ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1990

Seria: GÓRNICTWO z. 184 Nr kol. 1065

Florian KRASUCKI

METODY I KRYTERIA OCENY BEZPIECZEŃSTWA ELEKTRYFIKACJI PODZIEMI KOPALŃ

Streszczenie. W pracy przedstawiono podstawy i krytyczną analizę oraz omówiono potrzebę i możliwości obiektywnej oceny poziomu bezpieczeństwa (zagrożeń elektrycznych) w elektryfikowanych i automatyzowanych kopalniach węgla kamiennego. Zwrócono uwagę na konieczność nowego spojrzenia na działania profilaktyczne - systemowego podejścia do zagrożeń i stanu bezpieczeństwa w kopalniach - z uwzględnieniem losowego charakteru i współzależności niezawodności wyposażenia technicznego, warunków środowiskowych i czynników psychofizycznych załogi.
Przedstawiono przegląd metod deterministycznych i probabilistycznych uzupełnianych oceną ekspertów w zakresie możliwości oceny zagrożeń elektrycznych, a w szczególności rażeń prądem elektrycznym i zapłonów mieszaniny metanowo-powietrznej. Podkreślono decydujące znaczenie problemów niezawodności eksploatacyjnej i kompatybilności sieci i urządzeń elektrycznych w danym środowisku, w tym wzrastającą rolę kompatybilności elektromagnetycznej we współczesnych kopalniach stosujących rozbudowane elektroniczne systemy dyspozytorskie. Podano przykładowe informacje o spotykanych w literaturze próbach stosowania nowych metod i kryteriów oceny.

1. WSTĘP

Bezpieczeństwo jest głównym kryterium oceny możliwości i skutków działania człowieka w zakładzie górniczym. Wymagany poziom bezpieczeństwa można osiągnąć stosując odpowiednią ochronę przed zagrożeniami oraz zabezpieczenia od skutków zagrożeń. Istotnym wymaganiem jest zapewnienie wysokiej jakości dostarczanych urządzeń technicznych, dostosowanych do górniczych warunków środowiskowych, tzn. w wykonaniu środowiskowym górniczym.

Ważnym czynnikiem ogólnego stanu bezpieczeństwa w kopalni jest występowanie zagrożeń elektrycznych [4].
Elektryfikacja i automatyzacja kopalń wiąże się nie tylko z niebezpieczeństwem porażeń prądem, lecz także ze szkodliwym oddziaływaniem pól elektromagnetycznych oraz zagrożeniem wybuchowym, pożarowym i w robotach strzelniczych, a także z niebezpieczeństwem urazów mechanicznych cieplnych i innych.
Uzyskanie bezwzględnego (pełnego) bezpieczeństwa w kopalni nie jest możliwe. Tym bardziej istotna jest więc możliwość oceny bezpieczeństwa oraz wielokryterialna optymalizacja w tym zakresie.

Niezbędne są podejmowane a priori działania o różnym charakterze, pozwalające uzyskać "wymagany" poziom bezpieczeństwa, który można osiągnąć stosując odpowiednią ochronę przed zagrożeniami oraz zabezpieczenia od skutków zagrożeń. Należy dążyć do rozwiązań optymalnych, możliwych na danym etapie rozwoju nauki i techniki - zależnie od przyjętych założeń, poziomu odniesienia, warunków realizacji i nieuniknionych ograniczeń (czynników materialnych i ludzkich). Jednym z podstawowych problemów w tym zakresie są metody analizy i w miarę obiektywnej oceny zagrożeń i ich skutków.

Niezbędna jest odpowiedź na pytanie: co należy uznać jako wymagany poziom bezpieczeństwa (lub dopuszczalny jeszcze stan zagrożenia), który można praktycznie osiągnąć.
Dotychczas oceny te opierają się głównie na określeniach i opisach werbalnych - na kryteriach o charakterze intuicyjnym.

2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA PROBLEMU

Zagrożeniem nazywamy wystąpienie stanu (sytuacji) niebezpiecznego dla ludzi, urządzeń lub środowiska. Zagrożenia górnicze wynikają z przyczyn naturalnych lub są spowodowane działalnością człowieka. Najczęściej są one wynikiem wzajemnych uzależnień obu grup czynników.

Każde zagrożenie jest skutkiem wcześniej zaistniałej przyczyny (determinizm zdarzeń). Są to zdarzenia losowe, co oznacza w praktyce, że w tych samych warunkach i okolicznościach "te same" przyczyny nie zawsze powodują takie same skutki zagrożeń (np. nieszczęśliwy wypadek), a w szczególności, że takie same skutki mogą zaistnieć z określonym prawdopodobieństwem. Dla uzyskania bardziej obiektywnej oceny stosuje się więc zasadę determinizmu statystycznego.

Na stan bezpieczeństwa w kopalni mają wpływ wszystkie rodzaje występujących w niej zagrożeń. Tak więc w praktyce ocena poziomu bezpieczeństwa jest problemem złożonym, "obciążona" nie dającymi się uniknąć czynnikami subiektywnymi. Tradycyjnie w górnictwie na przykład analizuje się skutki zaistniałych nieszczęśliwych zdarzeń (tzw. badania wypadków) [11]. Głównym celem tych badań jest poznanie przyczyn i odtworzenie sytuacji poprzedzającej wypadek, określenie odpowiedzialności i winy odpowiednich osób oraz sformułowanie wniosków zmierzających do zapobieżenia powtórzenia się takiego wypadku w przyszłości. Jest to więc przyczynowo-skutkowa analiza głównie zdarzeń poprzedzających wypadek. Wynikiem analizy jest ocena a posteriori zdarzeń, które uznano za decydujące, natomiast zadaniem profilaktyki jest ocena a priori prawdopodobnych zagrożeń.

Bezpieczeństwo elektryfikacji zależy od bardzo wielu czynników - parametrów i cech techniczno-eksploatacyjnych urządzeń i układów oraz właściwości fizycznych, biologicznych i psychicznych załogi - w danych geologicz-

no-górniczych warunkach środowiskowych. Wiele z tych czynników i właściwości wchodzi w splot wzajemnych zależności i uwarunkowań, utrudniających (praktycznie często uniemożliwiających) obiektywną ocenę zagrożeń i podejmowanie właściwych działań profilaktycznych. Ważność oraz złożoność tej problematyki wymaga bardziej systemowego podejścia, z wykorzystaniem osiągnięć ogólnej teorii systemów i analizy systemowej. Wykorzystuje to rozwijająca się obecnie ogólna nauka o bezpieczeństwie, obejmująca metodologicznie teorię bezpieczeństwa systemów oraz teorię systemów bezpieczeństwa.

W systemowej teorii przyczynowości wypadkowej przyjmuje się, że poziom bezpieczeństwa jest wynikiem wzajemnego dostosowania zakładu pracy - celu jego istnienia i wielkości produkcji oraz strategii jej uzyskiwania - i warunków realizacji [7]. Systemowość podejścia polega na uwzględnieniu wielu przyczyn, ich zgrupowaniu i uporządkowaniu. Jest to jednak statyczne ujęcie zagadnienia. Kopalnia natomiast jest określonym quasi-autonomicznym i socjotechnicznym układem dynamicznym. Należy również uwzględnić fakt, że niektóre zdarzenia (wypadki) w konkretnym układzie są wynikiem szczególnego połączenia przyczyn, występujących także w dłuższym okresie czasu, jako skutek działań wewnętrznych i zewnętrznych. Powstaje więc problem sterowania autonomicznego (wewnętrznego) i parametrycznego (zewnętrznego) w takim układzie.

Istota zagadnienia oceny bezpieczeństwa nie leży więc w konkretnym nieszczęśliwym zdarzeniu (wypadku), lecz w pewnym zbiorze sytuacji "wypadkogennych" (zagrożeń), występujących permanentnie w danym układzie. W ujęciu systemowym uwzględnia się funkcje stanu wewnętrznego oraz sytuacje, w których on się znajduje. Obecnie już powszechnie przyjmuje się, że optymalizując funkcjonalną strukturę kopalni należy uwzględnić w niej rolę człowieka jako czynnika narażeniowo-zagrożeniowego, czyli że niezbędna jest kompatybilność człowieka i układu.

Współczesne kopalnie charakteryzują się dużym nagromadzeniem różnego rodzaju urządzeń technicznych, w tym elektrycznych, stosowanych w procesie bezpośrednio produkcyjnym oraz w innych pomocniczych procesach i ogniwach struktury kopalni. Oczywista jest współzależność bezpieczeństwa i niezawodności urządzeń, a uwidacznia się ona szczególnie wyraźnie w przypadku układów elektryfikacji i automatyzacji kopalń. Zawodność urządzeń, sprzyjająca powstawaniu zagrożeń górniczych, może być przyczyną lub skutkiem różnego rodzaju zakłóceń. W przypadku urządzeń elektrycznych duże znaczenie jakościowe i ilościowe (zakres i skutki) mają zakłócenia o charakterze elektromagnetycznym. Negatywne ich skutki ujawniają się przede wszystkim w nieprawidłowym działaniu układów tzw. słaboprądowych (sterowania, kontroli, sygnalizacji, łączności telefonicznej), decydujących często o stanie bezpieczeństwa w kopalni [5].

Z urządzeń elektrycznych stosowanych w kopalniach zagrożenia mogą wywoływać przede wszystkim urządzenia elektroenergetyczne, przeznaczone do przekształcania i przesyłania energii elektrycznej (obwody energoelektryczne) oraz przetwarzania jej w inne postacie użyteczne. Występują one praktycznie we wszystkich wyrobiskach i pomieszczeniach - we wszystkich ogniwach procesu technologicznego zelektryfikowanych kopalń.

Urządzenia (obwody) teleelektryczne, w których prąd elektryczny jest nośnikiem informacji i rozkazów, stosowane są w ograniczonym zakresie (przestrzeni) w układach sterowania, sygnalizacji i kontroli stanu pracy maszyn (automatyki lokalnej) oraz w układach kompleksowych, przede wszystkim w systemach dyspozytorskich. Największym z nich jest system kontroli stanu bezpieczeństwa w kopalni, w skład którego wchodzą podsystemy: kontroli parametrów fizycznych atmosfery kopalnianej i sterowania wentylacją, zabezpieczeń metanometrycznych i kontroli odmetanowania, wczesnego wykrywania pożarów endogenicznych i egzogenicznych, prognozowania tąpań, prognozowania wyrzutów i wypływów CO_2. Ponadto stosowane są systemy: kontroli zagrożeń tąpaniami, kontroli procesu produkcyjnego, kontroli ruchu załogi, nadzoru i zarządzania oraz system alarmowania i rozgłaszania. Sieć telekomunikacyjna w każdej kopalni składa się z sieci łączności ogólnokopalnianej, sieci łączności dyspozytorskiej oraz sieci łączności lokalnej.

Dotychczas w praktyce projektowania budowy i eksploatacji urządzeń i sieci elektrycznych poszczególne zagrożenia ocenia się zazwyczaj oddzielnie. Przykładowo, w zakresie zagrożeń rażenia prądem elektrycznym przyjmuje się, na podstawie badań teoretycznych i uogólnionych wyników doświadczeń praktycznych, pewne wartości jako kryteria bezpieczeństwa - przede wszystkim dopuszczalne wartości prądu i napięcia rażenia (dotykowe i krokowe) oraz natężenia pola elektromagnetycznego. Podobne kryteria opracowano np. dla obwodów iskrobezpiecznych. Nie mogą być one jednak wykorzystywane bezpośrednio do rozpoznawania i obiektywnej ogólnej oceny sytuacji niebezpiecznych oraz stosowania skutecznych działań profilaktycznych. Są to bowiem kryteria deterministyczne subiektywne, gdy natura zjawiska (zagrożeń) jest przypadkowa (losowa). Nie mogą być one odpowiednio zmierzone bądź obliczone, np. dla zaszłego już zdarzenia. Praktycznie nie można także uwzględnić obiektywnie dużego wpływu na nie czynników ludzkich i warunków środowiskowych, które w górnictwie mają często decydujący charakter. W układzie "człowiek-maszyna" słabym ogniwem jest najczęściej człowiek. Potwierdza to analiza wypadków w przodkach górniczych, z której wynika, że w ponad 60% są one zawinione przez obsługę (błędne czynności oraz nieprzestrzeganie przepisów i instrukcji).

W literaturze można spotkać wiele prób opracowania odpowiedniego modelu matematycznego oceny zagrożeń elektrycznych (bądź poziomu bezpieczeństwa), a tym samym i możliwości stosowania optymalnych metod i środków ochrony. Potrzeba takich opracowań dla górnictwa wynika również z obiektywnie zwiększających się zagrożeń elektrycznych powodowanych choćby po-

garszającymi się warunkami geologiczno-górniczymi w kopalniach węgla oraz zwiększeniem się wartości prądów i napięć, złożoności urządzeń i sieci elektroenergetycznych, automatyki sieciowej, układów telekomunikacyjnych (kontrolno-sterujących, dyspozytorskich systemów bezpieczeństwa górniczego).
W ogólności można stwierdzić, że istnieją dwa metodologiczne podejścia do zagadnienia, które umownie można by określić jako deterministyczna i probabilistyczny - w praktyce często uzupełniające się [6].

3. JAKOŚĆ URZĄDZEŃ JAKO KRYTERIUM OCENY BEZPIECZEŃSTWA EKSPLOATACJI

W analizie i ocenie możliwości elektryfikacji kopalń należy zwracać szczególną uwagę na współzależność bezpieczeństwa i jakości, a przede wszystkim niezawodności urządzeń technicznych w danych warunkach środowiskowych. W szczególności odnosi się to do urządzeń elektrycznych, które w stanach zakłóceniowych mogą być źródłem dużych zagrożeń, przede wszystkim wybuchowych oraz pożarowych i rażeniowych. Tak więc środki elektryfikacji i automatyzacji kopalń muszą być tak konstruowane, produkowane i eksploatowane, aby można było zapewnić bezpieczną, niezawodną i wydajną pracę w spodziewanych, specyficznie trudnych warunkach środowiskowych zakładów górniczych. Obecnie już truizmem jest stwierdzenie, że poprawnej i bezpiecznej pracy w warunkach środowiskowych podziemi kopalń można oczekiwać tylko od urządzeń o właściwym wykonaniu środowiskowym górniczym, zapewniającym niezbędną odporność i bezpieczność środowiskową.
Oczywiste jest również, że technika bezpieczeństwa jest ściśle związana z techniką produkcji, a użytkowanie urządzeń z ich jakością.
Na jakość urządzeń składają się takie jego cechy, jak: niezawodność, trwałość, funkcjonalność, zdolność naprawcza i estetyka wykonania.
Z punktu widzenia bezpieczeństwa eksploatacji najbardziej istotne jest kryterium niezawodności, rozumianej jako zdolność do wykonywania przez urządzenie określonych zadań w danych warunkach układowych i środowiskowych oraz w określonym czasie.

Uszkodzenie (niesprawność) urządzenia powstaje, ogólnie ujmując, wskutek jego zużycia. Objawia się ono pełną lub częściową utratą bądź zmianą właściwości urządzenia, które powodują, że urządzenie (jego podzespoły lub elementy) przechodzi w stan niezdolności do poprawnej pracy (staje się niesprawne - zawodne). Jest to więc pojęcie o znaczeniu szerszym niż używane w mowie potocznej. W warunkach górniczych są to głównie zjawiska losowe wywoływane oddziaływaniem na urządzenia czynników środowiska górniczego o takim nasileniu, że przekraczają one odporność (w stanach roboczych) lub wytrzymałość (w stanach awaryjnych) urządzenia. Mogą więc one być oceniane w kategoriach probabilistycznych - jako realizacje zmiennej losowej t. Postać i parametry funkcji rozkładu gęstości mogą być osza-

cowane na podstawie wyników badań reprezentatywnej próbki losowej metodami analizy statystycznej. Funkcje gęstości są odwzorowywane najczęściej następującymi rozkładami: wykładniczym, Weibulla, Gaussa-Laplace'a logarytmo-normalnym, gamma, cosinusowym.

W praktyce jako miary do określania zdatności i trwałości urządzeń stosuje się: prawdopodobieństwo poprawnej pracy P lub uszkodzenia Q, średni czas poprawnej pracy T (do pierwszego uszkodzenia lub między kolejnymi uszkodzeniami), średnią intensywność (częstość) uszkodzeń $\lambda(f)$ i czas przerwy w pracy t_p spowodowany uszkodzeniem (niesprawnością).

Niezawodność i bezpieczeństwo stosowania poszczególnych rodzajów urządzeń są różne, zależą od rodzaju ich budowy i produkcji, a co najmniej równorzędnie od warunków ich eksploatacji i stosowanych zabiegów konserwacyjnych. W większości są to szeregowe struktury niezawodnościowe i praktycznie każde uszkodzenie jednego elementu powoduje przerwy w pracy układu technologicznego.

W literaturze można również spotkać pogląd, że bezpieczeństwo należy traktować jako jedną z cech (właściwości, miar) ogólnego pojęcia niezawodności obiektów technicznych, np. układu elektroenergetycznego. W takim ujęciu bezpieczeństwo rozumie się jako jeden z czynników ogólnej właściwości (niezawodności) wewnętrznej obiektu (układu), założonych przy jego projektowaniu i wykonaniu, a ujawniające się w działaniu (eksploatacji). Wyraża ono zdolność do niepowodowania niebezpiecznych sytuacji (zagrożeń) dla układu, ludzi i otoczenia. Jest to jednak cecha jakościowa - brak jest wskaźników oceny (kryteriów liczbowych) i uwzględnia właściwie tylko jedną część złożonego systemu. Bezpieczeństwo zależy bowiem nie tylko od konstrukcyjnych i układowych parametrów, np. urządzeń i sieci elektroenergetycznej. Jak wykazują analizy statystyczne wypadków elektrycznych w górnictwie, decydujący wpływ mają często psychofizyczne właściwości załogi i poszczególnych ludzi oraz techniczne warunki środowiskowe. Potwierdza to pogląd, że niezawodność obiektów technicznych należy traktować metodologicznie jako istotny, lecz tylko jeden z wieloskładnikowych czynników kształtujących poziom bezpieczeństwa w kopalniach, a nie odwrotnie [4].

W takim ujęciu ważnym kierunkiem zwiększania efektywności produkcyjnej i bezpieczeństwa współczesnych zmechanizowanych kopalń jest zwiększenie niezawodności stosowanych urządzeń technicznych, w tym aparatury i sieci elektrycznej. Doświadczenia w zakresie teorii i praktyki niezawodności oraz diagnostyki urządzeń technicznych pozwalają na wykorzystanie metod matematycznych w optymalizacji konstrukcji i eksploatacji układów elektrycznych. Dotyczy to np. także planowania i wykonywania okresowych przeglądów (napraw) profilaktycznych (wymiana, konserwacja) oraz badań atestacyjnych.

Wybór strategii zwiększania niezawodności urządzeń eksploatowanych zależy od ich rodzaju (np. podatność naprawcza, wymienność podzespołów - budowa modułowa) oraz przyjętych kryteriów optymalizacji. Z zasady sto-

sowane są dwa kryteria: minimum kosztów eksploatacyjnych oraz niezbędne prawdopodobieństwo (P_d) pracy bezawaryjnej. W warunkach górniczych drugie kryterium jest ściśle związane z bezpieczeństwem eksploatacji i z reguły przyjmuje się je jako nadrzędne - decydujące o długości okresów działań (napraw) profilaktycznych t_d. Niezbędne są więc odpowiednie badania i określenie wartości wskaźników niezawodnościowych.
W praktyce wygodnie jest posługiwać się wartością względną czasu t_w - okresów "międzynaprawczych" t_d odniesionych do trwałości T danego typu aparatu, czyli: $t_w = t_d T^{-1}$. Prawdopodobieństwo P bezawaryjnej pracy takiego (naprawianego) aparatu będzie zależało (co jest oczywiste) od "głębokości naprawy", czyli współczynnika g, którego wartość (0, 0.1, 0.2, 0.4...) wyraża stopień utraty (zawodność) właściwości początkowych (aparatu nowego). W ogólnej postaci można to wyrazić następującym zapisem:

$$P(t_w, g) = P(t_w + g)\, P(t_w)^{-1}. \tag{1}$$

Wyrażenie to, zależnie od założonego rozkładu prawdopodobieństwa, przyjmuje postać, z której obliczyć można t_w dla założonego P_d (por. np. [10]).

Z punktu widzenia techniki bezpieczeństwa podstawowe znaczenie ma ocena niezawodności technicznych systemów ochronnych. Podstawą analizy i oceny są modele niezawodnościowe uwzględniające możliwe uszkodzenia i stany niesprawności. W konkretnych przypadkach obliczeń niezbędne są dane statystyczne intensywności uszkodzeń zachodzących w tych systemach. Wiąże się to bezpośrednio z problematyką okresowych badań eksploatacyjnych systemów ochronnych. W systemach takich często uszkodzenie nie ujawnia się samoistnie, a więc proces odnowy prowadzić należy cyklicznie, po każdych okresowych badaniach kontrolnych. Terminy okresowych badań kontrolnych powinny być ustalane tak, aby wartość funkcji niezawodności tych systemów w okresach między kolejnymi badaniami nie zmniejszała się poniżej wartości uznawanej za dopuszczalną. Analiza niezawodnościowa umożliwia więc optymalizację w danych warunkach rozwiązań systemów ochronnych oraz racjonalizację badań profilaktycznych.

4. PROBABILISTYCZNE OCENY ZAGROŻEŃ

W analizie zawodności urządzeń i układów elektrycznych korzysta się z dostatecznie już opracowanych i sprawdzonych dla tych celów metod rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej. Obecnie wielu zwolenników znajduje pogląd, że metody probabilistyczne mogą i powinny być wykorzystane do analizy i oceny zagrożeń górniczych, w tym szczególnie elektrycznych [4, 6]. Uważa się, że pozwoli to na bardziej kompleksową obiektywną (ilościową) ocenę stanu bezpieczeństwa w kopalni, a w efekcie i na optymalizację metod profilaktyki i środków ochronnych.

W metodzie tej zakłada się, zgodnie z rzeczywistością, że zagrożenia i ich skutki są zjawiskami losowymi. Wskaźniki charakteryzujące niebezpieczeństwo lub określające poziom bezpieczeństwa mogą być wyrażane miarami probabilistyki - rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej. Można je oceniać znając prawdopodobieństwa takich zjawisk, jak: wystąpienie iskrzenia lub łuku elektrycznego bądź pojawienie się napięć zabłąkanych (np. dotykowych). Te zaś w dużym stopniu zależą od wskaźników niezawodnościowych środków elektryfikacji i automatyzacji kopalń. Szczególne znaczenie w tym zakresie ma niezawodność i skuteczność systemów ochronnych.

Prawdopodobieństwo niebezpiecznego zdarzenia P_w (np. wybuchu, pożaru lub rażenia elektrycznego) zależy od prawdopodobieństwa wystąpienia zagrożenia P_z i prawdopodobieństwa zaistnienia w tym czasie uczulenia na zagrożenie bezpośredniego otoczenia P_o.
Obrazuje to zależność:

$$P_w = P_z P_o \, . \tag{2}$$

Miarą bezpieczeństwa jest wtedy prawdopodobieństwo P_b, przy czym:

$$P_b = 1 - P_w \, . \tag{3}$$

W ocenie poziomu bezpieczeństwa przyjmuje się umownie, że w najbardziej niesprzyjających warunkach (a więc w stanach awaryjnych) prawdopodobieństwo wystąpienia niebezpiecznego zdarzenia nie powinno być większe niż $P_w \leqslant P_d = 10^{-6}$ (np. wg GOST 12.1.010-76 "dopuszcza się" możliwość jednego zapłonu w danym rejonie - oddziale technologicznym z prawdopodobieństwem 10^{-6} w ciągu roku, czyli $P_d = 1.10^{-6}/a$).
W stanach pracy normalnej często przyjmuje się $P_d = 10^{-8}$. Wtedy np. zakładając, że prawdopodobieństwo wystąpienia mieszaniny wybuchowej $P_o = 10^{-2}$ (w pomieszczeniach "b"), można stosować aparaty tak zbudowane, że mogą spowodować zagrożenie tylko w stanach awaryjnych (np. budowy wzmocnionej) z prawdopodobieństwem uszkodzenia co najwyżej $P_z = 10^{-4}$, bowiem wtedy $P_w \leqslant 10^{-2} \cdot 10^{-4} \leqslant 10^{-6}$.

Prawdopodobieństwa składowe P_z i P_o zależą od wielu czynników losowych. Można więc określać je prawdopodobieństwami cząstkowymi (nawet warunkowymi). Na przykład w przypadku określania prawdopodobieństwa wybuchu metanu P_{wm} należałoby znać prawdopodobieństwa zdarzeń: niesprawności (uszkodzenia) aparatu (P_n) i wystąpienia iskry lub łuku bądź nagrzania do temperatury zapłonu (P_e); utworzenia się mieszaniny wybuchowej w otoczeniu "uszkodzenia", które z kolei zależy od wydzielania się metanu (P_m) oraz intensywności i niezawodności układu wentylacyjnego (P_p). Otrzymuje się więc zależność:

$$P_{vm} = (P_n P_e)(P_m P_p) \ . \tag{4}$$

W przypadku stosowania kontroli koncentracji metanu (zabezpieczeń metanometrycznych) uwzględnić należałoby dodatkowy czynnik - niezawodność układu metanometrycznego, wyłączającego zasilanie elektryczne (P_k).
Podobnie można przedstawić matematyczne prawdopodobieństwo zagrożenia elektrycznego na przykładzie wypadku porażenia prądem elektrycznym [1, 6]:

$$P_w = P_s P_i P_c P_k \ , \tag{5}$$

gdzie:

- P_s - prawdopodobieństwo zetknięcia się człowieka z urządzeniem (częściami), które znajduje się (może znaleźć się) pod napięciem,
- P_i - prawdopodobieństwo wystąpienia napięcia lub prądu rażenia,
- P_c - prawdopodobieństwo niebezpiecznych oddziaływań w organizmie człowieka rażonego,
- P_k - prawdopodobieństwo niezadziałania systemu ochronnego.

Każde z prawdopodobieństw występujących w równaniach (2)-(5) zależy od wielu zdarzeń elementarnych o różnych prawdopodobieństwach - niezależnych lub zależnych. Wyznaczenie ich wymaga odpowiedniej analizy zdarzeń, a przede wszystkim wielu danych z badań statystycznych w rzeczywistych warunkach środowiskowych; jest to główna przeszkoda w praktycznym stosowaniu tej metody.

Określenie wymaganego poziomu bezpieczeństwa, rozumianego jako ustalenie najmniejszej, jeszcze dopuszczalnej wartości P_b lub największej dopuszczalnej wartości P_d jest zagadnieniem złożonym. Występują bowiem ograniczenia natury etyczno-humanitarnej (czynnik subiektywny) oraz techniczno-ekonomiczne, w tym w zakresie budowy i eksploatacji systemów ochrony. Niezbędny jest więc także racjonalny kompromis - uzasadnionych chęci zwiększania poziomu bezpieczeństwa i kosztów realizacji odpowiednio niezawodnej ochrony. Można wyróżnić dwa sposoby realizacji problemu. Przyjmując jednakowe poziomy bezpieczeństwa (P_b) dla wszystkich zagrożeń (lub stanowisk pracy) dobiera się odpowiednie, zróżnicowane systemy ochronne - w zależności od warunków eksploatacji. Druga zasada to w dysponowanych warunkach technicznych i ekonomicznych uzyskać największe możliwe bezpieczeństwo (najmniejsze prawdopodobieństwo P_w) w danych warunkach eksploatacji.

Praktyczne wykorzystanie probabilistycznej metody oceny bezpieczeństwa wymaga przeprowadzenia wielu badań poprzedzających. W chwili obecnej możliwa jest tylko wstępna ocena ilościowa. Jak wiadomo, prawdopodobieństwo statystyczne stosunkowo łatwo można obliczyć z dużej liczby obserwacji jednego obiektu lub obserwacji dużej liczby jednorodnych obiektów w określonych jednorodnych warunkach środowiskowych (w tym czynników ludzkich).

Zagrożenia elektryczne natomiast jako zdarzenia losowe mogą być często zjawiskami jednostkowymi, nie powtarzającymi się, o zmiennych rozkładach funkcji gęstości prawdopodobieństwa. Dotychczas nie znamy odpowiednich charakterystyk regresji i korelacji - liczbowych zależności: poziomu bezpieczeństwa, np. konkretnych urządzeń i ich wskaźników niezawodności oraz psychotechnicznych czynników załogi i technicznych warunków środowiskowych. Tym bardziej brak tych danych dla poszczególnych układów elektrycznych czy dużych systemów, np. techniczno-górniczych. Również ocena samych technicznych systemów bezpieczeństwa w górnictwie wymaga kompleksowego potraktowania. Wynika to choćby z faktu, że są one zazwyczaj ściśle związane ze złożonymi systemami technologicznymi. Często oprócz funkcji ochronnych spełniają one także funkcje robocze, a podsystemy przeznaczone do zapobiegania (lub co najmniej sygnalizowania) odpowiednim zagrożeniom uzupełniają działanie innych podsystemów ochronnych. Przykładem mogą być zabezpieczenia zwarciowe i przeciwporażeniowe kopalnianych odbiorników I kat. zasilania, których uzasadnione wyłączenie przy uszkodzeniu izolacji międzyfazowej lub doziemnej powoduje wystąpienie poważnego zagrożenia (wtórnego) dla całej załogi i kopalni.

Wymienione trudności wynikające z braku uzasadnionych teoretycznie i sprawdzonych praktycznie rozwiązań w zakresie złożonych problemów techniki bezpieczeństwa i obiektywnej oceny środków ochronnych zmuszają do dalszych uzupełniających badań. Jednym z kierunków są próby stosowania metod opartych na ocenach ekspertów, z odpowiednią zobiektywizowaną weryfikacją wyników tych ocen. Przykładem może być potrzeba oceny bezpieczeństwa wybuchowego urządzeń elektrycznych górniczych na etapie ich konstruowania [8]. Sprawdzenie, czy oceny ekspertów spełniają kryteria dla poszczególnych grup konstrukcyjnych i/lub układowych aparatury górniczej, przeprowadzono korzystając z funkcji rozkładu normalnego. Poziom bezpieczeństwa określony tą metodą oznacza, że przy określonej konstrukcji oraz wymaganej niezawodności elementów i obsłudze aparat będzie posiadał wymaganą cechę przeciwwybuchowości. Wynika z tego również, że działania profilaktyczne, takie jak np. odpowiednie diagnozowanie, niezawodność i wyłączenia wyprzedzające, zapewniają większe bezpieczeństwo niż np. osłony ognioszczelne. Dobrym dopełnieniem przedstawionej metody oceny może być także zastosowanie matematycznej teorii mnogości - zbiorów rozmytych [9]. Zakłada się, że teoria ta metodologicznie odpowiada charakterowi powstawania i strukturze zagrożeń elektrycznych oraz pozwoli budować odpowiednie modele matematyczne przydatne do ich rozpoznawania i profilaktyki w czasie rzeczywistym.

5. ZAKOŃCZENIE

Bezpieczeństwa elektryfikacji kopalń nie można oceniać nie uwzględniając wzajemnego uzależnienia czynników środowiskowych - naturalnych, technicznych i ludzkich. Na stan bezpieczeństwa mają bowiem wpływ wszystkie rodzaje zagrożeń, występujących w kopalni, które z kolei często są wynikiem np. niesprawności urządzeń. Z tych względów niezawodność (zawodność!) układów technicznych to nie tylko zagadnienie techniczno-ekonomiczne, lecz w wielu przypadkach również (a może przede wszystkim?) podstawowy problem bezpieczeństwa.
Konieczne jest więc zapewnienie właściwej budowy obsługi i konserwacji eksploatowanych urządzeń i systemów. Całokształt zagadnienia należy rozpatrywać kompleksowo, jednak poprawy należy poszukiwać praktycznie również na drodze rozwiązań cząstkowych obejmujących poszczególne ogniwa systemu, jakim w ogólnym znaczeniu tego słowa jest kopalnia.

Prawdopodobieństwa P_b i P_w są już brane pod uwagę przy opracowywaniu wymagań przepisów w zakresie doboru systemów profilaktyki i wymiarowania środków ochronnych. W praktyce jednak prawdopodobieństwo P_w jako miara zagrożeń stosowane jest w bardzo ograniczonym zakresie. Brak jest przede wszystkim wartości liczbowych rzeczywistych prawdopodobieństw dla poszczególnych elementów złożonego systemu oraz ustaleń normatywnych wartości wymaganego poziomu bezpieczeństwa. Dlatego też większość dokumentów normalizacyjno-technicznych opiera się na jakościowym podejściu do oceny warunków pracy i bezpieczeństwa. Są to z reguły wskazania, co i jak należy wykonać, natomiast ich skuteczność ocenia się kontrolą ich realizacji oraz liczbą i kategorią zaistniałych wypadków.

Ilustracją trudności oraz czynników, które należy uwzględniać w kompleksowej ocenie stanu bezpieczeństwa w zelektryfikowanym oddziale wydobywczym może być przykład analizy zagrożeń wybuchowych [3]. W analizie i ocenie "bezpieczeństwa wybuchowego" starano się uwzględnić wszystkie stany niebezpieczne, które mogą spowodować urządzenia tworzące elektroenergetyczną sieć oddziałową oraz współpracujące z nią systemy telekomunikacyjne i ochronne. Przy czym ze względu na wartość prawdopodobieństwa wystąpienia źródła zapłonu wyróżnić można praktycznie trzy grupy urządzeń: 1) zawierające normalnie iskrzące i nieiskrzące elementy zamknięte w oddzielnych osłonach ognioszczelnych lub zabezpieczone innym rodzajem budowy przeciwwybuchowej; 2) zawierające tylko nie iskrzące elementy w osłonach ognioszczelnych; 3) nie zawierające normalnie iskrzących elementów i nie mające budowy przeciwwybuchowej (np. przewody elektryczne). Jako przyczyny prawdopodobnych zapłonów mieszaniny metanowo-powietrznej o niebezpiecznej koncentracji metanu przyjmuje się najczęściej odpowiednie kombinacje następujących sytuacji (zdarzeń): zwarcia międzyfazowe, wyłączane bezzwłocznie przez zabezpieczenia oraz nie wyłączane - powodujące przepalenie powłok i zapalenie się lub nie izolacji; doziemienia w obudowach

lub poza nimi, wyłączane bezzwłocznie bądź nie wyłączane (sygnalizowane); nieodpowiednie połączenia stałe (styki) w obwodach elektroenergetycznych - iskrzące lub nagrzewające się; przeciążenia; przerwy w połączeniach obudów z systemem uziemiających przewodów ochronnych oraz przewodów w tym systemie, szczególnie przewodów ochronnych zewnętrznych; stan wentylacji oraz wydzielania się metanu; zawodność aparatury zabezpieczeniowej i kontrolnej, w tym gazometrii i zabezpieczeń metanometrycznych. Ta mnogość przyczyn i wzajemnych uwarunkowań powoduje, że schematy logiczne umożliwiające analizę i ocenę prawdopodobieństwa zapłonu metanu w konkretnym ogniwie technologicznym kopalni są dość złożone (kaskadowe, szeregowo-równoległe połączenia rodzajowych grup urządzeń i sytuacji), zależnie od liczby elementów (urządzeń) i uwzględnianych niebezpiecznych sytuacji. Ogólnie sytuacji niebezpiecznych wpływających w efekcie na wartość prawdopodobieństwa P_w, a więc i na ocenę stanu bezpieczeństwa elektryfikacji jest znacznie więcej [4]. Przykładowo można by wymienić takie przyczyny zagrożeń, jak: prądy i napięcia błądzące, napięcia pasożytnicze indukowane w przewodach o asymetrycznym układzie geometrycznym żył oraz oddziaływania pól elektromagnetycznych, w tym szeroko rozumiany problem kompatybilności elektromagnetycznej we współczesnej kopalni głębinowej [2].

LITERATURA

[1] Danielski L., Masny J.: Nowe tendencje w technice ochrony przeciwporażeniowej. Gospodarka Paliwami i Energią 1989, nr 3.

[2] Frączek S., Krasucki F., Miśkiewicz K., Wojaczek A.: Wybrane zagadnienia kompatybilności elektromagnetycznej w górnictwie. PWN, Warszawa 1988.

[3] Kowalew P.F., Kowalew A.P., Sierdiuk Ł.J.: Mietodika rasczota wzrywobiezopasnosti elektrificirowannogo uczastka ugolnoj szachty. Promyszlennaja Eniergietika 1989, nr 1.

[4] Krasucki F.: Zagrożenia elektryczne w górnictwie. "Śląsk", Katowice 1984.

[5] Krasucki F.: Kompatybilność elektromagnetyczna jako kryterium oceny stanu bezpieczeństwa w górnictwie. Mat. XVIII Symp. Sekcji Cybernetyki w Górnictwie KGPAN, Zarzecze 4-6.05.1989 r.

[6] Krasucki F.: Deterministyczne i probabilistyczne modele oceny zagrożeń elektrycznych. ZN Polit. Śl., s. Górnictwo, z. 125, Gliwice 1984.

[7] Mazurkiewicz A.: Wybrane aspekty bezpieczeństwa pracy w ujęciu funkcjonalnym. Bezpieczeństwo Pracy w Górnictwie 1989, nr 1.

[8] Piesok S.A.: Naprawlenija sowierszenstwowanija sistiemy podziemnogo elektrosnabżenija. Ugol Ukrainy 1989, nr 3.

[9] Pospiełowa T.G.: Ocienka elektrobiezopasnosti na osnowie tieorii nieczetkich mnożestw. Elektriczestwo 1989, nr 4.

[10] Szczuckij W.I., Wołodarskij W.A.: Principy wybora strategij priedu-prieżditielnogo riemonta elektrooburudowanija gornych priedprijatij. IWUZ, Gornyj Żurnał 1988, nr 4.

[11] Szczurowski A.: Metoda badania wypadków. ZN Polit. Śl., s. Górnictwo, z. 118, Gliwice 1983.

МЕТОДЫ И КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ ШАХТ

Р е з ю м е

В работе представлены основы и критический анализ, а также потребности и возможности объективной оценки уровня безопасности (электрической угрозы) в электрифицированных и автоматизированных каменноугольных шахтах. Обращается внимание на необходимость рассмотреть с новой точки зрения профилактические действия - системный подход к угрозам и степени безопасности в шахтах - с учетом случайного характера и взаимозавмсимости надежности технического оборудования, окружающих условий и психо-физических факторов работников шахты. Представлены примеры предлагаемых методов и критериев оценки.

METHODS AND CRITERIONS OF ASSESSMEN OF THE SAFETY ELECTRIFICATIONS OF MINES

S u m m a r y

In the paper the basic problems and possibility of objective assessmen of level of the safety (electric threats) in electrification and automation mines are presented. There are also presented review of methods of assessmen of electric threats in particular electric shock and ignition of mixture of methane - air. The autor pays athention to necessity new glances at prewentive activities of system approch to electric threats and safety conditions in mines allow for randomness and reliability of technical equipments, environment conditions and psycho-physical factors of crew. The autor stresses decisive importance of problems of operational reliability and compatibility of power network and electrical equipment in datum environment, cardinal EMC. There are given information about trials use new methods and criterions of assessmen of the safty electrification of mines.

Recenzent: Prof. mgr inż. Władysław Gluziński