

Florian KRASUCKI

## DETERMINISTYCZNE I PROBABILISTYCZNE MODELE ZAGROZEŃ ELEKTRYCZNYCH

**Streszczenie.** W artykule podano podstawowe definicje i kryteria oraz analizowano możliwość i metody oceny zagrożeń elektrycznych w górnictwie. Przedstawiono przykłady modeli matematycznych quasi-dwuelementowego systemu (źródło zagrożeń - zagrożone środowisko) w ujęciu mnogościowym jako zbioru elementów oraz relacji między nimi i między ich właściwościami.

Wskazano, że przyjęcie odpowiedniej struktury logicznej systemu o znanych wskaźnikach niezawodnościowych jego elementów umożliwi bardziej obiektywną probabilistyczną ocenę poziomu bezpieczeństwa elektryfikacji.

### 1. Wstęp

W ogólnym przypadku **z a g r o ż e n i e m** nazywa się wystąpienie stanu niebezpiecznego dla ludzi, urządzeń lub środowiska. Natomiast słowem **b e z p i e c z e ń s t w o** określa się stan niezagrożenia, spokoju, pewności.

Zagrożenia mogą wynikać z przyczyn naturalnych lub mogą być spowodowane działalnością człowieka; często są wynikiem wzajemnych uzależnień obu grup czynników. Rodzaj zagrożenia określa się zwykle zależnie od przyczyny powodującej wystąpienie stanu niebezpieczeństwa, podmiotu zagrożenia lub możliwych jego skutków (np. zagrożenia pożarowe, wodne, gazowe, pyłowe, wybuchowe, korozyjne, elektryczne). Przy czym np. pod nazwą zagrożenie pożarowe rozumie się "stwierdzoną możliwość powstania i łatwego rozprzestrzeniania się pożaru powodowanego zapalnością materiałów, z których wykonany jest obiekt budowlany oraz zapalnością materiałów znajdujących się w tym obiekcie", a zagrożenie korozyjne to "źródło narażeń zdolnych do wywoływania zmian korozyjnych".

W zakładach górniczych mogą występować zagrożenia różnych rodzajów. W kopalniach, a szczególnie w podziemiach kopalń występują także zagrożenia specyficzne **g ó r n i c z e**, wynikające z przyczyn naturalnych oraz z technicznej działalności człowieka w określonych warunkach geologiczno-górniczych. Interesują nas w szczególności zagrożenia spowodowane środkami technicznymi stosowanymi w procesie produkcyjnym, w robotach udostępniających i wydobywanych, np. środkami strzałowymi i maszynami górniczymi. Do grupy tej należy też większość **z a g r o ż e ń e l e k t r y c z n y c h**, wywołanych zjawiskami elektrycznymi. Ich źródłem

mogą być częściowo również inne przyczyny, jak np. prądy błądzące tellurowe, wyładowania elektryczne i elektryczność statyczna, promieniowanie elektromagnetyczne, jednak decydujące znaczenie mają urządzenia elektro-techniczne, które pośrednio mogą być przyczyną również innych zagrożeń przede wszystkim pożarowych, wybuchowych i rażeńiowych.

Już włączenie napięcia i przepływ energii przez urządzenie elektryczne powodują obciążenie napięciowe izolacji oraz obciążenie prądowe ich części przewodzących. Istotny wpływ na prawidłowe działanie urządzeń, a więc i na ewentualne zagrożenia mają warunki ich pracy: układowe, obciążeniowe i zasileniowe oraz warunki środowiskowe. W warunkach podziemi kopalń decydującą rolę odgrywają zazwyczaj warunki środowiskowe, klimatyczne i techniczno-organizacyjne, a w wielu przypadkach również antropogenne.

W ogólności urządzenia elektryczne mogą być źródłem wielu zagrożeń. Najczęściej występujące czynniki zagrożeniowe mogą spowodować następujące skutki:

- porażenia prądem elektrycznym,
- zapłony elektryczne materiałów łatwo zapalnych lub mieszanin wybuchowych,
- niekontrolowane odpalenia zapalników elektrycznych,
- oparzenia ciepłe,
- urazy mechaniczne i akustyczne,
- zmiany biologiczne spowodowane silnymi polami magnetycznymi i elektrycznymi,
- pogorszenie kompatybilności elektromagnetycznej.

Specyfika warunków górniczych powoduje, że współzależność zagrożeń występujących w kopalniach jest duża, a możliwość występowania i ich nasilenie zmieniają się w czasie.

## 2. Kryteria i możliwość oceny poziomu bezpieczeństwa

Ocena możliwych zagrożeń górniczych (w tym elektrycznych), a więc i spodziewanego "poziomu" bezpieczeństwa (stanu niezagrożenia), jest niezbędna tak już na etapie projektowania (kopalń, urządzeń), jak i w trakcie eksploatacji.

Jest to zadanie złożone, bowiem uwzględnić należy zależności i uwarunkowania wielu różnorodnych czynników, zwykle przypadkowych-niewymiernych oraz zmiennych w czasie i w przestrzeni.

Określony poziom bezpieczeństwa (bądź poziom zagrożenie) w kopalni można zapewnić w wyniku "współdziałania" wyposażenia technicznego i ludzi z uwzględnieniem warunków środowiskowych. Metody, sposoby i środki zwiększania bezpieczeństwa (zmniejszenia zagrożeń) można by podzielić na dwie grupy:

- ochronne, których zadaniem jest profilaktyka, zapobieganie występowaniu stanów niebezpiecznych,
- zabezpieczające, służące do usuwania zaistniałych zagrożeń lub ograniczenia ich skutków.

Spełnienie warunku bezwzględnego ("pełnego") bezpieczeństwa (w sensie matematycznym - 100%) w praktycznych warunkach eksploatacji - szczególnie w dużych zespołach techniczno-organizacyjnych z udziałem dużej liczby ludzi, jest nierealne tak ze względów technicznych, jak i ekonomicznych. Powstaje więc problem, jaki poziom bezpieczeństwa można uznać za dostateczny oraz jak go oceniać, jakie stosować miary bezpieczeństwa, aby można było dostatecznie obiektywnie ocenić potrzebę i skuteczność stosowania środków profilaktycznych i zabezpieczających.

W dotychczasowej praktyce oceny bezpieczeństwa ugruntowało się uproszczone kwalifikowanie zagrożeń. Jako miarę stosuje się dwuwartościowe kryterium logiczne: stan (urządzenie) jest bezpieczny lub stan (urządzenie) jest niebezpieczny. Jest to ocena intuicyjna, zależna od subiektywnych cech oceniającego.

Do bardziej obiektywnej oceny poziomu bezpieczeństwa wykorzystuje się osiągnięcia nauk matematycznych. Opracowane modele deterministyczne różnych zagrożeń pozwalają na formalny opis oraz retrospektywną analizę zaistniałych wypadków. Umożliwia to już pewną racjonalizację profilaktyki, np. w zakresie budowy i eksploatacji urządzeń elektromechanicznych.

Powezęchnie uważa się, że na przykład urządzenia prawidłowo zbudowane oraz właściwie konserwowane i obsługiwane w normalnych warunkach pracy nie stwarzają zagrożeń; możliwość spowodowania przez nie nieszczęśliwego wypadku jest znikoma. Przyjmuje się natomiast, że zagrożenie występuje przy odpowiednim zbiegu okoliczności, które często nazywa się umownie "uszkodzeniem". Trzeba jednak zdawać sobie sprawę z wieloznaczności tego pojęcia.

Uwzględniając oczywiście niejako uszkodzenia parametryczne i katastroficzne wywoływane naturalnym zużyciem należy zwrócić uwagę na uszkodzenia, których przyczynami są błędy w produkcji i doborze urządzeń do przewidywanych warunków pracy oraz naruszenie prawideł ich eksploatacji.

W górnictwie szczególne znaczenie mają uszkodzenia losowe, wywołwane zmianami i kumulowaniem się narażeń środowiskowych. Zalicza się do nich również zawodne działanie środków ochrony (np. urządzeń kontroli stanu izolacji) i zabezpieczeń (np. zabezpieczeń nadprądowych sieci elektroenergetycznej) oraz nieświadome bądź nawet "umyślne" nieprawidłowe działanie obsługi i osób postronnych, na przykład: zablokowanie zabezpieczeń, usunięcie osłon izolacyjnych, otwarcie obudów ognioszczelnych, praca pod napięciem, błędy manipulacyjne i łączeniowe.

Większość z wymienionych przyczyn, nawet te najbardziej oczywiste naruszenia przepisów eksploatacji, ma charakter przypadkowy i praktycznie nie można ich wyeliminować.

Czynniki, od których zależy możliwość (prawdopodobieństwo) niebezpiecznego zdarzenia (wypadku) tworzą splot wzajemnych zależności i uwarunkowań.

Z tych względów aktualnie uważa się, że najbardziej obiektywną ocenę poziomu bezpieczeństwa może dać potraktowanie zagrożeń w kategoriach probabilistycznych. Wtedy liczbową miarę bezpieczeństwa będzie prawdopodobieństwo zaistnienia nieszczęśliwego zdarzenia (wypadku) jako skutku danego zagrożenia. Wtedy też będzie można mówić o optymalizacji ochrony i zabezpieczeń oraz o ich niezawodności (prawdopodobieństwie wystąpienia zagrożeń) z uwzględnieniem aspektów humanitarnych i gospodarczych.

W takim ujęciu ogólnym kryterium oceny poziomu bezpieczeństwa (np. elektryfikacji) jest takie wykonanie i eksploatacja urządzeń w określonych warunkach środowiskowych, aby prawdopodobieństwo nieszczęśliwego wypadku  $P_w$  (np. porażek elektrycznych oraz pożarów i wybuchów z przyczyn elektrycznych) w dowolnym elemencie (np. oddziale) kopalni w ciągu określonego czasu (np. jednego roku) nie było większe od wartości dopuszczalnej  $P_d$ :

$$P_w \leq P_d \quad (1)$$

W przypadku ogólnym prawdopodobieństwo  $P_w$ , w matematyce wprowadzane w sposób aksjomatyczny, jest prawdopodobieństwem zdarzenia losowego.

Wyraża ono ocenę możliwości zajęcia nieszczęśliwego wypadku jako zdarzenia losowego. W praktyce ocenia się go statystycznie jako "stosunek częstości, z jaką zachodzi to zdarzenie w danych warunkach do liczby wszystkich tego rodzaju zdarzeń losowych, jakie zachodzą w danych warunkach". W konkretnych przypadkach określane może być np. w odniesieniu do zbioru określonych urządzeń w danej przestrzeni fizycznej i wybranej chwili czasu; może to być również stosunek czasu występowania zagrożeń, np. nagromadzenia mieszaniny wybuchowej, w badanej przedziale czasu (np. 1 roku). Przyjmując założenie, że przyczyną nieszczęśliwego wypadku jest "uszkodzenie", jego prawdopodobieństwo obliczać można metodami znanymi z teorii niezawodności obiektów.

### 3. Deterministyczne oceny wypadków

Wypadek (nieszczęśliwe zdarzenie) następuje w wyniku zbieżności w danym miejscu co najmniej dwóch zwykle niezależnych zdarzeń losowych: wystąpienia zagrożenia (np. łuk lub iskra elektryczna, napięcie zabłąkane) oraz podatności (uczulenia) obiektu na zagrożenie (np. nagromadzenie się mieszaniny wybuchowej lub materiałów łatwopalnych w warunkach podatnych na zapalenie, bądź dotyk do części pod napięciem większym od bezpiecznego).

Isotone dla praktyki informacje uzyskuje się już z analizy poszczególnych wypadków oraz statystycznego ich opracowania w odpowiednio długich

okresach czasu. Pozwalają one na wyodrębnienie głównych przyczyn i ocenę "trendów" rozwojowych oraz na wyciągnięcie szczegółowych wniosków odnośnie do niezbędnych działań profilaktycznych.

I tak np. z analizy statystycznych wypadków elektrycznych zaistniałych w polskich kopalniach węgla kamiennego w latach 1945-1980 wynika [10, 12], a.in. że:

- większość wypadków ma miejsce w podziemiach kopalń, ponad 75% wypadków elektrycznych wszystkich (83% wypadków śmiertelnych oraz 70% pozostałych),
- największe zagrożenie stwarza sieć górna trakcji dołowej (prawie 50% wypadków śmiertelnych na dole) i urządzenia rozdzielcze (40% wypadków kat. II-IV) oraz kable i przewody oponowe,
- głównymi przyczynami wypadków są: nieodpowiedni sposób pracy, pośpiech - nieprzestrzeganie przepisów i instrukcji (66÷100% wypadków kat. I oraz 70÷100% wypadków kat. II-IV),
- wypadkom śmiertelnym ulegają głównie nie elektrycy (70%), natomiast elektromonterzy przeważają (60%) wśród poszkodowanych w kat. II÷IV,
- najczęściej (70÷60%) wypadków zdarza się pracownikom młodym i w pierwszych trzech latach pracy; ponowny wzrost liczby wypadków występuje wśród pracowników w wieku 40÷45 lat oraz przy stażu pracy 6÷10 lat.

Stopień (poziom) zagrożenia, oceniany dotychczas głównie jakościowo, zależy przede wszystkim od nasilenia czynnika zagrożeniowego, częstości jego występowania i czasu oddziaływania oraz uczulenia środowiska na dany czynnik.

Wnioski z analiz uwzględnia się w optymalizacji środków ochronnych. I tak w aktualnie obowiązujących przepisach w sprawie ochrony przeciwporażeniowej w sieciach do 1 kV [15] rodzaj i zakres stosowania środków ochronnych uzależnia się od warunków środowiskowych, podzielonych na 2 stopnie. Propozycje znacznego rozszerzenia tej metody z zastosowaniem 10-punktowej skali oceny stopnia zagrożenia zależnej od warunków sprzyjających ujawnianiu się poszczególnych narażeń w górnictwie miedziowym podano w pracy [4].

Duża liczba czynników mających wpływ na bezpieczeństwo powoduje konieczność poszukiwania bardziej ogólnych metod, umożliwiających bardziej obiektywną (wymierną) ocenę jego poziomu. Opracowano już wiele matematycznych modeli zagrożeń oraz metod analizy i oceny stanu bezpieczeństwa. Jako przykład o charakterze ogólnym można by wymienić interesujące, systemowe podejście przyczynowo-logiczne proponowane przez prof. A. Szczurowskiego (referat wygłoszony w dniu 12.05.1982 r. na zebraniu Komisji Górniczej PAN, Oddział w Katowicach).

Jeden ze sposobów sformalizowanego opisu zagrożeń elektrycznych, z wykorzystaniem teorii relacji, omówimy pobieżnie na przykładzie modelu tematycznego zaproponowanego w [14] dla przypadku rażenia elektrycznego.

Możliwość wystąpienia nieszczęśliwego wypadku rozpatrzmy jako zdarzenie mogące spowodować określone skutki dla obiektów należących do zbioru  $O$  (osób, urządzeń, kopalni). Przyjmijmy że, np. zbiór ten reprezentuje załogę kopalni.

Każdy element  $o$  zbioru  $O$  ( $o \in O$ ) może się znaleźć pod działaniem (bezpośrednio lub pośrednio) zespołu niekorzystnych czynników zagrożeniowych  $Z$ . W przypadku analizowania zagrożeń wywołanych przez urządzenia elektryczne jako czynniki (przyczyny, źródła zagrożeń lub stany zagrożeniowe)  $z \in Z$  występują przede wszystkim: nieosłonięte części urządzeń, będące pod napięciem większym od bezpiecznego bądź wyłączone, lecz nie rozładowane z energii pojemnościowej linie kablowe; napięcia zabłąkane, dotykowe i krokowe, oraz napięcia indukowane; iskra lub łuk elektryczny oraz części urządzeń bądź gazy nagrzane do wysokiej temperatury; prądy błędzące; duże natężenia pól elektromagnetycznych; części urządzeń będące w ruchu.

Oznaczmy przez  $M$  zbiór miejsc - punktów w przestrzeni (stanowisk pracy, urządzeń, pomieszczeń, wyrobisk, lub ich części), w których mogą jednocześnie występować obiekty  $o \in O$  i czynniki  $z \in Z$ . Niebezpieczeństwo  $N$  występuje wtedy, gdy np. człowiek  $o \in O$  znajdzie się w miejscu  $m \in M$ , w którym stale lub przejściowo występują czynniki zagrożeniowe  $z \in Z$ . Zdarzenie takie możemy zapisać jako:

$$N_{Om} = [(\langle o, m \rangle) (o N_{Om} m)] \subset (O \times M) \quad (2a)$$

$$N_{Zm} = [(\langle z, m \rangle) (z N_{Zm} m)] \subset (Z \times M) \quad (2b)$$

Kartezjański iloczyn np.  $(O \times M)$  zbiorów  $O$  i  $M$  zawiera uporządkowane pary  $(o, m)$ , z których pierwszy element  $o$  należy do zbioru  $O$ , a drugi  $m$  do zbioru  $M$ .

W zapisie tym para  $\langle o, m \rangle$  reprezentuje zdarzenie polegające na znalezieniu się obiektu (człowieka)  $o \in O$  w miejscu  $m \in M$ , natomiast para  $\langle z, m \rangle$  - zdarzenie wystąpienia zagrożenia  $z \in Z$  w miejscu  $m \in M$ . Kolokację przestrzenną elementów  $o \in O$  i  $z \in Z$  w miejscu  $m \in M$  zapisać można w postaci:

$$N_m = N_{Om} N_{Zm} = \langle o, z \rangle_m \left\{ \bigvee_{m \in M} (o N_{Om} m) \wedge (z N_{Zm} m) \right\} \quad (3)$$

Należy uwzględnić jeszcze koincydencję czasową - jednoczesność wystąpienia  $o$  i  $z$  w miejscu  $m$  w czasie  $t \in T$ , czyli

$$N_{Omt} = [(\langle o, \langle m, t \rangle \rangle) (o N_{Omt} \langle m, t \rangle)] \subset [O \times (M \times T)] \quad (4a)$$

$$N_{Zmt} = [(\langle z, \langle m, t \rangle \rangle) (z N_{Zmt} \langle m, t \rangle)] \subset [Z \times (M \times T)] \quad (4b)$$

Relację  $N_r$ , koincydencji czasowo-przestrzennej elementów  $o \in O$  i  $z \in Z$  w zbiorze  $(M \times T)$ , można zapisać jako:

$$N_r = N_{omt} N_{zmt} = ( \langle o z \rangle_{m,t} ) \left\{ \vee [ (o N_{omt} \langle m,t \rangle) \wedge (z N_{zmt} \langle m,t \rangle) ] \right\} \quad (5)$$

$\langle m,t \rangle \in (M \times T)$

Jak widać, przedstawiony przykładowo model deterministyczny może służyć do analizy retrospektywnej i formalnego opisu zdarzenia, jakim jest nieszczęśliwy wypadek. Przy czym nie uwzględniono w nim wielu czynników, uznanych jako "drugorzędne", które jednak mogą mieć ważny wpływ na powstawanie stanu zagrożenia i przebieg zdarzenia (wypadku). Należy tutaj wspomnieć przede wszystkim o narażeniach środowiskowych, które oddziałując na urządzenia elektryczne powodują występowanie stanów zagrożeniowych oraz uczulają "obiekty" na stany zagrożeniowe. Na przykład w przypadku rażenia elektrycznego warunki środowiskowe nie tylko wpływają istotnie na możliwość uszkodzenia izolacji i urządzeń ochronnych oraz zetknięcia się człowieka z urządzeniami, lecz również na stan fizyczny i psychiczny człowieka, zmniejszając odporność organizmu ludzkiego na oddziaływanie prądu elektrycznego.

Jeżeli poszczególnym relacjom uda się przyporządkować odpowiednie prawdopodobieństwa, otrzymać można model probabilistyczny.

#### 4. Modele probabilistyczne

Mnogość i charakter przyczyn nieszczęśliwych wypadków powodują, że ocena zagrożeń, traktowanych jako wystąpienie stanu niebezpiecznego w modelu deterministycznym, jest bardzo trudna i wieloznaczna.

W kategoriach probabilistycznych zagrożenie jest reprezentowane przez prawdopodobieństwa wystąpienia stanów niebezpiecznych. Poziom bezpieczeństwa można więc ocenić wtedy wypadkowym prawdopodobieństwem wystąpienia wypadku, np. porażenia, wybuchu lub pożaru, w określonym czasie  $T$ .

W przypadku na przykład porażenia elektrycznego należy ocenić prawdopodobieństwo zbiegu (koincydencji) zdarzeń z następujących zbiorów składających się na zbiór wypadków ( $W$ ): bezpośrednie lub pośrednie zetknięcie się człowieka z urządzeniami ( $A$ ), które są lub mogą się znaleźć pod napięciem dotykowym lub krokowym ( $B$ ), w wyniku pracy pod napięciem lub uszkodzenia podstawowej ochrony przeciwporażeniowej ( $C$ ) względnie ochrony dodatkowej ( $D$ ); należy uwzględnić jeszcze możliwość przepływu prądu elektrycznego o odpowiedniej wartości przez człowieka (rażenia elektrycznego  $E$ ) oraz wystąpienie takiego stanu organizmu, że przepływ tego prądu w czasie  $t$  spowoduje wystąpienie niebezpiecznych skutków ( $F$ ).

Przyjmując, że są to zdarzenia niezależne prawdopodobieństwo wystąpienia niebezpiecznego stanu (rażenia elektrycznego)  $P(E)$ , zgodnie z (1), można zapisać jako

$$P(E) = P(A) \cdot P(B), \quad (6)$$

natomiast prawdopodobieństwo wypadku (porażenia)  $P(W)$  można by wyrazić zależnością:

$$P(W) = P(E) \cdot P(F/E) = P(A) P(B) P(F/E), \quad (7)$$

w której  $P(F/E)$  jest warunkowym prawdopodobieństwem, że wystąpią niebezpieczne zmiany w organizmie człowieka w przypadku rażenia odpowiednim prądem (którego wartość zależy również od napięcia, czyli zdarzenia ze zbioru  $B$ ).

Prawdopodobieństwo wystąpienia niebezpiecznego napięcia  $P(B)$  jest również warunkowe. Należy uwzględnić bowiem prawdopodobieństwa uszkodzeń ochron podstawowej  $P(C)$  i dodatkowej  $P(D)$ , jak również prawdopodobieństwa pojawienia się niebezpiecznych napięć rażenia w przypadkach nie uszkodzonych ochron przeciwporażeniowych, podstawowej  $P(\bar{C})$  "lub" (bądź "i") dodatkowej  $P(\bar{D})$ . Na podstawie [13] można by to zapisać następująco:

$$P(B) = P(\bar{C} \cap \bar{D}) [1 - P(C) - P(D) + P(C)P(D)] + \\ + P(\bar{C} \cap D)P(D) [1 - P(C)] + P(C \cap \bar{D})P(C) [1 - P(D)] + P(C \cap D)P(C)P(D) \quad (8)$$

Główną niedogodnością tej metody oceny, a tym bardziej prognozowania poziomu bezpieczeństwa są trudności, jakie napotyka się przy określaniu prawdopodobieństw warunkowych, szczególnie przy uwzględnianiu wpływu losowego rozkładu czasów przepływu prądu rażenia. Dlatego może być stosowana do oceny poziomu bezpieczeństwa poszczególnych urządzeń, np. w przypadku zagrożeń wybuchowych, bowiem prawdopodobieństwo warunkowe zapłonu, zależne od wartości parametrów obwodu, może być określane z dostatecznym poziomem ufności.

Jedną z dróg pokonania tych trudności jest wprowadzenie do struktury modelu logicznego relatywnie pojmowanych współczynników awaryjności i bezpieczeństwa. Przykładem takiego podejścia do oceny zagrożenia rażeniowego może być prace [2].

Obecnie oczywiste jest już prawda o ścisłym związku niezawodności sieci elektroenergetycznej i urządzeń współpracujących ze stanem bezpieczeństwa elektryfikacji i automatyzacji kopalń [11]. Do praktycznej oceny poziomu bezpieczeństwa można więc wykorzystać teorię i stosunkowo duże już doświadczenie w zakresie oceny niezawodności urządzeń i systemów technicznych.

Przyjmijemy rozszerzone pojęcia systemu (kopalni), w skład którego wchodzi urządzenia techniczne i narażenia środowiskowe jako źródła (przyczyny) stanów niebezpiecznych oraz załogę, a nawet wyrobiska kopalni jako podmiot zagrożenia. W systemie takim podstawowe pojęcie uszkodzenia ma znacze-



nie szerszy zakres niż stosowane w teorii niezawodności urządzeń technicznych.

Na przykład jako "uszkodzenie" uważać należy także dotknięcie przez człowieka części będących normalnie pod napięcia lub które znalazły się pod napięciem zabłąkanym, bądź np. powstanie mieszaniny wybuchowej.

Zagrożenia w takim systemie określić można stosując znane miary niezawodności obiektów naprawialnych: prawdopodobieństwa niewystąpienia  $R(T)$  względnie wystąpienia  $Q(T)$  uszkodzenia systemu w określonym czasie eksploatacji  $T$ ; prawdopodobieństwa znajdowania się systemu w stanie bezpiecznym  $p$  lub niebezpiecznym  $q$  - w dowolnej chwili czasu  $T$ ; średni czas znajdowania się systemu w stanie bezpiecznym  $T_b$  lub niebezpiecznym  $T_n$ ; częstość występowania niebezpiecznych stanów (uszkodzeń)  $f$ .

Do oceny poziomu bezpieczeństwa należy znać jeszcze dodatkowo uczulenie obiektów na zagrożenia. W większości zagrożeń elektrycznych można by to ocenić na podstawie dopuszczalnych wartości prądu  $I_b$  i czasu  $t$ ; w ocenie orientacyjnej przyjmuje się przypadki skrajne:

$$p = 0 \text{ dla } I < I_b(t), \quad p = 1 \text{ dla } I > I_b(t).$$

W praktyce przyjmuje się założenia, że proces występowania i zanikania zagrożeń elementów  $X_1$  systemu jest niezależny i stacjonarny, a funkcja gęstości prawdopodobieństwa czasów tych stanów może być odwzorowane rozkładem wykładniczym lub logarytmo-normalnym. Uzyskuje się wtedy uproszczone zależności wskaźników zagrożeń.

Stosuje się przy tym odpowiednie modele logiczne, zazwyczaj szeregowo-równoległe, podobnie jak struktury niezawodnościowe obiektu, odzwierciedlające współzależność i jednoczesność logiczną elementów i zdarzeń w systemie.

W pracy [16] np. analizowano możliwość probabilistycznej oceny bezpieczeństwa rażenia prądem elektrycznym w systemie złożonym z zespołu ludzi i urządzeń elektrycznych  $X_1$  - sieć elektroenergetyczną do 1000 V o izolowanym punkcie zerowym wyposażoną w centralne zabezpieczenie upływowe.

Założono, że stanami niebezpiecznymi ( $m$ ) mogą być: 1- dotyk do części pod napięciem, 2 - dotyk do obudów urządzeń, 3 - doziemienie, 4 - zwarcie dwufazowe z ziemią, 5 - niesprawność zabezpieczenia upływowego, 6 - niesprawność zabezpieczeń zwarciovych, 7 - uszkodzenie dodatkowej ochrony przeciwporażeniowej (uziemień ochronnych). Prawdopodobieństwo znajdowania się systemu (składającego się z  $n$  urządzeń każdego rodzaju  $r$ ) w stanie niebezpiecznym  $q_m$  określono zależnością:

$$q_m = q_5 \left[ q_1 + \sum_{i=1}^r n_i q_{2i} q_{3i} \left\{ q_{7i} + q_{6i} \left[ q_{4i} + (n_i - 1) q_{4i} q_{6i} + \sum_{j \neq i}^r n_j q_{4j} q_{6j} \right] \right\} \right]$$

w której  $q_m, q_{m1}, q_{mj}$  - prawdopodobieństwa znajdowania się w  $m$ -tym niebezpiecznym stanie odpowiednio całego systemu oraz urządzeń  $i, j$ ;  $n_1, n_j$  - liczby urządzeń  $i$ -tego oraz  $j$ -tego rodzaju.

Przyjmując średni czas dotyku  $t_{\acute{e}r}$  wskaźniki poziomu zagrożenia rażącego w takim systemie można napisać w postaci:

$$T_{bs} = t_{\acute{e}r} (1 - q_s) q_s \approx \frac{t_{\acute{e}r}}{q_s} \quad (10)$$

$$R(T) = \exp\left(-\frac{T}{T_{bs}}\right) = \exp\left(-\frac{q_s T}{t_{\acute{e}r}}\right) \quad (11)$$

$$f_s = \frac{1}{T_{bs}} \approx \frac{q_s}{t_{\acute{e}r}} \quad (12)$$

Na podobnych zasadach można tworzyć modele umożliwiające bardziej obiektywną ocenę również innych zagrożeń elektrycznych. Przykłady takich prób odnośnie do zagrożeń wybuchowych można znaleźć w dostępnej literaturze, np. w [6, 9].

##### 5. Przykłady oceny bezpieczeństwa wybuchowego w kategoriach probabilistycznych

Metody probabilistyczne oceny stanu bezpieczeństwa, wykorzystujące statystycznie określone wartości prawdopodobieństwa zapłonu, stosuje się praktycznie już od kilkunastu lat w zakresie budowy przeciwybuchowej - urządzeń i obwodów iskrobezpiecznych. Jak wiadomo, przyjmuje się tam wartości iskrobezpieczne, określane zwykle z prawdopodobieństwem  $P = 10^{-8}$  w stanach pracy normalnej oraz  $P = 10^{-6}$  w stanach awaryjnych.

Prawidłowy dobór urządzeń budowy przeciwybuchowej do przewidywanych warunków eksploatacji wymaga znajomości prawdopodobieństwa występowania uszkodzeń stwarzających stany zagrożeniowe oraz prawdopodobieństwa uczulenia środowiska (występowania mieszaniny wybuchowej) na te zagrożenia. W ogólnym przypadku, aby można było przeprowadzić obiektywną ocenę poziomu bezpieczeństwa, niezbędna jest znajomość probabilistycznych wskaźników poszczególnych członów (podsystemów, obiektów) złożonego systemu, jakim jest kopalnia; w głównej mierze dotyczy to urządzeń (sieci) elektrotechnicznych i środków ochrony (zabezpieczeń sieciowych i metanometrycznych) oraz składu atmosfery kopalnianej (wentylacja, odmetanowanie).

Problem jest złożony i aktualnie rozwiązywany etapami, tzn. wyniki badań głównych podsystemów pozwalają na ilościowe ustalenie prawdopodobieństw częstkowych.

W przypadku oceny bezpieczeństwa wybuchowego chodzi przede wszystkim o prawdopodobieństwo przejścia urządzeń elektrycznych ze stanu bezpiecznego w stan niebezpieczny oraz o prawdopodobieństwo przejścia środowiska otaczającego urządzenie ze stanu bezpiecznego w niebezpieczny.

Jako przykład można podać ocenę prawdopodobieństwa zapłonu mieszaniny wybuchowej w wyniku zwarć w urządzeniach elektrycznych górniczych - przedstawioną w pracy [17].

Założmy, że każde zwarcie w urządzeniu elektrycznym budowy zwykłej lub w urządzeniu budowy przeciwybuchowej, lecz z niesprawnymi osłonami może spowodować zapłon ( $P = 1$ ) mieszaniny wybuchowej. Wtedy wybuch może nastąpić w przypadku koincydencji dwóch niezależnych zdarzeń losowych: zwarcia w urządzeniu ( $z$ ) i nagromadzenia się w jego bezpośrednim otoczeniu mieszaniny wybuchowej ( $m$ ) o odpowiedniej koncentracji metanu.

Intensywność (częstość) występowania zwarć  $f_z$  w poszczególnych głównych rodzajach urządzeń elektrycznych górniczych badano [17] w Zagłębiach Donieckim i Kuźnieckim, natomiast częstość występowania niebezpiecznych stężeń metanu  $f_m$  w przodkach wydobywczych ( $m_w$ ) i przygotowawczych ( $m_p$ ) w kopalniach Zagłębie Kuźnieckiego. Częstość występowania mieszaniny wybuchowej  $f_m$  w ciągu jednego roku ( $T = 8760$  h) oraz prawdopodobieństwo wybuchu  $P_w$  na skutek występowania w tym okresie zwarć w urządzeniach obliczano wg wzorów:

$$f_m = \frac{m}{nAR T_r} \quad (13)$$

$$P_w = 1 - \exp(-f_z f_m t) \quad (14)$$

w których:  $m$  - średnia wartość liczby nagromadzeń mieszaniny wybuchowej w roku ( $m_w = 313,6$ ,  $m_p = 651,4$ );  $n$  - średnia wartość liczby badanych przodków ( $n_w = 676,6$ ,  $n_p = 1513$ );  $A$  - okres badań ( $A = 10a$ );  $R$  - liczba zmian roboczych w roku ( $R = 1220$ );  $T_r$  - średni czas zmiany roboczej ( $T_r = 6h$ );  $t$  - średni czas utrzymywania się jednego nagromadzenia mieszaniny wybuchowej ( $t_w = 0,5$  h,  $t_p = 6h$ );  $T$  - okres, w którym oblicza się prawdopodobieństwo wybuchu ( $T = 8760$  h).

Przyjmując przeciętne, typowe wyposażenie przodków ścianowych kompleksowo zmechanizowanych oraz przodków przygotowawczych, otrzymano następujące spodziewane wartości prawdopodobieństwa spowodowania wybuchu przez urządzenia elektryczne:

łączniki stycznikowe	$2,2 \cdot 10^{-6}$	oraz	$2,5 \cdot 10^{-5}$ ,
łączniki zwarciove	$2,4 \cdot 10^{-6}$	oraz	$2,8 \cdot 10^{-5}$ ,
stacje transformatorowe	$2,0 \cdot 10^{-6}$	oraz	$3,3 \cdot 10^{-5}$ ,
silniki	$8,7 \cdot 10^{-6}$		$1 \cdot 10^{-5}$ .

Bardzo duży wpływ na poziom bezpieczeństwa wybuchowego mogą mieć zabezpieczenia metanometryczne, powodujące automatyczne wyłączenie urządzeń

elektrycznych w przypadku wystąpienia w ich bezpośrednim otoczeniu mieszaniny wybuchowej.

Prawdopodobieństwo wybuchu, spowodowanego przez urządzenia elektryczne w stanie swaryjnym ("uszkodzenia") w kontrolowanym wyrobisku, nie może przekraczać wartości  $P_d$  przyjętej za dopuszczalną (np.  $10^{-6}$ ) w danym okresie eksploatacji  $T$  (np. jednego roku). Można to zapisać następująco:

$$P_w(T) = 1 - e^{-fT} \leq P_d = 10^{-6} \quad (15)$$

Po zlogarytmowaniu i ograniczeniu się do dwóch wyrazów szeregu otrzymuje się:  $\ln fT = \ln 10^{-6}$ , czyli że dla  $T = 1a$   $f = 10^{-6} a^{-1}$ .

Korzystając z teorii procesów Markowa [3, 9] intensywność występowania wybuchów  $f$  można ocenić znając wartości czasów  $t$ , charakteryzujących rozkłady stanów bezpiecznych ( $t_b$ ) i niebezpiecznych ( $t_n$ ) w okresie jednego roku, w których mogą znaleźć się urządzenia elektryczne ( $e$ ) i otoczenie ( $o$ ) oraz ewentualne zabezpieczenia metanometryczne ( $m$ ). Dla systemu sieć elektroenergetyczna - środowisko można napisać zależność:

$$f_1 = \frac{t_{ne}}{t_{be}} \cdot \frac{1}{t_{bo}} + \frac{t_{no}}{t_{bo}} \frac{1}{t_{be}} = \frac{t_{ne} + t_{no}}{t_{be} t_{bo}} \quad (16)$$

oraz podobnie dla systemu sieć elektroenergetyczna-środowisko-metanometria

$$f_2 = \frac{t_{ne} t_{no} + t_{nm} t_{ne} + t_{nm} t_{no}}{t_{be} t_{bo} t_{ba}} \quad (17)$$

Jako stany niebezpieczne uważa się "uszkodzenia" urządzeń elektrycznych, powodujące wystąpienie iskry, łuku lub nagrzania do temperatury większej od dopuszczalnej oraz niesprawność zabezpieczeń metanometrycznych powodującą niewyłączenie urządzeń elektrycznych w przypadku wystąpienia w ich bezpośrednim otoczeniu niebezpiecznego stanu środowiska, którym jest nagromadzenie się metanu o stężeniu wybuchowym.

Przyjmując, że w większości przypadków średnia wartość czasu niebezpiecznego stanu urządzeń elektrycznych  $t_{ne}$  nie będzie większa od czasu działania zabezpieczeń sieciowych (np. 0,2s), a czas niebezpiecznego stanu środowiska  $t_{no}$  jako czas pracy urządzeń elektrycznych pod napięciem w środowisku z mieszaniną wybuchową (do chwili wyłączenia np. przez zabezpieczenia metanometryczne) np. 60s, korzystając ze wzoru (16) można obliczyć:

$$\frac{0,2 + 60}{31536000 t_{be} t_{bo}} = 10^{-6}, \quad \text{czyli} \quad t_{be} t_{bo} = 1,9s$$

Wpływ, jaki może mieć skracanie czasu niebezpiecznego stanu środowiska jest oczywisty. Bardziej dokładna analiza stosunku zależności (16) i (17) oraz możliwych wartości czasów  $t_{nm}$  i  $t_{bm}$  oraz  $t_{ns}$  i  $t_{no}$  z uwzględnieniem zabezpieczeń stosowanych aktualnie w kopalniach ZSRR wykazała [3], że prawidłowa eksploatacja i organizacja obsługi urządzeń gazometrii (AKW -2P oraz AMT-3) pozwalają zmniejszyć prawdopodobieństwo wybuchu 182,589 razy.

## 6. Uwagi końcowe

Bezpieczeństwo elektryfikacji kopalń zależy od wielu czynników o charakterze losowym i jako takie można je analizować i oceniać wykorzystując metody matematyczne. Poziom zagrożeń jest proporcjonalny do prawdopodobieństwa wystąpienia stanu niebezpiecznego. Obiektywną miarą stanu bezpieczeństwa może więc być wartość prawdopodobieństwa zaistnienia nieszczęśliwego wypadku.

W realnych warunkach eksploatacji nie występują urządzenia czy środowiska "absolutnie bezpieczne". Wypadek, jako skutek jednoczesnego zaistnienia odpowiednich niebezpiecznych stanów, następuje zazwyczaj w przypadku uszkodzenia urządzeń lub naruszenia (nieprzestrzegania) podstawowych prawideł eksploatacji. Są to zdarzenia losowe i nie można ich w pełni wyeliminować.

Stany niebezpieczne lub bezpieczne mogą być oceniane prawdopodobieństwem o określonej skończonej wartości. Wartość prawdopodobieństwa wypadkowego zależy od intensywności występowanie stanów niebezpiecznych w urządzeniach oraz intensywności stanów podatności obiektów na zagrożenia (np. ludzi, środowiska). Uzasadniony jest więc relatywizm w ustaleniu wymagań odnośnie do poszczególnych elementów systemu kopalnianego (urządzeń technologicznych, zabezpieczeń, ludzi), zależnie od spodziewanej intensywności występowania stanów niebezpiecznych i zakresu ich skutków. Na przykład poziom wymagań w zakresie ochrony przeciwporażeniowej (w tym również wartości prądów i napięć) może być zróżnicowany zależnie od typu i charakteru urządzenia oraz warunków ich eksploatacji, w tym także od charakteru obsługi i czasu styczności ludzi z urządzeniami (stała lub dorywcza; elektrycy lub nie elektrycy).

Dyskusyjna jest wartość prawdopodobieństwa wypadkowego, którą należałoby przyjąć jako dopuszczalną ("bezpieczną"). Uważa się, że np. w przypadku prawidłowo wykonanych, dobranych i eksploatowanych urządzeń elektrycznych prawdopodobieństwo porażenia elektrycznego jest znikomo małe ( $10^{-8}$ ;  $10^{-10}$ ).

Ze statystyk wypadków można obliczyć średnią wartość prawdopodobieństwa porażenia śmiertelnego dla danej branży lub kraju, np. na 1 milion mieszkańców w ciągu roku; przykładowo tak obliczone prawdopodobieństwo dla

krajów Europy Zachodniej (1967 r.) wynosi  $1,9 \pm 7,6 \cdot 10^{-6}$ , średnio  $3,7 \cdot 10^{-6}$  [5] (w Polsce  $> 9 \cdot 10^{-6}$ ).

Zgodnie z normą PN-72/E-8110 elektryczne urządzenie przeciwwybuchowe są to urządzenia wykonane w ten sposób, że przy prawidłowym doborze, zainstalowaniu, zabezpieczeniu i eksploatacji prawdopodobieństwo zainicjowania wybuchu otaczającej je mieszaniny wybuchowej jest zaniejszone do minimum.

Dotychczas wartość prawdopodobieństwa jako miara poziomu (klasy) stopnia bezpieczeństwa stosowana jest konkretnie tylko w ocenie budowy przeciwwybuchowej iskrobezpiecznej ( $10^{-6} \pm 10^{-8}$ ). Uważa się, że w porównaniu z innymi rodzajami budowy przeciwwybuchowej są to urządzenia o największym stopniu bezpieczeństwa; w kategoriach jakościowych można by je uszeregować (IEC) w trzech grupach "pewności": 1) budowa iskrobezpieczna, 2) budowa ogniozczelna, przewietrzana, gazowa pod ciśnieniem, 3) pozostałe rodzaje budowy, przy czym budowa specjalna może być zaliczona do dowolnej grupy, zależnie od rodzaju zastosowanego rozwiązania zapewniającego przeciwwybuchowość.

Przykładem zastosowania ogólnej bardziej kompleksowej oceny stanu bezpieczeństwa z wykorzystaniem metod probabilistycznych jest postanowienie zawarte w normie GOST 12.1.010-76- zgodnie z którym procesy technologiczne w kopalniach metanowych i pyłowych należy tak prowadzić, aby prawdopodobieństwo wybuchu w dowolnym niebezpiecznym "odcinku" kopalni (np. oddziały wydobywcze i przygotowawcze, wyrobiska, pomieszczenia) w ciągu roku nie było większe od  $10^{-6}$ . W takim ujęciu problemu oczywisty jest związek (wpływ) niezawodności elementów złożonego systemu, jakim jest kopalnia ze stanem jej bezpieczeństwa wybuchowego.

Szczególną rolę w systemie kopalni odgrywa niezawodność (stan bezpieczeństwa) elementów podsystemu, jakim jest sieć elektroenergetyczna, jej urządzenia główne i pomocnicze, zabezpieczenia i środki ochronne oraz niezawodność elementów podsystemów kontrolujących stan atmosfery kopalnianej.

W ogólności przyjmując, że prawdopodobieństwo występowania w danym pomieszczeniu mieszaniny wybuchowej nie przekracza wartości  $10^{-4} \pm 10^{-3}$  urządzenia elektryczne powinny być tak zbudowane i eksploatowane, aby prawdopodobieństwo ich "uszkodzenia" nie było większe niż  $10^{-2} \pm 10^{-3}$ .

Badania w tym zakresie w kopalniach ZSRR prowadzone są w sposób systematyczny i koordynowany na podstawie wytycznych, zatwierdzonych przez Ministerstwo Przemysłu Węglowego w postaci zaleceń "w sprawie oceny bezpiecznego stanu urządzeń elektroenergetycznych i układów zabezpieczeń wyłączających".

Badania laboratoryjne i eksploatacyjne urządzeń elektrycznych umożliwiają ustalenie "słabych" elementów sieci elektroenergetycznej i opracowanie środków zaradczych w zakresie ich budowy i eksploatacji. Z dotychczasowych doświadczeń praktycznych można by wymienić tylko jako przykłady następujące wskazania, których realizacja zwiększyłaby znacznie poziom bezpieczeństwa eksploatacji urządzeń elektrycznych:

- przestrzeganie terminów okresowych badań profilaktycznych i wymiany bloków o największej intensywności uszkodzeń,
- sprawdzanie połączeń obwodów głównych i ochronnych (u wytwórcy i okresowo w kopalni) oraz zamknięć osłon ognioszczelnych,
- stałe kontrolowanie stanu i warunków eksploatacji przewodów oponowych zasilających maszyny robocze, szczególnie ruchome.

Równocześnie należy prowadzić badania i kontrolę sprawności urządzeń zabezpieczających i ochronnych, w tym także decydujących o technicznych warunkach środowiskowych kopalni.

Przedstawione w pracy modele mają charakter ogólny. W takiej postaci mogą być przydatne do celów analiz porównawczych zagrożeń elektrycznych. Właściwe ich wykorzystanie będzie możliwe, gdy znane będą wartości prawdopodobieństw zdarzeń składających się na powstanie nieszczęśliwego wypadku.

#### LITERATURA

- [1] Altman S.: Anwendung Logischer Modelle bei der quantitativen Sicherheitsbeurteilung elektrotechnischer Anlagen. *Elektrie* 1976, nr 9.
- [2] Burałkow A.A.: Effektivnost mier elektrobezopasnosti w niskowolt-nych elektroustanowkach drag. *IWUZ Gornyj Zhurnal* 1980, nr 9.
- [3] Chomicz W.W., Kowalew P.F.: Średstwa awtomatycznego otkluczeniija elektroenergij w typikowych wyrobotkach. *Ugol* 1982, nr 9.
- [4] Gunderska H.: Metoda oceny zagrożenia porażeniowego w zakładach górniczych. *Cuprum* 1979, nr 1.
- [5] Jakobs A.I., Kostruba S.I.: O normirowaniju urownija elektrobezopasnosti i dopustimogo napriazeniija prikosnowienija. *Elektriczestwo* 1978, nr 1.
- [6] Kalinin W.W., Kowalew P.F.: Ocenka bezopasnosti sistem elektro-sna-bzeniija szacht. *Bezopasnost Truda w Promyslennosti* 1981, nr 10.
- [7] Kostruba S.I.: Matematicheskije modelirowanije sistem obiespie-czeniija elektrobezopasnosti. *Elektriczestwo* 1970, nr 9.
- [8] Kowalew P.F., Chomicz W.W., Kowalew A.P., Sierdiuk Ł.I.: Metody ocenki wzrywobezopasnosti na uczastkach ugolnych szacht. *Ugol Ukrainy* 1981, nr 1.
- [9] Kowalew P.F., Koptikow W.P., Kowalew A.P.: Normirowanije nadieznosti swojstw rudnicznego elektrooborudowanija. *Bezopasnost Truda w Promyslennosti* 1979, nr 12.
- [10] Krasucki F.: Analiza kształtowania się wypadkowości powodowanej działaniem prądu elektrycznego w kopalniach węgla. *Wiadomości Górnicze* 1968, nr 9.
- [11] Krasucki F.: Problemy niezawodności oraz bezpieczeństwa elektryfikacji i automatyzacji podziemi kopalń. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej* 1972, *Górnictwo*, z. 51.
- [12] Krasucki F.: Zagrożenia elektryczne w górnictwie. *Wyd. "Śląsk"* 1984.
- [13] Masny J.: Skuteczność i niezawodność systemów ochrony przeciwporażeniowej. *Przegląd Elektrotechniczny* 1981, nr 1.

- [14] Masny J., Tereziak Z.: Matematyczny model wypadku porażenia elektrycznego. Prace Naukowe Instytutu Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej 1977, nr 42.
- [15] Ochrona przeciwporażeniowa w urządzeniach elektroenergetycznych o napięciu do 1 kV. Zał. do Zarządzenia MGIE oraz MB1PMP z dnia 31.12.1968 r.
- [16] Szczuckij W.I., Burażkow A.A.: O wiarygodności oceny urowniwa elektrobezpieczeństwa. Elektryczestwo 1982, nr 2.
- [17] Torgaszow W.S., Piesok S.A., Ichno S.A., Kajmakow A.A., Nosik M.I.: Rabota rudnicznogo elektrooborudoweniya w awaryjnom riszyie. Bieзопасnost Truda w Promyszlennosti 1981, nr 3.

Recenzent: Prof. dr inż. Adam SZCZUROWSKI

Wpłynęło do Redakcji w marcu 1983 r.

#### ДЕТЕРМИНИСТИЧЕСКАЯ И ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УГРОЗ

##### Р е з ю м е

В статье даны основные определения и критерия а также анализ возможности и методов оценки электрических угроз в горной промышленности. Представлено примеры математических моделей квазидвухэлементной системы (источник угрозы-среда под угрозой) в системе множеств - как множества элементов и их взаимосвязей а также связей между их свойствами.

Указано, что принятие соответственной логической структуры системы а известными надёжностными оценками элементов даёт возможность более объективно определить вероятностную оценку уровня безопасности электрификации.

#### DETERMINISTIC AND PROBABILISTIC MODELS OF ELECTRIC HAZARD

##### S u m m a r y

Basic definition and criteria as well as methods of estimation for electric hazard in mining are presented. Quasi twoelement system model is described using set theoretical approach. The proper logic structure of the system with known reliability indices of its elements enables more objective probabilistic estimate of the safety level of electrification.