ZESZYTY
NAUKOWE
POLITECHNIKI
ŚLĄSKIEJ

P.3342/77

AUTOMATYKA

Z. 38
GLIWICE
1977

SPIS TREŚCI

Str.

1. Rozwój iskrobezpieczeństwa 3
2. Sposoby definiowania parametrów bezpiecznych 6
2.1. Statystyczna metoda oceny iskrobezpieczeństwa 6
2.2. Brytyjska metoda oceny iskrobezpieczeństwa 9
2.3. Inne metody oceny iskrobezpieczeństwa 10
3. Eksploatacja urządzeń iskrobezpiecznych 14
4. Probabilistyczny model zagrożenia wybuchowego od urządzeń iskrobezpiecznych 16
4.1. Prawdopodobieństwo pojawienia się gazu wybuchowego w przestrzeni wybuchowej 16
4.2. Prawdopodobieństwo wydzielenia podczas iskrzenia energii zdolnej do zapalenia mieszaniny wybuchowej 19
4.3. Średni czas między wybuchami 20
4.4. Dopuszczalna wartość średniego czasu między wybuchami . . 23
4.5. Przedział ufności dla średniego czasu między wybuchami . . 24
5. Iskiernik IEC 30
6. Iskiernik jako przyrząd pomiarowy 39
7. Wyznaczanie własności metrologicznych iskiernika IEC . . 42
7.1. Wyznaczanie krzywej wzorcowej 42
7.2. Dopuszczalne parametry iskrobezpieczne 51
7.3. Porównanie procedur kontroli czułości i atestacyjnych . . . 53
8. Podsumowanie 55
9. Załącznik 57
10. Literatura 67
11. Streszczenia 73

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ZESZYTY NAUKOWE

Nr 508

P. 3342/77

JERZY FRĄCZEK

POLITECHNIKA ŚLĄSKA BIBLIOTEKA GŁÓWNA

PODSTAWY OCENY ZAGROŻENIA WYBUCHOWEGO OD URZĄDZEŃ KONTROLNO-POMIAROWYCH W WYKONANIU ISKROBEZPIECZNYM W ASPEKCIE STOSOWANIA ISKIERNIKA IEC

(SKRÓT)

GLIWICE 1977

OPINIODAWCY:

Prof. dr hab. inż. Bolesław Kozłowski

Prof. mgr inż. Edmund Romer

Prof. dr hab. inż. Ludger Szklarski

REDAKTOR NACZELNY WYDAWNICTW UCZELNIANYCH
POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Jan Bandrowski

REDAKTOR DZIAŁU

Anna Skrzywan-Kosek

SEKRETARZ REDAKCJI

Jan Znamirowski

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Śląskiej

Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej
Gliwice, ul. Kujawska 2

Nakł. 80+141 Ark. wyd. 5,08 Ark. druk. 4,8 Papier offsetowy kl. III 70x100, 70 g
Oddano do druku 11 01 1977 Podpis. do druku 12.02 1977 Druk ukończ. w lutym 1977
Zam. 48/77 Cena zł 13,—

Skład, fotokopie, druk i oprawę
wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach

27 - 198/32

1. ROZWÓJ ISKROBEZPIECZEŃSTWA

Aparatura kontrolno-pomiarowa elektryczna i elektroniczna,przeznaczona do pracy w atmosferach wybuchowych, musi posiadać konstrukcję, która zapewni, że zarówno w stanie normalnym pracy tej aparatury oraz w stanie awaryjnym nie stanie się ona przyczyną powstania wybuchu. Zależnie od rodzaju konstrukcji rozróżnia się następujące rodzaje budowy przeciwwybuchowej urządzeń elektrycznych [1, 2, 59]:

1) urządzenie z osłoną ognioszczelną [4],
2) urządzenie o budowie wzmocnionej [5],
3) urządzenie z osłoną olejową [6],
4) urządzenie z osłoną piaskową [7],
5) urządzenie przewietrzane [8],
6) urządzenie z osłoną gazową pod ciśnieniem [8],
7) urządzenie iskrobezpieczne [9].

Aparatura w wykonaniu iskrobezpiecznym daje gwarancję największego bezpieczeństwa. Jest to związane z poziomem energetycznym urządzenia.Zgodnie z określeniem zawartym w Polskiej Normie [9], urządzenie iskrobezpieczne to "układ o małej energii elektrycznej, którego elementy tak dobrano, aby iskry elektryczne lub zjawiska termiczne, mogące powstać zarówno podczas normalnej pracy (przez zamknięcie lub otwarcie obwodu) jak wskutek awarii (np. przez zwarcie, przerwę w obwodzie) nie mogły wywołać wybuchu mieszaniny wybuchowej".

Podstawowe prace z dziedziny iskrobezpieczeństwa rozpoczęto w Wielkiej Brytanii. Celem tych prac było: ustalenie minimalnej energii niezbędnej do zapalenia mieszaniny wybuchowej metanu z powietrzem, stworzenie podstawowych metod badania iskrobezpieczeństwa, przebadanie aparatury stosowanej w górnictwie na warunki iskrobezpieczne oraz ustanowienie podstawowych norm [11, 12, 13], w celu stworzenia podstaw do projektowania. Prace prowadzone były w The Safety in Mines Research Board (Instytut Bezpieczeństwa Górniczego) w Sheffield o obecnej nazwie The Safety in Mines Research Establishment (SMRE). Pełny wykaz raportów naukowych tej instytucji do lat pięćdziesiątych włącznie można prześledzić w [10].

Potrzeby przemysłu chemicznego znacznie różnią się od potrzeb górnictwa. Cechuje go przede wszystkim duża różnorodność mieszanin wybuchowych,obiektów i pomieszczeń. Stąd od kilku lat funkcjonuje w Wielkiej Brytanii instytucja: The British Approvals Service for Electrical Equipment in Flammable Atmospheres (BASEEFA). Instytucja ta zajmuje się atestacją aparatury dla przemysłu chemicznego, biorąc odpowiedzialność prawną za atesty wy-

dawane w oparciu o normy, które ta instytucja wprowadziła jako obowiązujące w przemyśle chemicznym [14, 15, 16, 84].

Nad wprowadzeniem w życie obowiązujących przepisów i norm czuwają odpowiednie zrzeszenia producentów. Są tym zainteresowane jako producenci, aby uzyskać atest oraz aby ułatwić użytkownikowi wprowadzenie aparatury do bezpiecznego stosowania. Grupy robocze zrzeszeń opracowują przewodniki o znaczeniu ogólnym. Przykładem są przewodniki zrzeszenia producentów aparatury naukowej (SIMA) [17], zrzeszenia producentów aparatury kontrolno-pomiarowej (BIMCAM) [18], jak również poszczególnych producentów [19].

W skali międzynarodowej ustalenia w zakresie aparatury iskrobezpiecznej w sposób szczegółowy, lecz o ograniczonym zasięgu, są dokonywane przez organizację d/s standaryzacji krajów EWG - CENELEC (The European Electrical Standards Coordination Committee) [20]. Kraje te dokonują także konfrontacji postępu w dziedzinie iskrobezpieczeństwa na międzynarodowych konferencjach organizowanych periodycznie w Londynie przez The Institution of Electrical Engineers (IEE) [21].

W ślad za Wielką Brytanią prace w dziedzinie iskrobezpieczeństwa podjęły inne kraje [22, 23, 24, 25, 26]. Krótki rys historyczny zawarty jest w pracy [35] pod kątem widzenia dat ukazywania się narodowych norm. W pracy zwrócono szczególną uwagę na różnice w procedurach badań na warunki iskrobezpieczne. Oceniono je jako znaczne. Te różnice występują nie tylko w normach poszczególnych krajów, ale nawet w przepisach różnych instytucji tego samego kraju, co ma miejsce w USA (The Instrument Society of America [83], Underwrites' Laboratories Incorporated, Bureau of Mines, Factory Mutual Research Corporation, The National Fire Protection Association).

Stan osiągnięć na arenie międzynarodowej można prześledzić w oparciu o podstawowe prace przeglądowe [27÷35, 57, 71], podręczniki [36÷40], monografie [41, 42] i materiały konferencyjne [21, 43, 44].

W kraju podstawowe prace prowadzone są w Instytucie Bezpieczeństwa Górniczego Głównego Instytutu Górnictwa 45÷54 , który obecnie jest jedyną instytucją upoważnioną do wydawania atestów na aparaturę iskrobezpieczną. Większość prac poświęcona jest problematyce górniczej. Zagadnieniami górniczymi zajmowały się także Zakłady Konstrukcyjno-Mechanizacyjne Przemysłu Węglowego [55÷57]. Wymienione publikacje uzupełniają prace autorów spoza tych instytucji [58÷72].

Prace prowadzone w Związku Radzieckim w latach czterdziestych opierały się na tzw. statystycznej metodzie oceny iskrobezpieczeństwa obwodów elektrycznych [24]. Wyniki w ocenie iskrobezpieczeństwa tą metodą są inne niż metodą przyjętą w Wielkiej Brytanii [66, 72, 73]. Kraje RWPG, podobnie jak kraje EWG, posiadają organizację, która zajmuje się opracowaniem zaleceń w ramach normowania. W ramach RWPG opracowaniem zaleceń konstrukcji i badań urządzeń elektrycznych do atmosfer wybuchowych, w tym także w wykonaniu iskrobezpiecznym, zajęła się Sekcja 10 Stałej Komisji Maszynowej. W wyniku jej prac ukazały się zalecenia [74], na których oparto się przy opracowaniu polskich norm [1, 8].

W rezultacie istnienia dwu organizacji wydających międzynarodowe zalecenia normalizacyjne o węższym zasięgu, oparte na różnych metodach oceny iskrobezpieczeństwa, wystąpiły trudności w bezpośrednim stosowaniu aparatury iskrobezpiecznej, pochodzącej z importu. Aby możliwe było korzystanie z aparatury iskrobezpiecznej niezależnie od kraju, producenta i uzytkownika, czyni się usiłowania ujednolicenia zaleceń na forum międzynarodowym w szerszym sensie. W tym celu Międzynarodowa Komisja Elektrotechniczna (IEC) powołała Komitet nr 31 do opracowania zaleceń dotyczących aparatury elektrycznej, przeznaczonej do pracy w atmosferach wybuchowych. Podkomitet 31G zajął się aparaturą iskrobezpieczną. W pierwszym rzędzie zalecono jednolitą aparaturę do badań iskrobezpieczeństwa [76]. Dopiero w dalszej kolejności przystąpiono do opracowania zaleceń konstrukcyjnych i zasad badania [77].

Oprócz norm i zaleceń, które stanowią podstawę przy projektowaniu w poszczególnych krajach, opracowuje się również wytyczne [78, 79] oraz zarządzenia [80, 81]. Nie zawsze dotyczą one ściśle urządzeń iskrobezpiecznych, ale są z nimi powiązane, np. gdy ich treścią są ustalenia kategorii pomieszczeń z punktu widzenia zagrożenia wybuchem. Także wiele norm o znaczeniu ogólnym ma powiązanie z technikę iskrobezpieczeństwa. Przykładem jest norma dotycząca wymagań na osłony urządzeń elektrycznych [82].

Praca niniejsza poświęcona jest zagadnieniom określania dopuszczalnych parametrów iskrobezpiecznych. W centrum uwagi postawiono własności metrologiczne iskiernika oraz ich wpływ na wielkość dopuszczalnych prądów bezpiecznych.

Zdaniem autora, same własności metrologiczne nie decydują jednak o dopuszczalnych prądach bezpiecznych. Trzeba je widzieć na tle modelu zagrożenia wybuchowego i uznanych kryteriów oceny iskrobezpieczeństwa, przyjętych za obowiązujące przepisami norm krajowych i zagranicznych. Wzięto więc w pracy pod uwagę następujące dodatkowe aspekty:

1) różnice w definicjach minimalnych prądów zapalających (mpz) oraz prądów bezpiecznych (pb);
2) sposoby wyznaczania (mpz) oraz (pb);
3) model zagrożenia wybuchowego przy stosowaniu elektrycznych urządzeń iskrobezpiecznych;
4) przyjęte poziomy bezpieczne i niebezpieczne prawdopodobieństw zapalenia, średnie czasy pomiędzy wybuchami oraz związane z nimi współczynniki bezpieczeństwa.

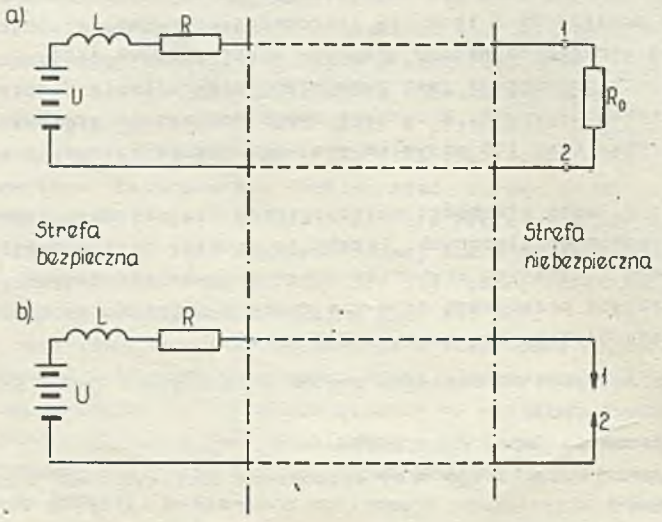
2. SPOSOBY DEFINIOWANIA PARAMETRÓW BEZPIECZNYCH

2.1. Statystyczna metoda oceny iskrobezpieczeństwa

Podstawowym celem wszelkich prac w dziedzinie iskrobezpieczeństwa jest ustalenie bezpiecznych wartości prądów i napięć w obwodach elektrycznych. To stało się punktem wyjścia, gdy tę dziedzinę zaczęto rozwijać w Anglii [3]. Oficjalnie zaakceptowane procedury postępowania [1, 9, 11, 74, 77] polegają na następującym:

Zgodnie z przyjętą definicją mpz ustala się ich wartości dla konkretnych obwodów elektrycznych. Za bezpieczne przyjmuje się pb, które określa się w oparciu o przyjęty system współczynników bezpieczeństwa, różnicujący klasę urządzenia. Klasyfikacja wiąże się z kategorią zagrożenia wybuchowego pomieszczenia i atmosfery, do jakich jest urządzenie przeznaczone.

W Polsce i krajach RWPG przyjęto tzw. statystyczną metodą oceny iskrobezpieczeństwa [25, 66]. Podstawy tej techniki można prześledzić na przykładzie prostego obwodu elektrycznego (rys. 1). Załóżmy, że nastąpiło od-

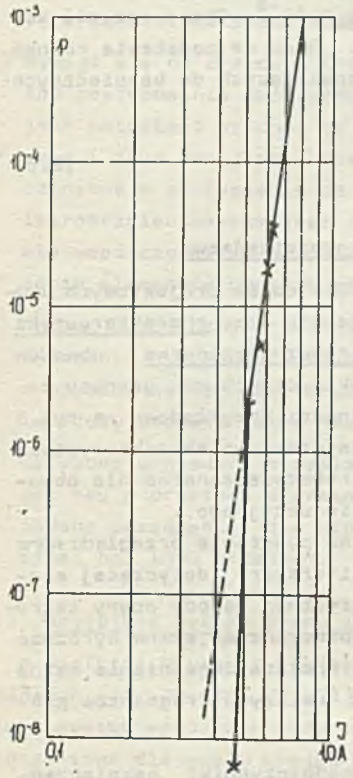


Rys. 1. Przykład lokalizacji obwodu iskrobezpiecznego

łączenie odbiornika, a końcówki doprowadzające 1 i 2 są zwierane i rozwierane w sposób przypadkowy. Okaże się, że zależnie od wielkości napięcia U oraz parametrów R i L iskry, jakie powstaną, mogą powodować:

a) zapalenie mieszaniny przy każdej wywołanej iskrze,
b) niezapalenie przy żadnej iskrze,
c) zapalenie przy niektórych tylko iskrach, a więc z pewnym prawdopodobieństwem $0 < p < 1$.

Dla pełnego scharakteryzowania obwodu pod kątem widzenia możliwości spowodowania zapłonu mieszaniny wybuchowej, należy określić prawdopodobieństwo zapalenia w funkcji parametrów obwodu (przykład dla metanu na rys. 2). W ZSRR dokonano pomiarów dla szerokiego zakresu parametrów obwodów i stwierdzono, że dla prawdopodobieństwa zapalenia większego od $p = 10^{-6}$ dobrze spełniane są zależności:



Rys. 2. Zależność prawdopodobieństwa p zapalenia wybuchowej mieszaniny metanowej od prądu w obwodzie indukcyjnym przy napięciu źródła 70 V i indukcyjności mniejszej niż 1 mH [27]. Linia ciągła - przebieg rzeczywisty, linia przerywana - przebieg aproksymowany z ekstrapolacji: $p > 10^{-6}$

$$p = K_1 (L) \cdot I^a \qquad (2.1)$$

dla obwodu indukcyjnego;

$$p = K_2 (C) \cdot U^b \qquad (2.2)$$

dla obwodu pojemnościowego,
gdzie $K_1(L)$, $K_2(C)$, a, b - stałe wartości współczynników dla danego L lub C oraz stałe wartości wykładników.

Na podstawie (2.1) oraz (2.2) dla danej indukcyjności lub pojemności otrzymujemy:

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{I_1}{I_2}\right)^a, \qquad (2.3)$$

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^b. \qquad (2.4)$$

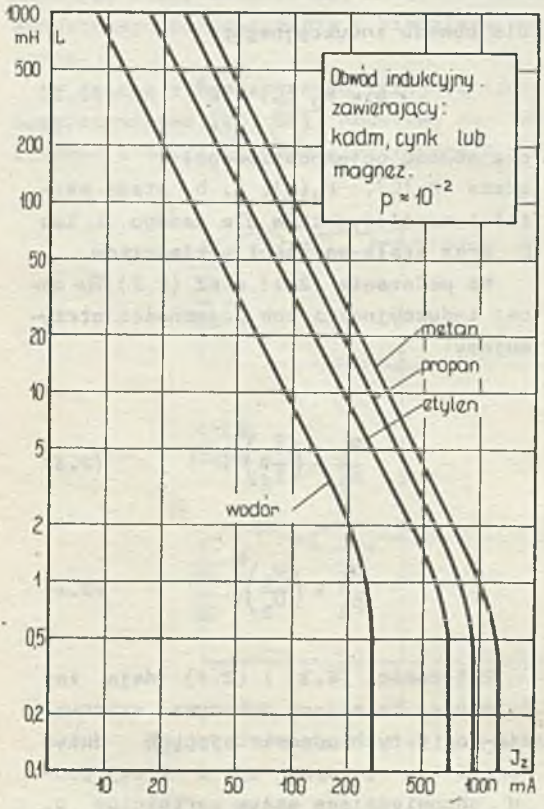
Zależności (2.3) i (2.4) dają informację, że możemy dokonywać szacowania p dużych odpowiadających dużym wartościom I oraz U i na tej podstawie wyznaczyć wartości I oraz U odpowiadające małym wartościom p. Taka jest właśnie technika postępowania. Przyjęto mianowicie w statystycznej metodzie oceny iskrobezpieczeństwa, że prądy bezpieczne i napięcia bezpieczne odpowiadają prawdopodobieństwu zapalenia $p = 10^{-8}$. Te wartości są największymi wartościami dozwolonymi, jakie mogą wystąpić w stanie normalnym pracy. Za minimalne prądy zapalające oraz minimalne napięcia zapalające przyjęto te, które odpowiadają prawdopodobieństwu zapalenia $p = 10^{-3}$. Ponieważ sprawdzenie prawdopodobieństwa $p = 10^{-8}$ jest bardzo cza-

sochłonne, sprawdzenia dokonuje się dla $p = 10^{-3}$ i w oparciu o zależności (2.3) i (2.4) szacuje się wartości I oraz U dla $p = 10^{-8}$.

Wg danych Kowalewa i Koczergi wartość a zawiera się w granicach $a \approx 13 \div 16$, zaś równanie (2.3) jest spełniane dla $p > 10^{-6}$, Chcąc uczynić metodę badań uniwersalną, przyjęto $a = b = 13$. Stąd na podstawie równań (2.3) i (2.4) uzyskuje się stosunek wartości zapalających do bezpiecznych:

$$\frac{I_z}{I_b} = \frac{U_z}{U_b} = 2,5 = k. \qquad (2.5)$$

Wielkość k przyjęto nazywać współczynnikiem bezpieczeństwa



Rys. 3. Minimalne prądy zapalające dla obwodu indukcyjnego przy napięciu źródła 24 V wg [40]

Dla celów projektowych zdejmuje się tzw. charakterystyki iskrobezpieczeństwa obwodów elektrycznych na granicy zapalności. Przykładowo na rys.3 przedstawiono charakterystyki iskrobezpieczeństwa dla obwodu indukcyjnego.

Na podstawie przeglądu norm i literatury dotyczącej statystycznej metody oceny iskrobezpieczeństwa, można wyróżnić następujące zagadnienia ważne dla dalszych fragmentów pracy:

1) Współczynniki bezpieczeństwa wśród których wyróżniamy:

   k_{Nn}, k_{Na} - współczynniki bezpieczeństwa dla pracy znamionowej; określają one o ile należy podwyższyć napięcie zasilające przy badaniu na warunki iskrobezpieczne w stanie pracy normalnym oraz awaryjnym;

   k_a - współczynnik bezpieczeństwa dla stanu awaryjnego; określa on ile razy należy powiększyć prąd w obwodzie przy badaniu na warunki iskrobezpieczne w stanie awaryjnym;

k_b - współczynnik bezpieczeństwa dla pracy normalnej; określa on ile razy należy powiększyć prąd w obwodzie przy badaniu na warunki iskrobezpieczne przy normalnej pracy.

2) Wymaga się od urządzeń iskrobezpiecznych zwiększonej niezawodności. Sposób postępowania uwidacznia, że istotnie zwiększa się niezawodność. Nie jest natomiast wiadome do jakiego stopnia niezawodność należy powiększyć i jaka ona jest w rzeczywistości. System współczynników bezpieczeństwa w odniesieniu do wartości prądów i napięć z punktu widzenia iskrobezpieczeństwa jest realizowany przy równoczesnym przyjętym systemie współczynników bezpieczeństwa odnoszącym się do możliwości przeciążenia elementów obwodów elektrycznych [9].

3) Poziom bezpieczny prawdopodobieństwa ustalany jest przy założeniu, że iskrzenie występuje zawsze i przebiega w warunkach jak podczas badania z użyciem iskiernika. Gdyby było inaczej, to w pierwszej kolejności należałoby ustalić jakie jest prawdopodobieństwo, że iskrzenie wystąpi.

4) Ustalona procedura określania poziomu bezpiecznego nie bierze pod uwagę, czy w praktyce w przestrzeni wybuchowej zlokalizowane będzie tylko badane urządzenie, dla którego np. wystawia się atest, czy też większe ilość np. 1000 urządzeń.

2.2. Brytyjska metoda oceny iskrobezpieczeństwa

W Wielkiej Brytanii i krajach, które oparły swoje normy na jej doświadczeniach [11, 20, 35, 73, 83] poziom bezpieczny ustala się także w oparciu o system współczynników bezpieczeństwa. Zestawienie współczynników bezpieczeństwa dla wielu krajów zawarte jest w [35]. Dla potrzeb tej pracy wystarczy jednak przytoczenie różnic we współczynnikach bezpieczeństwa obowiązujących w Polsce i Wielkiej Brytanii. Zestawienia dokonano w tabl.2.1.

Tablica 2.1

Porównanie współczynników bezpieczeństwa wg PN [8] z brytyjskimi [35]

Warunki	Współczynnik bezpieczeństwa		Wartości obowiązujące w Polsce		Wartości obowiązujące w Wielkiej Brytanii			
					bez styków z otwartym iskrzeniem		ze stykami z otwartym iskrzeniem	
			KI	KII	ia	ib	ia	ib
Normalne	k_{Nn}		1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
	k_b		2,5	2,5	1,5	1,5	3,0	1,5
Awaryjne	k_{Na}		1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1
	k_a	jedno uszkodzenie	-	-	1,5	1,0	3,0	1,5
		dwa uszkodzenia	1,5	-	1,0	-	3,0	-
		dowolna ilość uszk.	-	2,5	-	-	-	-

KI i KII - stopnie urządzeń iskrobezpiecznych wg PN odpowiadające odpowiednio kategoriom urządzeń brytyjskich ib oraz ia.

Oprócz zasadniczych różnic we współczynnikach systemy różnią się definicjami mpz. Wśród krajów członkowskich CENELEC dominująca jest definicja brytyjska mpz wprowadzona przez Allsopa [73, 89]: "Jeśli została znaleziona wartość prądu, przy którym zapalenie zachodzi łatwo, to prąd ten należy stopniowo zmniejszać skokami po 5 do 10% aż na 100 iskier nie uzyskuje się żadnego zapalenia. Wówczas wartość minimalnego prądu zapalającego równa się średniej arytmetycznej tej ostatniej wartości i wartości bezpośrednio wyższej, dla której otrzymuje się jeszcze zapalenie poniżej 100 iskier". Obecnie w SMRE zmieniono nieco postępowanie. Zmniejszenie prądu następuje do momentu, gdy na 400 obrotów uchwytu elektrod wolframowych iskiernika IEC nie uzyskuje się zapalenia mieszaniny wybuchowej. Tę wartość uważa się za mpz. Ilość obrotów uchwytu nie jest miarodajna do określenia ilości wywołanych iskier. Zależnie od typu obwodu (R,L,C) obserwuje się iskry nie tylko przy przerwach lub w momencie zwarć, lecz także podczas przesuwania się elektrod wolframowych po powierzchni dysku kadmowego.

Bez względu na definicje mpz, jeżeli są znane wartości mpz wyznaczone wg dowolnej definicji oraz znany jest system współczynników bezpieczeństwa, to dla tego samego obwodu można określić różnice w poziomach bezpiecznych wykorzystując zależność (2.3). Konieczne jest, aby pomiary były wykonywane na iskierniku tego samego typu. Tylko wówczas porównanie może być miarodajne.

2.3. Inne metody oceny iskrobezpieczeństwa

Odmienne poglądy na poziom bezpieczny są formułowane na gruncie naukowego uzasadnienia. Dominuje przekonanie, że należy ustalać poziom bezpieczeństwa w oparciu o materiał statystyczny odnoszący się do niezawodności urządzeń, harmonogramu pracy urządzeń, częstości występowania atmosfer wybuchowych, czasu pozostawania urządzeń w poszczególnych stanach.

Wiele z przytoczonych danych posiadają służby pomiarowe w przypadkach dobrze zorganizowanej gospodarki aparaturę pomiarową [91, 92]. Jakkolwiek żadna z przytoczonych dalej metod wyboru poziomu bezpiecznego nie znalazła jeszcze zastosowania przy opracowaniu norm i zaleceń, to na podstawie spotykanych w literaturze uwag i potrzeb unormowania gospodarki aparaturę przeciwwybuchową, można wnioskować, że metody te zostaną wprowadzone do praktyki [93]. Prześledzimy więc proponowane metody w punktach 1),2) i 3).

1) Metoda "normy iskrobezpieczeństwa", która ma "normę wyjściową" [87] oparta jest na rejestracji średniej częstości wybuchów μ_o zaobserwowanej w interwale czasu od początku liczenia do bieżącego czasu i wyrażonej na jednostkę produkcji. (W omawianym przykładzie produkcję stanowi węgiel wyrażany w tonach i mowa jest o wybuchach metanu w kopalniach). Taka funkcja ma tendencję do ustalenia się. Można więc przyjąć μ_o = = const w okresie służby aparatury. Wówczas strumień wybuchów dla dowolnego czasu eksploatacji konkretnego rodzaju aparatury będzie opi-

sany procesem Poissona ze średnią częstością μ_o, którą można przyjąć za normę wyjściową:

$$\mu_o = \frac{N}{t \cdot Q}, \tag{2.6}$$

gdzie:

t - czas od momentu obserwacji,
Q - ilość ton węgla za czas t,
N - ilość wybuchów metanu za czas t przy wydobyciu Q ton węgla.

Dalej wprowadza się pojęcie uśrednionej intensywności strumienia wybuchów pochodzących od jednostki aparatury, także odniesioną do tony węgla μ_1. Wówczas, przy schemacie jak poprzednio, uśredniona intensywność strumienia wybuchów od aparatury automatyki na 1 tonę będzie:

$$\mu_a = \sum_{i=1}^{i=k} S_i \cdot \mu_1, \tag{2.7}$$

gdzie S_i ilość jednostek tego samego rodzaju aparatury.

Równanie (2.7) wynika z założenia sumowania k niezależnych stacjonarnych procesów Poissona.

Przyjęto warunek, który nazwano podstawowym warunkiem iskrobezpieczeństwa: "Niebezpieczeństwo wybuchu wywoływane aparaturą iskrobezpieczną powinno być nieporównanie małe w porównaniu z niebezpieczeństwem wybuchów istniejącym w przemyśle węglowym w całości".

Oznacza to, że powinna zachodzić nierówność:

$$\mu_o \geqslant 100\ \mu_a. \tag{2.8}$$

W przybliżeniu, gdy dopuści się, że norma iskrobezpieczeństwa może być jednakowa dla każdej jednostki różnych aparatów, otrzymamy:

$$\mu_1 \leq \frac{\mu_o}{100 \sum_{i=1}^{k} S_i}. \tag{2.9}$$

Norma wyrażona wzorem (2.9) jest przybliżona. Pokazuje się także jak postępować, gdy nie są jednakowe μ_1 dla wszystkich jednostek i niejednakowe możliwości ich pomniejszenia.

2) Dla potrzeb IEC podjęto pracę, której celem było teoretyczne uzasadnienie klasyfikacji przestrzeni wybuchowych [88]. Problem widziany jest bardzo szeroko, gdyż ujmuje zagadnienie bezpieczeństwa dla kilku rodzajów budów przeciwwybuchowych. Uwzględniono przy tym niezawodność aparatury, częstość pojawiania się mieszaniny wybuchowej i czas pozostawania urządzeń w stanie awaryjnym. Rozpatrzono pracę pojedynczych urządzeń.

Autorzy przyjęli następujące założenia:

a) eksplozja może nastąpić wówczas, gdy spełnione zostaną dwa warunki: znajduje się wybuchowy gaz lub para w mieszaninie z powietrzem oraz występują: elektryczna iskra lub łuk lub gorąca powierzchnia o wystarczającej energii do zapalenia mieszaniny wybuchowej,

b) intensywność uszkodzeń λ ma wartość stałą i obowiązuje wykładnicze prawo niezawodności:

$$R(t) = \exp(-\lambda t) \tag{2.10}$$

za uszkodzenia uważa się takie jak: urządzenie, które nie iskrzyło - zaczyna iskrzyć; urządzenie ognioszczelne traci swą ognioszczelność, czy wreszcie mieszanina wybuchowa przenika do przestrzeni, w której są zlokalizowane urządzenia elektryczne,

c) znany jest średni czas pomiędzy uszkodzeniami urządzeń (MTBF),

d) całkowity niebezpieczny przedział czasu wynosi:

$$T_f = T_g + T_m. \tag{2.11}$$

gdzie:

T_g - czas trwania mieszaniny wybuchowej, która pojawia się z częstotliwością g,

T_m - czas zwłoki działania urządzenia zabezpieczającego.

Gdy o wykryciu uszkodzenia decyduje długość odcinka czasu T_c pomiędzy kolejnymi kontrolami stanu urządzenia, to wówczas

$$T_f = T_g + 1/2 \cdot T_c. \tag{2.12}$$

Przy powyższych założeniach, dla aparatu iskrobezpiecznego z podwójnym urządzeniem ograniczenia mocy (oba tej samej jakości, posiadające jednakowe wartości MTBF), autorzy podają następujące zależności na średni czas pomiędzy eksplozjami (MTBE):

a) dla $g \cdot T_c \gg 1$

$$\log (MTBE) = 2 \log (MTBF) - \log T_c, \tag{2.13}$$

b) dla $g \cdot T_c \ll 1$

$$\log (MTBE) = 2 \log (MTBF) - 2 \log T_c - \log g + 0{,}5. \qquad (2.14)$$

Istota metody polega na tym, że na podstawie równań (2.13) i (2.14) proponuje się ustalać do jakiej kategorii pomieszczenia można urządzenie dopuścić. Autorzy proponują dwie kategorie pomieszczeń. Powstaje problem co uznać za granicę podziału? Co jest dopuszczalnym poziomem, a co jest niedopuszczalnym poziomem? Zdaniem autorów (uważają, że może to być arbitralne) wartość MTBE = 10^7 godz., która dobrze koresponduje z obecną praktyką, uznać należy jako odpowiednią (1000 lat). Proponuję, aby granicę podziału pomieszczeń zdefiniować dla $g = 10^{-4}$, co oznacza pojawienie się gazu raz na rok.

W metodzie tej nie wzięto pod uwagę następujących ważnych czynników:

a) we wzorach (2.13) oraz (2.14) MTBF charakteryzuje uszkodzenie elementów ograniczających moc, jaka przenoszona jest do strefy niebezpiecznej. Nie jest to wystarczające do scharakteryzowania zagrożenia od urządzenia iskrobezpiecznego. W normalnym stanie pracy oraz w innych stanach awaryjnych zagrożenie takie występuje i winno być określone. Do tego nie wiadomo jak traktować stany, w których iskrzenie nie występuje, zaś prądy w obwodzie przewyższają wartości, która uważa się za niebezpieczne w świetle obowiązujących norm i zaleceń,

b) niebezpieczeństwo wnoszone przez urządzenie elektryczne traktowane jest indywidualnie. Nie bierze się pod uwagę pracy w strefie wybuchowej wielu urządzeń elektrycznych jednocześnie.

3) Zdaniem autora krytykującego poziomy bezpieczne i niebezpieczne prawdopodobieństw w normie opartej na statystycznej metodzie oceny iskrobezpieczeństwa [85], zadaniem norm i metody badań jest zapewnienie obiektywnej oceny bezpieczeństwa i ciągłego postępu w dalszym powiększaniu bezpieczeństwa. Żaden umowny poziom prawdopodobieństwa nie może być przyjęty dla oceny iskrobezpieczeństwa. Jedynym kryterium w ocenie bezpieczeństwa systemu elektrycznego może być tylko faktyczny stopień bezpieczeństwa, który należy oceniać wg następujących zasad:

a) o bezpieczeństwie systemu świadczy wskaźnik bezpieczeństwa obliczany z zależności:

$$A = \frac{1}{P_o \cdot (N_a + N_N)}, \qquad (2.15)$$

$$P_o = P_N + P_a, \qquad (2.16)$$

$$P_N = \sum_i P_{Ni} \frac{\sum \Delta t_N}{T}, \qquad (2.17)$$

$$P_a = \sum_j P_{aj} \cdot P(j), \qquad (2.18)$$

gdzie:

$N_a + N_N$ - sumaryczna ilość iskrzeń, jakie wystąpiły w stanie awaryjnym i stanie normalnym w określonym okresie czasu T;

P_N - wypadkowe prawdopodobieństwo zapalenia w stanie normalnym;

$\frac{\sum \Delta t_N}{T}$ - sumaryczny czas pozostawania systemu w i-tym stanie stanu normalnego, dla którego prawdopodobieństwo zapalenia określane na iskierniku wynosi P_{Ni};

P_a - wypadkowe prawdopodobieństwo zapalenia w stanie awaryjnym;

$P(j)$ - prawdopodobieństwo wystąpienia j-tego stanu awaryjnego, dla którego prawdopodobieństwo zapalenia wyznaczane na iskierniku wynosi P_{aj}.

b) wskaźnik bezpieczeństwa wyraża czas pomiędzy wybuchami. Uwzględnia on możliwe stany pracy systemu, częstotliwość występowania iskier i prawdopodobieństwo pojawienia się poszczególnych stanów awaryjnych. Autor podaje w jaki sposób określać poszczególne wielkości,

c) odniesieniem dla projektowanego systemu jest system pracujący, dla którego znany jest wskaźnik bezpieczeństwa,

d) zaleca się, aby badania z iskiernikiem nie dokonywać przez powiększenie prądu w celu ograniczenia ilości wywoływanych iskier,ale aby stosować mieszaniny bardziej agresywne, gwarantujące takie samo zwiększenie prawdopodobieństwa wybuchu. Powiększenie prądu prowadzi często do zmiany zjawisk w obwodzie w stanie nieustalonych, co ma wpływ na wynik badania.

3. EKSPLOATACJA URZĄDZEŃ ISKROBEZPIECZNYCH

O niezawodności urządzeń decyduje wiele czynników, które biorą swój początek w fazie projektowania. Ta właśnie faza znajduje swoje odbicie w istniejących przepisach, normach i zarządzeniach. Projektowanie jest właściwie jedyną dziedziną, która dysponuje prawnie ustalonymi zasadami,które odzwierciedlają specyfikę aparatury przeciwwybuchowej. Natomiast w zakresie: montażu, odbioru, eksploatacji i remontów instalacji oraz urządzeń przeciwwybuchowych w przemyśle chemicznym brak jest właściwych przepisów [94, 95, 96]. Brak jest także jakichkolwiek przepisów dotyczących dopuszczenia do stosowania urządzeń przeciwwybuchowych z atestami zagranicznymi [95]. Zdarza się natomiast, że przeglądy główne i remonty urządzeń przeciwwybuchowych dokonywane są przez pracowników bez uprawnień w zakresie obsługi urządzeń w wykonaniu przeciwwybuchowym [96].

Przy stosowaniu aparatury przeciwwybuchowej, fazy montażu, odbioru, eksploatacji i remontów, muszą przebiegać tak, aby przyczyniały się do zwiększenia niezawodności systemu: urządzenie przeciwwybuchowe - przestrzeń wybuchowa - człowiek, z punktu widzenia niemożności powstania wybuchu [97]. Istotnie, gdy w wymienionych fazach nie weźmie się pod uwagę aspektów zwiększenia niezawodności, to jedynym etapem, który można wykorzystać do zagwarantowania umownego poziomu bezpieczeństwa jest etap projektowania. Siłą rzeczy należy się spodziewać, że przepisy dotyczące projektowania w pojęciu potocznym będą "ostre". Stworzą one ograniczenia, które w wielu przypadkach wykluczą możliwość wykonania urządzenia w technice iskrobezpiecznej.

Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna "Automatyzacja w Przemyśle Chemicznym", jaka miała miejsce w Płocku w październiku 1975 r. stanowiła ciekawe forum, na którym zagadnienia powyższe stanęły w centrum uwagi sekcji "Urządzenia pomiarów i automatyki w obiektach przemysłu chemicznego zagrożonych wybuchem" [44, 93]. Ważny jest fakt, że zmierza się do zmiany istniejącego stanu. W tym celu poddano pod dyskusję zasady eksploatacji, które staną się podstawą przy opracowaniu brakujących przepisów [98].

Rzeczą niezmiernie ważną jest możność zbierania danych o aparaturze, które pozwolą na ocenę jej niezawodności. W tym zakresie należy odnotować dokumentację Zakładów Chemicznych "Oświęcim", prowadzoną dla aparatury pomiarowej [91]. Uzyskane dane są przetwarzane z użyciem maszyny cyfrowej dla uzyskania informacji o pracochłonności napraw, niezawodności aparatury i innych. W MZRiP Płock wprowadzono ostatnio system "badanie eksploatacyjne niezawodności" [92]. System dostarcza 4 tabulogramy:

1) "Zestawienie przeprowadzonych napraw aparatów wg zleceń mistrzów.
2) Zestawienie zbiorcze naprawianych aparatów wg producentów i typów z wyszczególnieniem rodzajów uszkodzeń.
3) Zestawienie czasu zużytego przez poszczególnych mechaników na naprawy.
4) Zestawienie zużytych i naprawionych części".

Ww. systemy pozwolą na ustalenie czasokresów międzyremontowych, okresu powtarzania kontroli stanu sprawności i momentów wycofania przyrządów z eksploatacji.

Na podstawie poddanych pod dyskusję propozycji, w niedalekiej przyszłości będzie można poczynić następujące założenia o eksploatacji urządzeń przeciwwybuchowych, które mają wpływ na niezawodność iskrobezpiecznych systemów:

1) Montaż, odbiór, eksploatacja i remonty dokonywane są przez personel specjalnie przeszkolony do obsługi urządzeń przeciwwybuchowych.
2) Sposób postępowania w poszczególnych fazach uwzględnia specyfikę urządzeń przeciwwybuchowych.
3) Dokonuje się kontroli stanu sprawności urządzeń i instalacji. Kontrola, oprócz sprawdzania spełniania przez urządzenie i instalacje funkcji podstawowych, wynikających z ich przeznaczenia, przyczynia się do powiększenia niezawodności.

4) Szczegółowe instrukcje eksploatacji są opracowane dla każdego zakładu lub nawet wydziału. Uzależnione to jest od wielkości, specyfiki branży, występujących substancji i kategorii zagrożenia wybuchem.

5) Przy zalecaniu częstości kontroli i jej zakresu uwzględnia się wymaganą częstość i zakres podyktowane potrzebą zapewnienia określonego poziomu niezawodności dla systemu przeciwwybuchowego.

6) System prowadzonej dokumentacji w poszczególnych fazach pozwala na ocenę wskaźników niezawodności.

Powyższe założenia są celowe do ustalenia probabilistycznego modelu zagrożenia wybuchowego od urządzeń iskrobezpiecznych. Stworzenie takiego modelu pozwoli na uzmysłowienie sobie jakie czynniki wpływają na poziom prawdopodobieństwa powstania wybuchu i jakimi drogami można je zmniejszyć.

W obecnych zapatrywaniach zwraca się uwagę, że o prawdopodobieństwie powstania wybuchu od urządzeń iskrobezpiecznych decydują czynniki [27, 36, 40, 71, 85]:

w - prawdopodobieństwo wystąpienia stężenia wybuchowego,

p_u - prawdopodobieństwo uszkodzenia, któremu towarzyszy iskrzenie,

p - prawdopodobieństwo zapalenia przy występującym iskrzeniu i gazie wybuchowym,

czyli

$$P = w \cdot p_u \cdot p \qquad (3.1)$$

W praktycznym działaniu, o czym świadczy kształt obowiązujących norm, punkt ciężkości przeniesiono na czynnik p. Poziom współczynników bezpieczeństwa ujmuje jednak fakt, że prawdopodobieństwo w może przyjmować różne wartości. Podobnie przyjęcie dwóch stopni urządzeń iskrobezpiecznych (KI i KII) uwzględnia fakt, że częstotliwość pojawiania się gazu wybuchowego w przestrzeni wybuchowej może być różna. Tak postępuje się we wszystkich krajach.

4. PROBABILISTYCZNY MODEL ZAGROŻENIA WYBUCHOWEGO OD URZĄDZEŃ ISKROBEZPIECZNYCH

4.1. Prawdopodobieństwo pojawienia się gazu wybuchowego w przestrzeni wybuchowej

W celu jakościowego i ilościowego określenia zagrożenia, jakie powstaje z pojawieniem się gazu wybuchowego, należy prześledzić proces pojawiania się i zanikania gazu w przestrzeni wybuchowej. Ponieważ pojawianie się gazu jest związane z niezawodnością urządzeń technologicznych, można więc proces pojawiania się i zanikania gazu w przestrzeni wybuchowej rozpatrywać jak proces powstawania i usuwania uszkodzeń [97, 101].

Przedział czasu T_G pomiędzy kolejnymi zanikami mieszaniny wybuchowej jest sumą: przedziału czasu T_o, w którym mieszanina wybuchowa nie występuje oraz przedziału czasu T_g, w którym mieszanina występuje. Zajmijmy się w pierwszej kolejności przedziałem czasu bez mieszaniny wybuchowej T_o zakładając, że czas pozostawania gazu w przestrzeni wybuchowej T_g jest do pominięcia. Przyjmijmy następujące dalsze założenia:

1) Ilości pojawień się gazu X_{ot} w rozłącznych przedziałach czasowych są niezależnymi zmiennymi losowymi i proces $\{X_{ot},\ 0 \leqslant t < \infty\}$ jest procesem o przyrostach niezależnych.
2) Niech prawdopodobieństwo występienia określonej ilości pojawień gazu w przedziałach czasowych i jednakowej długości będzie stałe, czyli niech proces $\{X_{ot},\ 0 \leqslant t < \infty\}$ będzie procesem o przyrostach jednorodnych.
3) Niech pojawienie się gazu następuje nagle i pojedynczo, a prawdopodobieństwo pojawienia się gazu w małym przedziale czasowym t jest proporcjonalne do tego przedziału czasu $\lambda_o.t$.

Dla tak sformułowanych założeń proces stochastyczny pojawienia się gazu $\{X_{ot},\ 0 \leqslant t < \infty\}$ jest jednorodnym procesem sygnałowym Poissona [99], dla którego zachodzi relacja na strumień ilości pojawień gazu w przedziale czasu (0,t):

$$P(X_{ot} = g) = \frac{(\lambda_o.t)^g}{g!}\, e^{-\lambda_o.t} \qquad (4.1)$$

gdzie $\lambda_o > 0 = \text{const}$ - jest intensywnością pojawień gazu.

Wzór (4.1) wyraża prawdopodobieństwo tego, że w przedziale czasu (0,t) ilość pojawień gazu X_{ot} w przestrzeni wybuchowej wynosi g, gdy intensywność pojawień gazu wynosi λ_o i jest stała. Dla $X_{ot} = 0$, co oznacza niepojawienie się gazu w przedziale czasu (0,t), otrzymujemy:

$$P(X_{ot} = 0) = P(T_o > t) = e^{-\lambda_o.t}. \qquad (4.2)$$

Równanie (4.2) wyraża prawdopodobieństwo tego, że czas oczekiwania na pojawienie się gazu T_o jest większy od danego czasu t i jest odpowiednikiem wykładniczego prawa niezawodności [100]. Dla tego prawa średni przedział czasu, w którym mieszanina wybuchowa nie pojawia się, wynosi:

$$\bar{T}_o = \frac{1}{\lambda_o}. \qquad (4.3)$$

Postępując podobnie z przedziałem czasu pozostawania gazu w przestrzeni wybuchowej T_g możemy określić prawdopodobieństwo tego, że licz-

ba zaników gazu w przestrzeni wybuchowej X_{gt} w przedziale czasu $(0,t)$ jest równa g:

$$P(X_{gt} = g) = \frac{(\lambda_g t)^g}{g!} e^{-\lambda_g t} \tag{4.4}$$

gdzie $\lambda_g > 0 = \text{const}$ - intensywność zaników gazu.

Dla procesu $\left\{X_{gt},\ 0 \leqslant t < \infty\right\}$ zakładamy, że zanik następuje nagle i czas trwania zaniku jest do pominięcia. Zatem zależność (4.4) jest podobnie jak zależność (4.1) jednorodnym procesem sygnałowym Poissona i przez analogię, - średni czas pozostawania gazu w przestrzeni wybuchowej wyraża się zależnością:

$$\bar{T}_g = \frac{1}{\lambda_g}, \tag{4.5}$$

Procesy Poissona (4.1) oraz (4.4) składają się na proces wynikowy, którym opisać można prawdopodobieństwo tego, że w przedziale czasu $(0,t)$ liczba pojawień gazu X_{Gt} wynosić będzie g, przy czym przedział czasu T_G pomiędzy kolejnymi pojawieniami się gazu jest sumą przedziału czasu pozostawania gazu w przestrzeni wybuchowej T_g oraz przedziału czasu T_o, w którym w przestrzeni gaz wybuchowy nie występuje. Ponieważ każdy z przedziałów czasu T_g i T_o posiada rozkład wykładniczy (równanie (4.2)), to ich suma T_G także posiada rozkład wykładniczy [99], zaś średni czas pomiędzy kolejnymi pojawieniami się mieszaniny wybuchowej wyraża się zależnością:

$$\bar{T}_G = \bar{T}_o + \bar{T}_g = \frac{1}{\lambda_o} + \frac{1}{\lambda_g}. \tag{4.6}$$

Wówczas proces wynikowy, który jest sumą dwu procesów Poissona, jest także procesem Poissona [99] określonym zależnością:

$$P(X_{Gt} = g) = \frac{(\lambda_G t)^g}{g!} e^{-\lambda_G t}, \tag{4.7}$$

gdzie $\lambda_G = \frac{1}{\bar{T}_G} = \text{const}$ - intensywność pojawień gazu ogólna.

Proces (4.7) jest procesem pojawień i zaniku gazu w przestrzeni wybuchowej i jako proces Poissona jest procesem ergodycznym. Dla przestrzeni wybuchowej oznacza to, że prawdopodobieństwa pozostawania gazu wybuchowego w przestrzeni lub jego braku, gdy t wzrasta, są coraz mniej zależne od

stanu przestrzeni wybuchowej, jaki miał miejsce w chwili t = 0. Dlatego możemy, dla odpowiednio długiego odcinka czasu obserwacji procesu wynikowego (0,t), określić przez jaką część czasu gaz wybuchowy będzie pozostawał w przestrzeni wybuchowej. Punktem wyjścia jest średnia liczba pojawień gazu, która dla rozkładu wykładniczego wynikowego wynosi [99]:

$$E(g) = \lambda_G t = \frac{t}{\bar{T}_G} = \frac{t}{\bar{T}_o + \bar{T}_g}. \qquad (4.8)$$

Stąd oczekiwany czas pozostawania gazu w przestrzeni wybuchowej w odcinku czasu (0,t) wynosi:

$$\bar{t}_g = E(g) \cdot \bar{T}_g = \frac{\bar{T}_g}{\bar{T}_o + \bar{T}_g} \cdot t = w \cdot t \qquad (4.9)$$

gdzie w - współczynnik zdatności wybuchowej, analogiczny ze współczynnikiem gotowości w teorii niezawodności.

Współczynnik zdatności wybuchowej można interpretować jako prawdopodobieństwo, że w dowolnie wybranej chwili czasu t, w której przebiega proces pojawiania się i zaniku gazu w przestrzeni wybuchowej znajduje się gaz wybuchowy.

4.2. Prawdopodobieństwo wydzielania podczas iskrzenia energii zdolnej do zapalenia mieszaniny wybuchowej

Prawdopodobieństwo zapalenia p od prądu lub napięcia obwodu, o których była mowa w pkt 2, wyznacza się przy użyciu iskiernika. W komorze iskiernika zawsze znajduje się mieszanina wybuchowa, a urządzenie badane znajduje się w stanie normalnym lub w sztucznie spowodowanym wybranym stanie awaryjnym. W warunkach eksploatacji przemysłowej urządzenia iskrobezpiecznego prawdopodobieństwo p należy interpretować w następujący sposób:

Urządzenie iskrobezpieczne może znajdować się w dowolnym stanie j, co będzie związane z niezawodnością urządzenia. Dla każdego stanu j można określić prawdopodobieństwo p_j wydzielania się podczas iskrzenia energii zdolnej do zapalenia mieszaniny wybuchowej. Prawdopodobieństwo to (p_j) można określić przez włączenie iskiernika w obwód urządzenia. Jeżeli w przestrzeni wybuchowej znajduje się n urządzeń iskrobezpiecznych, to dla każdego urządzenia i należy określić prawdopodobieństwo całkowite p_i zdolności wydzielenia się w dowolnej chwili czasu t energii zdolnej do zapalenia mieszaniny wybuchowej, gdy w poszczególnych stanach j urządzenia prawdopodobieństwo to wynosi p_j, zaś prawdopodobieństwo wystąpienia poszczególnych stanów wynosi P_j. Ponieważ poszczególne stany wyłączają się

parami, na mocy twierdzenia o prawdopodobieństwie całkowitym mamy dla i-tego urządzenia [99]:

$$p_i = \sum_j p_j \, P_j. \tag{4.10}$$

4.3. Średni czas między wybuchami

Korzystając z zależności (4.9) i (4.10) możemy obecnie określić prawdopodobieństwo zapalenia p_{zi} w pojedynczym iskrzeniu dla i-tego urządzenia pośród n znajdujących się w tej samej przestrzeni wybuchowej

$$p_{zi} = p_i \cdot w, \tag{4.11}$$

skąd wynika: dla $w = 1$ $\quad p_{zi} = p_i$,

dla $w \to 0$ $\quad p_{zi} \to 0$.

Zależność (4.11) wynika z niezależności wydzielenia się energii podczas iskrzenia, zdolnej do zapalenia mieszaniny wybuchowej oraz pojawiania się gazu wybuchowego.

Załóżmy, że w i-tym urządzeniu nastąpiło uszkodzenie, któremu towarzyszy iskrzenie. Niech dla każdego iskrzenia prawdopodobieństwo zapalenia p_{zi} będzie stałe. Wówczas prawdopodobieństwo, że nastąpi $X_i = m$ wybuchów, gdy ilość wywołanych iskier wynosi N_i opisuje rozkład dwumianowy [66, 99]:

$$P(X_i = m) = \binom{N_i}{m} p_{zi}^m \, (1 - p_{zi})^{N_i - m}. \tag{4.12}$$

N_i traktujemy jako ilość uszkodzeń urządzenia, którym za każdym razem towarzyszy zaiskrzenie. Niech ilość uszkodzeń N_i będzie opisana procesem Poissona

$$P(N_i = l_i) = \frac{(\lambda_i \cdot t)^{l_i}}{l_i!} e^{-\lambda_i \cdot t}. \tag{4.13}$$

gdzie λ_i - intensywność uszkodzeń, którym towarzyszy zaiskrzenie,

$1/\lambda_i = \bar{T}_{ui}$ - średni czas pomiędzy zaiskrzeniami.

Z (4.12) i (4.13) otrzymujemy proces złożony [99]:

$$P(X_i = m) = \frac{(p_{zi} \lambda_i t)^m}{m!} e^{-p_{zi}\lambda_i t}. \tag{4.14a}$$

dla którego: $\bar{m}_i = p_{zi}\lambda_i\, t,$ (4.14b)

$$\sigma_i^2 = p_{zi}\lambda_i\, t, \tag{4.14c}$$

$$\bar{T}_{wi} = \frac{1}{p_{zi}\lambda_i} \text{ - średni czas pomiędzy wybuchami.} \tag{4.14d}$$

Dla przestrzeni wybuchowej ważna jest sumaryczna ilość zaiskrzeń, a więc określamy nową zmienną losową

$$X_o = \sum_i X_i, \tag{4.15}$$

gdy każda ze zmiennych X_i ma rozkład Poissona. Proces powstawania wypadkowej ilości wybuchów będzie procesem Poissona [99]:

$$P(X_o = m) = \frac{(\lambda_o\, t)^m}{m!}\, e^{-\lambda_o t} \tag{4.16a}$$

gdzie $\lambda_o = \sum_i p_{zi}\,\lambda_i$ - intensywność wybuchów ogólna, (4.16b)

dla którego średni czas pomiędzy wybuchami wyraża się zależnością:

$$\bar{T}_{wo} = \frac{1}{\lambda_o} = \frac{1}{\sum_i p_{zi}\,\lambda_i}, \qquad i = 1,2,\ldots,n. \tag{4.17}$$

W szczególnym przypadku, gdy:

$$p_{z1} = p_{z2} = \ldots = p_{zi} = p_z = p \;.\; w,$$

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \ldots = \lambda_i = \lambda = \frac{1}{\bar{T}_u},$$

otrzymamy:

$$\bar{T}_{wo} = \frac{\bar{T}_u}{n \;.\; w \;.\; p}. \tag{4.18}$$

Zależnie od wartości poszczególnych wielkości we wzorze (4.18) można przewidywać następujące przypadki:

1) Gaz występuje ciągle, co odpowiada kategorii przestrzeni wybuchowej W I:

$$w = 1 \;\Rightarrow\; \bar{T}_{wo} = \frac{\bar{T}_u}{n \;.\; p}. \tag{4.19}$$

2) Urządzenia nie są iskrobezpieczne:

$$p = 1 \rightarrow \bar{T}_{wo} = \frac{\bar{T}_u}{n \cdot w}. \qquad (4.20)$$

O bezpieczeństwie decyduje niezawodność urządzeń i prawdopodobieństwo pojawienia się gazu.

3) W przestrzeni zlokalizowane jest tylko jedno urządzenie:

$$n = 1 \rightarrow \bar{T}_{wo} = \bar{T}_w = \frac{\bar{T}_u}{w \cdot p}. \qquad (4.21)$$

4) Jedno urządzenie w przestrzeni o kategorii W I:

$$n = 1,\ w = 1 \rightarrow \bar{T}_w = \frac{\bar{T}_u}{p}. \qquad (4.22)$$

5) Jak 4), lecz urządzenie nie jest iskrobezpieczne:

$$n = 1,\ w = 1,\ p = 1 \rightarrow \bar{T}_w = \bar{T}_u. \qquad (4.23)$$

O bezpieczeństwie decyduje tylko niezawodność urządzenia.

6) Pojedyncze urządzenie o stałym zagrożeniu.
Ten przypadek zachodzi, gdy występuje otwarte iskrzenie i p = 1. Wówczas średni czas pomiędzy wybuchami zależy od średniego czasu pomiędzy poszczególnymi iskrami $\bar{T}_J$ oraz prawdopodobieństwa występowania gazu w:

$$\bar{T}_w = \frac{\bar{T}_J}{w}. \qquad (4.24a)$$

$\bar{T}_J$ (podobnie zresztą jak i $\bar{T}_u$), może mieć dowolny rozkład, byleby wartość średnia była stała.

Gdy $w \rightarrow 1$ oraz $n = 1$ $\bar{T}_w \rightarrow \bar{T}_J$, (4.24b)

zaś gdy mamy n urządzeń to

$$\bar{T}_w = \frac{\bar{T}_J}{n}. \qquad (4.25)$$

Zależność (4.25) jest przypadkiem, dla którego zagrożenie wybuchowe jest największe i może być odniesieniem dla pozostałych przypadków. Z kolei zależność (4.21) odnosi się do przypadku o najmniejszym zagrożeniu.

7) Szczególnym przypadkiem są badania z użyciem iskiernika, dla których jest $n = 1$ oraz $w = 1$. Czas $\bar{T}_J$ określić można np. na podstawie danych iskiernika IEC (pkt 5). Uchwyt elektrod wolframowych posiada prędkość obrotową 80 obr/min. Na każdy obrót otrzymuje się 4 przerwy i 4 zwarcia. Zatem wartość $\bar{T}_J = 3{,}125 \cdot 10^{-3}$ min, a średni czas pomiędzy wybuchami określić należy z zależności:

$$\bar{T}_w = \frac{\bar{T}_J}{p}. \tag{4.26}$$

Dla typowych wartości p otrzymujemy:

dla $p = 10^{-8}$ $\quad \bar{T}_w \approx 5208$ godz. ≈ 7 miesięcy,

dla $p = 10^{-6}$ $\quad \bar{T}_w \approx 52$ godz.,

dla $p = 10^{-3}$ $\quad \bar{T}_w \approx 3$ min,

dla $p = 10^{-2}$ $\quad \bar{T}_w \approx 19$ s.

Zwykle dokonuje się sprawdzenia obwodów dla $p = 10^{-3}$ lub $p = 10^{-2}$.

4.4. Dopuszczalna wartość średniego czasu między wybuchami

Idea zawarta w pracach [87, 88], aby wymagania w stosunku do aparatury przeciwwybuchowej ustalać w oparciu o istniejący stan bezpieczeństwa, jaki istnieje w danej gałęzi przemysłu, wydaje się być słuszna. Jest bowiem niecelowe stawianie ekstremalnie trudnych do spełnienia wymagań, gdy częstość wybuchów, pochodzących z innych źródeł niż aparatura przeciwwybuchowa, rejestrowana w gałęzi przemysłowej jest wysoka, gdyż i tak nie poprawi to ogólnego stanu bezpieczeństwa.

Załóżmy, że w oparciu o zebrane dane statystyczne w danej gałęzi przemysłowej został określony średni czas pomiędzy wybuchami (pożarami) $\bar{T}_{wp}$, powodowanymi innymi przyczynami niż w wyniku stosowania aparatury przeciwwybuchowej. Wówczas średni czas pomiędzy wybuchami określany dla aparatury iskrobezpiecznej z zależności (4.17)-(4.26), powinien być większy od wartości $\bar{T}_{wp}$ co zapisujemy:

$$\bar{T}_{wp} \cdot k = \bar{T}_{wd} \leq \bar{T}_{wo}, \tag{4.27}$$

gdzie $k > 1$ (np. 100) - współczynnik bezpieczeństwa dla dopuszczalnego średniego czasu pomiędzy wybuchami $\bar{T}_{wd}$.

Dla przykładu posłużymy się danymi dla w, $\bar{T}_u$ oraz $\bar{T}_{wp}$, jakie uzyskano w kombinacie węglowym "Donieckugoł" w Zagłębiu Donieckim [87]. Dane te wynoszą odpowiednio:

$$w \approx 2{,}9 \cdot 10^{-3}; \quad \bar{T}_u \approx 1{,}5 \cdot 10^{-1} \text{ lat}; \quad \bar{T}_{wp} = 2{,}5 \text{ lat}.$$

Jeżeli przyjąć k = 100, to wartość dopuszczalna średniego czasu pomiędzy wybuchami powodowanymi urządzeniami iskrobezpiecznymi wynosi:

$$\bar{T}_{wd} = k \cdot \bar{T}_{wp} = 250 \text{ lat.}$$

Obecnie dla powyższych danych, przy założeniu, że wszystkie urządzenia są identyczne, z zależności (4.18) i (4.27) możemy określić graniczne dopuszczalne ilości urządzeń iskrobezpiecznych n_{gr}, które można zlokalizować w przestrzeni wybuchowej:

$$n_{gr} = \frac{\bar{T}_w}{\bar{T}_{wp}} \cdot \frac{1}{w \cdot p} \cdot \frac{1}{k}. \qquad (4.28)$$

W tablicy 4.1 zestawiono te wartości dla różnych prawdopodobieństw p.

Tablica 4.1

p	10^{-2}	10^{-3}	10^{-6}	10^{-8}	
n_{gr}	20	200	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^7$	

Jeżeli dla każdego urządzenia trzeba przyjąć indywidualne wartości p_{zi} oraz λ_i, wówczas obliczenia należy dokonać korzystając z zależności (4.17) Wartość graniczna n_{gr} zostanie ustalona metodą kolejnych przeliczeń. Zwykle jednak iskrzenia pochodzą od uszkodzeń kabli i stąd zależność (4.18) może mieć zastosowanie.

4.5. Przedział ufności dla średniego czasu między wybuchami

Zajmiemy się przypadkiem prostym, gdy intensywność uszkodzeń dla każdego z n urządzeń jest taka sama i wynosi λ, zaś średni czas pomiędzy wybuchami wyraża się zależnością (4.18). Wielkości występujące w zależności (4.18), tj. w, λ, p wyznacza się w oparciu o dane statystyczne. Innymi słowy wyznacza się wartości w^*, λ^*, p^* statystyk $\hat{w}$, $\hat{\lambda}$, $\hat{p}$, które są estymatorami wielkości w, λ, p. Dla każdej z wielkości możemy określić przedziały ufności dla zadanego poziomu ufności

$$\beta = 1 - \alpha : \langle w_1, w_2; \beta \rangle, \langle \lambda_1, \lambda_2; \beta \rangle, \langle p_1, p_2; \beta \rangle,$$

dla których wartości granic będą funkcjami zaobserwowanych wartości estymatorów: w^*, λ^*, p^*. Wówczas przedział ufności dla średniego czasu pomiędzy wybuchami $\bar{T}_{wo}$ wyznaczymy z zależności:

$$P\left\{T_1 < \bar{T}_{wo} < T_2\right\} = \beta_T \qquad (4.29)$$

gdzie

$$T_1 = \frac{1}{n \cdot w_2 \cdot \lambda_2 \cdot p_2}, \tag{4.30}$$

$$T_2 = \frac{1}{n \cdot w_1 \cdot \lambda_1 \cdot p_1}, \tag{4.31}$$

są odpowiednio granicą dolną i górną przedziału ufności.

W dalszej kolejności należy więc wyznaczyć wartości wielkości występujących w wyrażeniach na T_1 i T_2.

Przedział ufności dla w

Zgodnie ze wzorem (4.9) współczynnik zdatności wybuchowej oblicza się z zależności:

$$w = \frac{\bar{T}_g}{\bar{T}_o + \bar{T}_g} = \frac{\bar{T}_g}{\bar{T}_G}. \tag{4.32}$$

Zarówno czas pozostawania gazu w przestrzeni wybuchowej jak i czas, w którym gaz nie występuje, mają zgodnie z założeniami rozkład wykładniczy. Podobnie suma tych czasów: $T_G = T_o + T_g$ ma także rozkład wykładniczy.

Wyznaczenie realizacji estymatorów $\hat{\bar{T}}_g$, $\hat{\bar{T}}_o$ oraz $\hat{\bar{T}}_G$: $\bar{T}_g^*$, $\bar{T}_o^*$, $\bar{T}_G^*$ odbywa się w oparciu o ten sam materiał statystyczny. Dla procesu Poissona (4.7) będziemy obserwować od pewnego momentu $t_o = 0$, kolejne pojawianie się gazu aż do m-tego w chwilach $t_1, t_2, \ldots, t_m$. Równocześnie dla procesu Poissona (4.4) będziemy notować odpowiednie czasy pozostawania gazu w przestrzeni wybuchowej: $T_{g1}, T_{g2}, \ldots, T_{gm}$. Wówczas jako estymatory wielkości T_g i T_G możemy wykorzystać estymatory wyznaczone metodą największej wiarygodności [99]:

$$\hat{\bar{T}}_G = \frac{t_m}{m}, \tag{4.33}$$

$$\hat{\bar{T}}_g = \frac{\sum_{i=1}^{m} T_{gi}}{m}; \tag{4.34}$$

a stąd:

$$\hat{w} = \frac{\sum_{i=1}^{m} T_{gi}}{t_m}. \tag{4.35}$$

Przekształćmy wyrażenie na "w" zdefiniowane w zależności (4.9) do postaci:

$$w = \frac{1}{1 + \frac{\bar{T}_o}{\bar{T}_g}} = \frac{1}{1 + w_o}. \tag{4.36}$$

Jeżeli wyznaczymy przedział ufności dla w_o:

$$P\left\{ w_{o1} \leq w_o \leq w_{o2} \right\} = \tag{4.37}$$

to wówczas łatwo wyznaczymy wartości w_1 i w_2 wyznaczające przedział ufności dla współczynnika zdatności wybuchowej w.

W [97] podany jest sposób wyznaczania w_{o1} i w_{o2}, gdy T_o i T_g mają rozkład wykładniczy. Można w tym celu skorzystać z wykresu zależności współczynników δ_1 i δ_2 od β oraz zaobserwowanej ilości pojawień lub zaników gazu w czasie t_m. Wówczas w_{o1} i w_{o2} oblicza się z zależności:

$$w_{o1} = \frac{w_o^*}{\delta_2}, \tag{4.38}$$

$$w_{o2} = \frac{w_o^*}{\delta_1}, \tag{4.39}$$

gdzie w_o^* - zaobserwowana wartość w_o, którą można wyznaczyć korzystając z zależności (4.33) i (4.34).

Przedział ufności dla λ

Szerokie omówienie budowy przedziałów ufności dla λ zawarte są w pracach [97], [100], [103]. Dla potrzeb niniejszej pracy przytacza się jedynie przypadek wyznaczania przedziału ufności intensywności uszkodzeń, gdy rozkład czasu do uszkodzenia jest wykładniczy. Jeżeli w tym celu obserwuje się n urządzeń elektrycznych i notuje się moment uszkodzenia każdego urządzenia aż do chwili t_m, w której uległo uszkodzeniu urządzenie m-te, wówczas metodą największej wiarygodności otrzymuje się

$$\lambda^* = \frac{m}{Q(t_m)}, \tag{4.40}$$

gdzie

$$Q(t_m) = \sum_{i=1}^{m} t_i + (n-m)\, t_m,$$

t_i - momenty, w których następowały kolejne niezależne uszkodzenia.

Statystyka $2m\lambda/\hat{\lambda}$ ma rozkład χ^2 o $k = 2m$ stopniach swobody [103]. Stąd na podstawie zaobserwowanej wartości λ^* estymatora $\hat{\lambda}$, gdy uległo uszkodzeniu m urządzeń, otrzymujemy dla zadanego poziomu ufności $\beta=1-\alpha$:

$$\lambda_1 = \frac{\chi^2 (1-\alpha/2),\ 2m}{2\,Q\,(t_m)} \tag{4.41}$$

$$\lambda_2 = \frac{\chi^2 \alpha/2,\ 2m}{2\,Q\,(t_m)}, \tag{4.42}$$

gdzie $\chi^2 (1-\alpha/2),\ 2m$, $\chi^2 \alpha/2,\ 2m$ - są kwantylami zmiennej losowej o rozkładzie χ^2 o stopniach swobody $k = 2m$. Kwantyle spełniają zależność $P(\chi^2_k \geq \lambda^2_{\alpha,k}) = \alpha$. Są one podane np. w [100].

Przedział ufności dla p

Temu zagadnieniu poświęca się w niniejszej pracy szczególną uwagę, gdyż wiąże się ono bezpośrednio z problemami oceny wyników badań iskrobezpieczeństwa przy użyciu iskierników.

W tym fragmencie pracy rozpatrzymy przypadek iskiernika o czułości, która nie ulega zmianie z upływem czasu. Rozszerzenie zagadnienia zawarte jest w punkcie 7 przy omówieniu wyznaczania krzywej wzorcowej dla iskiernika, którego czułość ulega zmianie.

Sposób przeprowadzania doświadczalnego sprawdzenia iskrobezpieczeństwa pozwala na posługiwanie się w teoretycznych rozważaniach rozkładem dwumianowym prawdopodobieństwa.

Prawdopodobieństwo tego, że przy N wywołanych iskrzeniach wystąpi $X = m$ wybuchów, gdy prawdopodobieństwo wystąpienia wybuchu w pojedynczym iskrzeniu wynosi p (dla iskiernika $w = 1$ i $p_z = p$) wyraża się zależnością (4.12). Ponieważ sprawdzenie iskrobezpieczeństwa polega na wyznaczaniu częstości względnej m/N i na tej podstawie sądzi się o prawdopodobieństwie p, zatem interesuje nas zmienna losowa $Y = X/N$. Jej rozkład prawdopodobieństwa jest taki sam jak dla zmiennej losowej X i mamy:

$$P(Y = \frac{X}{N}) = P(X = m) = \binom{N}{m} p^m (1-p)^{N-m}, \tag{4.43}$$

zaś momenty rozkładu wynoszą odpowiednio:

$$m_1 = p; \quad (a), \qquad \mu_2 = \frac{p(1-p)}{N}; \quad (b). \tag{4.44}$$

Zgodnie z teorią estymacji [99] statystyka

$$U = \frac{\bar{X}}{N} \tag{4.45}$$

jest estymatorem nieobciążonym i najefektywniejszym parametru p.

W trakcie badania na warunki iskrobezpieczne mamy do czynienia z zaobserwowaną wartością estymatora parametru p

$$p^* = \frac{m}{N}. \tag{4.46}$$

Chcemy oszacować w jakich granicach zawiera się nieznana wartość p dla badanego obwodu na podstawie zaobserwowanej wartości p^*. Ponieważ badanie odbywa się przy dużej wartości N i małej wartości p, więc bezpośrednie korzystanie z zależności (4.43) jest kłopotliwe. Także tablice statystyczne nie są dla wymaganych danych opracowane. Korzystamy więc z twierdzenia granicznego Moivre'a-Laplace'a, zgodnie z którym dla $N \to \infty$ estymator p ma rozkład asymptotycznie normalny

$$\mathcal{N}\left(p, \sqrt{\frac{p(1-p)}{N}}\right). \tag{4.47}$$

Przy estymacji przedziałowej parametru p z próby o N elementach rozkładu normalnego (4.47), przedział ufności wyraża się zależnością [99]:

$$P\left\{p - k_\beta \sqrt{\frac{p(1-p)}{N}} \leq \hat{p} \leq p + k_\beta \sqrt{\frac{p(1-p)}{N}}\right\} = \beta, \tag{4.48}$$

gdzie k_β - liczba wyznaczana w ten sposób, aby prawdopodobieństwo tego, że zmienna losowa N(0,1) przyjmie wartość z przedziału $(-k_\beta, +k_\beta)$ wynosiło β.

Równanie (4.48) wyraża współzależność pomiędzy wielkościami p oraz $\hat{p}$. Ponieważ nas interesuje oszacowanie nieznanego parametru p, równanie (4.48) przekształca się do postaci:

$$P\left\{\frac{N}{N + k_\beta^2}\left[p^* + \frac{k_\beta^2}{2N} - k_\beta \sqrt{\frac{p^*(1-p^*)}{N} + \left(\frac{k_\beta}{2N}\right)^2}\right] \leq \right.$$

$$\left. \leq p \leq \frac{N}{N + k_\beta^2}\left[p^* + \frac{k_\beta^2}{2N} + k_\beta \sqrt{\frac{p^*(1-p^*)}{N} + \left(\frac{k_\beta}{2N}\right)^2}\right]\right\} = \beta. \tag{4.49}$$

Przez analogię do równania (4.48), równanie (4.49) możemy zapisać w postaci:

$$P\left\{ p^* - \Delta \leq p \leq p^* + \Delta \right\} = \beta . \tag{4.50}$$

Na podstawie równania (4.49) i (4.50) otrzymujemy wyrażenie na Δ :

$$\pm \Delta = \pm \left[\frac{k_\beta}{1 + k_\beta^2/N} \sqrt{\frac{p^*(1-p^*)}{N} + \left(\frac{k_\beta}{2N}\right)^2} \pm \left[p^* \left(\frac{1}{1 + k_\beta^2/N} - 1 \right) + \frac{\frac{k_\beta^2}{2N}}{1 + k_\beta^2/N} \right] \right] = \pm k \cdot p^* . \tag{4.51}$$

Dla dużych N przyjmijmy zależność przybliżoną

$$\pm \Delta \approx \pm k_\beta \sqrt{\frac{p^*(1-p^*)}{N}} = \pm k \cdot p^* \tag{4.52}$$

Δ wg równania (4.52) stanowi połowę przedziału ufności dla p. Stąd określamy ilość iskier, jakie należy wywołać dla zadanych β i Δ oraz zaobserwowanej wartości p^*

$$N = \frac{k_\beta^2 \, p^*(1-p^*)}{\Delta^2} . \tag{4.53}$$

W odniesieniu do badań na warunki iskrobezpieczeństwa wzór (4.52) i (4.53) należy interpretować następująco:

1) Jeżeli wykonamy N iskrzeń i zarejestrujemy w wyniku tego m wybuchów, to zakładając, że wymagamy oszacowania parametru p z poziomem ufności β , otrzymamy ze wzoru (4.53) wartość połowy przedziału ufności, który odpowiada założonemu β.
2) Zakładając, że wymagamy sprawdzenia p z dokładnością $\pm \Delta = \pm k\, p^*$ i poziomem ufności β , obliczamy ze wzoru (4.53) wymaganą ilość iskrzeń niezbędną do sprawdzenia prawdopodobieństwa p.

W normie PN-72/E-08107, dla sprawdzenia $p = 10^{-3}$ wymaga się wykonania 16.000 iskier. Przyjmując poziom ufności $\beta = 0{,}95$, dla którego $k_\beta = 1{,}96$, otrzymujemy dla $p^* = 10^{-3}$ wg zależności (4.49):

$$P\left\{ 0{,}62 \cdot 10^{-3} \leq p \leq 1{,}62 \cdot 10^{-3} \right\} = 0{,}95,$$

wg (4.50) i (4.52):

$$P\left\{0{,}5 \cdot 10^{-3} \leq p \leq 1{,}5 \cdot 10^{-3}\right\} = 0{,}95.$$

Z uzyskanych wyników wyciągamy następujące wnioski:

1) Przybliżenie (4.52) jest dopuszczalne dla $p \leq 10^{-3}$.
2) Można uważać, że wywołując 16 000 iskier, gdy p jest rzędu 10^{-3}, otrzymujemy oszacowanie p^* z dokładnością $\pm$ 0,5 p^* na poziomie ufności $\beta = 0{,}95$.

Dla ilustracji w tablicy (4.2) zestawione są wartosci k dla interesujących nas poziomów prawdopodobieństw.

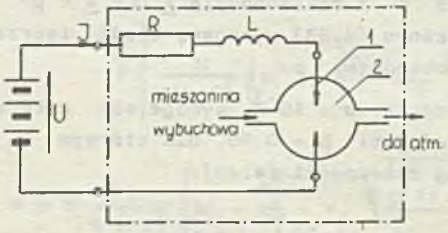
Tablica 4.2

p^*	N	Wg (4.51)		Wg (4.52)
		-k	+k	$\pm$ k
10^{-2}	$16 \cdot 10^2$	0,3835	0,6183	0,4875
10^{-3}	$16 \cdot 10^3$	0,3844	0,6239	0,4897
10^{-6}	$16 \cdot 10^6$	0,3844	0,6245	0,4899
10^{-8}	$16 \cdot 10^8$	0,3844	0,6245	0,4899

Przedział ufności (4.49) można również określić wykorzystując tożsamość Cloppera-Garwooda, która wyraża powiązanie rozkładu dwumianowego z rozkładem F - Snedecora [100]. Dla dużych wartości prawdopodobieństwa p można skorzystać z gotowych tablic przedziałów ufności sporządzanych dla rozkładu dwumianowego [104].

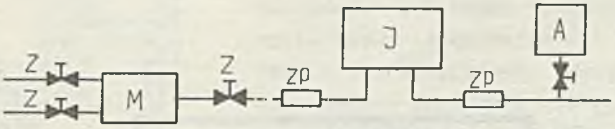
5. ISKIERNIK IEC

Na rys. 4 przedstawiono ideę iskiernika. W zamkniętej komorze umieszcza się dwie elektrody. Mogą one być obie ruchome lub tylko jedna. Komory wypełnia się gazem o stężeniu najniebezpieczniejszym, tzw. mieszaniną probierczą, której skład podany jest w normie. Następnie powoduje się zwieranie i rozwieranie styków. Po każdym wybuchu wymienia się gaz w komorze. W badanym obwodzie ustala się wielkości napięć i prądów stosownie do stopnia urządzenia oraz



Rys. 4. Uproszczony schemat iskiernika z badanym obwodem
1 - elektrody, 2 - komora

grupy gazu. Typowy schemat układu gazowego iskiernika przedstawiony jest na rys. 5.



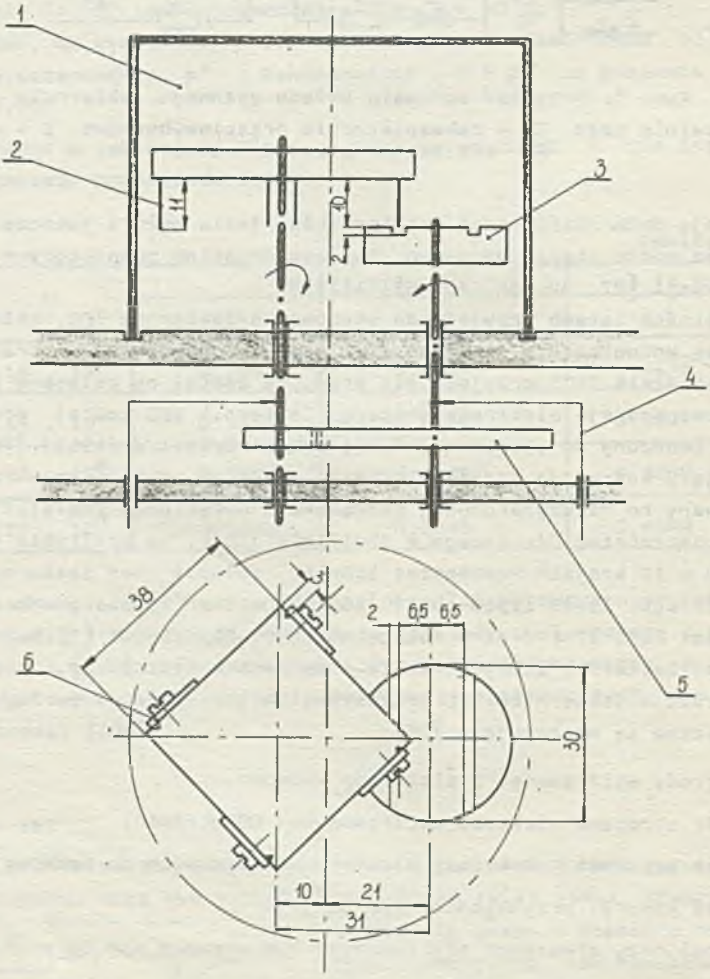
Rys. 5. Przykład schematu układu gazowego iskiernika
M - mieszalnik gazu, ZP - zabezpieczenie przeciwwybuchowe, I - iskiernik, A - analizator gazu, Z - zawory

Istnieje duża różnorodność iskierników, jakie były i jeszcze są stosowane przez różne stacje badawcze. Tym zagadnieniom poświęconych jest wiele publikacji [27, 32, 36, 40, 63, 112].

W ostatnich latach przyjęto do stosowania iskiernik IEC, który jest iskiernikiem uniwersalnym, zalecanym do badania obwodów R, L oraz C [76]. Nazwa "iskiernik IEC" przyjęła się stąd, że został on zalecony przez Międzynarodową Komisję Elektrotechniczną. Iskiernik IEC został opracowany w RFN i wprowadzony do stosowania normą VDE 0170/0171 d (1965) [75], jako obowiązujący aparat do badań iskrobezpieczeństwa. W 1965 roku został zaprezentowany na Międzynarodowej Konferencji Dyrektorów Instytucji Naukowych Bezpieczeństwa Górniczego w Sheffield [101]. Na podstawie badań prowadzonych w 12 krajach Podkomitet 31G-IEC zalecił ten iskiernik do stosowania (Praga, 11-25 lipca 1967) [102]. Jest on zalecany do stosowania. Zaleceniami RWPG [74] oraz w Polsce normą PN-72/E-08107 [9].W Stanach Zjednoczonych iskiernik IEC jest także urządzeniem stosowanym.

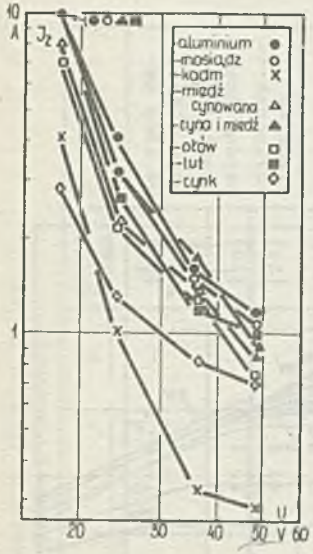
Konstrukcja iskiernika IEC przedstawiona jest na rys. 6. Podstawowe dane techniczne są następujące [76]:

- 4 elektrody wolframowe, 1 elektroda kadmowa;
- prędkość obrotowa elektrod wolframowych: 80 obr/min;
- stosunek prędkości obrotowej elektrod wolframowych do kadmowej: 50:12;
- objętość komory: przynajmniej 250 cm^3;
- pojemność przy otwartych elektrodach: nie większa niż 30 pF;
- indukcyjność przy zwartych elektrodach: nie większa niż 3 μH;
- dopuszczalne prądy: nie mogą przekroczyć 1,5 A w stanie normalnym;
- dopuszczalne napięcie: do 300 V;
- zakres badań indukcyjności: do 1 H;
- wymiana elektrod wolframowych: po 50 000 wywołanych iskier.



Rys. 6. Układ elektrod iskiernika IEC wg [76]

1 - komora, 2 - elektroda wolframowa, 3 - elektroda kadmowa, 4 - doprowadzenie elektryczne, 5 - przekładnia, 6 - uchwyt elektrody wolframowej

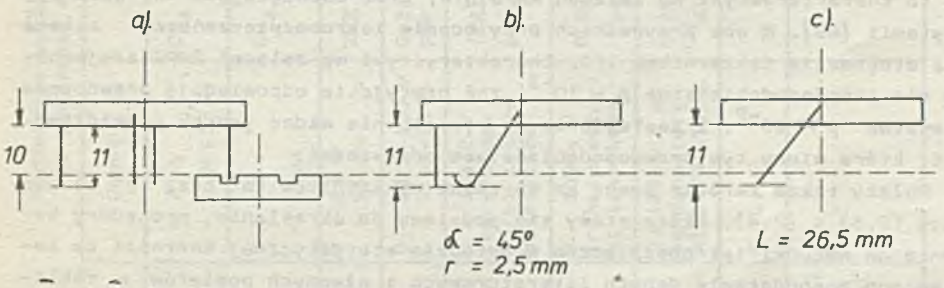


Rys. 7. Minimalne prądy zapalające w obwodzie bezindukcyjnym otrzymane dla iskiernika IEC z dyskami z różnych materiałów wg [32]

Ogólnie można stwierdzić, że iskiernik IEC jest obecnie najbardziej rozpowszechnionym iskiernikiem. W SMRE dokonano bardzo obszernych badań iskiernika IEC pod kątem widzenia uzyskiwanych czułości [32]. Zdjęto charakterystyki iskrobezpieczeństwa dla różnych obwodów i różnych gazów. Zostały one opublikowane jako oficjalnie obowiązujące w Wielkiej Brytanii [84]. Jest to zarazem najobszerniejszy materiał dotyczący własności iskiernika IEC.

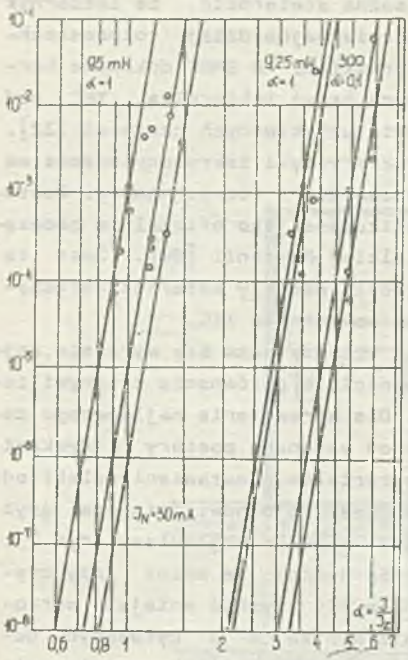
Iskiernik IEC odznacza się wyraźnie największą czułością w porównaniu z innymi iskiernikami. Dla sprawdzenia najlepszego zestawu elektrod wykonano pomiary z dyskami z różnych materiałów. Zestawienie elektrod kadm-wolfram jest najodpowiedniejsze, gdyż iskiernik jest wówczas najczulszy (rys.7).

Okazuje się jednak, że można przy użyciu iskiernika IEC uzyskać mniejsze wartości mpz niż wynika to z cytowanych dotychczas charakterystyk iskrobezpieczeństwa [105]. Uzyskuje się to drogę prostych zmian ustawienia elektrod wolframowych. Szczególnie duży wpływ zmiany ustawienia elektrod zauważa się dla obwodu rezystancyjnego. Na rys.8 przedstawiono różne sposoby ustawienia elektrod wolframowych, dla których uzyskuje się wyraźnie różne wartości mpz.

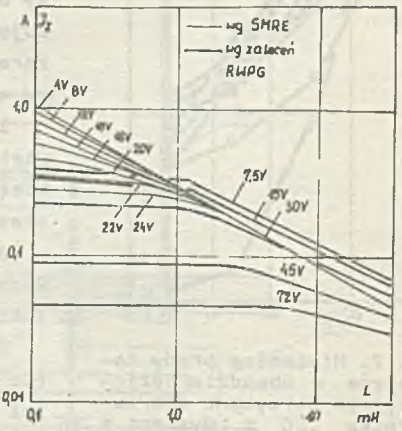


Rys. 8. Różne ustawienie elektrod wolframowych w iskierniku IEC

Mało spotyka się materiałów, które zawierałyby dane na temat powtarzalności pomiarów. Pewne dane zawarte są w [106] bez próby interpretacji. Na rys. 9 podane są charakterystyki, jakie uzyskano dla iskiernika IEC przy wyznaczaniu prądu zapalającego w obwodzie prądu stałego. Poszczególne proste pochodzą z różnych dni pomiaru.



Rys. 9. Ilustracja niestałości iskiernika IEC wg [106]



Rys. 10. Porównanie charakterystyk iskrobezpieczeństwa ustalonych wg różnych definicji mpz i różnych przepisów na podstawie [74] i [89]

Zwróćmy uwagę na charakterystyki iskrobezpieczeństwa podane na rys.10. Są to charakterystyki wg zaleceń RWPG [74] oraz obowiązujące w Wielkiej Brytanii [89]. W obu przypadkach przy ocenie iskrobezpieczeństwa zaleca się stosowanie iskierników IEC. Charakterystyki wg zaleceń RWPG zdejmowano dla prawdopodobieństwa $p = 10^{-3}$, zaś brytyjskie odpowiadają prawdopodobieństwu $p \approx 10^{-2}$. Z zestawienia na rys. 10 nie widać jednak prawidłowości, które winny tym prawdopodobieństwom odpowiadać.

Należy także zwrócić uwagę na wartości wykładników "a" oraz "b" we wzorach (2.3) i (2.4), które stały się podstawą do określenia procedury badania na warunki iskrobezpieczne w metodzie statystycznej.Wartości te zestawiono na podstawie danych literaturowych i własnych pomiarów w tablicy 5.1. Jak widać rozbieżności są znaczne zależnie od typu iskiernika, a i dla samego iskiernika IEC również. Wartości współczynników bezpieczeństwa pozostają jednak nadal bez zmian. Do tego w jednym przypadku stwierdza się, że obniżenie wartości prądu o 16-20% poniżej mpz powoduje, że nie otrzymuje się wybuchów nawet przy dużej liczbie wywołanych iskier.Jeśli wziąć pod uwagę Lp. 7 i 8, to dla pierwszego przypadku otrzymujemy współczynnik bezpieczeństwa w granicach k = 1,31÷1,44 a w drugim k=1,65÷2,24.

Porównanie wykładników "a" i "b" w równaniach (2.3) i (2.4)
na podstawie danych literaturowych i własnych pomiarów

Lp.	Iskiernik	Obwód	Gaz	Zakres p^*	a	b	Źródło liter.	Uwagi
1	ZSRR - do badań atestacyjnych	U = 7 V L = 1 mH÷37 H	CH_4 + pow	$10^{-3} \div 3.10^{-1}$	12,9	-	[25]	Na tych danych oparto statystyczną metodę oceny iskrobezpieczeństwa
		U = 70 V L < 1 mH	CH_4 + pow	$2.10^{-6} \div 10^{-3}$	15,1	-	[25]	
				$5.10^{-9} \div 2.10^{-6}$	49,9	-	[25]	
2	SMRE - eksperymentalny	U = 24 V L = 95 mH	22% H_2+pow	$10^{-3} \div 1$	13,9	-	[41]	
3	Iskiernik L Kop."Barbara"	U = 24 V-130 V L = 1 mH-10 H	8,3÷8,5 CH_4+ pow	$10^{-5} \div 10^{-1}$	10,5÷120	-	[48]	
4	IEC "BELMA"	U = 10÷12 V transformatorki iskrobezpieczne	(22±1)% H_2 + pow.	$8.10^{-4} \div 3.10^{-2}$	6,6÷9,2	-	[65]	
5	IEC Kop."Barbara"	U = 20÷24 V transformatorki iskrobezp.	8,5% CH_4 + pow.	$10^{-4} \div 10^{-2}$	6,7÷11,2	-	[65]	
6	IEC Kop."Barbara"	C = 122÷563 μF kondensatory elektrolitycz.	8,3÷8,6% CH_4 + pow.	$10^{-3} \div 10^{-1}$	-	6,4÷14	[66]	
7	IEC ZSRR	R, L, C	-	$> 10^{-6}$	31,2÷43	31,2÷43	[107]	
8	ZSRR - do badań atestacyjnych (do ok.1963 r.)	R, L, C	-	-	14,3÷23	14,3÷23	[107]	

Przed sprawdzeniem obwodu elektrycznego na warunki iskrobezpieczne jak i po sprawdzeniu, należy dokonać kontroli czułości iskiernika. Parametry obwodów kontrolnych i mieszaniny probiercze dla poszczególnych klas wybuchowości gazów są zwykle podane w normach i zaleceniach.Koncentracja składników palnych jest taka, że wymagana jest najmniejsza energia do spowodowania wybuchu.

Mieszaniny probiercze i parametry obwodów kontrolnych obowiązujące w Polsce [9] odpowiadają dokładnie zestawieniu w zaleceniach RWPG [74].Natomiast są zgodne tylko w zakresie mieszanin probierczych z zaleceniami IEC [77] oraz CENELEC [20]. Oprócz mieszanin probierczych wykazanych w normach i zaleceniach stosowane są także inne mieszaniny probiercze przebadane przez indywidualne stacje badawcze [108÷111]. Te mieszaniny stosuje się głównie dla sprawdzenia iskrobezpieczeństwa dla zadanego współczynnika bezpieczeństwa zamiast powiększenia prądu lub napięcia. Sugestie odnośnie korzyści z takiego postępowania omówiono przy okazji cytowania pozycji [85]. (Wg PN dopuszcza się ten sposób badania).

W większości norm i zaleceń podaje się jakie winny być temperatura i ciśnienie mieszaniny probierczej przy atestacji. Te same warunki obowiązują przy zdejmowaniu charakterystyk iskrobezpieczeństwa. W tabl. 5.2 zestawiono odnośne wymagania z kilku źródeł.

Tablica 5.2

Lp.	Norma lub zalecenia	Wymagania odnośnie ciśnienia	Wymagania odnośnie temperatury
1	PN [9]	760 ± 10 mm Hg	brak wymagań
2	RWPG [74]	760 ± 20 mm Hg	20-35°C
3	CENELEC [20]	brak wymagań	brak wymagań
4	IEC [77]	W zaleceniach zawarta jest uwaga: ... Wpływ normalnych zmian temperatury i ciśnienia w laboratorium, jak i wilgotności powietrza do sporządzania mieszanin są małe. Jakieś wyraźne wpływy zmian tych wielkości staną się widoczne podczas rutynowego kalibrowania aparatu do badań.	

Źródłową pracą z zakresu badania wpływu zmian temperatury i ciśnienia na wielkość energii zapalającej jest praca B. Lewisa i G. von Elbe [113]. Z tej pracy są cytowane dane w późniejszych publikacjach różnych autorów [2], [27], [36] i inne.

Zgodnie z tytułem niniejszej pracy interesują nas wyniki uzyskiwane przy wyznaczaniu mpz z użyciem iskiernika IEC, przy różnych parametrach gazów probierczych. Do ciekawych należą wyniki przedstawione w pracach [108], [114], [116]. Należy tu dodać, że w zakresie normowania nie spotyka się wy-

magań odbiegających od zestawionych w tablicy 5.2. Natomiast warto odnotować informację o patencie iskiernika skonstruowanego do badań atestacyjnych przy dużym ciśnieniu gazu probierczego [115]. Jest to nadążanie za potrzebą przewidywania przy atestacji różnorodnych sytuacji spotykanych w przemyśle.

Oceny wpływu zmian wielkości wpływających w warunkach przeprowadzania atestacji możemy dokonać przyjmując za punkt wyjścia zależność (2.1). Zakładamy, że dla małych zmian poszczególnych wielkości wpływających X_i, dla $i = 1,2,\ldots,n$, wartość wykładnika "a" pozostaje bez zmian. Wówczas zależność (2.1) przyjmuje postać:

$$p = K(X_1, X_2, \ldots, X_n) \cdot I^a. \tag{5.1}$$

Podobnie wszystkie wielkości wpływające wpływają na wielkość mpz:

$$I_z = f_z(X_1, X_2, \ldots, X_n). \tag{5.2}$$

Jeżeli w warunkach odniesienia funkcję (5.2) oznaczymy jako f_o, to na mocy twierdzenia o wartości oczekiwanej kombinacji liniowej dowolnej, skończonej ilości zmiennych losowych [117], możemy przyrost mpz określić z zależności:

$$d I_z = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial f_o}{\partial X_i} \right)_o \cdot d X_i. \tag{5.3}$$

Gdy w obwodzie utrzymywać będziemy wartość prądu na stałym poziomie, to przy zmianie wielkości wpływających prawdopodobieństwo zapalenia zmieni się w stosunku do tego, jakie obserwowano w warunkach odniesienia:

$$p^* = p_o^* \cdot \frac{K(X_1, X_2, \ldots, X_n)}{K_o(X_{10}, X_{20}, \ldots, X_{no})}. \tag{5.4}$$

Tą samą wartość K można zaobserwować przy różnej kombinacji wartości zmiennych $X_1, X_2, \ldots X_n$. Nie jest rzeczą możliwą określenie bezpośrednie współczynnika K, gdyż nie dysponujemy postacią analityczną, w której występowałyby wielkości wpływające. Dlatego należy uciec się do obliczeń przybliżonych. Prześledzimy to, gdy ulega zmianie tylko jedna wielkość wpływająca X_i.

Gdy wielkość X_i przyjmuje dwie wartości x_{io} i $x_{io} + dx_i = x_{i1}$ i wyznaczymy dla nich dwie wartości I_{zo} oraz I_{z1}, którym odpowiada ta

sama wartość prawdopodobieństwa zapalenia p_o^*, wówczas K_1 wyznaczymy z zależności (5.1), gdy uwzględnimy powyższe założenia:

$$K_1 = K_o \cdot \left(\frac{I_{zo}}{I_{z1}}\right)^a . \tag{5.5}$$

Do powyższego mogą posłużyć dane z literatury, przedstawione w postaci wykresów lub tablic. Uwzględniając następnie (5.5) w (5.4) otrzymujemy dla zmiany X_i:

$$p_1^* = p_o^* \left(\frac{I_{zo}}{I_{z1}}\right)^a . \tag{5.6}$$

Z danych doświadczalnych określimy prąd

$$I_{z1} = I_{zo} + \left(\frac{\partial f_o}{\partial X_i}\right)_o d X_i , \tag{5.7}$$

który po wprowadzeniu do (5.6) pozwala już na wyznaczenie p_1^* przy zmianie wielkości wpływającej X_i z wartości x_{io} na x_{i1}:

$$p_1^* = p_o^* \frac{1}{\left[1 + \frac{1}{I_{zo}} \left(\frac{\partial f_o}{\partial X_i}\right)_o d X_i\right]^a} . \tag{5.8}$$

Korzystając z zależności (5.8) można ocenić jakie mogą być zmiany p^*, gdy ciśnienie lub temperatura będą się zmieniały oddzielnie przy atestacji w granicach przewidzianych normami i zaleceniami (tablica 5.2). Dla zmian ciśnienia od 740 do 780 mm Hg oraz zmian temperatury od 20 do 35°C otrzymujemy przy "a" = 16:

- dla zmiany ciśnienia: $p_1^*(P) = 1{,}6 \cdot p_o^*$;
- dla zmiany temperatury: $p_1^*(t) = 1{,}4 \cdot p_o^*$.

Gdy natomiast, stosownie do danych z tablicy 5.1 (Lp. 7) przyjąć "a" = = 43, to mamy dla tej samej zmiany ciśnienia:

$$p_1^*(P) = 3{,}7\, p_o^* .$$

W sumie można uważać, że przy dopuszczalnych zmianach ciśnienia i temperatury rozrzuty p będą rzędu, jaki można obserwować przy wywołaniu ilości iskrzeń wynikającej z zależności (4.53), przy przyjętych: $\beta = 0{,}95$ i $\Delta = \pm 0{,}5\, p^*$. Przy $a \approx 40$ ten przedział rozrzutu się podwaja.

6. ISKIERNIK JAKO PRZYRZĄD POMIAROWY

Iskiernik wraz z badanym obwodem można uważać za przyrząd pomiarowy. Jeżeli rozpatrywać obwód indukcyjny z rys. 4, to iskiernik wraz z obwodem możemy uważać za przyrząd do pomiaru prądu. Wzorcowanie takiego przyrządu polega na wyznaczeniu odpowiedniości ciągłej prawdopodobieństwa zapalenia p^* od prądu I przy stałej wartości napięcia źródła zasilania U i indukcyjności obwodu L.

Do iskiernika jako narzędzia pomiarowego winny mieć zastosowanie nazwy i określenia przyjęte w metrologii [118], [119]. Wymagają one omówienia pod kątem widzenia czynności, jakie się wykonuje, aby określić podczas adestacji prądy zapalające (mpz), prądy awaryjne (pa) i prądy bezpieczne (pb). Każdej z tych wielkości odpowiada pewna wartość prawdopodobieństwa zapalenia p, która występuje we wzorze (4.18) i decyduje o wielkości średniego czasu pomiędzy wybuchami $\bar{T}_{wo}$. Właściwości metrologiczne iskiernika i warunki jego użytkowania będą miały wpływ na przedział ufności dla p, a tym samym i na przedział ufności dla $\bar{T}_{wo}$, wyrażony wzorem (4.29).

W pierwszym rzędzie zwrócimy uwagę na niektóre określenia przyjęte w metrologii [119]:

Przyrząd pomiarowy - "narzędzie pomiarowe służące do przetwarzania wielkości mierzonej - albo jednej spośród innych wielkości związanych z tą wielkością mierzoną - na wskazanie lub równoważną informację".

Krzywa wzorcowa narzędzia pomiarowego - "krzywa przedstawiająca odpowiedniość ciągłą między wartościami wielkości mierzonej a wartościami wskazanymi przez narzędzie pomiarowe".

W iskierniku, jak już wspomniano, informację o prądzie w modelu z rys.4 uzyskujemy na podstawie krzywej wzorcowej $p^* = f(I)$.

Powtarzalność pomiarów - "stopień zgodności wyników kolejnych pomiarów tej samej wielkości, wykonywanych przez tego samego obserwatora w danym laboratorium w tych samych warunkach, za pomocą tych samych metod i tych samych narzędzi pomiarowych".

Odtwarzalność pomiaru - "stopień zgodności wyników pomiarów tej samej wielkości w przypadku, gdy poszczególne pomiary są wykonywane:
- za pomocą różnych metod,
- za pomocą różnych narzędzi pomiarowych,
- przez różnych obserwatorów,
- w różnych laboratoriach,
- w dość długich odstępach czasu w porównaniu z czasem trwania pojedynczego pomiaru,
- w różnych warunkach użytkowania".

Stałość narzędzia pomiarowego - "właściwość charakteryzująca zdolność narzędzia pomiarowego do zachowania niezmiennych właściwości metrologicznych w funkcji czasu".

Trzy ostatnie określenia są niezmiernie ważne dla iskiernika. Iskiernik stosowany do badań atestacyjnych, czy też zdejmowania charakterystyk iskrobezpieczeństwa winien być przebadany na tyle, aby stosownie do tych określeń związać z nimi odpowiednie miary liczbowe. Tylko wówczas wyniki uzyskiwane podczas atestacji będzie można uznać za wiarygodne, gdy będzie podany pełny wynik z uwzględnieniem właściwości metrologicznych iskiernika. Na podstawie przeglądu literatury dochodzi się do wniosku, że z tymi problemami borykają się użytkownicy iskierników, lecz nie doprowadzili do usystematyzowania uzyskiwanych wyników pod kątem widzenia metrologicznym. Prawdopodobnie dlatego, że nie są metrologami i nie rozpatrują iskiernika jako przyrządu pomiarowego. Przykładem mogą być dane z rys. 9.

Właściwości metrologiczne winny być ustalone w sposób jednoznaczny. Jest to szczególnie ważne, gdy stosuje się różne definicje mpz, w różny sposób sprawdza się czułość iskiernika (zależnie od kraju lub ogranizacji), stosuje się różny system współczynników bezpieczeństwa, w różny sposób ustalane są procedury, które jeśli się spełni z wynikiem pozytywnym, uznaje się, że obwód jest iskrobezpieczny. O definicjach mpz i współczynnikach bezpieczeństwa pisano w pkt 2. Niezbędne jest zatem zestawienie stosowanych procedur sprawdzania czułości i procedur atestacyjnych. Dokonano tego w tablicy 6.1.

Z dalszych określeń ważne są następujące:

Warunki odniesienia - "zbiór wartości odniesienia lub zakresu odniesienia różnych wielkości wpływających na działanie narzędzia pomiarowego".

Dla iskiernika zbiór ten obejmuje: parametry obwodu, skład mieszaniny probierczej i jej parametry.

Zakres pomiarowy - "zakres wartości wielkości mierzonej, dla których wskazania narzędzia pomiarowego otrzymane w normalnych warunkach użytkowania i z jednego tylko pomiaru nie powinny być obarczone błędem większym od granicznego błędu dopuszczalnego".

Dla przyjętego modelu przyrządu z rys. 4 zakres pomiarowy można ustalić na podstawie danych zawartych w pkt 5. Wynika z nich, że granica górna zakresu pomiarowego w stanie normalnym wynosi 1,5 A. Zważywszy, że zgodnie z przyjętymi współczynnikami bezpieczeństwa prąd ten może być powiększony ok. 3 razy, wartość górna zakresu pomiarowego wyniesie ok. 4,5 A. Przy tym ograniczą się maksymalne napięcie źródła do 300 V i indukcyjność do 1 H.

Klasa dokładności narzędzia pomiarowego - "charakterystyka narzędzi pomiarowych o tych samych wymaganiach dotyczących dokładności".

W odniesieniu do iskierników jak dotąd nie stawia się wymagań odnośnie dokładności. Przepisy norm i zaleceń stawiają wymagania jedynie w stosunku do czułości, jakie winny mieć iskierniki. Brak jest przepisów legalizacyjnych, które ustalałyby błędy graniczne dopuszczalne dokładności dla iskierników stosowanych do atestacji.

Procedury kontroli czułości i procedury atestacyjne ustalone na podstawie [9], [20], [35], [74], [75], [77]

Lp.	Norma lub zalecenie	Stosowany iskiernik	Mieszanina wybuchowa w % obj. w powietrzu	Procedura kontroli czułości					Procedura atestacyjna				
				obwód kontrolny			wymagana ilość iskier	wymagana ilość wybuchów	obwód prądu stałego			obwód prądu zmiennego	
				U	L	I			wymagana ilość iskrzeń	polaryzacja dysku	dopuszczalna ilość wybuchów	wymagana ilość iskrzeń	dopuszczalna ilość wybuchów
				[V]	[mH]	[mA]	n	m	n		m	n	m
1	PN-72/E-08107	IEC	8,3 ± 0,3	24 24	95 bez ind	160 1500	-	$p^m \geq 10^{-2}$	⩾ 16 000	(-)	⩽16	nie podaje się specjalnych wymagań	
2	RWPG	IEC	8,3 ± 0,3	24 24	95 bez ind	160 1500	20-40 (5-10 obr)	⩾ 1	16 000	(-)	⩽16	8000 każdej polaryz.	
3	IEC - projekt	IEC	8,3 ± 0,3	24 24	95 bez ind	110 1500	1600 1600	⩾ 1 ⩾ 1	200+200 obr ≙800+800	(+),(-)	0	1000 obr ≙4000	0
4	CENELEC - projekt	IEC	8,3 ± 0,3	24 24	95 bez ind	110 1500	400 obr ≙1600	1	⩾200+200 obr ≙⩾800+800	(+),(-)	0	1000 obr ≙4000	0
5	BSI - projekt	IEC	8,0 ± 0,3	24 24	95 bez ind	140 1300	400 400	⩾ 1 ⩾ 1	400 obr ≙1600	(-)	0	1000 obr ≙4000	0
6	VDE 0170 d/0171d (RFN)	IEC	8,5 ± 0,5	24	95	105	3000	⩾ 1	1000-1000	(+),(-)	0	5000	0
7	NEPA 493 (USA)	Iskiernik z dyskiem mosiężnym	8,3 ± 0,2	24	95	130	3000	⩾ 1	500+500	(+),(-)	0	2000	0

Patrząc na powyższe określenia można stwierdzić, że obecnie można jedynie porównać iskierniki na podstawie publikowanych wartości mpz dla takich samych obwodów elektrycznych. Ale na tej podstawie nie można przewidzieć jaki będzie wynik atestacji tego samego obwodu,przeprowadzony praktycznie w takich samych warunkach, lecz z użyciem różnych egzemplarzy iskiernika IEC. Będzie to możliwe dopiero wówczas, gdy dla każdego iskiernika będą wyznaczane: powtarzalność pomiarów, odtwarzalność pomiaru i stałość iskiernika. W końcu, niezależnie od przyjętej definicji mpz, procedury kontroli czułości i procedury atestacji, wszystkie one opierają się na badaniach statystycznych. Musi więc jako pierwszy być ustalony model statystyczny, który będzie najlepszym odwzorowaniem krzywej wzorcowej.Przedział ufności dla takiej krzywej wzorcowej, jeśli będzie w nim uwzględnione: powtarzalność, odtwarzalność i stałość, będzie dostatecznym punktem wyjścia do porównania: jakie określi się dopuszczalne parametry obwodu iskrobezpiecznego, gdy zastosuje się różne definicje mpz, różne procedury kontroli czułości, różne procedury atestacji i różne systemy współczynników bezpieczeństwa.

7. WYZNACZANIE WŁASNOŚCI METROLOGICZNYCH ISKIERNIKA IEC

7.1. Wyznaczanie krzywej wzorcowej

Pomiary związane z wyznaczeniem krzywej wzorcowej autor przeprowadził podczas pobytu w SMRE. Pobyt miał na celu badanie własności metrologicznych iskiernika z uwzględnieniem definicji mpz brytyjskiej i procedur stosowanych przy atestacji w SMRE. Szczególnie pomocną była możliwość wymiany poglądów i dyskusja nad wynikami z Mr D.W. Widgintonem,autorem wielu publikacji cytowanych w niniejszej pracy, kierownikiem Electrical Hazards Section.

Z wyznaczeniem krzywej wzorcowej wiąże się zagadnienie wyboru równania regresji. Do tego zagadnienia możemy wykorzystać teorię liniowych funkcji regresji drugiego rodzaju, która pozwoli nam na ustalenie współzależności statystycznej pomiędzy p oraz I bez znajomości dwuwymiarowego rozkładu (p, I) [99], [120]. Jak się okaże jest to wystarczające dla celów praktycznych, zaś wyznaczenie takiego rozkładu jest bardzo czasochłonne i trudne z uwagi na sam przebieg doświadczeń.

Powszechnie stosowana współzależność nieliniowa (2.1), po wprowadzeniu nowych zmiennych $Y = \log p$, $X = \log I$ pozwala na przewidywanie możliwości przyjęcia modelu liniowego pierwszego stopnia:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon , \tag{7.1}$$

gdzie:

β_0, β_1 - parametry modelu,

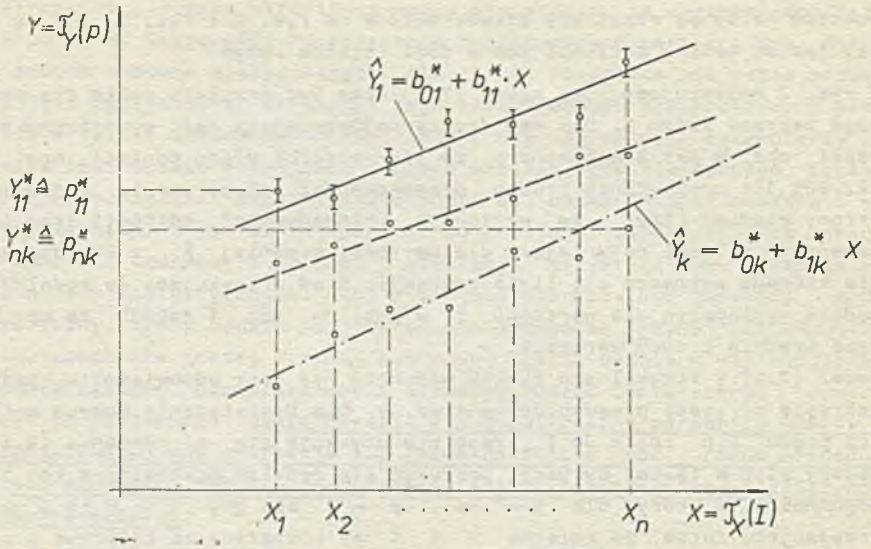
ε - przyrost powodujący rozrzut poszczególnych Y poza linią regresji.

Dowodem na to są rezultaty przedstawione na rys. 2 i rys. 9. Już na początku jednak należy poczynić pewne dość istotne uwagi:

1) Z rys. 2 wnioskujemy, że model (7.1) może być przyjęty tylko dla pewnego zakresu zmian I. Dla nas rzeczą najważniejszą jest wyznaczenie wartości mpz. W pkt 5 wspominano, że dla wartości prądu poniżej mpz o ok. 20% już praktycznie trudno przeprowadzać eksperyment. Z drugiej strony wiadomo [120], że wariancja przewidywanej wartości średniej zmiennej Y jest najmniejsza dla wartości średniej $\bar{X}$ z przedziału, dla którego wyznacza się linią regresji. Stąd wnioskujemy, że model (7.1) będzie najlepszym dla wartości I w pobliżu mpz i takich, że mpz będzie średnią z tych wartości.
2) Model (7.1) z fizykalnego punktu widzenia nie jest odpowiedni w każdym zakresie wartości prawdopodobieństwa p. Dla dostatecznie dużych wartości prądu I p zdąża do 1, czego nie uzyskuje się z równania (2.1). Należy więc w takiej sytuacji posłużyć się modelem pozbawionym tej niedogodności, w którym dla $I \to \infty$, $p \to 1$, zaś gdy $I \to 0$, to $p \to 0$. Przyjmujemy zatem, że zmienne Y i X są powiązane ze zmiennym p i I dowolnymi przekształceniami, przyjętymi zależnie od potrzeb spełnienia pewnych warunków.
3) Dąży się do ograniczenia wpływu zmian wielkości wpływających na ile to jest możliwe. Jedyną zmienną niezależną jest prąd I (lub napięcie U w obwodzie pojemnościowym), a własności iskiernika są wynikiem wpływu czynników, które praktycznie należy uznać, że są poza możliwością naszej kontroli.
4) W praktyce zawsze przyjmujemy, że I jest ustalone. Zatem uważamy, że p jest zmienną losową, która jest obarczona błędem, zaś I nie jest zmienną losową.

Załóżmy, że dla ustalonych wartości prądu $I_1, I_2, \ldots, I_n$ określamy z doświadczenia odpowiadające im wartości prawdopodobieństwa zapalenia z próby $p_{11}^*, p_{21}^*, \ldots, p_{n1}^*$ wzajemnie niezależnych. Niech wpływ zmian czynników nie podlegających naszej kontroli będzie do pominięcia. Każda wartość średnia p_{i1}^* obarczona jest błędem, którego miarą jest odchylenie standardowe (dane równaniem (4.52)) lub przedział ufności (dany równaniem (4.50) i (4.52)). Wprowadzamy nowe zmienne $X = T_X(I)$ i $Y = T_Y(p)$ takie, aby przyjęcie modelu (7.1) było najodpowiedniejsze. Temu doświadczeniu odpowiada prosta $\hat{Y}_1$ na rys. 11, dla której wartości estymatorów parametrów wynoszą b_{o1}^* i b_{11}^*. Na rys. 11 zaznaczono także wokół przekształconych wartości p_{i1} odpowiednie przedziały ufności.

Doświadczenia opisane wyżej powtarzamy k-krotnie. Są one na tyle odległe od siebie, że stwierdzamy wpływ przypadkowych czynników nie podlegających naszej kontroli. Stąd dla każdego doświadczenia j : dla $j = 1,2,\ldots,k$ moglibyśmy wyznaczyć k prostych stosownie do modelu (7.1). Aby opisać jednak własności iskiernika łącznie możemy pominąć wyznaczenie



Rys. 11. Ilustracja do opracowania wyników doświadczeń prowadzących do wyznaczenia krzywej wzorcowej dla iskiernika

prostych po każdym doświadczeniu, lecz wyznaczyć jeden model średni, który będzie poszukiwaną przez nas krzywą wzorcową dla iskiernika. Dla tej prostej musimy wyznaczyć przedział ufności, który będzie ujmował fakt, że dla tej samej wartości I_i uzyskaliśmy k różnych wartości p_{ij}^* : $p_{i1}^*, p_{i2}^*, \ldots, p_{ik}^*$ oraz fakt, że każda wartość p_{ij}^* obarczona jest błędem.

Przy tak sformułowanych uwagach i założeniach sposobu przeprowadzania doświadczeń, możemy przejść do estymacji równania (7.1). Stosownie do uwagi 4) stwierdzamy, że występuje tu tzw. "zmodyfikowane zagadnienie regresji" [99], które jest pokrewne z zagadnieniem regresji drugiego rodzaju. Estymowane równanie regresji ma postać:

$$\hat{Y} = b_o + b_1 \cdot X, \tag{7.2}$$

gdzie:

$\hat{Y}$ - przewidywana wartość Y dla danego X,

b_o, b_1 - estymatory parametrów β_o i β_1.

Załóżmy, że dla każdej wartości X, które są znanymi parametrami a nie zmiennymi losowymi, zmienna Y ma rozkład normalny

$$\mathcal{N}(\beta_o + \beta_1 X, \sigma). \tag{7.3}$$

Wówczas metodą największej wiarygodności, gdyż znana jest funkcja gęstości zmiennej losowej Y, znajduje się b_1 i b_o o wyrażeniach [99]:

$$b_1 = \frac{s_Y}{s_X} \cdot r_{XY}, \tag{7.4}$$

$$b_o = \bar{Y} - b_1 \cdot \bar{X}, \tag{7.5}$$

gdzie:

a) $$r_{XY} = \frac{1}{n \cdot s_X s_Y} \sum_{i=1}^{n} (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}), \tag{7.6}$$

b) $$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} X_i, \quad \bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} Y_i, \tag{7.7}$$

c) $$s_X = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (X_i - \bar{X})^2}, \quad s_Y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (Y_i - \bar{Y})^2}. \tag{7.8}$$

W powyższych wzorach $\bar{X}$ oraz s_X nie są zmiennymi losowymi, zaś r_{XY} nie jest współczynnikiem korelacji. Podobnie dochodzi się do wyrażenia na $\hat{\sigma}^2$:

$$\hat{\sigma}^2 = s_Y^2(1 - r_{XY}^2). \tag{7.9}$$

Zmienne losowe b_1, b_o mają rozkład normalny, zaś zmienna losowa $n\hat{\sigma}^2/\sigma^2$ ma rozkład χ^2 o $n-2$ stopniach swobody.

Estymatory b_o, b_1 i $n\hat{\sigma}^2/(n-2)$ są estymatorami nieobciążonymi parametrów β_o, β_1 i σ^2. Zachodzi to również, gdy nie zakłada się normalności rozkładu zmiennej losowej Y. W tym ostatnim przypadku wyrażania (7.4), (7.5) i (7.9) są nadal obowiązujące [99].

Określmy obecnie odchylenie standardowe i przedziały ufności dla b_1 i $\hat{Y}$ przy założeniu, że nadal obowiązuje zależność (7.3).

Odchylenie standardowe i przedział ufności dla b_1

Skoro obowiązują zależności (7.3) i (7.4), to b_1 ma także rozkład normalny i wariancja wyraża się zależnością [99]:

$$D^2(b_1) = \frac{\sigma^2}{n\, s_X^2}. \tag{7.10}$$

Wartość tę możemy oszacować, gdy w miejsce σ wstawimy oszacowanie σ^* wyrażenia (7.9).

Przedział ufności dla b_1 określimy korzystając z faktu, że zmienna losowa

$$t = s_X \frac{b_1 - \beta_1}{\hat{\sigma}} \sqrt{n-2}, \tag{7.11}$$

ma rozkład Studenta o $n-2 = r$ stopniach swobody. Dla zadanego poziomu ufności $1 - \alpha$ z tablic [102] wyznaczamy kwantyl $t(n-2, 1-\alpha) = t_r$ i otrzymujemy przedział ufności dla β_1:

$$P\left\{ b_1^* - t_r \frac{\sigma^*}{s_X \sqrt{n-2}} \leq \beta_1 \leq b_1^* + t_r \frac{\sigma^*}{s_X \sqrt{n-2}} \right\} = 1 - \alpha. \tag{7.12}$$

Założenie o normalności dane zależnością (7.3) może być przyjęte na zasadzie centralnego twierdzenia granicznego, gdy dla każdego X_i będziemy dysponowali dużą liczbą wyników Y_{ij}. Gdy natomiast nie będziemy mogli poczynić założenia co do rozkładu, to posłużymy się nierównością Czebyszewa obowiązującą dla dowolnej zmiennej losowej o skończonej wariancji [99]:

$$P\left\{ \left| b_1^* - \beta_1 \right| < \varepsilon \right\} \geq 1 - \frac{D^2(b_1)^*}{\varepsilon^2} \tag{7.13}$$

gdzie ε - dowolna dodatnia liczba.

W załączniku do niniejszej pracy omówiono szczegółowo wyniki doświadczeń w celu wyznaczenia zależności przedstawionych na rys. 11. Ostatecznie zdecydowano posługiwać się przekształceniami $Y = \log p$ i $X = \log I$. Decydują o tym: dostępność odpowiednich siatek, łatwość określania wykładnika "a" w równaniu (2.1) oraz wystarczająco dobra przydatność przekształcenia dla przyjęcia modelu (7.2) bezpośrednio związanego z powszechnie przyjętą zależnością (2.1). W załączniku są także zestawione wyniki obliczeń przy przyjętych innych przekształceniach.

Dla przyjętych przekształceń $Y = \log p$, $X = \log I$, b_1 jest estymatorem wykładnika "a" z równania (2.1). Stąd równanie (7.10) i (7.12) odnoszą się także do "a".

Odchylenie standardowe i przedział ufności dla Y

Po wstawieniu (7.5) do (7.2) otrzymujemy

$$\hat{Y} = \bar{Y} + b_1(X - \bar{X}). \tag{7.14}$$

Udowadnia się, że $\bar{Y}$ i b_1 są zmiennymi nieskorelowanymi [120], zatem wariancja zmiennej losowej $\hat{Y}$ jest sumą wariancji zmiennej losowej $\bar{Y}$ i $b_1(X - \bar{X})$:

$$D^2(\hat{Y}) = \frac{\sigma^2}{n}\left[1 + \frac{(X - \bar{X})^2}{s_X^2}\right]. \tag{7.15}$$

Wariancja dana wzorem (7.15) odnosi się do przewidywanej wartości średniej zmiennej losowej Y. Zgodnie z zależnością (7.3) obserwowana wartość Y posiada wariancję σ^2 niezależną od $D^2(\hat{Y})$. Tak więc, gdy dokonamy pojedynczej obserwacji p_i^* i odpowiadającej jej wartości Y_i^*, to wariancja będzie sumą obu wariancji [120]:

$$D^2(Y_i) = \sigma^2 + D^2(\hat{Y}) \tag{7.16}$$

Przedział ufności dla Y_i tworzymy po zastąpieniu σ przez oszacowanie σ^* estymatora $\hat{\sigma}$ i wykorzystaniu rozkładu t Studenta o n-2 stopniach swobody:

$$P\left\{\hat{Y}_i - t_r \cdot D(Y_i) \leq Y_i \leq \hat{Y}_i + t_r \cdot D(Y_i)\right\} = 1 - \alpha. \tag{7.17}$$

Podobnie określimy przedział ufności dla $\hat{Y}$.

W przypadku, gdy nie znamy rozkładu dla $\hat{Y}$ oraz Y możemy wykorzystać nierówność Czebyszewa wstawiając do niej odpowiednie wariancje dane zależnościami (7.15) lub (7.16).

Błędy wyznaczenia p^*

W przedziale ufności (7.17) nie uwzględniono, że wyniki obserwacji p_i^* obarczone są błędami. Błędy te są reprezentowane przez oszacowanie odchylenia standardowego występującego w równaniu (4.47):

$$D(p_i^*)_N = \sqrt{\frac{p_i^*(1 - p_i^*)}{N_i}}, \tag{7.18}$$

gdzie N_i - ilość wywołanych iskrzeń w pojedynczym doświadczeniu.

Wielkość $D(p_i^*)_N$ uzależniona jest od ilości wywołanych iskrzeń i zawsze możemy dobrać takie N_i, aby w dowolnym doświadczeniu, niezależnie od p_i^*, otrzymać $D(p_i^*)_N$ na wymaganym poziomie. Porównując przeliczenie wg zależności (4.49) i (4.52) z danymi na rys. 9, dochodzimy do wniosku, że często $D(p_i^*)_N$ będzie do pominięcia. Zależeć to jednak będzie od własności iskiernika oraz przyjętej wartości N_i. Formalnie więc winniśmy dokonać su-

mowania błędów danych wyrażeniami (7.16) oraz (7.18). W związku z tym trzeba uwzględnić, że zmienne są powiązane zależnością $Y = \log p$.

Skorzystajmy z twierdzenia o rozkładzie logarytmiczno-normalnym [100] [121], zgodnie z którym zmienna losowa p posiada rozkład logarytmiczno-normalny, gdy zmienna losowa $Y = \log p$ posiada rozkład normalny, co zapisujemy:

$$\lambda(\beta_o + \beta_1 X, \sigma). \tag{7.19}$$

Nas interesuje podczas atestacji szacowanie, które dane jest przedziałem ufności (7.17), co uwzględniamy i otrzymujemy wyrażenie na wariancję [121]:

$$D^2(p_i) = \left[E(p_i)\right]^2 \cdot \left(\exp \frac{D^2(Y_i)}{M^2} - 1\right), \tag{7.20}$$

gdzie: $\log E(p_i) = \hat{Y}_i + \frac{D^2(Y_i)}{2M}$, $M = \log e$,

która odpowiada wariancji $D^2(Y_i)$. Teraz dopiero możemy formalnie dokonać ostatecznego sumowania błędów.

Na mocy twierdzenia (4.47) błędy wyznaczenia p_i^* mają rozkład normalny $\mathcal{N}(0, D(p_i^*)_N)$. Wariancje $D^2(p_i^*)_N$ i $D^2(p_i)$ są wzajemnie niezależne. Wariancja wypadkowa jest sumą obu wariancji:

$$D_o^2(p_i) = D^2(p_i) + D^2(p_i^*)_N. \tag{7.21}$$

Ostatecznie możemy określić przedział ufności, który ujmuje właściwości metrologiczne iskiernika, dla przypadku gdy podczas atestacji dokonamy sprawdzenia iskrobezpieczeństwa jedną serią iskier o liczbie N_i. W tym celu wykorzystujemy nierówność Czebyszewa (7.13), w której uwzględniamy równanie (7.21). Za ε przyjmujemy liczbę, która jest k_D krotnością $D_o(p_i)$, co w efekcie prowadzi do wyrażenia:

$$P\left\{\left|\frac{p_i - p}{D_o(p_i)}\right| < k_D\right\} \geqslant 1 - \frac{1}{k_D^2}. \tag{7.22}$$

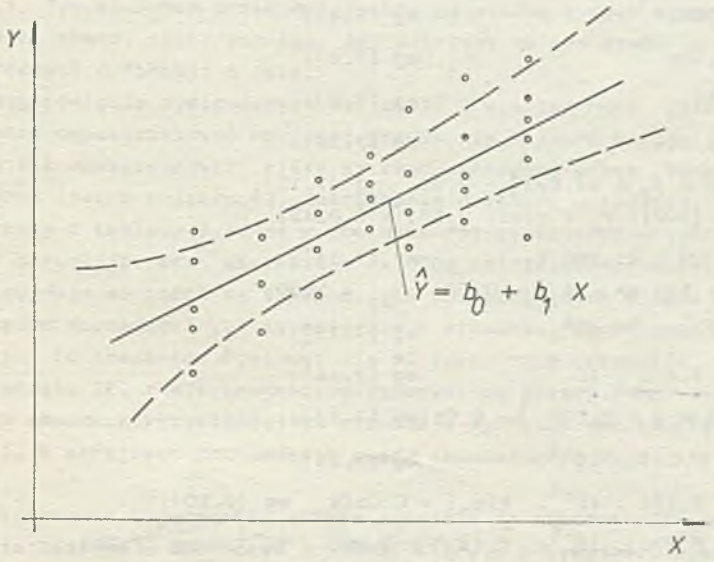
Gdy atestacja będzie dokonywana w ciągu pewnego okresu czasu i weźmiemy pod uwagę wynik średni z poszczególnych wartości p_i^*, to wówczas należy przyjąć wyrażenie (7.15) w miejsce (7.16). Niezależnie od przypadku, wartość prawej strony zależy od przyjętej wartości dla k_D. Np. dla $1 - 1/k_D^2 = 0{,}95$ $k_D = 4{,}47$, co oznacza, że z poziomem ufności $\beta \geqslant 0{,}95$ war-

tość rzeczywista parametru p mieści się w przedziale, którego połowa jest 4,47 krotnością odchylenia standardowego.

W tym momencie należy powrócić do zagadnienia wyznaczania przedziału ufności dla średniego czasu pomiędzy wybuchami danego wzorami (4-29)÷(4.31). Dotychczas wiązaliśmy wymaganą tu znajomość przedziału ufności dla p z równaniami (4.50)÷(4.52). Tak można by postępować, gdyby iskiernik miał własności, dla których wystarczy podać tylko ten przedział ufności. Jest to więc przypadek skrajny, najkorzystniejszy, który chcielibyśmy osiągnąć. W rzeczywistości, przy uwzględnieniu zmiany czułości iskiernika musimy wziąć pod uwagę równanie (7.22) i na jego podstawie wyznaczyć wartości dla p_1 i p_2.

W podsumowaniu naszych rozważań nad wyznaczeniem krzywej wzorcowej dla iskiernika stwierdzamy:

1) Posiadamy krzywą wzorcową daną równaniem (7.2), dla której potrafimy wyznaczyć przedział ufności wg zależności (7.17). Ilustruje to rys.12.



Rys. 12. Krzywa wzorcowa iskiernika z przedziałem ufności ujmującym także przedziały ufności dane zależnościami (4.50) i (4.52)

2) Przy wyznaczaniu krzywej wzorcowej oszacowaliśmy wartość parametru b_1 i jego przedział ufności, które odnoszą się do wykładnika a z równania (2.1) powszechnie stosowanego.
3) W przypadku znacznej wartości błędów popełnianych przy wyznaczaniu p_i, w porównaniu z błędami szacunku modelu dla krzywej wzorcowej, dysponujemy zależnościami (7.21) i (7.22), które pozwalają nam na uwzględnienie tych błędów.

4) Wyznaczona krzywa wzorcowa i przedstawiony tok postępowania matematycznego są konsekwencją przyjęcia: modelu (7.1), przekształcenia $Y = \log p$ i $X = \log I$ oraz założenia odnośnie normalności danego równaniem (7.3). Obowiązuje ona tylko dla zakresu prądów I, dla których została wyznaczona.

Dla przykładu przytacza się wyniki obliczeń na podstawie podanego wyżej toku, przyjmując za dane wyjściowe wyniki pomiarów (p_{ij}^*/I_{ij}) dla obwodu indukcyjnego prądu stałego: U = 24 V, L = 95 mH; zawarte w tablicy Z.1 (załącznik).

Wyniki obliczeń:

a) Ilość par (p_{ij}^*/I_{ij}), $M = 47 = n$, $X = \log I$, $Y = \log p$;

b) $\bar{X} = 2{,}036$; $\bar{Y} = -1{,}964$ wg (7.7);

c) $s_X = 0{,}019$; $s_Y = 0{,}458$, wg (7.8);

d) $r_{XY} = 0{,}9148$, wg (7.6);

e) $b_1 = 21{,}980$, wg (7.4);

f) $b_o = -46{,}709$, wg (7.5);

g) $\sigma^* = 0{,}185$, wg (7.9);

h) $D(b_1) = 1{,}416$, wg (7.10);

i) $P\left\{19{,}067 \leq \beta_1 \leq 24{,}893\right\} = 0{,}95$, wg (7.12);
z tablic [102]: $t_r = t(45;\ 0{,}95) = 2{,}0142$;

j) $\hat{Y} = -46{,}709 + 21{,}980\ X$, wg (7.14);
Dla $I_{ij} = 110$ mA, $p_{ij}^* = 0{,}02$; $N_{ij} = 1600$;

k) $D^2(\hat{Y}) = 7{,}926 \cdot 10^{-4}$, wg (7.15);

l) $D^2(Y_i) = 3{,}498 \cdot 10^{-2}$, wg (7.16);

m) $P\left\{0{,}0061 \leq p \leq 0{,}035\right\} = 0{,}95$; wg (7.17);

n) $D^2(p_{iN}^*) = 1{,}225 \cdot 10^{-5}$, wg (7.18);

o) $D^2(p_i) = 5{,}151 \cdot 10^{-5}$, $E(p_i) = 0{,}0159$, wg (7.20);

p) $D_o^2(p_i) = 6{,}376 \cdot 10^{-5}$, $D_o(p_i) = 7{,}985 \cdot 10^{-3}$, wg (7.21);

r) $$P\left\{\left|\frac{p_i^* - p}{D_o(p_i)}\right| < 4{,}47\right\} \geqslant 0{,}95, \quad \text{wg (7.22)},$$

skąd $p_1 = 0$, $p_2 = 0{,}0557$ i te wartości graniczne należy brać pod uwagę przy wyznaczaniu średniego czasu pomiędzy wybuchami określonego wzorami (4.30) i (4.31). W rzeczywistości z obliczeń otrzymuje się $p_1 < 0$, lecz nie ma to sensu fizykalnego. I tak dla praktyki jest interesująca wartość dolna średniego czasu pomiędzy wybuchami $T_1 = f(p_2)$ danego zależnością (4.30).

Tok obliczeń z wykorzystaniem rozkładu logarytmiczno-normalnego ma tu znaczenie formalnej zgodności z logiką czynionych założeń. Można praktycznie liczenie uprościć. Np. obliczając dla kolumny p_{ij}^* odpowiadającej prądowi I = 110 mA w tablicy Z.1:

$$\overline{p_{ij}^*} = 0{,}015 \approx E(p_i) = 0{,}0159,$$

$$D^2(p_{ij}^*) = 5{,}898 \cdot 10^{-5} \approx D^2(p_i) = 5{,}151 \cdot 10^{-5}.$$

7.2. Dopuszczalne parametry iskrobezpieczne

Dokonajmy oceny dopuszczalnych parametrów iskrobezpiecznych zgodnie z:
a) definicję statystyczną mpz i PN,
b) definicją brytyjską mpz i obowiązujących w Wielkiej Brytanii norm.

Wykorzystujemy w tym celu współczynniki bezpieczeństwa zestawione w tablicy 2.1. Tym sposobem przekonujemy się co wynika z tych samych danych wyjściowych obwodu elektrycznego, gdy patrzymy na ten obwód z punktu widzenia różnych definicji i norm.

Po uwzględnieniu wymienionych definicji i wymagań norm dochodzimy do zestawienia dopuszczalnych wartości prądów dla różnych kategorii i stopni urządzeń iskrobezpiecznych, które są reprezentowane przez badane obwody elektryczne (patrz załącznik). Zestawienie dokonano w tablicy 7.1.

Zauważamy z tablicy 7.1, że w obwodzie rezystancyjnym uzyskuje się wg polskiej definicji mpz wartości o ok. 50% mniejsze, natomiast dla obwodu indukcyjnego wartości są zbieżne. Dla poszczególnych stopni zawsze wartości prądów dopuszczalnych są mniejsze w stosunku do odpowiadających im kategorii i to znacznie. Ponieważ nie ma formalnych przeszkód w stosowaniu iskiernika IEC z elektrodami ustawionymi wg metody SMRE, można przewidzieć w obwodzie rezystancyjnym różnice w wynikach jak podkreślone w tablicy 7.1. W skrajnych przypadkach prądy dopuszczalne mają się do siebie jak 1:13.

Na zakończenie tego punktu trzeba powrócić do zagadnienia współczynników bezpieczeństwa i zaznaczyć problem, który w przyszłości wymaga zgłębienia. Na współczynniki bezpieczeństwa należałoby patrzeć podobnie jak to się robi ze współczynnikami bezpieczeństwa w wytrzymałości materiałów [123]. Rzecz w tym, że trzeba dysponować także danymi statystycznymi z obszaru, do którego sprowadza się dopuszczalne parametry. Tylko wówczas można mówić o współczynniku bezpieczeństwa w sensie niezawodnościowym. W technice iskrobezpieczeństwa brak jest wystarczającego materiału doświadczalnego, aby stwierdzić, że prądy bezpieczne to takie, dla których prawdopodobieństwo zapalenia wynosi $p = 10^{-8}$. Jedyne więc poprawne stwierdzenie będzie, iż wartości zestawione w tablicy 7.1 gwarantują, że prawdopodobieństwo zapalenia będzie mniejsze od tego, jakie uzyskuje się na podstawie krzywej wzorcowej dla wartości wyjściowej (np. mpz), która zawarta jest w przedziale objętym przez tą krzywą.

Porównanie dopuszczalnych prądów w obwodach standardowych L oraz R, wyznaczonych zgodnie z zasadami obowiązującymi w Polsce i Wielkiej Brytanii. Obwody prądu stałego o napięciu U = 24 V, gaz probierczy CH_4 + pow.
Kategoriom brytyjskim "ib", "ia" odpowiadają odpowiednio polskie stopnie KI i KII

Obwód oraz ustawienie elektrod wolfram.	mpz wg def brytyjskiej [mA]	mpz wg def. statystycznej [mA]	Dopuszczalne wartości prądów [mA]				W a r u n k i
			kategorie		stopnie		
			ib	ia	KI	KII	
Obwód R Elektroda pochyła wg SMRE (rys. 8c)	757	315	459	459	115	115	normalne
			688	459	-	-	awaryjne z 1 uszkodzeniem
			-	688	175	105	awaryjne z 2 uszkodz.[x)]
			459[xx)]	229	-	-	otwarte kontakty iskrzące
Obwód R Elektroda prosta wg IEC (rys. 8a)	1503	776	911	911	282	282	normalne
			1366	911	-	-	awaryjne z 1 uszkodzeniem
			-	1366	431	259	awaryjne z 2 uszkodz.[x)]
			911[xx)]	455	-	-	otwarte kontakty iskrzące
Obwód L Elektroda prosta wg IEC (rys. 8a)	96,6	97,4	58,6	58,6	35,4	35,4	normalne
			87,8	58,6	-	-	awaryjne z 1 uszkodzeniem
			-	87,8	54,1	32,5	awaryjne z 2 uszkodz.[x)]
			58,6[xx)]	29,3	-	-	otwarte kontakty iskrzące

[x)] Dla KII z dowolną ilością uszkodzeń.

[xx)] Z jednym dopuszczalnym uszkodzeniem.

7.3. Porównanie procedur kontroli czułości i atestacyjnych

Zajmijmy się obecnie procedurami kontroli czułości i atestacyjnymi, które zestawiono w tablicy 6.1. Sprawdźmy jak mają się do siebie różne procedury kontroli czułości i atestacyjne w świetle tej samej krzywej wzorcowej iskiernika i tego samego obwodu kontrolnego.

Dla wszystkich procedur kontroli czułości zestawionych w tablicy 6.1 wymaga się, aby dla zadanej wartości prądu obwodu I i ilości wywołanych iskier n występował przynajmniej jeden wybuch ($m \geqslant 1$).

W polskiej procedurze nie zakłada się wymaganej ilości iskier, więc przyjmujemy $n = 100$, jak to miało miejsce w projekcie PN, który już nie jest obowiązujący. Wymaga się jedynie, aby w warunkach kontroli czułości było $p \geqslant 10^{-2}$.

Jako krzywą wzorcową dla obwodu kontrolnego indukcyjnego prądu stałego: $U = 24$ V, $L = 95$ mH, przyjęliśmy w punkcie 7.1 linię regresji $\hat{Y} = -46{,}709 + 21{,}98\,X$. Zaznaczyliśmy, że jest ona obowiązująca dla zakresu wartości (p_{ij}^{*}/I_{ij}), dla którego dysponowano danymi pomiarowymi. Nadal tą krzywą przyjmujemy do sprawdzania procedur atestacyjnych. Natomiast nie możemy się nią posłużyć przy porównaniu procedur kontroli czułości. Dla wartości prądów, jakie zestawiono w tablicy 6.1, otrzymujemy wg tego modelu prawdopodobieństwa zapalenia $p > 1$. Przestrzegano przed tym w punkcie 7.1 (uwaga 2). Musimy sięgnąć po model z przekształceniem probit/log lub probit/lin [124]. Przyjmujemy zatem model $\hat{Y} = -5{,}452 + 0{,}075\,X$ z tablicy Z.7 (załącznik), gdzie Y = probit (p), X = lin I.

Obliczamy prawdopodobieństwa zapalnia dla poszczególnych wartości z krzywej wzorcowej i sprawdzamy jakie jest prawdopodobieństwo spełnienia warunku $P(m \geqslant 1)$, które na podstawie (4.43) wyliczamy z zależności:

$$P(m \geqslant 1) = \sum_{m=1}^{n} \binom{n}{m} \cdot \hat{p}^{m} \cdot (1-\hat{p})^{n-m} = 1 - P(0), \tag{7.23}$$

gdzie: $\hat{p}$ wyliczamy dla zadanej wartości I po wykorzystaniu przekształcenia odwrotnego: $\text{probit}^{-1}(p)$, np. na podstawie tablic zawartych w [127]:

$$P(0) = P(m = 0) = (1 - \hat{p})^{n}. \tag{7.24}$$

Z zestawienia wyników $1 - P(0)$ w tabl. 7.2 wnioskujemy, że każda z procedur kontroli czułości da wynik pozytywny i trudno je odróżnić. Ma to jednak miejsce, gdy zawsze obowiązuje model $\hat{Y}$. W rzeczywistości możemy się spodziewać zmian czułości iskiernika z dnia na dzień. Dla małych zmian, jak to miało miejsce w iskierniku badanym, zawsze wyniki będą takie same. Sprawdzimy te procedury natomiast dla przypadku przedstawionego na rys.9. Prawdopodobieństwo $\hat{p}$ dla różnych dni różni się aż o 3 rzędy. Sprawdzono zatem obliczeniowo jaki będzie wynik kontroli czułości zestawionymi proce-

Tablica 7.2

Porównanie procedur kontroli czułości i atestacyjnych dla obwodu kontrolnego prądu stałego: U = 24 V, L = 95 mH. Gaz probierczy: CH_4 + pow. Iskiernik IEC z dyskiem kadmowym (dla Lp. 6 z dyskiem mosiężnym)

Lp.	Norma lub zalecenie	Kontrola czułości gdy $\hat{p}$ dane z modelu				Wartości 1-P(0) gdy $\hat{p}$ wynosi				Atestacja. Prawdopodobieństwo spełnienia procedury dla $\hat{p}$ = 0,001
		I [mA]	wymagane n	$\hat{p}$	1-P(0)	0,1	0,01	0,001	0,0001	
1	PN-72/E-08107	160	100	0,94	1	1	0,63	0,095	0,01	$P(m \leqslant 16) \approx 0,5$
2	RWPG - (1971)	160	40	0,94	1	0,99	0,33	0,039	0,004	$P(m \leqslant 16) \approx 0,5$
3	IEC - proj.(1971) CENELEC - proj. (1974)	110	1600	0,014	1	1	1	0,8	0,148	$P(m = 0) \approx 0,5$
4	BSI - projekt (1968)	140	400	0,5	1	1	0,98	0,33	0,039	$P(m = 0) \approx 0,2$
5	VDE 0170d/0171d	105	3000	0,005	1	1	1	0,95	0,259	$P(m = 0) \approx 0,4$
6	NEPA 493 (USA)	130	3000	0,24	1	1	1	0,95	0,259	$P(m = 0) \approx 0,6$

durami, gdy $\hat{p}$ wynosi: 0,1; 0,01; 0,001; 0,0001. Wyniki zestawiono także w tablicy 7.2. Na podstawie zestawienia widzimy, że procedury 1 i 2 są najkorzystniejsze, gdyż umożliwiają zaobserwowanie zmian czułości iskiernika. Natomiast najniekorzystniejsze są procedury 5 i 6.

Porównajmy obecnie procedury atestacyjne zestawione w tabl. 6.1.W procedurze wg PN i zaleceń RWPG wymaga się, aby dla zadanego $n = 16.000$ nie wystąpiło więcej niż $m = 16$ wybuchów. W pozostałych procedurach wymaga się spełnienia warunku: $m = 0$ dla zadanego n.

Dla rozpatrywanego obwodu, bez względu na definicję mpz uzyskano wynik: mpz $\approx$ 97 mA (patrz tablica Z.2 w załączniku). Na podstawie modelu $\hat{Y} = -46,709 + 21,98\ X$ obliczamy: $\hat{p} = 0,000913 \approx 0,001$; a więc p jest zgodne z definicją statystyczną mpz. Zakładamy zatem, że w obwodzie płynie prąd równy mpz i obliczamy jakie są prawdopodobieństwa spełnienia warunków atestacji. Wyniki obliczeń zestawiono w tablicy 7.2.Dla procedury wg PN i RWPG korzystamy z twierdzenia granicznego, które prowadzi do zależności (4.47), zgodnie z którą: $P(m \leqslant 16) = F(\hat{p} = 0,001) = 0,5$. Natomiast dla pozostałych procedur obliczamy $P(m = 0)$ z zależności (7.24).

Na podstawie uzyskanych wyników obliczeń stwierdzamy, że procedury 1, 2, 3, 5 i 6 dają prawie taką samą odpowiedź podczas atestacji. Jest to dowód zarazem na to, że podczas atestacji nie odgrywa roli definicja mpz dla tych procedur. Poprawnie jednak sformułowane są procedury 1 i 2, gdyż nawiązują do zależności (4.53). Możemy zapytać dla jakiej wartości p wynik procedury 4 będzie zgodny z pozostałymi tzn. kiedy $P(0) = 0,5$.Korzystamy z zależności (7.24), skąd obliczona niewiadoma $\hat{p}$ wynosi: $\hat{p}=0,0004$. Dla tej wartości z modelu $\hat{Y}$ określamy odpowiadający temu prawdopodobieństwu prąd: $I = 94$ mA, który jest mniejszy od mpz o ok. 3%. Nie ma to praktycznego znaczenia i stwierdzamy na zakończenie, że dopuszczalne wartości będą zróżnicowane przez system współczynników bezpieczeństwa, która uwzględniono w punkcie 7.2.

8. PODSUMOWANIE

W przedstawionej pracy dokonano analizy stanu w technice iskrobezpieczeństwa w zakresie definicji zagrożenia wybuchowego od tych urządzeń i procedur prowadzących do ustalenia parametrów bezpiecznych, na tle obowiązujących w różnych krajach zaleceń, norm, literatury i prac własnych.

Postawiono tezę, że ocena zagrożenia wybuchowego od urządzeń iskrobezpiecznych nie może ograniczać się jedynie do wyników uzyskiwanych przy atestacji z użyciem iskierników IEC, lecz musi ujmować niezawodność urządzeń, częstość pojawiania się mieszaniny wybuchowej w obszarze użytkowania urządzeń oraz ilości urządzeń zlokalizowanych w tym samym obszarze. W tym celu zaproponowano model probabilistyczny, który pozwala na oszacowanie minimalnego średniego czasu pomiędzy wybuchami oraz wskazuje w ja-

kim kierunku winny przebiegać w przyszłości badania nad zagrożeniem wybuchowym od urządzeń iskrobezpiecznych i jak szacować niezbędne parametry modelu na podstawie danych statystycznych.

Ustalono, że najodpowiedniejszym sposobem porównania parametrów dopuszczalnych, ustalonych stosownie do różnych definicji minimalnych prądów zapalających i różnych systemów współczynników bezpieczeństwa jest stworzenie modelu regresyjnego dla iskiernika IEC, przy czym iskiernik należy uważać jako przyrząd pomiarowy, zaś model regresyjny jako krzywą wzorcową tego przyrządu.

Dla udowodnienia tez pracy zestawiono odpowiedni materiał doświadczalny z literatury, z pomiarów własnych opublikowanych, jak również pomiarów specjalnie wykonanych przez autora dla celów tej pracy w The Safety in Mines Research Establishment w 1974 i 1975 r. Przedstawiony materiał doświadczalny przemawia na korzyść głoszonych w tej pracy tez.

Z A Ł Ą C Z N I K

1. Wyniki pomiarów

Zamieszczone w załączniku wyniki pomiarów stanowią tylko fragment wykonanych pomiarów (jakie wykonał autor w The Safety in Mines Research Establishment), który jest niezbędny do zilustrowania tez niniejszej pracy.

a) Obwód indukcyjny

Pomiary wykonano dla obwodu kontrolnego prądu stałego o danych:

1) mieszanina probiercza CH_4 + pow.;
2) ciśnienie i temperatura w granicach przewidzianych przez PN;
3) U = 24 V, L = 95 mH;
4) elektrody wolframowe wg zaleceń IEC;
5) wyznaczono mpz wg definicji statystycznej i definicji brytyjskiej; pomiary wykonywano w odstępach od 1 do kilku dni przez okres ok. 1 miesiąca.

Wyniki pomiarów dla metody statystycznej zestawione są w tablicy Z.1. Wyznaczone graficznie na ich podstawie wartości mpz zestawiono w tabl. Z.2. W tej też tablicy zestawiono wartości mpz wg definicji brytyjskiej, wyznaczone za okres ok. 1 miesiąca równolegle z danymi zestawionymi w tablicy Z.1.

Z zestawienia w tablicy Z.2 widać dużą zgodność w wynikach uzyskanych dla obu definicji.

b) Obwód rezystancyjny

Pomiary wykonano dla obwodu prądu stałego o danych:

1) mieszanina probiercza CH_4 - pow.;
2) ciśnienie i temperatura w granicach przewidzianych przez PN;
3) U = 24 V;
4) elektrody wolframowe wg IEC oraz SMRE;
5) wyznaczono mpz wg definicji statystycznej i brytyjskiej; pomiary wykonano na przestrzeni ok. 1 miesiąca w odstępach od 1 do kilku dni.

Wyniki zestawiono w tablicach: Z.3, Z.4, Z.5.

Wartości $\overline{mpz}$ wyznaczane z linii regresji nie są w pełni miarodajne, gdyż pochodzą z zakresu, dla którego dysponuje się małą ilością wyników pomiarowych. Jest to związane z trudnościami pomiaru w tym zakresie wg definicji statystycznej.

Wyniki pomiarów dla standardowego obwodu indukcyjnego prądu stałego: U = 24 V, L = 95 mH, gaz: CH_4 + pow.; definicja statystyczna mpz; okres pomiaru: ok. 1 miesiąca; metoda IEC

I mA	115		110		105		102,5		102		100	
Nr dośw.	p^*	m/n	p^*	m/n	p^*	m/n	p^*	m/n	p^*	m/n	p^*	m/n
1	-	-	0,0137	9/656	0,0059	10/1692	-	-	0,0035	6/1720	-	-
2	0,0490	10/204	-	-	0,0065	12/1844	-	-	-	-	0,0028	17/6132
3	0,0202	10/496	0,0063	16/2560	0,0030	12/4032	-	-	-	-	-	-
4	0,0200	11/412	0,0090	11/1184	0,0050	23/3844	0,0035	7/2008	-	-	-	-
5	0,0300	17/528	0,0100	21/1872	0,0030	23/5796	-	-	0,0020	31/14824	-	-
6	0,0466	14/300	0,0088	14/1576	0,0043	24/5532	-	-	-	-	-	-
7	0,0322	12/372	0,0161	12/744	0,0039	25/6396	-	-	-	-	-	-
8	0,1034	12/116	0,0319	12/376	0,0091	32/3500	-	-	-	-	-	-
9	0,0416	12/288	0,0205	17/828	0,0093	27/2876	-	-	0,0036	20/5516	-	-
10	0,0380	19/500	0,0119	17/1428	0,0060	20/3324	-	-	0,0038	13/3356	-	-
11	0,0256	15/584	0,0108	21/1940	0,0025	28/10896	-	-	-	-	-	-
12	0,0263	12/456	0,0304	15/492	0,0045	40/8716	-	-	-	-	-	-
13	0,1000	12/120	0,0135	21/1548	0,0061	19/3096	-	-	-	-	-	-
14	0,0551	15/272	0,0125	35/2788	0,0045	34/7520	-	-	0,0014	7/4912	-	-
$\sum_{n}^{m}$	0,0368	171/4648	0,0123	221/17992	0,0048	329/69064	0,0035	7/2008	0,0025	77/30328	0,0028	17/6132

Tablica Z.2

Porównanie wartości mpz
dla definicji statystycznej i definicji brytyjskiej.
Obwód indukcyjny prądu stałego, U = 24 V, L = 95 mH, gaz CH_4 - pow.;
okres pomiaru ok. 1 miesiąca, metoda IEC

Definicja mpz	Wyznaczone wartości mpz [mA]	$\overline{mpz}$ [mA]	$D(\overline{mpz})$ %	$\overline{mpz}$ wg linii regresji [mA]
Brytyjska	90, 110, 94, 99, 99, 99, 89, 94, 99, 94, 99, 99, 94, 94, 99, 99, 99, 99, 99, 99, 94, 99, 94, 89, 94, 99, 94	96,7	0,84	-
Statystyczna	94,6; 95,0; 99,8; 94,8; 99,3; 100,0; 98,0; 96,8; 94,5; 95,5; 100,3; 94,75; 100,0; 99,5	97,4	2,4	95,8

* Wyznaczono dla $\sum m/\sum n$ przy przekształceniu log/lin, gdy $p^* = 10^{-3}$.

Tablica Z.3

Wyniki pomiarów dla standardowego obwodu rezystancyjnego prądu stałego
U = 24 V; gaz CH_4 + pow.; definicja statystyczna mpz;
okres pomiaru ok. 1 miesiąca; metoda IEC

I mA	2200		2100		2000		1900	
Nr dośw.	p^*	m/n	p^*	m/n	p^*	m/n	p^*	m/n
1	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	0,0085	12/1402	0,0153	13/848	0,0094	10/1060
3	0,0083	11/1324	0,0113	12/1055	0,0060	13/2135	-	-
4	-	-	0,0156	7/450	0,0157	14/890	0,0088	12/1354
5	0,0281	12/426	0,0140	13/923	0,0113	12/1055	-	-
6	0,0207	12/578	0,0170	11/644	0,0108	12/1110	0,0074	12/1616
$\sum m/\sum n$	0,0150	35/2328	0,0123	55/4474	0,0106	64/6038	0,0084	34/4030

Wyniki pomiarów dla standardowego obwodu rezystancyjnego prądu stałego:
U = 24 V; gaz CH_4 + pow.; definicja statystyczna mpz; okres pomiaru ok. 1 miesiąca; metoda SMRE

I [mA]	1000		950		900		850		800		750	
Nr doś	p*	m/n	p*	m/n	p*	m/n	p*	m/n	p*	m/n	p*	m/n
1	0,0238	15/628	-	-	0,0326	15/460	-	-	0,0068	3/438	-	-
2	0,3846	10/26	-	-	0,1351	10/74	-	-	0,0048	9/1839	-	-
3	0,0349	11/315	0,0185	13/700	0,0400	18/450	0,0131	14/1061	-	-	-	-
4	0,0440	11/250	-	-	0,0310	12/387	0,0047	8/1694	-	-	-	-
5	0,0787	10/127	-	-	0,0170	12/704	-	-	0,0235	12/510	-	-
6	0,1764	9/51	-	-	0,0396	10/252	0,1730	9/52	0,0330	10/303	0,0127	5/392
$\sum m/\sum n$	0,0472	66/1397	0,0185	13/700	0,0331	77/2327	0,0110	31/2807	0,0110	34/3090	0,0127	5/392

* Tablica Z.5

Porównanie wyników wyznaczanie mpz w obwodzie rezystancyjnym przy mocowaniu elektrod wolframowych metodą IEC oraz SMRE. Pozostałe dane jak dla tabl. Z.3

Metoda	Wyznaczone wartości mpz [mA]	$\overline{mpz}$ [mA]	$D(\overline{mpz})\%$	* $\overline{mpz}$ wg linii regresji
SMRE	730, 770, 770, 690, 770, 850, 850, 730, 770, 650, 730, 770	757	2,1	315
IEC	1710, 1800, 1540, 1250, 1250, 1460	1503	5,7	776

* Wyznaczono dla $\sum m/\sum n$ przy przekształceniu log/lin, gdy $p^* = 10^{-3}$.

2. Przyjęte przekształcenia zmiennych

Wyznaczenie krzywych wzorcowych oparto na wynikach zawartych w tablicach: Z.1, Z.3 i Z.4. Posłużono się przy tym czterema różnymi parami przekształceń dla p oraz I. Są to:

1) log p/log I;
2) log p/lin I;
3) probit p/log I;
4) probit p/lin I.

Po przekształceniu oznaczamy zmienne: Y/X.

Przekształcenie lin oznacza, że wartości prądu pozostają w skali liniowej. Przekształcenie "probit" stosowane jest wówczas, gdy pragnie się przyjąć aproksymację liniową dla dystrybuanty po przekształceniu. Szerokie omówienie tej metody zawarte jest w pracy Finney'a [124] i pod nazwą probit sporządzane są tablice w literaturze anglosaskiej [125]. W SMRE metoda ta jest stosowana do statystycznej oceny masy ładunku wybuchowego, który eksploduje w atmosferze wybuchowej i powoduje jej zapłon z prawdopodobieństwem p = 0,5 [126].

Najbardziej przystępne i wystarczające wyjaśnienie w literaturze polskiej zawarte jest w [127], gdzie w przypadku przekształcenia 3) przytacza się siatkę "laplaso-logarytmiczną", zaś w przypadku przekształcenia 4) siatkę "laplaso-regularną". Należy jednak zaznaczyć, że sens stosowania tych przekształceń jest nieco odmienny niż ma to miejsce normalnie. Nie badamy dystrybuanty, lecz po przekształceniu zależności $p = f(I)$ chcemy przyjąć model regresyjny liniowy drugiego rodzaju i pierwszego stopnia. Do tego chcemy spełnić postulat, aby dla $I \to \infty$ $p \to 1$, o czym wspominano w punkcie 7.1 w uwadze 2).

Przekształcenie probit ma więc następujący układ równań:

$$Y = \beta_o + \beta_1 X, \tag{a}$$

$$p = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Y-5} \exp(-\tfrac{1}{2} y^2)\, dy. \tag{b}$$

3. Obliczenia

Obliczenia zostały wykonane na minikomputerze pdp 8 i pdp 11. Programy zostały opracowane przez Mr S.P. SIMPSONa z Sekcji Matematyków w SMRE. Autor korzystał z programów, jakie opracowano dla potrzeb SMRE, stąd w tablicach wyników obliczeń zawarte są także wielkości, jakie były przewidziane do obliczeń i wydruków w tych programach.

W tablicach oznaczają:

1) M - ilość wyników (p_i^*, I_i),

2) Z - stopnie swobody,

3) $SS_R = \sum_i (\hat{Y}_i - \bar{Y})$ - suma kwadratów zmiennej w regresji,

4) $SS_r = \sum_i (Y_i - \hat{Y}_i)$ - suma kwadratów zmiennej poza regresją,

5) $MS_R = SS_R / Z_R$, $MS_r = SS_r / Z_r$ - wariancja resztkowa (7.9) będąca odpowiednikiem wariancji danej zależnością (7.9),

6) r_{XY} - wielkość dana zależnością (7.6).

Wielkości: SS (sum of squares) oraz MS (mean square) są wielkościami służącymi w analizie regresji do oceny dokładności regresji estymowanej [120]. Na ich podstawie zestawia się tablicę analizy wariancji. Z możliwych przekształceń prowadzących do przyjęcia modelu liniowego wybieramy takie, dla którego stosunek SS_r/SS_R jest najmniejszy. Nie jest to wyłączne kryterium i wybór może być dokonany dla przekształcenia, które posiada większą wartość stosunku, lecz jest wygodniejsze w stosowaniu.

W tablicy Z.6 zestawiono wyniki obliczeń dla obwodu indukcyjnego prądu stałego, dla którego dane wyjściowe zawarte są w tablicy Z.1. Obliczenia obowiązują dla przekształcenia log/log. Dokonano obliczeń w trzech etapach. Najpierw dla każdego doświadczenia wyznaczono linię regresji. Następnie w tablicy Z.1 zsumowano w kolumnach oddzielnie m oraz n. W ten sposób otrzymano dane $(\sum m/\sum n)$ o M = 6. Wreszcie przyjęto, że z 14 doświadczeń dysponuje się M = 47 parami wyników (p_{ij}^*, I_{ij}).

Podobny zestaw przeliczeń dokonano dla pozostałych przekształceń. Celowe jest przedstawienie w tej pracy tylko wyników dla danych $(\sum m/\sum n)$ oraz par (p_{ij}^*, I_{ij}). Zestawienia dokonano w tablicy Z.7, na podstawie którego

Obliczenia dla przekształcenia log p/ log I. Dane wyjściowe zawarte są w tablicy Z.1

Nr dośw.	r_{XY}	Linia regresji	Analiza wariancji SS_R	Z_R	MS_R	SS_r	Z_r	MS_r	SS_Σ	Z_Σ
1	1.000	$\hat{Y}$ = -38.8782+18.1326X	0.180	1	0.180	0.000	1	0.000	0.180	2
2	0.9983	-44.1082+20.7619X	0.818	1	0.818	0.003	1	0.003	0.821	2
3	0.9899	-44.9854+20.9904X	0.344	1	0.344	0.007	1	0.007	0.351	2
4	0.9840	-35.9340+16.6523X	0.408	1	0.408	0.013	2	0.007	0.421	3
5	0.9999	-48.4046+22.7617X	0.815	1	0.815	0.000	2	0.000	0.812	3
6	0.9718	-55.0442+26.0298X	0.529	1	0.529	0.031	1	0.031	0.560	2
7	0.9834	-49.3659+23.2565X	0.422	1	0.422	0.014	1	0.014	0.437	2
8	1.0000	-55.9431+26.6703X	0.555	1	0.555	0.000	1	0.000	0.555	2
9	0.9867	-41.8039+19.6363X	0.606	1	0.606	0.016	2	0.008	0.623	3
10	0.9890	-39.9406+18.6655X	0.548	1	0.548	0.012	2	0.006	0.560	3
11	0.9916	-53.7883+25.3490X	0.502	1	0.502	0.002	1	0.002	0.510	2
12	0.8363	-41.3357+19.3644X	0.293	1	0.293	0.126	1	0.126	0.419	2
13	0.9671	-64.0944+30.5725X	0.730	1	0.730	0.051	1	0.051	0.780	2
14	0.9950	-61.6562+29.3013X	1.350	1	1.350	0.014	2	0.007	1.364	3
		Linia regresji dla $(\sum m/\sum n)$. M = 6								
	0.9852	$\hat{Y}$ = -41.6282+19.4762X	1.004	1	1.004	0.030	4	0.008	1.034	5
		Linia regresji dla łącznej sumy M = 47 par (p_{ij}^*, I_{ij})								
	0.9148	$\hat{Y}$ = -46.7093+21.9803X	8.244	1	8.244	1.607	45	0.036	9.850	46

Tablica Z.7

Porównanie linii regresji dla różnych przekształceń.
Obwód indukcyjny o danych wyjściowych zawartych w tabl. Z.1

Przekształcenie	Dane wyjściowe	Linia regresji	r_{XY}	$D(b_1)$	Analiza wariancji								χ^2/Z	M
					SS_R	Z_R	MS_R	SS_r	Z_r	MS_r	SS_Σ	Z_Σ		
log/log	$\sum m/\sum n$	$\hat{Y}=-41,6282+19,4762X$	0,9852	-	1,004	1	1,004	0,030	4	0,008	1,034	5	-	6
	p_{ij}^*/I_{ij}	$\hat{Y}=-46,7093+21,9803X$	0,9148	-	8,244	1	8,244	1,607	45	0,036	9,850	46	-	47
log/lin	$\sum m/\sum n$	$\hat{Y}=-10,5603+0,0789X$	0,9876	-	1,009	1	1,009	0,026	4	0,006	1,034	5	-	6
	p_{ij}^*/I_{ij}	$\hat{Y}=-11,5204+0,0879X$	0,9157	-	8,260	1	8,260	1,590	45	0,035	9,850	46	-	47
probit/log	p_{ij}^*/I_{ij}	$\hat{Y}=-35,25+18,64X$	-	0,791	-	-	-	-	-	-	-	-	$\frac{154,9}{45}$	47
probit/lin	p_{ij}^*/I_{ij}	$\hat{Y}=-5,452+0,075X$	-	0,003	-	-	-	-	-	-	-	-	$\frac{151,4}{45}$	47

Wyniki obliczeń dla obwodu rezystancyjnego prądu stałego.
Gaz probierczy: CH_4 - pow. Napięcie zasilania 24 V. Elektrody wolframowe wg zaleceń IEC oraz wg SMRE

Elektrody	Przekształcenie	Linia regresji	r_{XY}	$D(b_1)$	SS_R	Z_R	MS_R	SS_r	Z_r	MS_r	SS_Σ	Z_Σ	χ^2/Z	M
IEC	log/log	$\hat{Y} = -14,6989+3.8517X$	0,9524	-	0,033	1	0,033	0,000	2	0,000	0,034	3	-	4
	log/lin	$\hat{Y} = -3,6205+0,0008X$	0,9970	-	0,033	1	0,033	0,000	2	0,000	0,034	3	-	4
	probit/log	$\hat{Y} = -8,419+3,366X$	-	1,308	-	-	-	-	-	-	-	-	0,048/2	4
	probit/lin	$\hat{Y} = 1,2606+0,00071X$	-	0,00028	-	-	-	-	-	-	-	-	0,054/2	4
SMRE	log/log	$\hat{Y} = -14,9953+4.5140X$	0,7901	-	0,222	1	0,222	0,134	4	0,033	0,356	5	-	6
	log/lin	$\hat{Y} = -3,7254+0,0023X$	0,8013	-	0,229	1	0,229	0,128	4	0,032	0,356	5	-	6
	probit/log	$\hat{Y} = -15,42+6,245X$	-	0,791	-	-	-	-	-	-	-	-	20,41/4	6
	probit/lin	$\hat{Y} = 0,289+0,003X$	-	0,00038	-	-	-	-	-	-	-	-	20,44/4	6

można dokonać wyboru przekształcenia. Dla przekształcenia probit z wielu danych, których wydrukiem autor dysponuje (przydatne dla SMRE) przydatne są jedynie: odchylenie standardowe dla współczynnika linii regresji $D(b_1)$ oraz χ^2 dla testu zgodności χ^2. (Szersze omówienie tych zagadnień czytelnik znajdzie w [124]÷[126] w odniesieniu do metody probit).

Na podstawie tablic [102] znajdujemy, że dla poziomu istotności α=0,05 i Z = 45 stopni swobody wartość krytyczna $\chi^2(\alpha,Z)$ = 61,656, Z danych w tablicy widać, że z obliczeń wartości χ^2 są znacznie większe, a więc przekształcenie probit dla uzyskanych danych odrzucamy.

Na podstawie analizy wariancji w tablicy Z.7 stwierdzamy: $(SS_r/SS_\Sigma)\%$ dla log/log $\approx (SS_r/SS_\Sigma)\%$ dla log/lin i wynoszą ok. 16% przy danych wyjściowych p_{ij}^*/I_{ij}. Dla danych wyjściowych $(\sum m/\sum n)$ wartości $(SS_r/SS_\Sigma)\%$ są na poziomie ok. 3%. Wydaje się być korzystniejsze dokonywanie przeliczeń wychodząc z tych danych.

Wnioskujemy dalej, że r_{XY} jest większy dla przekształcenia log/lin. Nie jest to różnica zbyt duża i ostatecznie można przyjąć, że przekształcenie log/log jest odpowiednie dla naszych celów (pomimo, że nie posiada korzystnej własności przekształcenia probit, którą należałoby wziąć dodatkowo pod uwagę, gdybyśmy musieli przyjąć zakres dochodzący aż do wartości p bliskich 1).

Wyniki obliczeń dla obwodu rezystancyjnego dla danych wyjściowych $(\sum m/\sum n)$ wziętych z tablic Z.3 i Z.4 zestawiono w tablicy Z.8. Wyraźnie gorsze wyniki uzyskano dla elektrod ustawianych wg metody SMRE. Jest to związane z trudnościami w wyregulowaniu czułości iskiernika, o czym już wspominano. Uzyskano tu $(SS_r/SS_\Sigma)\% \approx 37\%$, gdy w metodzie IEC ta sama wielkość praktycznie wynosi $\approx$ 0. Wartość krytyczna χ^2 dla Z = 2 wynosi 5,991, zaś dla Z = 4 χ^2_{kr} = 9,488. Należy więc uznać wynik dla probit w metodzie IEC za korzystny. Dla jednolitości stosowania przekształceń dla wszystkich obwodów przyjmuje się ostatecznie za odpowiednie przekształcenie log/log.

Na zakończenie należy zwrócić uwagę, że dobór przekształcenia można w przybliżeniu robić graficznie we wszystkich przypadkach. Nie mamy jednak możliwości oceny ilościowej jak to ma miejsce wyżej metodą obliczeniową.

LITERATURA

[1] PN-72/E-08110. Elektryczne urządzenia przeciwwybuchowe. Wymagania i badania wspólne dla różnych rodzajów budowy.

[2] GLIŃSKI S.: Urządzenia elektryczne w obszarach zagrożonych wybuchami. Warszawa 1972, WNT.

[3] YOUNG W.: A History of Intrinsic Safety in Mines. The Mining Electrical and Mechanical Engineer, 1959, Jan.

[4] PN-72/E-08116. Urządzenia z osłoną ognioszczelną. Ogólne wymagania i badania.

[5] PN-72/E-08115. Urządzenia o budowie wzmocnionej. Ogólne wymagania i badania.

[6] PN-72/E-08114. Urządzenia z osłoną olejową. Ogólne wymagania i badania.

[7] PN-72/E-08113. Urządzenia z osłoną piaskową. Ogólne wymagania i badania.

[8] PN-72/E-08112. Urządzenia przewietrzane i urządzenia z osłoną gazową i pod ciśnieniem. Ogólne wymagania i badania.

[9] PN-72/E-08107. Urządzenia iskrobezpieczne. Ogólne wymagania i badania.

[10] SMRE Bibliography (2-nd edition), Sheffield 1960.

[11] BRITISH STANDARD INSTITUTION. British Standard 1259:1958. Intrinsically safe electrical apparatus and circuits for use in explosive atmospheres (pierwsze wydanie w 1945 r.).

[12] BRITISH STANDARD INSTITUTION. British Standard 1538:1956. Intrinsically safe transformers primarily for bell-signaling circuits (pierwsze wydanie w 1949 r.).

[13] BRITISH STANDARD CODE OF PRACTICE. CP 1003:1948. Installation and maintenance of flameproof and intrinsically safe electrical equipment.

[14] BASEEFA (1972 b). Intrinsic Safety, Certification Standard SFE 3012: 1972.

[15] BASEEFA (1971). Shunt Diode Safety Barriers, Certification Standard SFA 3004:1971.

[16] BASEEFA (1974). Electrostatic Paint and Powder Spray Guns,Certification Standard SFA 3010 Part 1:1974.

[17] SIMA GUIDE on the Safety of Electrical Equipment in Flammable Atmospheres. The Scientific Instrument Manufacturers' Association (SIMA), London 1971.

[18] BIMCAM CODE of Practice on Zener Barriers. The British Industrial Measuring and Control Apparatus Manufacturers' Association (BIMCAM). Wyd.: D.O.B. Services (Hitchin) Ltd.

[19] MTL APPLICATION NOTE; AN 9003. A user's guide to intrinsic safety. Measurement Technology Ltd., Luton 1973.

[20] CENELEC. Electrical Apparatus for potentially explosive atmosphere. Intrinsically safe apparatus. Specific requirements for construction and testing. First edition July 1974 (projekt do użytku wewnętrznego).

[21] IEE Conference Publication Number 74. Electrical Safety in Hazardous Environments. The Institution of Electrical Engineers. London, March 1971.

[22] DICKINSON J.V.: Safety Measures for Electrical Apparatus Used in Coalmines. The Mining Electrical and Mechanical Engineer, 1964, Dec.

[23] LOISON R., BELUGOU P., CHAINEAUX L.: Examen et construction des appareils électriques de sécurité intrinseque en France.Revue de l'industrie minerale. 1963, No 12.

[24] KRAWCZENKO W.S.: Wierojatnostnaja priroda wospłamienienija mietana elektriczeskim iskrienjem. Sbornik Statiej. Moskwa 1949,Ugletiechizdat.

[25] KOWALEW P.F.: Principy wzrywobiezopasnosti rudnicznogo elektrooborudowanja. Moskwa 1951, Ugletiechizdat.

[26] KRAWCZENKO W.S.: Wospłamieniajuszczaja sposobnost elektriczeskogo iskrienja. Moskwa. Elektriczestwo 1952, nr 9.

[27] THOMAS V.M.: Design of intrinsically safe apparatus for use in coalmines. A review of data and techniques. The Mining Electrical and Mechanical Engineer, 1964, May/June.

[28] THOMAS V.M.: Safety aspects in the design of instrument, control and automation systems for mining. Transactions of the Society of Instrument Technology, 1966, No 3.

[29] KRAWCZENKO W.S.: Wospłamieniajemost razlicznych gazo-parowozdusznych wzrywczatych sred, ich klassifikacja po wospłamieniajemosti ot elektriczeskich razriadow i pierspiektiwy rasszirienija primienienja iskrobiezopasnych sistem w razlicznych wzrywczatych sriedach. Kratkij naucznyj otczet. Moskwa 1964, IGD.

[30] KRAWCZENKO W.S.: Naucznyje issledowanija w Anglii w obłasti iskrobiezopasnogo primienienija elektriczeskoj energii w wospłamieniajuszczejsia atmosfierie. Kratkij naucznyj otczet. Moskwa 1964, IGD.

[31] KRAWCZENKO W.S.: Issledowanija w obłasti iskrobiezopasnosti w awtomaticzeskoj gazowoj zaszczyti. Międzynarodowa Konferencja, Gottwaldow 1968.

[32] WIDGINTON D.W.: Ignition of methane by electrical discharges. Sheffield 1966, SMRE Research Report No 240.

[33] STEWART J.A.: Comparison of World Standards for Electrical Enclosures for Hazardous Areas. Part I, IEEE Trans. Ind. and Gen. Applic. July/August 1970, Vol. IGA-6, No 4.

[34] SHORRT W.A.: Comparison of World Standards for Electrical Enclosures for Hazardous Areas. Part II. July/August 1970, Vol. IGA-6, No 4.

[35] ZBOROVSZKY Z.: A Comprehensive Study of Intrinsic Safety Criteria. Denver Research Institute. Distributed by National Technical Information Service. U.S. Department of Commerce, March 1972.

[36] MAGISON E.C.: Electrical Instruments in Hazardous Locations. Plenum Press, New York 1966.

[37] TURKIN G.J. i inni: Zarubieżnoje wzrywozaszcziszczennoje elektrooborudowanije. Moskwa 1973, izd. Energija.

[38] BAŁAKIERSKIJ L.B. i inni: Bieskontaktnyje iskrobiezopasnyje połuprovodnikowyje elementy szachtnoj awtomatiki. Moskwa 1969, izd. Niedra.

[39] SUŁTANOWICZ A.U. i inni: Rasczjet i konstruirowanje iskrobiezopasnoj apparatury. Moskwa 1971, Energija.

[40] REDDING R.J.: Intrinsic Safety. The safe use of electronics in hazardous locations. McGraw Hill, London 1971.

[41] ISA MONOGRAPH 111. Electrical Safety Practices. The Instrument Society of America, Pittsburgh 1967.

[42] ISA MONOGRAPH 113. Electrical Safety Practices. The Instrument Society of America, Pittsburgh 1972.

[43] IEE Conference Publication No 134. Electrical Safety in Hazardous Environments. The Institution of Electrical Engineers. London, December 1975.

[44] KRAJOWA KONFERENCJA Naukowo-Techniczna: "Automatyzacja w Przemyśle Chemicznym" - Sekcja II: Urządzenia pomiarów i automatyki w obiektach przemysłu chemicznego zagrożonych wybuchem. SITPChem,Płock,Październik 1975.

[45] CIOK J., WROŃSKI J.: Badania nad bezpieczeństwem wobec metanu zapalarek elektrycznych dla zapalników mostkowych. Komunikat GIG, nr 158, 1954.

[46] WROŃSKI J., CIOK J., KOŁODZIEJSKI B.: Badania możliwości zapalenia metanu od iskier powstających przy zwarciu akumulatorów zasilających lampy i przyrządy. Komunikat GIG, nr 299, 1962.

[47] WROŃSKI J., CIOK J.: Badania bezpieczników topikowych dla urządzeń elektrycznych małej mocy na bezpieczeństwo wobec metanu.Komunikat GIG, nr 300.

[48] CIOK J., KOŁODZIEJSKI B.: Badania nad zależnościami iskrobezpiecznych prądów i napięć od indukcyjności i pojemności obwodów.Komunikat GIG, nr 376, 1965.

[49] WYROSTKIEWICZ G.: Iskrobezpieczny aparat telefoniczny typu ATG/GIG do łączności lokalnej w górnictwie. Komunikat GIG, nr 377, 1965.

[50] CIOK J., KOŁODZIEJSKI B.: Iskrobezpieczne transformatory zasilane z sieci elektrycznej. Komunikat GIG, nr 458, 1969.

[51] KOŁODZIEJSKI B.: Izmierienije pierienapriażenij w induktiwnych iskrobiezopasnych ciepjach. Referat nr 9 na Międzynarodową Konferencję - Gottwaldow 1968.

[52] KOŁODZIEJSKI B.: Próba oceny obwodów iskrobezpiecznych na podstawie pomiarów przepięć. Zeszyty Problemowe Górnictwa PAN, 1971,tom 9, zeszyt 2.

[53] CIOK J., KOŁODZIEJSKI B.: Urządzenia przeciwwybuchowe iskrobezpieczne. Biuletyn MERA, 1972, nr 7/8.

[54] KOŁODZIEJSKI B., KOŁODZIEJ J.: Elektryczne urządzenia przeciwwybuchowe (patrz [44], str. 63).

[55] GRZYWAK A.: Niektóre problemy teoretyczne obwodów iskrobezpiecznych. Przegląd Górniczy 1964, nr 12.

[56] GRZYWAK A., ŚWIDER W.: Oscylograficzna metoda badań iskrobezpieczeństwa obwodów elektrycznych. Praca Naukowo-Badawcza ZKMPW, G-ce 1966, zesz. 55.

[57] GRZYWAK A.: Obwody iskrobezpieczne w układach automatyki górniczej. Praca Naukowo-Badawcza ZKMPW, Gliwice 1969.

[58] SMOLUCHOWSKI W.: Normalizacja obwodów i urządzeń iskrobezpiecznych. PAK, 1969, nr 10.

[59] SMOLUCHOWSKI W.: Historia i stan obecny normalizacji w zakresie elektrycznych urządzeń przeciwwybuchowych. Normalizacja 1973, nr 1.

[60] SKIBIŃSKI A.: Elektryczna aparatura pomiarowo-regulacyjna w obiektach zagrożonych wybuchem. PAK, nr 12/75.

[61] FRĄCZEK J.: Analizator termokonduktometryczny do kontroli chłodzenia wodorem generatorów wielkich mocy. PAK 1966, nr 8/9.

[62] FRĄCZEK J.: O kompensacji wpływu zmiany temperatury otoczenia na czułość analizatora termokonduktometrycznego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Automatyka, nr 8, 1967.

[63] FRĄCZEK J.: Iskrobezpieczne obwody elektryczne. Przegląd Elektrotechniczny, 1968, nr 10.

[64] FRĄCZEK J.: Iskrobezpieczny zasilacz atabilizowany do atmosfery wybuchowej wodorowej. Przegląd Elektrotechniczny, 1969, nr 9.

[65] FRĄCZEK J.: Iskrobezpieczny przekształtnik prądu zmiennego na stały z powielaczem napięcia do zasilania układów pomiarowych.Gliwice 1970. (Praca doktorska niepublikowana).

[66] FRĄCZEK J.: Statystyczna ocena iskrobezpieczeństwa obwodów elektrycznych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Automatyka, nr 17, 1971.

[67] FRĄCZEK J.: Metoda bariery w iskrobezpiecznych układach automatyki. PAK, 1972, nr 10.

[68] FRĄCZEK J.: Wpływ własności metrologicznych iskierników na wielkość dopuszczalnych parametrów iskrobezpiecznych aparatury pomiarowej.Materiały V Krajowej Konferencji Metrologii i Budowy Aparatury Pomiarowej, tom III, Poznań 1972.

[69] FRĄCZEK J.: Przekaźniki kontaktronowe w iskrobezpiecznych układach pomiarowych i sygnalizacji. PAK, 1974, nr 8.

[70] FRĄCZEK J.: Zależność iskrobezpieczeństwa od kształtu przebiegu prądu. IX Międzyuczelniana Narada Metrologów, Gliwice 1974.

[71] FRĄCZEK J.: Przeciwwybuchowe urządzenia kontrolno-pomiarowe w wykonaniu iskrobezpiecznym. Rozdz. 2 skryptu: Systemy pomiarowe.Zagadnienia wybrane. Pod red. J. Piotrowskiego. Skrypty uczelniane nr 573, Politechnika Śl., Gliwice 1974.

[72] FRĄCZEK J.: Wpływ definicji minimalnego prądu zapalającego oraz sposobów jego oceny na wielkość dopuszczalnych parametrów iskrobezpiecznych. Suplement do materiałów Krajowej Konferencji nt.: Automatyzacja w Przemyśle Chemicznym, Płock, październik 1975.

[73] ALLSOP A., GUÉNAULT E.M., NICOL A.D.J.: The minimum igniting current in relation to circuit constants. The Safety in Mines Research Board, Paper No 104, London HMSO 1946, Reprinted 1962.

[74] Sowiet Ekonomiczeskoj Wzaimopomoszczi. Elektrooborudowanije wzrywobiezopasnoje i wzrywozaszczisziczennoje w iskrobiezopasnom ispołnienii. Prawiła izgotowlenija. Mietody ispytanij i ispytatielnaja apparatura. Berlin 1971.

[75] VDE 0170/0171 d/2.65. Vorschriften für Schlagwettergeschützte/explosionsgeschütze elektrische Betriebsmittel. Verband Deutscher Elektrotechniker (VDE) e.V. 1965.

[76] IEC Technical Committee No 31, Sub-Committee 31 G : Test apparatus for intrinsically safe circuits. August 1968 (projekt).

[77] IEC Technical Committee No 31, Sub-Committee 31 G : Recommendation on the Constructional Requirements and Test Procedures for Intrinsically Safe Apparatus with Changes Made at Baden-Baden,1971 (projekt).

[78] WYTYCZNE ustalania kategorii zagrożenia wybuchem pomieszczeń,stref i przestrzeni zewnętrznych i ich wymiarów w zakładach przemysłu chemicznego. Wydane przez MPChem. Departament Mechaniki i Energetyki w listopadzie 1971.

[79] WYTYCZNE techniczne projektowania instalacji pomiarowo-automatyzacyjnych w pomieszczeniach, ich strefach i przestrzeniach zewnętrznych zagrożonych wybuchem z dnia 18 kwietnia 1972 r. Wydane przez MPChem. Departament Mechaniki i Energetyki.

[80] ZARZĄDZENIE Ministra Górnictwa i Energetyki oraz Ministra Budownictwa i Przemysłu Materiałów Budowlanych z dnia 5 października 1966 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać urządzenia elektroenergetyczne w pomieszczeniach, strefach i przestrzeniach zagrożonych wybuchem. Dz. Bud. nr 17/66 poz. 70 wraz ze zmianami wprowadzonymi w Dz. Bud. nr 10 z dnia 5 sierpnia 1969 r. poz. 34.

[81] ZARZĄDZENIE Ministra Spraw Wewnętrznych z dnia 18 marca 1967 r.w sprawie zasad zaliczania obiektów budowlanych, zakładów pracy i ich części do kategorii niebezpieczeństwa pożarowego i kategorii zagrożenia wybuchem. Dz. Bud. nr 4/67 poz. 28, ze zmianą w Dz. Bud. nr 2 poz.6 z dnia 15 kwietnia 1971 r.

[82] PN-63/E-08106. Osłony urządzeń elektroenergetycznych. Stopnie ochrony przed dotknięciem, przedostaniem się obcych ciał stałych oraz wody. Wymagania i badania.

[83] ISA-RP 12.2/1965. Tentetive recommended practice: Intrinsically safe and non-incendive electrical instruments. The Instrument Society of America, 1965.

[84] CARTWRIGHT J.: Application, Certification and Testing of Electrical Equipment for Flammable Atmospheres. Electrical Review, 1st March, 1968.

[85] FURMANOW B.M.: K woprosu ustanowlenija kriterija ocjenki iskrobiezopasnosti elektriczeskich sistem. WUGI, sbornik 11, Ugletiechizdat, 1954.

[86] FURMANOW B.M.: Biezkamiernyj mietod ocenki iskrobiezopasnosti riealnych induktiwnych elektriczeskich cepiej. Kratkij naucznyj otczet. IGD, Moskwa 1964.

[87] MICHAJŁOW W.A., KOŁOBOWSKIJ A.K.: Norma iskrobiezopasnosti dla sistem szachtnoj awtomatiki. Izw. WUZ Gorn. Ż., t. 10, nr 9, 1967.

[88] BENJAMINSEN J.M., VAN WIECHEN P.H.: Probability Factors as a Guide for Area Classification and Selection of Electrical Equipment. IEEE Trans. on Ind. and Gen. Applic., Vol. IGA-5, No 3, May/June 1969.

[89] WIDGINTON D.W.: Some aspects of the desing of intrinsically safe circuits. SMRE Research Report No 256, Sheffield 1968.

[90] HICKES W.F., BROWN K.J.: Assessment of explosion probability for intrinsically safe apparatus. IEEE Conference Publication Number 74, London 1974.

[91] DOKUMENTACJA przeglądu i naprawy aparatury pomiarowo-regulacyjnej (opracowanie wstępne). ZD Automatyzacji i Budowy Aparatury Chemicznej, Oddział Oświęcim, Oświęcim 1971.

[92] BĘTLEJEWSKI K.: Problemy eksploatacyjne aparatury kontrolno-pomiarowej w MZRiP Płock. PAK nr 8-9, 1975.

[93] FRĄCZEK J.: Omówienie referatów sekcji II - "Urządzenia pomiarów i automatyki w obiektach przemysłu chemicznego zagrożonych wybuchem". Konferencja Naukowo-Techniczna "Automatyzacja w Przemyśle Chemicznym" - Płock, 9-11.X.1975. Materiały pokonferencyjne.

[94] KOŁODZIEJSKI B., KOŁODZIEJ J.: Elektryczne urządzenia przeciwwybuchowe. Referat w zbiorze [44].

[95] PROŚNIEWSKI B.: Aktualne problemy dotyczące zagadnień przeciwwybuchowych w przemyśle chemicznym. Referat w zbiorze [44].

[96] SZTANDER A., GRYGIEL B.: Porównanie konstrukcji aparatury pomiarowo-regulacyjnej w wykonaniu "Ex" zastosowanej w ZA Włocławek z wymaganiami Polskich Norm. Referat w zbiorze [44].

[97] SZTARSKI M.: Niezawodność i eksploatacja urządzeń elektronicznych. WKŁ, Warszawa 1972.

[98] SKIBIŃSKI A.: Urządzenia pomiarów i automatyki w obiektach przemysłu chemicznego zagrożonych wybuchem. Referat w zbiorze [44].

[99] FISZ M.: Rachunek prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej.Wyd. III, PWN, Warszawa 1967.

[100] FIDELIS E., FIRKOWICZ S., GRZESIAK K., KOŁODZIEJSKI J.,WIŚNIEWSKI K.: Matematyczne podstawy oceny niezawodności. PWN, Warszawa 1966.

[101] BOJARSKI W.W.: Wprowadzenie do oceny niezawodności działania układów technicznych. PWN, Warszawa 1967.

[102] ZIELIŃSKI R.: Tablice statystyczne. PWN, Warszawa 1972.

[103] MANN N.R., SCHAFER R.E., SINGPURWALLA N.D.: Methods for Statistical Analysis of Reliability and Life Data. J. Wiley and Sons,N.Y.,1974.

[104] SADOWSKI W. i inni: Tablice statystyczne. PWN, Warszawa 1957.

[105] COOPER L.R.: Experience with the cadmium breakflash testing equipment. W zbiorze [21].

[106] MATOSOVIČ M.: Investigation probability of ignition of intrinsically safe induktive circuit. Ref. nr 14 na międzynarodową konferencję. Gottwaldov 1968.

[107] SUŁTANOWICZ A.U. i inni: Osobiennosti projektirowanija wzrywozaszczizszczennych priborow i sredst awtomatizacji neftjanoj promyszlennosti. Niedra, Moskwa 1973.

[108] BARTELS A.L., HOWES J.A.: The variation of minimum igniting currents with pressure, temperature and oxygen enrichment. W zbiorze [21].

[109] TOLSON P.: The use of oxygen-enriched mixtures to provide a factor of safety in the ignition testing of intrinsically safe circuits. W zbiorze [21].

[110] PEARSON K.F., VIRR L.E.: Electrical ignition characteristics of hydrogen/oxygen gas mixtures. SMRE Technical Paper P6, 1974.

[111] SIEROW W.I., WINOGRADOW W.P.: Uniwersalnyj sposob ispytanija iskrobiezopasnych ciepiej. Biezop. Truda w Prom., No 9, 1974.

[112] SIEROW W.I.: Awtomaticzeskaja bystrodiejstwujuszczaja wzrywnaja kamera IGD AN SSSR ... . IGD, Moskwa 1960.

[113] LEWIS B., von ELBE G.: Combustion, flames and explosions of gases. 2nd Edition, Academic Press Inc., New York 1961.

[114] MORGAN M.J.: Electrodes, wiring and barriers. W zbiorze [42].

[115] PATENT ZSRR: Opis 392429, opublikowany 31.XII.1973,Nr 1716085/24-7.

[116] TANAKA R.: Basic Study of Intrinsically Safe Circuits for Methane-Air Mixtures under Hyperbaric Pressure. Research Institute of Industrial Safety, Japan. Research Report R11S-RR-17-7.

[117] ZUBRZYCKI S.: Rachunek prawdopodobieństwa. Wyd. II, PWN, Warszawa 1970.

[118] PIOTROWSKI J.: Podstawy metrologii. PWN, Warszawa 1976.

[119] PN-71/N-02050. Metrologia. Nazwy i określenia.

[120] DRAPPER N.R., SMITH H.: Analiza regresji stosowana. PWN, Warszawa 1973.

[121] PAWŁOWSKI Z.: Wstęp do statystyki matematycznej. Wyd. III, PWN,Warszawa 1969.

[122] KORDOŃSKI Ch.B.: Zastosowanie rachunku prawdopodobieństwa w technice. WNT, Warszawa 1967.

[123] KILIŃSKI A.: Współczynnik bezpieczeństwa a niezawodność. Przegląd Elektrotechniczny, nr 5, 1967.

[124] FINNEY D.J.: Probit Analysis. A Statistical Treatment of the Sigmoid Response Curve. Cambridge University Press, 1962.

[125] FISHER R.A., YATES F.: Statistical Tables for Biological,Agricultural and Medical Research. Sixth Edition, Longman, London 1963.

[126] SIMPSON S.P.: The derivation of confidence limitis for the interpretation of incendivity tests of mining explosives. SMRE Technical Paper P3, 1973.

[127] KOTLARSKI I.: Rachunek prawdopodobieństwa dla inżynierów. WNT, Warszawa, 1966.

ОСНОВЫ ОЦЕНКИ ВЗРЫВООПАСНОСТИ ДЛЯ КОНТРОЛЬНО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ В ИСКРОБЕЗОПАСНОМ ИСПОЛНЕНИИ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ВЗРЫВНОЙ КАМЕРЫ IEC

Р е з ю м е

В работе выполнен анализ состояния техники и искробезопасности в области формулирования взрывоопасности для оборудования в искробезопасном исполнении. Для этого использованы стандарты и рекомендации разных стран, литература, а также результаты собственных работ.

Предложено вероятностную модель, которая разрешает оценить минимальное среднее время между взрывами. Модель учитывает надёжность оборудования, частоту появления взрывчатых смесей, а также количество оборудования находящегося в взрывной зоне. Вероятность воспламенения определена при аттестации при помощи взрывной камеры IEC, это только один из факторов влияющих на среднее время между взрывами.

Взрывная камера IEC рассмотрена, как измерительный прибор и создано для неё регресивную модель, которая соответствует калибровочной кривой измерительного прибора. Это разрешает сравнивать искробезопасные токи, определённые соответственно разными формулировками минимальных воспломеняющих токов и разных систем коэффициентов искробезопасности.

Работа обоснована многими расчетами и экспериментальными материалами. Большая часть экспериментальной работы выполнена автором в The Safety in Mines Research Establishment в Sheffield. Эта работа была также выполнена автором в Лондоне в The City University. Автор пробывал в этих местах как British Council стипендиат.

PODSTAWY OCENY ZAGROŻENIA WYBUCHOWEGO OD URZĄDZEŃ KONTROLNO-POMIAROWYCH W WYKONANIU ISKROBEZPIECZNYM W ASPEKCIE STOSOWANIA ISKIERNIKA IEC

S t r e s z c z e n i e

W pracy dokonano analizy stanu w technice iskrobezpieczeństwa w zakresie definicji zagrożenia wybuchowego od urządzeń iskrobezpiecznych. Wykorzystano w tym celu normy i zalecenia różnych krajów, literaturę oraz prace własne.

Zaproponowano model probabilistyczny, który pozwala na oszacowanie minimalnego średniego czasu pomiędzy wybuchami. W modelu uwzględniono niezawodność urządzeń, częstość pojawiania się mieszaniny wybuchowej oraz ilość urządzeń zlokalizowanych w strefie wybuchowej. Prawdopodobieństwo zapalenia wyznaczone przy atestacji z użyciem iskiernika IEC jest tylko jednym z czynników mających wpływ na średni czas pomiędzy wybuchami.

Iskiernik IEC potraktowano jako przyrząd pomiarowy i wyznaczono dla niego model regresyjny, który jest odpowiednikiem krzywej wzorcowej przyrządu pomiarowego. Pozwoliło to na porównanie prądów bezpiecznych wyznaczonych stosownie do różnych definicji minimalnych prądów zapalających i różnych systemów współczynników bezpieczeństwa.

Pracę udokumentowano wieloma przeliczeniami i materiałem doświadczalnym. Duży jest w tym udział wyników pomiarów z doświadczeń wykonanych przez autora w The Safety in Mines Research Establishment w Sheffield, a także wyników studiów na The City University w Londynie. Autor przebywał w tych ośrodkach jako stypendysta British Council.

ASSESSING FUNDATIONS OF THE SAFETY LEVEL FOR INTRINSICALLY SAFE CONTROL AND MEASURING APPARATUS WHEN THE IEC BREAKFLASH IS USED

S u m m a r y

The review and discussion of the different safety levels definitions have been done, based on literature, national standards and recommendations, author's papers and experiences.

The author suggests a probabilistic model which enables to assess the minimum time between explosions as the measure of the safety level. The probability of the presence of explosive gas mixtures, the reliability of electric apparatus, the ignition probability assessed of the IEC breakflash apparatus and the number of electric apparatus located in a dangerous zone are taken into account in this model. The ignition probability assessed by the IEC breakflash apparatus is only one of many factors influencing the average time between explosions.

The IEC breakflash apparatus has been defined as a measuring instrument and its regression model is the equivalent of the calibrating curve. This makes possible to compare permissible currents assessed according to different definitions of the minimum igniting currents and various systems of safety factors.

The results of calculations and experiments are presented to support the suggested model. The author has carried out the special tests at the Safety in Mines Research Establishment in Sheffield and studied at the City University in London, where he has been awarded the British Council scholarship.