaryjnego działania WWO i zasilania elektrycznego ZOW jest wyższe przy zastosowaniu selektywnej zasady odłączania uszkodzonego elementu niż przy zastosowaniu tradycyjnego zabezpieczania przed upływem prądu do ziemi, w niektórych przypadkach – nawet ponad dwukrotnie.
6. Udowodniono, że przy zastosowaniu układu wyłączenia zabezpieczającego z reglamentowanymi wskaźnikami niezawodności bezpieczeństwo wybuchowe wyrobisk ślepych zawsze się zwiększa, a przy zastosowaniu selektywnej zasady odłączania uszkodzonego elementu w schematach bez głębokiej redundancji wentylacji – zwiększa się co najmniej 1,63 razy.

#### Literatura

1. Bołdyriew W. I.: *Aparatura wyłączania zabezpieczającego energii elektrycznej przy naruszeniu przewietrzania wyrobisk ślepych kopalni gazowych*. W: W. I. Bołdyriew, W. W. Chimicz, *Współczesne urządzenia elektryczne zabezpieczone przed wybuchem: Tezy wykładów na IV Ogólnozwiązkowej Konferencji Naukowo-Technicznej*, 1975, s. 33-34.
2. Tkaczuk S. P., Kołosiuk W. P., Ichno S. A.: *Bezpieczeństwo wybuchowe urządzeń górniczych*, Osnova 2000, s. 695.
3. Gimelszejn L. J.: *Eksplatacja wentylatorów wentylacji odrębnej*, Niedra 1967.
4. Murawiov W. P., Razgildiejew G. I.: *Niezawodność układów zasilania elektrycznego i urządzeń elektrycznych podziemnych wyrobisk kopalni*, Niedra 1970, s. 144.
5. Bykow A. I., Waniejew B. N., Głównyj W. D. i in.: *Niezawodność bezpiecznych wybuchowo i górniczych urządzeń elektrycznych*, Niedra 1979, s. 302.
6. *Górnictwo urządzeń zabezpieczające przed upływem prądu dla sieci o napięciu do 1200 V. Ogólne warunki techniczne: GOST 22929*, Wydawnictwo standardów, Moskwa 1982 (Państwowy standard ZSRR, obowiązujący od 01.01.1979).
7. Dokumentacja techniczna sieci zasilania, niepublikowana.

Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów.