ZESZYTY
NAUKOWE
POLITECHNIKI
ŚLĄSKIEJ

AUTOMATYKA

Z. 57
GLIWICE
1980

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ZESZYTY NAUKOWE

Nr 670

JERZY FRĄCZEK

METODY ANALIZY DOPUSZCZALNYCH PRĄDÓW BEZPIECZNYCH W ISKROBEZPIECZNYCH URZĄDZENIACH KONTROLNO—POMIAROWYCH

PL ISSN 0434-0760

GLIWICE 1980

OPINIODAWCY

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Ciok

Prof. dr hab. inż. Andrzej Grzywak

REDAKTOR NACZELNY WYDAWNICTW UCZELNIANYCH POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Jan Bandrowski

REDAKTOR DZIAŁU

Anna Skrzywan-Kosek

SEKRETARZ REDAKCJI

Wojciech Mikołajków

OPRACOWANIE REDAKCYJNE

Kazimiera Rymarz

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Śląskiej

Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej
Gliwice, ul. Kujawska 2

Nakł. 220+85 Ark. wyd. 3,32 Ark. druk. 3,62 Papier drukowy kl. V 70x100, 70 g
Oddano do druku 11.06.80 Podpis. do druku 23.06.80 Druk ukończ. w sierpniu 1980
Zam. 632/80 Cena zł 8,—

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

SPIS TREŚCI

Str.

1. Problemy iskrobezpieczeństwa 5
2. Minimalne prądy zapalające 11
   2.1. Definicje 11
   2.2. Wyniki doświadczalne 14
3. Iskiernik analizowany jako przyrząd pomiarowy 20
4. Procedury kontroli czułości i procedury atestacyjne 23
   4.1. Procedury 23
   4.2. Porównanie procedur kontroli czułości 25
   4.3. Porównanie procedur atestacyjnych 27
5. Dopuszczalne prądy bezpieczne 28
6. Zagrożenie wybuchowe w warunkach eksploatacji urządzeń iskrobezpiecznych 30
   6.1. Model zagrożenia wybuchowego 30
   6.2. Dopuszczalne prądy bezpieczne z uwzględnieniem warunków eksploatacji 33
7. Podsumowanie 35

LITERATURA 53

DODATKI .....

Dod. 1. Zapalenie gazów i par iskrami elektrycznymi 37
Dod. 2. Iskiernik IEC 43
Dod. 3. Uwagi autora o pomiarach przy stosowaniu iskiernika IEC ... 46
Dod. 4. Wpływ częstotliwości na mpz 50

Streszczenie 57
Резюме 58
Summary 59

1. PROBLEMY ISKROBEZPIECZEŃSTWA

Pojęcie "iskrobezpieczeństwo" odnosi się do iskier elektrycznych, których energia jest zbyt mała, aby spowodować zainicjowanie zapalenia mieszaniny wybuchowej. Badania nad mechanizmem powstawania "bezpiecznych iskier" doprowadziło do sformułowania zasad budowy aparatury elektrycznej i elektronicznej małej mocy, przeznaczonych do pracy w atmosferach wybuchowych, tzw. budowy przeciwwybuchowej w wykonaniu iskrobezpiecznym. Nie jest to jedyny sposób osiągania przeciwwybuchowości. Można ją osiągnąć przez:

a) obudowanie obwodów elektrycznych w sposób uniemożliwiający przeniesienie wybuchu z obudowy do otoczenia (urządzenia z osłoną ognioszczelną, olejową, piaskową, przewietrzane, z osłoną gazową pod ciśnieniem);
b) wykonanie obwodów elektrycznych w sposób iskrobezpieczny, tj. tak, aby nie stały się one przyczyną powstania wybuchu.

Aparatura w wykonaniu iskrobezpiecznym daje gwarancję największego bezpieczeństwa. Stąd, od wielu lat daje się zauważyć szczególnie duże zainteresowanie tą dziedziną, co związane jest z szybkim rozwojem przemysłu chemicznego, petrochemicznego oraz elektryfikacji i automatyzacji kopalń gazowych. Nawet w stanach awaryjnych aparatura iskrobezpieczna może być nadal zasilana, co jest niedopuszczalne przy innych rodzajach budowy.

Wczesna historia rozwoju iskrobezpieczeństwa, opisana przez Younga [45], sięga roku 1913. Bezpośrednią przyczyną zajęcia się zagadnieniami iskrobezpieczeństwa był wypadek, jaki miał miejsce w kopalni Senghenydd w Wielkiej Brytanii. Iskra, która powstała w sieci sygnalizacyjnej, spowodowała wybuch mieszaniny metanu z powietrzem, stanowiącej atmosferę kopalnianą. Od tego momentu datuje się pierwsze prace Wheelera i Thorntona, poświęcone iskrobezpieczeństwu. 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. 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).

Ostatecznym celem wszelkich poczynań w dziedzinie iskrobezpieczeństwa jest ustalenie zasad konstruowania aparatury z uwzględnieniem aktualnego stanu technologicznego oraz zasad badania na warunki iskrobezpieczne z uwzględnieniem aktualnej wiedzy o zjawisku zapalania mieszanin wybuchowych od iskier elektrycznych. Doceniając znaczenie takiego postępowania w

tej dziedzinie, przy pierwszym pojawieniu się problematyki iskrobezpieczeństwa na Kongresie IFAC (Helsinki - 1978) była ona prezentowana w sekcji o nazwie: "Iskrobezpieczeństwo - różnice w normowaniu" [8, 39, 41].

Autor w pracy [21] dokonał omówienia rozwoju iskrobezpieczeństwa między innymi z punktu widzenia rozwoju instytucjonalnego, związanego z rozwojem normowania. W niniejszej pracy istotne jest natomiast zwrócenie uwagi na stan badań z zakresu ściśle związanego z tematem.

Poza Wheelerem wielu badaczy zajmowało się wyznaczeniem minimalnych energii zapalających (mez). Podstawowe są jednak ciągle wyniki uzyskane przez Lewisa i von Elbe [33], którzy ustalili zależność mez od wielu czynników związanych ze stanem gazu oraz elektrod; uzupełniają je wyniki badań uzyskane przez badaczy związanych bezpośrednio z rozwojem techniki iskrobezpieczeństwa. Krawczenko i Komarow [29, 30] sugerowali przyjęcie mez jako podstawowego kryterium do klasyfikacji mieszanin wybuchowych, Widginton (wcześniej wespół z Lintinem, Gordonem i Westem) zajmuje się wyznaczeniem mez dla mieszaniny metanowo-powietrznej oraz wyznaczeniem mez przez badanie właściwości iskiernika IEC [42], Mc Kinney [36], wykorzystując głównie wyniki Lewisa, ustala związki praktyczne przydatne w projektowaniu urządzeń iskrobezpiecznych, Bertels [3] wyznacza mez dla mieszaniny metanowo-powietrznej, gdy wyładowania pochodzą z linii transmisyjnej. Przykładem natomiast wykorzystania mez w praktyce jest metoda proponowana przez zrzeszenie producentów aparatury kontrolno-pomiarowej w Wielkiej Brytanii (BIMCAM) do oceny parametrów dopuszczalnych kabli. Autor opisał tę metodę w pracy [19]. Przykład własnego opracowania autora stanowi praca [17], w której przedstawiono metodę oceny iskrobezpieczeństwa układów wielowyjściowych z przekaźnikami kontaktronowymi. Za podstawę wzięto mez określone z charakterystyk iskrobezpieczeństwa dla obwodów indukcyjnych.

Równolegle z pomiarami mez starano się wyjaśnić mechanizm powstawania iskier w warunkach przewidywanych w urządzeniach iskrobezpiecznych. Spodziewano się mianowicie, że iskry mogą powstać przy zwieraniu lub rozwieraniu uszkodzonych przewodów o małych średnicach lub na stykach uszkodzonych elementów, a także na stykach przekaźników małej mocy. Zwykle przerwy w przestrzeni iskrowej są rzędu ułamka mm i dochodzą do kilku milimetrów. Z tego też powodu wyznaczenia mez dokonuje się przez wyładowanie kondensatorów o pojemności rzędu 100 pF między elektrodami o małej średnicy i odległościach kilku milimetrów.

Można by sądzić, że wyjaśnienia zjawisk zachodzących w powyższych przestrzeniach iskrowych należy poszukiwać w mechaniźmie elektrycznych wyładowań w gazach. Autorami ich są badacze zajmujący się techniką wysokich napięć. Obszerna monografia Meeka i Craggsa [38] zawiera aktualne podsumowanie w zakresie wyjaśniania zjawisk wyładowań w gazach, bogaty materiał doświadczalny wykorzystywany w technice wysokich napięć oraz wiele formuł empirycznych, możliwych do wykorzystania w pracach inżynierskich. Studia tej monografii pozwalają na stwierdzenie, że wytwarzanie iskier rzędu mm

i mniejszych, pochodzących ze źródeł o napięciu nie przekraczającym kilkudziesięciu woltów i mocy na poziomie kilkunastu watów, leży poza obszarem zainteresowań badaczy zajmujących się wyładowaniami w gazach. Można nawet mówić o przeciwności zainteresowań. Większość badań w technice wysokich napięć służy rozwijaniu techniki zapobiegawczej, natomiast ci, którzy zajmują się badaniem zapalania gazów od iskier elektrycznych, dążą do stworzenia najdogodniejszych warunków do powstania iskier o minimalnej energii. Barreto [2], który podjął się wyjaśnienia zjawisk towarzyszących tworzeniu iskier o minimalnej energii zapalającej, stwierdza nawet, że istnieje "realna przerwa komunikacyjna" między ludźmi zajmującymi się wyładowaniami w gazach i tymi, którzy zajmują się zapalaniem gazów od iskier elektrycznych.

Zasadnicze wnioski z techniki wysokich napięć, które wykorzystuje się do techniki iskrobezpieczeństwa, to: 1) zależność minimalnego napięcia łuku od rodzaju elektrod oraz ich odległości; 2) zależność napięcia przeskoku od kształtu elektrod. Te wnioski wykorzystano przy konstruowaniu iskierników do badań na warunki iskrobezpieczne. Z uwagi jednak na małe rozmiary elektrod oraz ich małe odległości przeprowadzono szczegółowe badania dla konkretnych rozwiązań iskierników. Istotne są tu wyniki Cappa i Widgintona [5, 6, 42] dotyczące wyładowań łukowych w iskierniku IEC oraz Bartelsa [3] dotyczące korelacji między konfiguracją jądra płomienia w przestrzeni iskrowej a energią w niej wydzieloną.

Dla celów projektowych przy analizie obwodów elektrycznych iskrobezpiecznych przestrzeń z wyładowaniem między elektrodami traktuje się jako element nieliniowy rezystancyjny. Przykłady takiego modelowania znajdujemy w pracach Grzywaka [28] oraz Zborovszky'ej [44].

W praktyce trudno jest kontrolować stan urządzenia iskrobezpiecznego pod kątem widzenia jego stopnia zagrożenia przez pomiar energii iskier w przestrzeni iskrowej iskiernika. Z tego też powodu Allsop [1] wprowadził pojęcie minimalnego prądu zapalającego (mpz) (dla obwodu pojemnościowego: minimalne napięcie zapalające (mnz)). Zaszła więc potrzeba ustalenia korelacji pomiędzy mpz a mez, mpz a minimalnymi napięciami łuku. Korelacje takie spotyka się w wielu pracach, w tym także w pracach Krawczenki, Widgintona [30, 31, 42].

Mpz i mnz stały się podstawowymi wielkościami, które określa się przy atestacji urządzeń iskrobezpiecznych. Ich wyznaczanie dokonywane jest dla tzw. mieszaniny probierczej o stężeniu składników palnych, dla których zapalenie od iskier elektrycznych zachodzi najłatwiej (Dodatek 1) oraz z użyciem iskiernika IEC o konstrukcji zapewniającej powstawanie zapalenia od iskier o minimalnej energii (Dodatek 2).

Opisana wyżej procedura jest stosowana powszechnie, pomimo że warunki takie mogą w praktyce nie występować. Z tego też powodu czynione są próby bardziej uzasadnionego zdefiniowania poziomu bezpiecznego. Benjaminsen i Van Wiechen [4] uważają za konieczne uwzględnienie niezawodności urządze-

nia, częstość występowania gazu wybuchowego oraz częstości kontroli stanu urządzenia. Furmanow [27] sugeruje, że jedynym kryterium w ocenie bezpieczeństwa systemu elektrycznego może być tylko faktyczny stopień bezpieczeństwa, zaś odniesieniem dla projektowanego systemu jest system pracujący. Michajłow i Kałobowskij [37] uważają, że poziom wymaganego bezpieczeństwa od urządzeń iskrobezpiecznych winien być ustalony w oparciu o istniejący stan zagrożenia wybuchowego w zakładzie przemysłowym, wynikający z przyczyn innych niż stosowanie urządzeń iskrobezpiecznych.

Zdaniem autora zbyt jednostronne spojrzenie na iskrobezpieczeństwo, tj. ciągłe ograniczanie mpz przez znajdowanie coraz dogodniejszych warunków do wywoływania wybuchów może doprowadzić do znacznego ograniczenia możliwości stosowania tej techniki. Trzeba także więcej uwagi poświęcić badaniom z zakresu przyjmowania w ocenie poziomu bezpiecznego realnych warunków stosowania aparatury iskrobezpiecznej. Autor poświęcił temu zagadnieniu prace [21, 22], podając sposób ich uwzględniania.

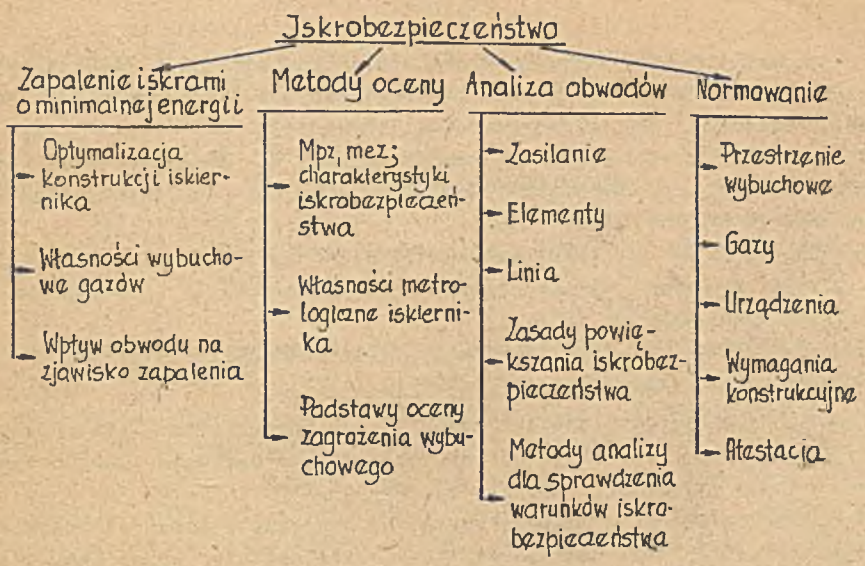
Ocena iskrobezpieczeństwa ma charakter oceny statystycznej. Przy wyznaczaniu mpz oprócz wyznaczania wartości średnich winniśmy dążyć do wyznaczenia przedziałów ufności. Wprawdzie przyjęto w praktyce różnych krajów współczynniki bezpieczeństwa, które mają wykluczyć możliwość pomyłek wynikających z faktu istnienia składowych przypadkowych mpz, jednak pominięcie tego problemu prowadzi do utrudnienia w interpretacji wyników uzyskiwanych z użyciem różnych iskierników i różnych sposobów wyznaczania mpz. Zdaniem autora [14, 16, 21] wymagane jest tutaj podejście metrologiczne i analizowanie iskiernika jako przyrządu pomiarowego.

W oparciu o przeglądy literatury, jakich autor dokonał w pracach [13, 21] oraz powyżej, można iskrobezpieczeństwo zawrzeć w trzech podstawowych problemach:

1) badanie zjawiska zapalenia gazów wybuchowych iskrami o minimalnej energii;
2) oceny ilościowe iskrobezpieczeństwa;
3) projektowanie urządzeń iskrobezpiecznych.

W ramach tych problemów wyłania się szeroka tematyka, którą obrazowo w głównym zarysie przedstawiono na rys. 1. W sytuacji, gdy dokonano klasyfikacji gazów wybuchowych, przestrzeni i urządzeń, przyjęto pewne definicje mpz oraz zaakceptowano odpowiedni iskiernik powszechne stają się problemy projektowania oraz oceny iskrobezpieczeństwa.

Urządzenie iskrobezpieczne to urządzenie o ograniczonej mocy. Kilka prac autora może być przykładem tematyki związanej ze spełnieniem warunków iskrobezpieczeństwa w ramach ograniczonej mocy, przy równoczesnym osiągnięciu zamierzonych własności metrologicznych urządzenia kontrolno-pomiarowego. Potrzeba ograniczenia mocy zmusza bowiem do eliminacji termostatów i wprowadzenia w ich miejsce układów kompensacyjnych [9, 10]. Ograniczenie mocy wyjściowej urządzeń zasilających zmusza do tworzenia wielu wyjść o zmniejszonej mocy [12]. Z wielu możliwych rozwiązań układów zasi-



Rys. 1. Problematyka iskrobezpieczeństwa

lających trzeba wybrać układ, który gwarantuje uzyskanie zadowalającej mocy iskrobezpiecznej przy równoczesnych zadowalających wskaźnikach jakości zasilania [13]. W układach sygnalizacyjnych wielopunktowych poszukujemy warunku dla ustalenia maksymalnej liczby dozwolonych punktów [17, 26]. W przytoczonych przykładach ostateczne potwierdzenie spełnienia warunków iskrobezpieczeństwa uzyskamy poprzez ocenę metrologiczną wyników atestacji, z uwzględnieniem własności metrologicznych iskiernika.

Od czasu pierwszych prac Wheelera i Thorntona, dzięki powstałym licznym opracowaniom oraz przeprowadzeniu wszechstronnych badań, technika iskrobezpieczeństwa przerodziła się w samodzielną dziedzinę o specyficznych kryteriach i metodach. Autor w okresie ponad 10 lat pracy naukowo-badawczej skoncentrował się na problematyce metod analizy i kryteriów oceny parametrów obwodu elektrycznego z punktu widzenia iskrobezpieczeństwa. Pierwszym tego wyrazem były niektóre fragmenty pracy doktorskiej przedstawionej w 1970 roku [13]. W miarę rozwijanych prac autor uwzględniał kolejno następujące zagadnienia:

- własności metrologiczne iskiernika,
- różne definicje mpz,
- model zagrożenia wybuchowego z uwzględnieniem niezawodności aparatury iskrobezpiecznej,
- różne procedury kontroli czułości iskiernika oraz procedury atestacyjne.

Autor prezentował swoje teorie na forum publicznym, poddając je pod dyskusję. Przykładem są tu referaty wygłoszone na konferencjach: V Krajowa

Konferencja Metrologii i Budowy Aparatury Pomiarowej [16], IX Międzyuczelniana Narada Metrologów [18], Krajowa Konferencja: "Automatyzacja w Przemyśle Chemicznym" [20], Międzynarodowa Konferencja "EMISCON-79" [23]. Bieżące prace były przedstawione na konferencjach: VI Międzynarodowa Konferencja Automatyzacji Górnictwa "ICAMC-80" [25] oraz Konferencja Naukowo-Techniczna "KONTAKTRONIKA-80" [26].

Podsumowaniem 10 lat pracy autora nad wyżej wymienionymi zagadnieniami były kolejno ukazujące się publikacje w czasopismach:
- Archiwum Górnictwa PAN [22, 24],
- Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. "Automatyka" [14, 21],
- Pomiary, Automatyka, Kontrola [17].

Wspólną ich cechą jest jednolite podejście do zagadnienia ustalania dopuszczalnych parametrów bezpiecznych, przy czym w zakresie merytorycznym jedne wynikają z drugich, tworząc całość.

Niniejsze opracowanie stanowi syntetyczne ujęcie całości, zestawienie najważniejszych wyników naukowo-badawczych wieloletniej pracy oraz istotne uzupełnienie do niektórych problemów, a zwłaszcza takich jak:
- wpływ sposobu przeprowadzenia doświadczenia na wynik uzyskanego mpz,
- dopuszczalne prądy bezpieczne z uwzględnieniem warunków eksploatacji,
- wpływ częstotliwości i kształtu prądu na mpz.

2. MINIMALNE PRĄDY ZAPALAJĄCE

2.1. Definicje

Autor omówił różne sposoby definiowania parametrów bezpiecznych w [21]. Z punktu widzenia dotychczasowej praktyki w ocenie iskrobezpieczeństwa celowe jest przytoczenie definicji minimalnych prądów zapalających.

Wśród krajów członkowskich CENELEC (The European Electrical Standards Coordination Committee) dominująca jest definicja brytyjska mpz, wprowadzana przez Allsopa [1]: "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 postępowanie nieco zmieniono. 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.

Definicja mpz w zaleceniach RWPG i PN oparta jest na statystycznej metodzie oceny iskrobezpieczeństwa. Jest ona zdefiniowana jako "wartość prądu I_z odpowiadająca prawdopodobieństwu zapalenia $p = 10^{-3}$". Praktycznie, dla stwierdzenia z prawdopodobieństwem 95%, że $p = 10^{-3} \mp 50\%$, trzeba wywołać 16 000 iskier [14, 21]. Wyznaczenie mpz winno się dokonywać przez interpolację graficzną, jak zilustrowano na rys. 2.

Z opisu własności iskiernika IEC dokonanego w Dodatku 2 wnioskujemy, że dla obu przytoczonych definicji możemy się spodziewać zmian w wynikach wyznaczaniu mpz zależnie od sposobu mocowania elektrod wolframowych.

Na podstawie wyników pomiarów dokonanych dla szerokiego zakresu parametrów obwodów [32] stwierdzono, że dla prawdopodobieństwa zapalenia większego od $p = 10^{-8}$ dobrze spełniane są zależności:

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{I_1}{I_2}\right)^a \tag{2.1}$$

dla obwodu indukcyjnego i rezystancyjnego:

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^b \tag{2.2}$$

Tablica 2.1

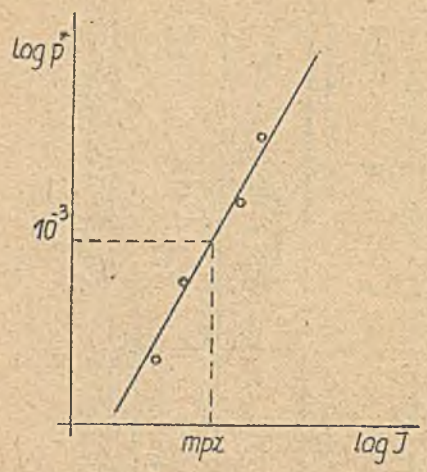
Przykłady współczynników bezpieczeństwa polskich [N3] i brytyjskich [N1]. Stopnie KI i KII odpowiadają odpowiednio kategoriom ib oraz ia

Warunki	Współczynnik bezpieczeństwa		Wartości obowiązujące			
			w Polsce		w Wielkiej Brytanii (bez styków z otwartym iskrzeniem)	
			K I	K II	ib	ia
Normalne	k_{Nn} - dla nap. zasil.		1,1	1,1	1,1	1,1
	k_b		2,5	2,5	1,5	1,5
Awaryjne	k_{Na} - dla nap. zasil.		1,2	1,2	1,1	1,1
	k_a	jedno uszkodzenie	-	-	1,0	1,5
		dwa uszkodzenia	1,5	-	-	1,0
		dowolna ilość uszkodzeń	-	2,5	-	-

Tablica 2.2

Przykłady wyznaczanych wartości wykładnika "a" z równania (2.1)

Lp.	Iskiernik	Obwód	Gaz	Zakres p*	a	Źródło lit.
1	ZSRR do badań atestacyjnych	U = 70 V L = 1 mH-37H	CH_4 + pow.	10^{-3} - 3.10^{-1}	12,9	[32]
		U = 70 V	CH_4 + pow.	2.10^{-6} - 10^{-3}	15,1	
		L < 1 mH		5.10^{-9} - 2.10^{-6}	49,9	
2	SMRE eksperymentalny	U = 24 V L = 95 mH	22% H_2 + pow.	10^{-3} - 1	13,9	[35]
3	IEC Kop. "Barbara"	U = 20 - 24 V transformatorki iskrobezp.	8,5% CH_4+pow.	10^{-4} - 10^{-2}	6,7 - 11,2	[13]
4	IEC - ZSRR	R, L, C	-	$>10^{-6}$	31,2 - 43	[40]
5	Iskiernik L Kop."Barbara"	U = 24-130 V L = 1mH - 10H	8,3 + 8,5% CH_4 + pow.	10^{-5} - 10^{-1}	10,5 - 120	[7]



Rys. 2. Ilustracja do wyznaczania mpz wg definicji statystycznej

dla obwodu pojemnościowego, gdzie a, b - stałe wartości wykładników przyjęte w metodzie statystycznej: a = b = 13.

Za wartości bezpieczne prądu I_b oraz napięcia U_b uważa się te, które odpowiadają prawdopodobieństwu zapalenia $p = 10^{-8}$. Z równań (2.1) oraz (2.2) uzyskuje się stosunek wartości zapalających do bezpiecznych:

$$\frac{I_z}{I_b} = \frac{U_z}{U_b} = 2,5 = k. \qquad (2.3)$$

Wielkość k przyjęto nazywać współczynnikiem bezpieczeństwa.

W Wielkiej Brytanii i w krajach stowarzyszonych w CENELEC poziomy bezpieczne także ustala się z wykorzystaniem współczynników bezpieczeństwa.

Autor zajmował się wykorzystaniem współczynników bezpieczeństwa w pracach [13, 20, 21, 25, 26]. Przykładowe porównanie niektórych współczynników zawiera tabl. 2.1. Z wielu wyników doświadczalnych spotykanych w literaturze, jak i z własnych pomiarów autora wynika, że faktyczne wartości współczynników bezpieczeństwa mogą się wahać zależnie od rzeczywistych wartości "a" i "b". Autor zestawił wyznaczane wartości "a" i "b" w pracach [21, 25]. W tabl. 2.2 zestawiono przykłady spotykanych wartości "a". Jeśli wziąć pod uwagę Lp. 4, to otrzymujemy współczynnik bezpieczeństwa w granicach 1,31 - 1,44.

2.2. Wyniki doświadczalne

Wprowadzimy następujące oznaczenia:

$(\overline{mpz})_S$ - średnia wartość mpz wyznaczona metodą statystyczną;

$(\overline{mpz})_A$ - średnia wartość mpz wyznaczana metodą Allsopa;

$(\overline{mpz})_P$ - najbardziej prawdopodobna średnia wartość mpz.

Pojedyncze doświadczenie, polegające na ustaleniu prawdopodobieństwa, że nastąpi X = m wybuchów, gdy liczba wywołanych iskier wynosi N, opisuje rozkład dwumianowy:

$$P\,(X=m) = \binom{N}{m} p^m q^{N-m}, \qquad (2.4)$$

gdzie: p - prawdopodobieństwo zapalenia w pojedynczym iskrzeniu, q=(1-p).

W trakcie prowadzenia doświadczenia możemy śledzić prawidłowość jego przebiegu przez obserwację liczby wywołanych iskier poprzedzających każdy wybuch. Mając wstępną informację o częstości względnej wybuchu (dużą rolę odgrywa tutaj doświadczenie eksperymentatora - patrz Dodatek 3), możemy przewidywać średnią liczbę iskier do wystąpienia wybuchu. Wykorzystujemy w tym celu definicję wartości oczekiwanej i obliczamy wartość oczekiwaną liczby iskier N_o zanim wystąpi wybuch, gdy w doświadczeniu wywołuje się N iskier:

$$E(N_p) = p + 2\,pq + 3\,pq^2 + \ldots + N \cdot pq^{N-1} + N \cdot qq^{N-1}, \qquad (2.5)$$

i otrzymujemy ostatecznie:

$$E(N_p) = \frac{1 - q^N}{p}. \qquad (2.6)$$

(Zależność (2.6) została zasugerowana przez Mr D. W. Widgintona podczas stażu autora w SMRE).

Załóżmy, że posiadamy krzywą wzorcową iskiernika (2.1), która jest bezpośrednio związana z definicją statystyczną mpz (patrz punkt 3). Jeżeli zgodnie z definicją mpz Allsopa rozpoczniemy wyznaczanie mpz od prądu I_1, któremu odpowiada prawdopodobieństwo zapalenia p_1 wg krzywej wzorcowej, to przy ustalonym N = const i wymaganiu X = 0 otrzymujemy wyrażenie na prawdopodobieństwo spełnienia tego wymagania:

$$P_1(X=0) = (1 - p_1)^N, \qquad (2.7)$$

zaś ogólnie:

$$P_i(X=0) = (1 - p_i)^N. \qquad (2.8)$$

Przejście do badania przy następnej wartości prądu pomniejszonej o stały procent δ nastąpi wówczas, gdy uzyska się przynajmniej jeden wybuch przy wybranej w doświadczeniu ilości iskier N. Prawdopodobieństwo przynajmniej jednego wybuchu wynosi:

$$Q_i = 1 - P_i. \qquad (2.9)$$

Zgodnie z definicją Allsopa postępowanie takie ma miejsce do momentu aż dla wybranego N nie nastąpi wybuch. Przy kolejnym zmniejszeniu prądu o δ możemy ustalić prawdopodobieństwo, że wartości prądu I_i dla i=1,2...,z będą wartościami mpz, tzn. ściślej, że dla nich wystąpi X=0 przy danym N. Prawdopodobieństwo to wyraża się zależnością:

$$P_{o,z} = P_z \prod_{i=1}^{z-1} Q_i. \qquad (2.10)$$

Zależność (2.10) jest funkcją rozkładu prawdopodobieństwa mpz. Przy obliczaniu P_z z zależności (2.8) możemy uwzględnić zależność (2.1) (oraz) δ, co prowadzi do zależności:

$$P_z = \left[1 - p_1 (1 - \delta)^{a(z-1)}\right]^N . \qquad (2.11)$$

Wyniki pomiarów przeprowadzonych przez autora są zamieszczone w pracy [21] w załączniku. Na ich podstawie wyznaczono $(\overline{mpz})_S$, $(\overline{mpz})_A$ oraz krzywe wzorcowe dla czterech par przekształceń dla p oraz I:

1) log p/log I;

2) log p/lin I;

3) probit p/log I;

4) probit p/lin I.

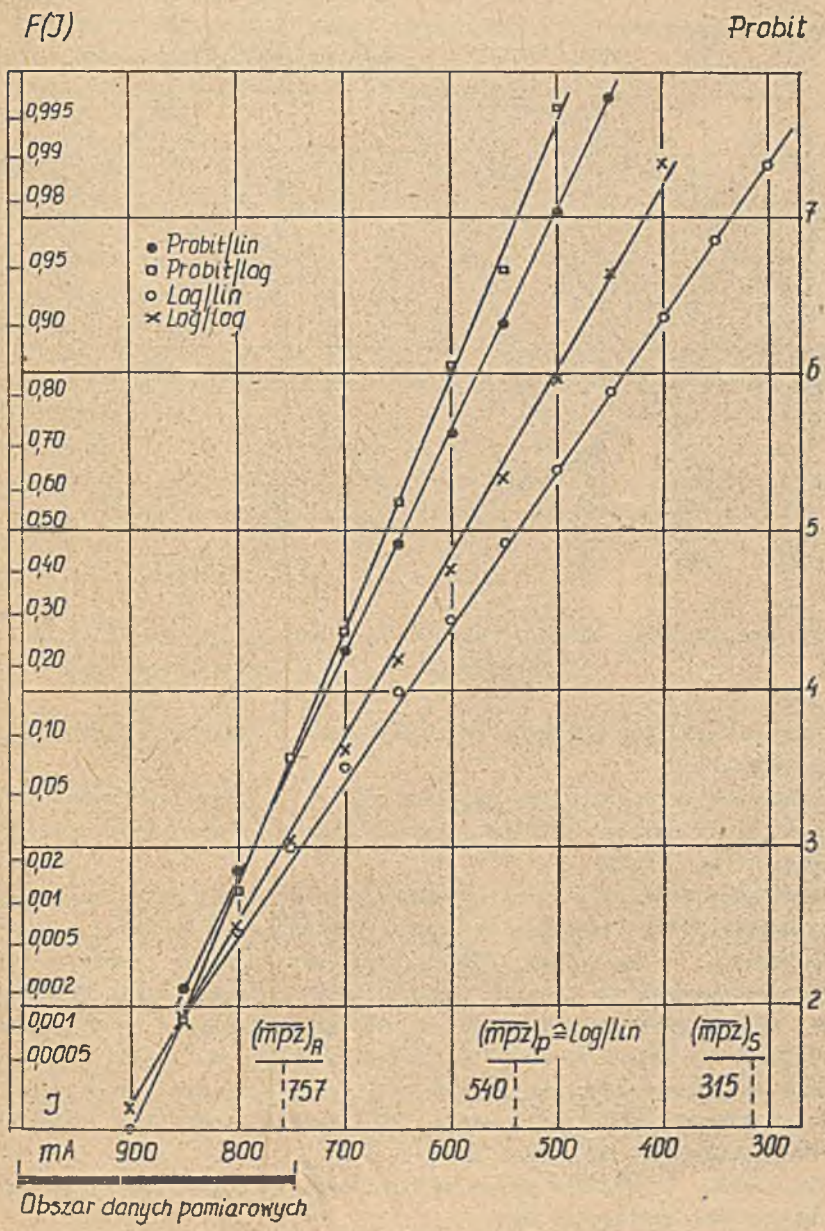
Przekształcenie lin oznacza, że wartości prądu pozostają w skali liniowej. Przekształcenie "probit" oznacza, że zmienna Y po przekształceniu : Y = probit p pozostaje w skali liniowej w siatce "laplaso-regularnej". Przekształcenie dane jest zależnością (4.2a).

Postępując zgodnie z definicją Allsopa i wykorzystując krzywe wzorcowe dla przekształcenia log p/lin I, wyznaczono wartości $(\overline{mpz})_P$. Zestawienie wyników zawiera tabl. 2.3. Przykładowe wyznaczenie $(\overline{mpz})_P$ dla obwodu rezystancyjnego przy mocowaniu elektrod wolframowych metodą SMRE (patrz Dodatek 2) przedstawiono na rys. 3, gdzie posłużono się siatką laplaso-regularną. Natomiast na rys. 4 przedstawiono zależność (2.10) w funkcji różnych obwodów i mocowań elektrod.

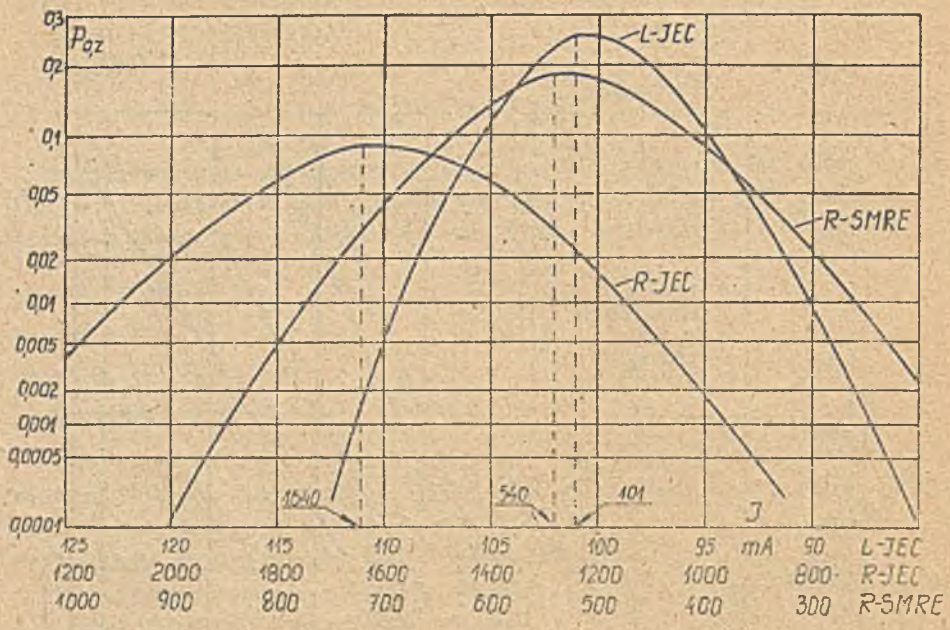
Tablica 2.3

Porównanie wartości mpz uzyskanych wg różnych definicji. $(mpz)_P$ obliczono dla przekształcenia log p/lin I z danych $\sum m/\sum n$ [21]

Obwód praz ustawienie elektrod wolframowych	$(\overline{mpz})_A$ [mA]	$(\overline{mpz})_S$ [mA]	$(\overline{mpz})_P$ [mA]	Wartości - górna dla przedziału [mA]	dolna i $(mpz)_P$ dla $\pm$ 2 x D(mpz) [mA]
Obwód R Elektroda pochyła wg SMRE	757	315	540	340	740
Obwód R Elektroda prosta wg IEC	1503	776	1640	1200	2080
Obdów L Elekroda prosta wg IEC	96,6	97,4	101	94	109



Rys. 3. Wyznaczanie $(\overline{mpz})_p$ dla obwodu rezystancyjnego prądu stałego przy napięciu źródła U = 24 V. Mocowanie elektrod wolframowych metodą SMRE



Rys. 4. Przykłady rozkładów prawdopodobieństwa $P_{o,z}$ dla różnych obwodów i sposobów mocowań elektrod wolframowych

Z przedstawionych wyników oraz uzupełnień w Dodatku 3 wyciągamy następujące wnioski:

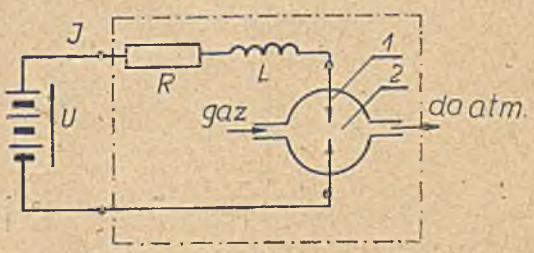
1. W obwodzie rezystancyjnym uzyskuje się wg definicji statystycznej wartości mpz o ok. 50% mniejsze, natomiast dla obwodu indukcyjnego wartości te są zbieżne.
2. Największe trudności sprawia wyznaczenie $\overline{mpz}$ przy ustawianiu elektrod wg metody SMRE. Ilustrują to wyniki przedstawione na rys. 3.
3. Dla obwodu R wg metody SMRE z tych samych danych pomiarowych wyjściowych uzyskujemy znaczne rozbieżności w przewidywaniu $(\overline{mpz})_P$ zależnie od przyjętego przekształcenia zmiennych. Decyzja o wyborze przekształcenia jest możliwa po dokonaniu analizy wariancji, obliczeniu r_{XY} mającego sens współczynnika korelacji oraz obliczeniu wariancji $D^2(b_1)$. Autor dokonał takich obliczeń w [21]. Najkorzystniejsze okazuje się przekształcenie log p/lin I.
4. Dla obwodu L wynik w małym stopniu zależy od przyjętego przekształcenia czy też definicji mpz.
5. Ogólnie dla obwodu R uzyskuje się $(\overline{mpz})_S$ prawie dwukrotnie mniejsze od wartości $(\overline{mpz})_A$. Wynik ten jest jednak niepewny, gdyż uzyskuje się

go z ekstrapolacji. Na rys. 3 zaznaczono obszar, w którym udaje się uzyskać wyniki pomiarowe p = f(I).

6. Za miarodajne należy przyjmować te wyniki, które uzyskiwane są w obszarze potwierdzalnym doświadczalnie.

3. ISKIERNIK ANALIZOWANY JAKO PRZYRZĄD POMIAROWY

Iskiernik wraz z badanym obwodem można traktować jako przyrząd specjalistyczny, który pozwala na ustalenie dopuszczalnych parametrów obwodu elektrycznego, ocenianych w kategoriach iskrobezpieczeństwa. Wielkością wyznaczoną może być napięcie źródła zasilania U, prąd obwodu I, rezystancja ograniczająca R, indukcyjność L lub pojemność C. Którą z wielkości wyznaczamy z użyciem iskiernika, zależne jest od sposobu ustalania dopuszczalnych parametrów obwodu oraz charakteru obwodu (rys. 5).



Rys. 5. Uproszczony schemat iskiernika z badanym obwodem:
1 - elektrody, 2 - komora

Podczas atestacji najistotniejsze jest wyznaczenie mpz. Z tego też względu, w tym szczególnym zastosowaniu, należy iskiernik wraz z badanym obwodem uważać za przyrząd do pomiaru prądu. Tym problemem autor zajmował się w pracy [21] i podał sposób wyznaczania własności metrologicznych iskiernika. Wzorcowanie takiego przyrządu polega na wyznaczaniu odpowiedniości ciągłej prawdopodobieństwa p od prądu I przy ustalonych pozostałych parametrach obwodu.

Pomiarami związanymi z wyznaczeniem krzywej wzorcowej autor zajmował się w pracy [21] i zostały one także omówione w pracach [24, 25].

Do wyznaczenia krzywej wzorcowej posłużono się teorią liniowych funkcji regresji drugiego rodzaju, która pozwoliła na ustalenie współzależności statystycznej pomiędzy p oraz I bez znajomości dwuwymiarowego rozkładu (p, I).

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:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon, \tag{3.1}$$

gdzie:

β_0, β_1 - parametry modelu,

ε - przyrost powodujący rozrzut poszczególnych Y poza linię regresji.

Estymowane równanie regresji ma postać:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 \cdot X, \tag{3.2}$$

gdzie:

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

b_0, b_1 - estymatory parametrów β_0 i β_1.

Przy estymacji dokonano następujących założeń:

1. Dla każdej wartości X, które są znanymi parametrami a nie zmiennymi losowymi, zmienna Y ma rozkład normalny:

$$\mathcal{N}\ (\beta_0 + \beta_1 X, \sigma). \tag{3.3}$$

2. Wyniki obserwacji p^* obarczone są błędami, które są reprezentowane przez odchylenie standardowe:

$$D(p_i^*)_N = \sqrt{\frac{p_i^* (1 - p_i^*)}{N_i}}, \tag{3.4}$$

gdzie:

N_i - ilość wywołanych iskrzeń w pojedynczym doświadczeniu.

3. Z uwagi na przyjęte przekształcenie $Y = \log p$ korzysta się z twierdzenia o rozkładzie logarytmiczno-normalnym, zgodnie z którym zmienna losowa p posiada rozkład logarytmiczno-normalny, gdy zmienna losowa $Y = \log p$ posiada rozkład normalny:

$$\lambda\ (\beta_0 + \beta_1 X, \sigma). \tag{3.5}$$

Uwzględniając wymienione założenia, w [21] określono b_0, b_1 oraz odpowiednie przedziały ufności. W szczególności podczas atestacji, gdy dokonamy pojedynczej obserwacji p_i^* i odpowiadającej jej wartości Y_i^*, co oznacza, że dokonujemy sprawdzenia iskrobezpieczeństwa jedną serią iskier o liczbie N_i, z nierówności Czebyszewa mamy [23]:

$$P\left(\left|\frac{p_i - p}{D_0(p_i)}\right| < k_D\right) \geqslant 1 - \frac{1}{k_D^2}, \tag{3.6}$$

gdzie:

$D_0^2(p_i) = D^2(p_i) + D^2(p_i^*)_N$ - wariancja, której sposób wyznaczania autor podał w [21].

Gdy atestacja będzie dokonywana w ciągu pewnego okresu czasu i weźmiemy pod uwagę wynik średni z poszczególnych wartości p_i^*, to wówczas należy

wykorzystać do budowy przedziału ufności $D^2(\hat{Y})$ zamiast $D^2(Y_i)$. Wartość prawej strony zależy od przyjętej wartości dla k_D. Na przykład dla $1 - 1/k_D^2 = 0,95$, $k_D = 4,47$, co oznacza, że z poziomem ufności $1 - \alpha \geqslant 0,95$ wartość rzeczywista parametru p mieści się w przedziale, którego połowa jest 4,47 -krotnością odchylenia standardowego.

W podsumowaniu zarysu wyznaczania krzywej wzorcowej dla iskiernika stwierdzamy:

1. Posiadamy krzywą wzorcową daną równaniem (3.2), dla której potrafimy wyznaczyć przedział ufności.
2. Przy wyznaczaniu krzywej wzorcowej oszacowaliśmy wartość parametru b_1 i jego przedział ufności, które odnoszą się do wykładnika "a" z równania (2.1).
3. W przypadku znacznej wartości błędów popełnianych przy wyznaczaniu p_i, w porównaniu z błędami szacunku modelu dla krzywej wzorcowej, dysponujemy zależnością (3.6), która pozwala na uwzględnienie tych błędów.
4. Wyznaczona krzywa wzorcowa obowiązuje tylko dla zakresu prądów, dla których została wyznaczona.

4. PROCEDURY KONTROLI CZUŁOŚCI I PROCEDURY ATESTACYJNE

4.1. Procedury

Przy atestacji, zależnie od stopnia czy kategorii urządzenia [N2, N3], postępuje się stosownie do obowiązującej procedury atestacyjnej. Badanie w warunkach normalnych bądź awaryjnych wymaga odpowiedniego powiększania prądów lub napięć obwodów zgodnie z przyjętym systemem współczynników bezpieczeństwa. Następnie wymaga się, aby przy użyciu iskiernika spełnić warunek dotyczący dopuszczalnej częstości wybuchów. Użyty iskiernik musi być przedtem sprawdzony, czy posiada odpowiednią czułość.

Autor w pracach [21, 24, 25] zestawił stosowane procedury kontroli czułości oraz procedury atestacyjne. Dokonał także ich porównania. W tabl. 4.1 przytoczone są przykładowo powszechnie stosowane procedury.

Porównanie różnych procedur kontroli czułości i atestacyjnych jest możliwe jedynie w przypadku ściśle zdefiniowanych właściwości metrologicznych iskiernika oraz ich w ustaleniu. Porównanie jest najwłaściwsze, gdy wykorzystuje się jedną krzywą wzorcową i w odniesieniu do tego samego obwodu elektrycznego.

Na podstawie pomiarów i obliczeń dla obwodu kontrolnego indukcyjnego prądu stałego: U = 24 V, L = 95 mH otrzymano estymowaną linię regresji o postaci [21]:

$$\hat{Y} = -46{,}7 + 22{,}0\,X, \tag{4.1}$$

gdzie Y = log p, X = log I.

Ta krzywa wzorcowa posłuży nam do sprawdzenia procedur atestacyjnych, gdzie mamy do czynienia z małymi wartościami prawdopodobieństw. Natomiast dla porównania procedur kontroli czułości, gdy mamy do czynienia z prawdopodobieństwami bliskimi 1, zależność (4.1) nie oddaje sensu fizycznego zachodzących zjawisk w iskierniku, ponieważ dla $I \to \infty$, $p \to \infty$. Posłużymy się natomiast krzywą wzorcową o innym przekształceniu zmiennych, wyznaczoną dla tego samego obwodu [21]:

$$\hat{Y} = -5{,}5 + 0{,}075\,X, \tag{4.2}$$

Tablica 4.1

Przykłady procedur kontroli czułości i procedur atestacyjnych

Lp.	Kraj lub organizacja	Iskiernik	Mieszanina wybuchowa z powietrzem % obj.	Procedura kontroli czułości iskiernika					Procedura atestacyjna dla obwodu prądu stałego		
				Obwód kontrolny			Wymagana ilość iskier	Wymagana ilość wybuchów	Wymagana ilość iskrzeń	Polaryzacja dysku	Dopuszczalna ilość wybuchów
				U [V]	L [mH]	I [mA]	n	m	n		m
1	Polska [N3]	IEC	8,3±0,3	24	95	160	-	$p^{*} \geq 10^{-2}$	≥16000	(-)	≤16
2	RWPG [N4]	IEC	8,3±0,3	24	95	110	1600	≥1	8000+8000	(+),(-)	≤16
3	CENELEC (EWG) [N2]	IEC	8,3±0,3	24	95	110	1600	≥1	800+800	(+),(-)	0
4	RFN [N5]	IEC	8,5±0,5	24	95	105	3000	≥1	1000+1000	(+),(-)	0

gdzie:

$$X = I,\ p = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Y-5} \exp\left(-\frac{1}{2} y^2\right) dy. \qquad (4.2a)$$

W zależności (4.2) spełniony jest warunek: gdy $I \to \infty$, to $p \to 1$ i zależność jest linią prostą w siatce "laplaso-regularnej".

4.2. Porównanie procedur kontroli czułości

We wszystkich procedurach kontroli czułości wymaga się, aby dla zadanej wartości prądu obwodu I i liczby wywołanych iskier n występował przynajmniej jeden wybuch ($m \geqslant 1$). W polskiej procedurze nie zakłada się wymaganej liczby iskier, więc przyjmujemy $n = 100$, jak to miało miejsce w projekcie Polskiej Normy. Obecnie wymaga się jedynie, aby w warunkach kontroli czułości było spełnione: $p^* \geqslant 10^{-2}$.

Obliczamy prawdopodobieństwo zapalenia dla poszczególnych wartości prądu wg krzywej wzorcowej (4.1) i sprawdzamy, jakie jest prawdopodobieństwo spełnienia warunku P ($m \geqslant 1$), które obliczamy w oparciu o rozkład dwumianowy, obowiązujący w tym przypadku:

$$P(m \geqslant 1) = \sum_{m=1}^{n} \binom{n}{m} \cdot \hat{p}^m \cdot (1-\hat{p})^{n-m} = 1 - P(0), \qquad (4.3)$$

gdzie:

a) $\hat{p}$ wyliczamy dla zadanej wartości I po wykorzystaniu przekształcenia (4.2a), a ściślej - spotykanego w postaci tablic przekształcenia odwrotnego;

b) $P(0) = P(m=0) = (1 - \hat{p})^n$. (4.3a)

Z zestawienia wyników $1 - P(0)$ w tablicy 4.2 wnioskujemy, że każda z procedur kontroli czułości da wynik pozytywny i trudno je porównać. Ma to jednak miejsce, gdy zawsze obowiązuje model $\hat{Y}$. W rzeczywistości możemy się spodziewać zmian czułości iskiernika nawet z dnia na dzień. Te zmiany są ujęte przy wyznaczaniu krzywej (4.2a), zaś obszar zmian jest określony przedziałem ufności. Sprawdzamy zatem procedury dla prawdopodobieństwa p: 0,1; 0,01; 0,001; 0,0001. Widzimy z tabl. 4.2, że procedura 1 jest najodpowiedniejsza, gdyż umożliwia zaobserwowanie zmian czułości iskiernika. Najnieodpowiedniejsza jest procedura 4.

Tablica 4.2

Porównanie procedur kontroli czułości i procedur atestacyjnych z tabl. 4.1 dla obwodu kontrolnego prądu stałego: U = 24 V, L = 95 mH; gaz probierczy: CH_4 + powietrze

Lp.	Kontrola czułości dla $\hat{p}$ wg krzywej wzorcowej				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	160	100	0,94	1	1	0,63	0,095	0,01	$P(m \leqslant 16) \approx 0,5$
2	110	1600	0,014	1	1	1	0,8	0,148	$P(m \leqslant 16) \approx 0,5$
3	110	1600	0,014	1	1	1	0,8	0,148	$P(m = 0) \approx 0,5$
4	105	3000	0,005	1	1	1	0,95	0,259	$P(m = 0) \approx 0,4$

4.3. Porównanie procedur atestacyjnych

Procedura atestacyjna ma za zadanie stwierdzenie, czy w warunkach przewidzianych procedurą prąd nie przekracza mpz (lub napięcie nie przekracza mnz dla obwodów pojemnościowych).

Dla obwodu indukcyjnego jak w pkt. 4.2 wyznaczono wartość mpz zgodnie ze statystyczną definicją (patrz punkt 2). Wartość ta dla p = 0,001 wynosi: $\overline{mpz}$ = 97 mA. Dla tej wartości z modelu (4.1) uzyskujemy p = 0,000913, co jest oczywiste, gdyż model wyznaczono w oparciu o dane statystyczne uzyskane dla tego obwodu. Zakładamy zatem, że w obwodzie płynie prąd równy mpz i obliczamy, jakie są prawdopodobieństwa spełnienia warunków atestacji. Wyniki obliczeń zestawiono w tablicy 4.2. Dla procedury 1 i 2 korzystamy z twierdzenia granicznego Moivrea-Laplacea, zgodnie z którym dla wzoru 2.4, gdy $n \to \infty$, estymator p dąży do rozkładu asymtotycznie normalnego $\mathcal{N}(p, \sqrt{p(1-p)/n})$. Z rozkładu normalnego mamy więc:

$$P(m \leq 16) = P(\hat{p} = 0{,}001) = 0{,}5.$$

Natomiast dla pozostałych procedur obliczamy P(m = 0) z zależności (4.3a).

Na podstawie uzyskanych wyników obliczeń stwierdzamy, że różne procedury atestacyjne dają prawie taką samą odpowiedź podczas atestacji w prostym obwodzie indukcyjnym. Jest to zarazem dowód na to, że podczas atestacji nie odgrywa roli definicja mpz.

Teoretycznie winniśmy się spodziewać podobnych wyników dla obwodu rezystancyjnego. W tym przypadku jednak definicja mpz odgrywa znaczniejszą rolę (patrz punkt 2). Obserwuje się iskry nie tylko przy przerwach lub w momencie zwarć, lecz także podczas przesuwania się elektrod wolframowych po powierzchni dysku kadmowego. Uwagi na ten temat poczynione są w Dodatku 3. Zastawienie wyznaczanych mpz dla obwodu rezystancyjnego zawarte jest w [21] i powtórzeone w [25]. Dyskusję wyników przeprowadzono w punkcie 2 niniejszej pracy.

5. DOPUSZCZALNE PRĄDY BEZPIECZNE

Dopuszczalne prądy bezpieczne dla obwodów kontrolnych autor zestawił w pracach [20, 21, 22]. Powtórzono je w najistotniejszym fragmencie w tabl. 5.1 z uwzględnieniem danych z punktu 2, dotyczących różnych sposobów wyznaczania mpz. Przy wyznaczaniu dopuszczalnych prądów bezpiecznych wzięto pod uwagę:

- definicję statystyczną mpz,
- definicję Allsopa mpz,
- współczynniki bezpieczeństwa (wg tabl. 2.1).

Dla poszczególnych stopni zawsze wartości prądów dopuszczalnych są mniejsze od prądów dla odpowiednich kategorii - i to znacznie. Ponieważ nie ma formalnych przeszkód w stosowaniu iskiernika IEC z elektrodami mocowanymi wg metody SMRE (patrz Dodatek 2), można przewidzieć w obwodzie rezystancyjnym różnice w wynikach, jak podkreślono w tabl. 5.1. W skrajnych przypadkach prądy dopuszczalne mają się do siebie jak 1:13.

Powróćmy jeszcze do zagadnienia współczynników bezpieczeństwa. Stanowią one problem, który wymaga zgłębienia i lepszego udokumentowania. Na współczynniki bezpieczeństwa należałoby patrzeć podobnie, jak to się robi ze współczynnikami bezpieczeństwa w wytrzymałości materiałów. 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 $p = 10^{-8}$. Poprawne będzie więc stwierdzenie, że wartości zestawione w tabl. 5.1 gwarantują, iż 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 tę krzywą.

Między innymi, z przedstawionego wyżej powodu, w punkcie 6 proponuje się inne spojrzenie na zagadnienie określania dopuszczalnych prądów bezpiecznych z uwzględnieniem realnych warunków eksploatacji urządzeń iskrobezpiecznych.

Tablica 5.1

Dopuszczalne prądy bezpieczne dla obwodu rezystancyjnego prądu stałego 24 V, gaz probierczy CH_4 + pow.
Wykorzystano jako wyjściowe mpz z tabl. 2.3 oraz współczynniki bezpieczeństwa z tabl. 2.1

Obwód oraz ustawienie elektrod wolframowych	Dopuszczalne prądy bezpieczne [mA]				Warunki
	Stopnie		Kategorie		
	K I	K II	ib	ia	
Obwód R Elektroda pochyła wg SMRE	115	115	459	459	normalne
	-	-	688	459	awaryjne z 1 uszkodz.
	175	105	-	688	awaryjna z 2 uszk.x)
Obwód R Elektroda prosta wg IEC	282	282	911	911	normalna
	-	-	1366	911	awaryjne z 1 uszkodz.
	431	259	-	1366	awaryjne z 2 uszk.x)

x) Dla K II z dowolną ilością uszkodzeń

6. ZAGROŻENIE WYBUCHOWE W WARUNKACH EKSPLOATACJI URZĄDZEŃ ISKROBEZPIECZNYCH

6.1. Model zagrożenia wybuchowego

Autor w pracach [21, 22], zwrócił uwagę iż warunki przemysłowe eksploatacji stwarzają mniej niebezpieczną sytuację niż symulowane podczas atestacji. Wynika to z następujących powodów:

1. Przeważnie stężenie gazu wybuchowego w warunkach przemysłowych nie jest tym najniebezpieczniejszym, jakie występuje podczas atestacji.
2. Gaz wybuchowy w warunkach przemysłowych może występować sporadycznie, a nie w sposób ciągły jak w komorze iskiernika.
3. Iskrzenie pojawia się zasadniczo w sposób przypadkowy, a nie stale i jest ono związane z niezawodnością urządzenia.
4. Elementy przewodzące urządzenia nie są tak "sprawne" energetycznie jak zestaw elektrod standardowych iskiernika znormalizowanego.
5. Energia wydzielana w obszarze iskrzenia uzależniona jest od konfiguracji obwodu elektrycznego, jego stanu energetycznego oraz sprawności elektrod.

Zwiększenie zagrożenia związane jest natomiast z faktem lokalizowania wielu urządzeń iskrobezpiecznych równocześnie, czego nie symuluje się przy atestacji.

Biorąc pod uwagę: liczbę urządzeń n, intensywność uszkodzeń urządzeń, którym towarzyszy iskrzenie $\lambda_{1,2,\ldots,n}$, prawdopodobieństwa zapalenia gazu od poszczególnych urządzeń $p_{1,2,\ldots n}$, prawdopodobieństwo wystąpienia stężenia wybuchowego w (współczynnik zdatności wybuchowej) autor przedstawił ogólny model zagrożenia wybuchowego od urządzeń iskrobezpiecznych [21, 22]. Miarą zagrożenia wybuchowego w prezentowanym modelu jest średni czas pomiędzy wybuchami, dany zależnością:

$$T_{wo} = \frac{1}{\lambda_o}, \tag{6.1}$$

gdzie:

$\lambda_o = \sum_i p_{zi} \cdot \lambda_i$ – ogólna intensywność wybuchów;

$p_{zi} = p_i \cdot w$ – prawdopodobieństwo zapalenia w pojedynczym iskrzeniu dla i-tego urządzenia;

p_i - prawdopodobieństwo całkowite zdolności wydzielania się w dowolnej chwili czasu t energii wystarczającej do zapalenia mieszaniny wybuchowej dla i-tego urządzenia;

w - prawdopodobieństwo wystąpienia stężenia wybuchowego;

λ_i - intensywność uszkodzeń, którym towarzyszy iskrzenie.

W szczególnym przypadku, gdy:

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

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \ldots = \lambda_i = \lambda = \frac{1}{\overline{T_U}},$$

otrzymujemy:

$$\overline{T_{wo}} = \frac{\overline{T_u}}{n \cdot w \cdot p}. \tag{6.2}$$

Postawmy racjonalne wymagania w stosunku do aparatury iskrobezpiecznej w oparciu o istniejący stan bezpieczeństwa w danej gałęzi przemysłowej. Załóżmy więc, że na podstawie zebranych danych statystycznych w danej gałęzi przemysłowej został określony średni czas pomiędzy wybuchami (pożarami) $\overline{T_{wp}}$, powodowany innymi przyczynami niż w wyniku stosowania aparatury iskrobezpiecznej. Wówczas średni czas pomiędzy wybuchami, określony dla aparatury iskrobezpiecznej z zależności (6.1) lub (6.2), powinien być większy od wartości $\overline{T_{wp}}$, co zapisujemy:

$$\overline{T_{wp}} \cdot k_T = \overline{T_{wd}} \leq \overline{T_{wo}}, \tag{6.3}$$

gdzie $k_T > 1$ (np. 100) - współczynnik bezpieczeństwa dla dopuszczalnego średniego czasu pomiędzy wybuchami $\overline{T_{wd}}$.

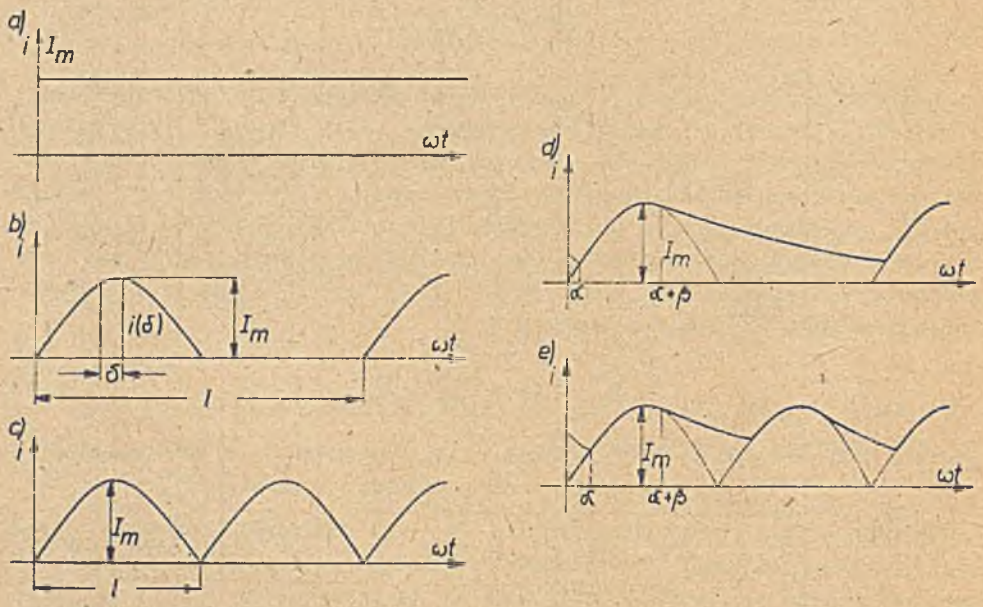
We wzorze (6.2) prawdopodobieństwo p jest prawdopodobieństwem ustalonym podczas atestacji z uwzględnieniem definicji mpz, krzywej wzorcowej iskiernika oraz przyjętych współczynników bezpieczeństwa. Ponieważ dotychczas w pracy omówiono zagadnienia związane z obwodem prądu stałego, należy uzupełnić je zależnością prawdopodobieństwa zapalenia od kształtu prądu.

Autor na podstawie literatury przedstawił charakterystyki iskrobezpieczeństwa w Dodatku 4 dla prądów przemiennych o różnej częstotliwości. Własne dociekania na temat wpływu kształtu pradu na prawdopodobieństwo zapalenia autor prezentował w pracach [13, 18, 19], sugerując wprowadzenie tzw. czynnika kształtu.

Dla przebiegów niesinusoidalnych, co zachodzi np. dla przemienników prądu przemiennego na stały, spodziewamy się, że winien odgrywać rolę kształt prądu. Prawdopodobieństwo zapalenia będzie inne dla prądu sinusoidalnego wyprostowanego o wartości maksymalnej I_m niż dla prądu stałego

o tej samej wartości. Zakres przeprowadzonej przez autora analizy precyzują następujące przyjęte założenia:

1) rozpatruje się zależności prawdopodobieństwa zapalenia od kształtów prądów przedstawionych na rys. 6;
2) ocenę iskrobezpieczeństwa przeprowadza się wg zasad statystycznej metody oceny iskrobezpieczeństwa;
3) dla ułatwienia rozważań przyjmuje się, że napięcie zasilające ma wartość stałą;
4) obciążenie ma charakter rezystancyjno-indukcyjnościowy o małej wartości indukcyjności.



Rys. 6. Przebiegi prądów w przemiennikach:
a) ωRC duże, b) prostowanie jednopołówkowe bez wygładzania, c) prostowanie dwupołówkowe bez wygładzania, d) i e) jak b) i c) lecz z wygładzaniem

Z przeprowadzonej analizy otrzymujemy zależność na prawdopodobieństwo zapalenia dla prostowania jednopołówkowego (rys.6b):

$$p = \frac{p_{zo}}{\pi} \prod_{k=1}^{\frac{a-1}{2}} \frac{a - (2k - 1)}{a - 2(k - 1)}, \qquad (6.4)$$

gdzie:

p_{zo} - prawdopodobieństwo zapalenia dla maksymalnej wartości prądu I_m;
a - wykładnik w zależności (2.1) (całkowite, dodatnie, nieparzyste, np. a = 13).

Dla prostowania dwupołówkowego (rys. 6c) zależność (6.4) należy pomnożyć przez 2.

Interesuje nas, jaka będzie dopuszczalna maksymalna wartość amplitudy prądu, gdyby prawdopodobieństwo p było równe 10^{-3}. Określamy ją korzystając z zależności (2.1) oraz (6.4). Otrzymujemy ostatecznie:

$$\left[(I_m)_{p=10^{-3}}\right] = 1{,}2 \cdot \left[(I_m)_{p_{I_m}=10^{-3}}\right] \quad \text{dla przebiegu b),}$$

$$\left[(I_m)_{p=10^{-3}}\right] = 1{,}1 \cdot \left[(I_m)_{p_{I_m}=10^{-3}}\right] \quad \text{dla przebiegu c).}$$

Powyższe wskazuje, że możemy dopuścić prawdopodobieństwo zapalenia dla wartości maksymalnej ponad $p = 10^{-3}$ lub inaczej - możemy w przypadku b) dopuścić amplitudę prądu o 20% większą w stosunku do tej, jaką dopuścilibyśmy przyjmując, że wartości prądu i napięcia, odczytane z charakterystyki iskrobezpieczeństwa dla prądu stałego, odpowiadają wartościom amplitud I_m, U_m. W rzeczywistości zwiększenie amplitudy prądu może być większe, gdyż napięcie także ulega zmianie i nie wynosi, jak założono $u(t) = U_m =$ const.

Zależności na prawdopodobieństwo zapalenia dla przemienników o wyjściu pojemnościowym (przebiegi d i e z rys. 6) są bardziej skomplikowane. Autor podał je w [13, 18].

Ogólnie, dla wszystkich przypadków z rys. 6 zależności na prawdopodobieństwo zapalenia od kształtu przebiegu prądu można zastąpić zależnością:

$$p = K \cdot p_{zo} \tag{6.5}$$

K można nazwać <u>czynnikiem kształtu</u>, gdyż jego wartość zależna jest od kształtu przebiegu prądu. Przy wyznaczaniu średniego czasu pomiędzy wybuchami z zależności (6.2) należy w p uwzględniać czynnik kształtu.

Dla przypadku przemiennika z prostowaniem jednopołówkowym K zmienia się w granicach od ~ 0,1 do 1, zaś z prostowaniem dwupołówkowym od ~ 0,2 do 1, zależnie od wartości ωRC.

6.2. Dopuszczalne prądy bezpieczne z uwzględnieniem warunków eksploatacji

W tabl. 5.1 zestawione są dopuszczalne prądy w oparciu o stosowane procedury. Pod tym samym kątem widzenia wyciągnijmy wnioski wynikające z zależności (6.3).

1. Bezpośrednio nasuwa się możliwość określenia granicznej dopuszczalnej liczby urządzeń iskrobezpiecznych n_{gr}, które można zlokalizować w przestrzeni wybuchowej. Dla realnych warunków cytowanych przez autora w pracy [22], gdy przewiduje się $\overline{T_{wd}}$ = 250 lat, n_{gr} wynoszą:

p =	10^{-2}	10^{-3}	10^{-6}	10^{-8}
n_{gr} =	20	200	2.10^5	2.10^7

przyjęto k_T = 100

Z przytoczonych danych widzimy, że praktycznie nie zajdzie potrzeba stosowania tak dużej liczby urządzeń w jednym zakładzie traktowanym jako obiekt o wspólnym zagrożeniu.
Przy tym wiemy, iż dla wartości granicznych zagrożenie jest 100 razy mniejsze od zagrożenia stwarzanego przez urządzenia inne niż iskrobezpieczne.

2. W oparciu o ostatnie stwierdzenie formułujemy drugi wniosek, który dotyczy już bezpośrednio dopuszczalnych prądów bezpiecznych:
Z zależności (6.2) oraz (6.3) widzimy, że aby spełnić warunek iskrobezpieczeństwa przy stałych $\overline{T_u}$ oraz w trzeba spełnić warunek:

$$n \cdot p = const, \tag{6.6}$$

co oznacza, że decydując się na $n < n_{gr}$ możemy dopuścić większe p, a tym samym większą wartość dopuszczalnego prądu bezpiecznego. Jest to równoznaczne z przyjęciem w sposób uzasadniony mniejszego współczynnika bezpieczeństwa przy atestacji. Wykorzystując zależność (2.1) oraz (2.3) w (6.3), otrzymujemy zależność na dopuszczalną krotność powiększania prądu przy przyjęciu $n < n_{gr}$:

$$k_I = \sqrt[a]{\frac{n_{gr}}{n}} \tag{6.7}$$

Dla przypadku: $\overline{T_{wd}}$ = 250 lat i k_T = 100 otrzymujemy z zależności (6.7):

$\frac{n_{gr}}{n}$	1	10^1	10^2	10^3	10^4	10^5
k_I	1	1,19	1,43	1,70	2,03	2,42

Jak widać, w skrajnym przypadku dopuszczalny prąd mógłby być na poziomie mpz (k_I = 2.42).

7. PODSUMOWANIE

W prezentowanej pracy przedstawiono metody analizy dopuszczalnych prądów bezpiecznych z uwzględnieniem różnych definicji minimalnych prądów zapalających oraz różnych systemów współczynników bezpieczeństwa.

Wykazano, że najodpowiedniejszym sposobem porównania minimalnych prądów zapalających, ustalonych stosowanie do różnych definicji, jest stworzenie modelu regresyjnego dla iskiernika. Iskiernik analizowano jako przyrząd specjalistyczny pozwalający mierzyć mpz jako funkcję parametrów obwodu elektrycznego.

Wykorzystano krzywą wzorcową do porównania procedur kontroli czułości iskiernika oraz procedur atestacyjnych. Wykazano w ten sposób ich wpływ na uzyskane wyniki podczas atestacji.

Przedstawiono potrzebę rozwijania oceny dopuszczalnych prądów bezpiecznych w oparciu o realne warunki eksploatacji urządzeń iskrobezpiecznych. W tym celu stworzono model zagrożenia wybuchowego, który uwzględnia niezawodność urządzeń, częstość pojawiania się gazu wybuchowego oraz liczby urządzeń iskrobezpiecznych zlokalizowanych w tym samym obszarze. W wyniku analizy pokazano możliwość oszacowania minimalnego dopuszczalnego średniego czasu pomiędzy wybuchami. Na podstawie tego oszacowania wykazano możliwość zwiększenia dopuszczalnych prądów bezpiecznych.

Dotychczasowa luka w podejściu metrologicznym do zagadnień iskrobezpieczeństwa jest wypełniona w znacznej mierze pracami autora obejmującymi obszary najistotniejsze dla tej dziedziny. Wyniki niniejszej pracy potwierdzają sugestie autora o słuszności oparcia analizy dopuszczalnych prądów bezpiecznych na analizie metrologicznej iskiernika.

Prezentowane w pracy metody autor poparł własnym materiałem doświadczalnym uzupełnionym materiałem doświadczalnym z literatury. Dla lepszego udokumentowania różnic w definicjach minimalnych prądów zapalających, współczynnikach bezpieczeństwa, procedurach kontroli czułości i atestacyjnych autor oprócz pomiarów wykonanych w kraju wykonał pomiary w The Safety in Mines Research Establishment w Sheffield.

Dodatek 1

ZAPALENIE MIESZANIN WYBUCHOWYCH GAZÓW I PAR ISKRAMI ELEKTRYCZNYMI

Mieszaniną wybuchową nazywana jest mieszanina gazu palnego lub par cieczy łatwo zapalnej (także kilku gazów lub par) z powietrzem, tlenem lub innymi gazami utleniaczami, która pod wpływem czynnika inicjującego jej zapłon, jak: iskra, łuk elektryczny, podwyższona temperatura do temperatury samozapalenia - wybucha, tzn. gwałtownie się spala, czemu towarzyszy wzrost ciśnienia.

W odniesieniu do mechanizmu wybuchu stworzono teorie:

1) teoria łańcuchowa wybuchu,
2) teoria cieplna wybuchu.

Obie teorie są omówione przy okazji omawiania zagadnień konstruowania aparatury przeciwwybuchowej [31]. Nieco szczegółowiej omawia je Lewis H. [35], uwzględniając specyfikę aparatury iskrobezpiecznej. W polskiej literaturze z zakresu aparatury przeciwwybuchowej krótki zarys tych teorii podaje Gliński [D4] i Świerżewski [D10]. Autor także podał najistotniejsze wnioski dotyczące zapalania mieszanin wybuchowych w pracach [11, 13, 19]. Wszystkie wymienione opracowania są ilustrowane wynikami doświadczalnymi, które zasadniczo są wynikami doświadczeń Lewisa i Von Elbe [33]. Doskonalenie aparatury do badań powoduje jednak, że spotyka się w literaturze coraz bardziej uściślane wartości, np. w odniesieniu do minimalnych energii zapalających. Widać to przy porównaniu danych cytowanych przez Lewisa H. [35], Krawczenkę [31] i Barreto [2].

Oddzielne zagadnienie stanowi technika pomiarowa wykorzystywana do ustalenia wielu własności mieszanin wybuchowych. Wyniki tych pomiarów pozwalają na klasyfikowanie mieszanin wybuchowych. Z prac prowadzonych w Polsce należy wymienić prace Pilca [D8]. Dla potrzeb niniejszej pracy omawia się dalej jedynie najistotniejsze pojęcia, których nie można pominąć mówiąc o technice iskrobezpieczeństwa.

Dolna i górna granica wybuchowości są podstawowymi wielkościami charakteryzującymi gazy i pary palne. Dolna granica wybuchowości oznacza najmniejszą ilość substancji palnej w powietrzu, tlenie lub w innym utleniaczu, przy której mieszanina może być zapalna. Granicę tę określa się doświadczalnie lub obliczeniowo. Obie granice ulegają przesunięciu przy zmianie ciśnienia i temperatury, przy czym

granica górna jest mniej stabilna. W literaturze podaje się granice wybuchowości w stosunku objętościowym lub wagowym do powietrza o temperaturze 20°C i przy ciśnieniu 760 mm Hg.

T e m p e r a t u r a s a m o z a p a l e n i a jest to najniższa temperatura, pod wpływem której mieszanina wybuchowa o składzie najbardziej skłonnym do wybuchu zapala się samoczynnie. Temperaturę tę określa się według zdefiniowanej metody i zależy ona w znacznej mierze od ciśnienia mieszaniny i składu.

S t ę ż e n i e s t e c h i o m e t r y c z n e jest stężeniem składników palnych w mieszaninie, przy którym teoretycznie następuje całkowite spalanie bez nadmiaru lub niedomiaru tlenu. Dla charakteryzowania własności gazów i par palnych stanowi ono odniesienie dla innych ważnych stężeń, które są brane pod uwagę przy konstruowaniu lub badaniu aparatury przeciwwybuchowej. Z tego punktu widzenia ważne są:

a) dla przestrzeni otwartej - stężenia, przy których występuje maksymalna prędkość spalania oraz maksymalna prędkość przemieszczania się płomienia;
b) dla przestrzeni zamkniętej - stężenia, przy których występują maksymalne ciśnienia.

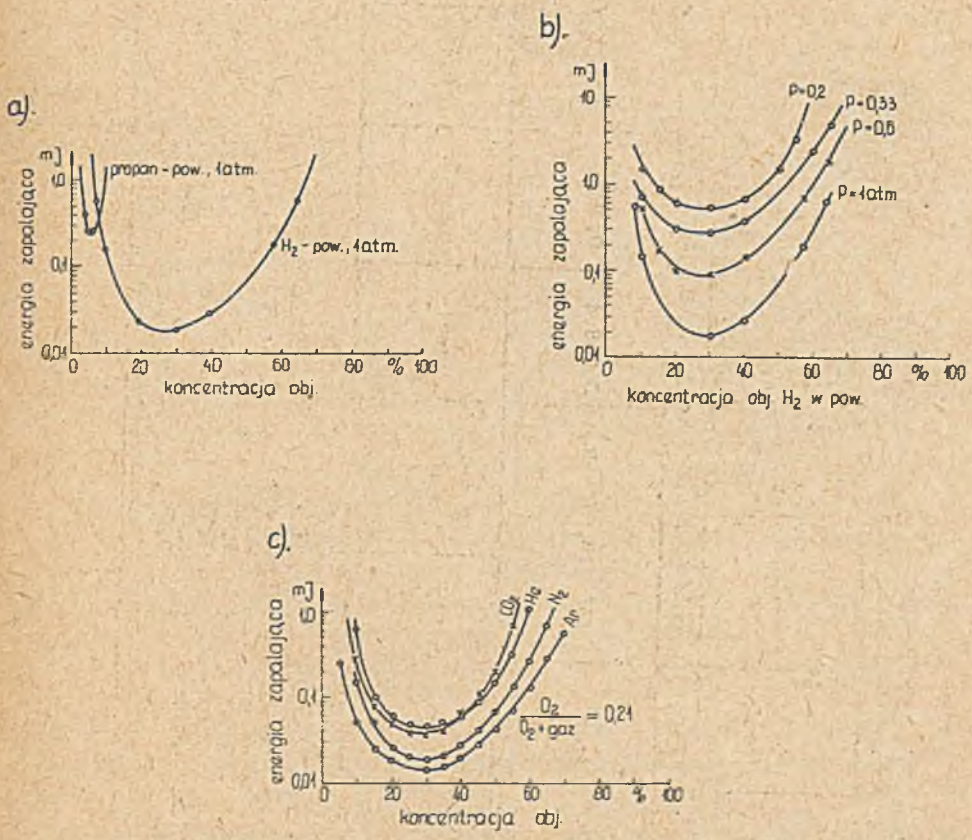
Stężenia, przy których występuje największa prędkość spalania, są zawsze nieco większe od stechiometrycznych. Natomiast największa prędkość przenoszenia się płomienia nie występuje przy tych samych stężeniach. Maksymalne ciśnienia występują przy innych stężeniach niż maksymalne prędkości płomienia, czy też maksymalne prędkości spalania.

Z a p a l e n i e i s k r a m i o m i n i m a l n e j e n e r g i i zachodzi dla stężenia składnika wybuchowego innego niż omówione poprzednio. Na rys. D-1 podane są zależności energii zapalającej od stężenia składnika palnego w powietrzu. Te właśnie koncentracje brane są pod uwagę przy badaniu na warunki iskrobezpieczne.

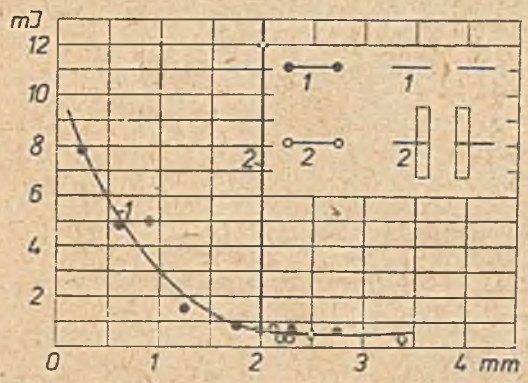
M i n i m a l n a e n e r g i a z a p a l a j ą c a. Z danych eksperymentalnych przedstawionych na rys. D-2 widać, że istnieją optymalne warunki, przy których energia potrzebna do zapalenia mieszaniny wybuchowej osiąga minimum. Nazwano ją minimalną energią zapalającą, przy czym minimum występuje przy tzw. odległości krytycznej elektrod, tj. gdy działanie gaszące elektrod jest minimalne.

Przykładowo w tabl. D-1 zestawiono omówione dotychczas wielkości charakteryzujące mieszaniny wybuchowe.

M i e s z a n i n y p r o b i e r c z e. Spotykane w praktyce przemysłowej mieszaniny wybuchowe składników palnych z powietrzem zostały przebadane pod kątem widzenia ich własności wybuchowych. Dla celów iskrobezpieczeństwa ustalono dodatkowo dla wielu z nich wartości minimalnych prądów zapalających (mpz) dla obwodu kontrolnego prądu stałego: U = 24 V,



Rys. D-1. Wpływ niektórych czynników na energię zapalającą [33]:
a) wpływ koncentracji składnika palnego w powietrzu, b) wpływ ciśnienia mieszaniny, c) wpływ rodzaju gazu inertnego



Rys. D-2. Minimalna energia zapalająca w zależności od odległości między elektrodami [33]. Stechiometryczna mieszanina gazu: 23% CH_4 + 17% C_2H_6 z powietrzem

1 - elektrody swobodne, 2 - elektrody z kołnierzami

Tablica D-1

Porównanie charakterystycznych stężeń oraz minimalnych energii zapalających

Gaz	Stężenie stechiometryczne	Dolna granica wybuchowości	Max prędkość spalania		Max szybkość płomienia		Stężenie, dla którego występuje max. ciśnienia	Stężenie, dla którego występuje min. energii iskry	Minimalna energia zapalająca (mez)	Odległość krytyczna (d)
			Stężenie	Prędkość	Stężenie	Prędkość				
	% obj	% obj	% obj	cm/s	% obj	cm/s	% obj	% obj	mJ	mm
Metan CH_4	9,5	5,3	10,5	37,0	10,7	155	8,5+1,5H_2	8,2-8,4	0,280	2,03
Wodór H_2	29,6	4,0	42,0	267,0	34,0	1610	33,0	19-21	0,018	0,61

Porównanie mez oraz d:

Gaz	mez [mJ]	d [mm]
Metan	0,280	2,03
Butan	0,260	1,78
Metanol	0,140	1,52
Wodór	0,018	0,61
Acetylen	0,011	0,60

L = 95 mH. W oparciu o wielkości mpz dokonano klasyfikacji gazów palnych (zasady klasyfikacji autor omówił w pracach [11, 13, 19]). Dla poszczególnych klas ustalono tzw. mieszaniny probiercze, które należy stosować jako reprezentatywne. Zestawienie mieszanin probierczych stosowanych w Polsce zawiera tabl. D-2.

Tablica D-2

Mieszaniny probiercze stosowane w Polsce

Klasa wybuchowości gazu	Mieszanina probiercza	Zawartość składnika palnego % obj.
I	Metanowo-powietrzna	8,3 ± 0,3
II A	Metanowo-powietrzna	4,6 ± 0,3
	Propanowo-powietrzna	5,25 ± 0,25
II B	Etylenowo-powietrzna	7,8 ± 0,5
II C	Wodorowo-powietrzna	21 ± 2

Tablica D-3

Mieszaniny probiercze dla sprawdzania współczynnika bezpieczeństwa 2 wg Sierowa [D9]. Iskiernik radziecki BWK-PUE. W nawiasach podano obowiązującą w Polsce klasyfikację

Kategoria (klasa)	Reprezentacyjny gaz	Zestaw mieszanin probierczych	
		Obwody indukcyjne i rezystancyjne	Obwody pojemnościowe
1 (I)	Metan	19% O_2 + 81% H_2	14% O_2 + 86% H_2
2 (II A)	Eter naftowy	30% O_2 + 70% H_2	17% O_2 + 83% H_2
3(II B)	Etylen	40% O_2 + 60% H_2	23% O_2 + 77% H_2
4 (II C)	Wodór	50% O_2 + 50% H_2	40% O_2 + 60% H_2

Oprócz omówionych mieszanin probierczych stosuje się także mieszaniny, które służą do sprawdzenia iskrobezpieczeństwa dla zadanego współczynnika bezpieczeństwa zamiast powiększania prądu lub napięcia. Przykłady takich mieszanin przedstawiono w tablicy D-3.

Dla mieszanin probierczych stosowanych przy atestacji podaje się, jakie winny być temperatura i ciśnienie i jakie są dopuszczalne ich zmiany.

Konsekwencje zmian autor przeanalizował w pracy [21] głównie pod kątem widzenia rozrzutów w częstości względnej wybuchów. W pewnych przypadkach celowa zmiana temperatury, ciśnienia oraz wzbogacenia tlenem może ułatwić badanie dla zadanego współczynnika bezpieczeństwa. Przykładem są wyniki Bartelsa [D1] podane w postaci wykresów. Autor zamieścił je w pracy [19], zaś przeliczone do formy wygodniejszej w stosowaniu przedstawione są w tabl. D-4.

Tablica D-4

Wpływ zmiany temperatury i ciśnienia mieszaniny probierczej na mpz. Iskiernik IEC, obwód prądu stałego: U = 24 V, L = 1 mH

Lp.	Mieszanina probiercza	% zmiany mpz przy zmianie temp. z 20° do 200°C dla P w $[N/m^2] \times 10^5$:				% zmiany mpz przy zmianie ciśnienia w $[N/m^2] \times 10^5$: (t=20°C)		
		1	2	4	6	1÷2	2÷4	4÷6
1	H_2 + pow.	-30	-20	-13	-	-55	-40	-
2	Propan + powietrze	- 6	-17	-25	-33	-33	-40	-28
3	Etylen + powietrze	-15	-38	-28	-28	-40	-50	-25

Tablica D-5

Wpływ zmian wilgotności mieszaniny probierczej na mpz. Wartości w tablicy otrzymano przy użyciu powietrza normalnie wilgotnego w miejsce suchego

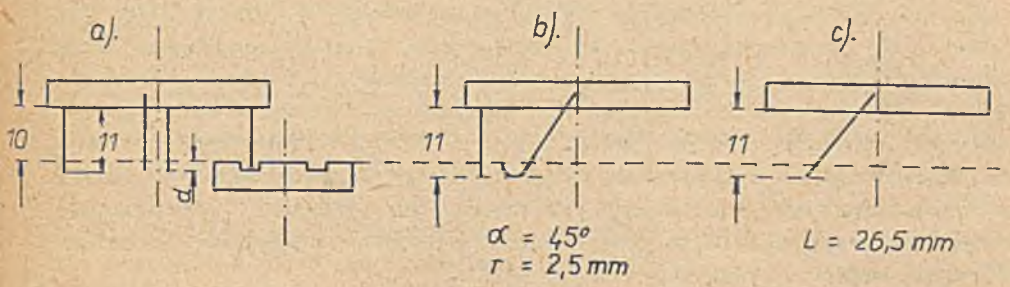
% zmiany mpz dla napięcia źródła prądu przemiennego [V]:			Krotność zmiany mpz dla obwodu prądu przemiennego : U = 62.5V oraz indukcyjności L [H]:		
30	50	70	0,01	0,1	1,0
+11	+16	+32	+1,7	+2,75	+3,4
Etylen + powietrze. Obwód rezystancyjny.			Propan + powietrze. Obwód indukcyjny.		

Godne odnotowania są również obserwacje Morgana [D7] wpływu zmian wilgotności gazu probierczego na wielkość mpz. W tabl. D-5 autor także przeliczył je do wygodniejszej postaci. Wpływ wilgotności zaobserwowano przy sporządzaniu mieszaniny z powietrzem suchym, a następnie wilgotnym z otoczenia. Nie podano jednak, jakie były wilgotność i temperatura. Większy wpływ wilgotności zaobserwowano w obwodzie rezystancyjnym o większym napięciu źródła zasilania oraz w indukcyjnym o większej indukcyjności.

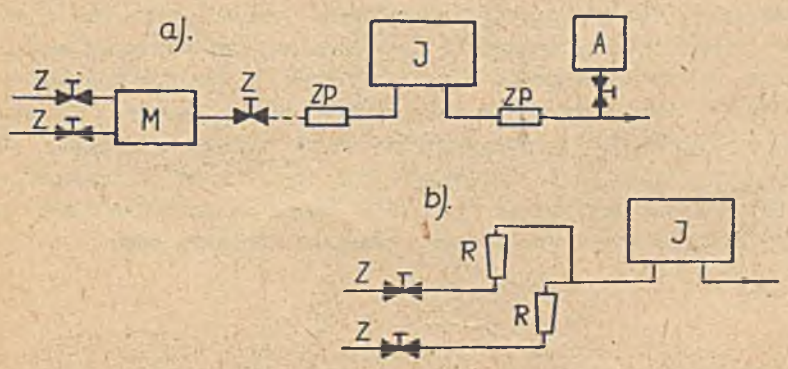
D o d a t e k 2

ISKIERNIK IEC

Autor analizował pracę iskiernika IEC w kilku pracach. Wyniki najbardziej przydatne do niniejszej pracy są zawarte w [21]. Znaczące uzupełnienie dotyczące wyników badań nad iskiernikiem zawiera praca autora [19]. Przypomnienia wymagają możliwe sposoby mocowania elektrod wolframowych. Przedstawiono je na rys. D-3. Mocowanie a) nazwano w pracy jako IEC, zaś b) oraz c) jako mocowanie SMRE. Na rys. D-4 przedstawiono typowy układ gazowy iskiernika.



Rys. D-3. Różne ustawienie elektrod wolframowych w iskierniku IEC: a) metoda IEC, b) i c) metoda SMRE



Rys. D-4. Przykład schematu układu gazowego iskiernika: a) układ przy atestacji, b) układ doświadczalny. M - mieszalnik gazu, ZP- zabezpieczenie przeciwwybuchowe, I - iskiernik, A - analizator gazu, Z - zawory, R - rotametr

Podstawowe dane techniczne iskiernika IEC są następujące:
- 4 elektrody wolframowe $\Phi = 0,2$ mm; L = 11 mm;
- 1 elektroda kadmowa $\Phi = 30$ mm; dysk o grubości kilku mm;
- prędkość obrotowa elektrod wolframowych : 80 obr./min;
- stosunek prędkości obrotowej elektrod wolframowych do kadmowej 50 : 12;
- objętość komory z gazem probierczym i elektrodami: 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 badania indukcyjności: do 1 H;
- wymiana elektrod wolframowych: po 50000 wywołanych iskier;
- dla dużych stałych czasowych badanych obwodów należy redukować ilość elektrod wolframowych.

Prędkość względna elektrod podczas przesuwania się elektrody wolframowej po powierzchni elektrody kadmowej wynosi 25 cm/s. W momencie sprężystego zejścia drutu z brzegu dysku prędkość względna dochodzi do 2000 cm/s.

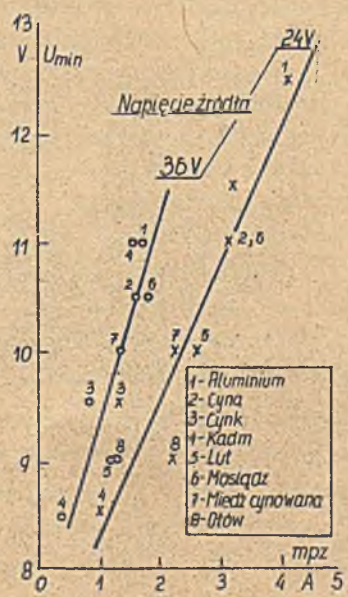
Autor w swoich opracowaniach cytował wiele wyników doświadczalnych Widgintona [42], z których wynika, że iskiernik IEC jest iskiernikiem o największej czułości, tzn. że w tych samych warunkach dla różnych iskierników z iskiernkiem IEC uzyskuje się najmniejszą wartość mpz. Duże zmiany czułości iskiernika omówione przez autora w [21] są między innymi powodem, dla którego autor widzi potrzebę oceny metrologicznej uzyskiwanych danych doświadczalnych oraz traktowanie iskiernika jako przyrządu pomiarowego. Szczegółowe uwagi dotyczące przeprowadzenia pomiarów z użyciem iskiernika IEC autor zawarł w Dodatku 3.

Dla wyboru rodzaju materiału elektrod wykorzystano między innymi dane o minimalnych napięciach łuku w zależności od rodzaju materiału elektrod. Różne spotyka się wartości liczbowe, zależnie od dziedziny, dla której były one wyznaczane. Widginton [42] cytuje własne wyniki pomiarowe oraz wyniki Holma i Finka, którzy zajmowali się badaniami zapobiegania zniszczeniu kontaktów przekaźników przez łuk elektryczny. W tablicy D-6 autor zestawił niektóre z tych danych, uzupełniając je danymi Kesajewa cytowanymi przez Mseka i Craggsa [38] z dziedziny techniki wysokich napięć. Ostatecznie najistotniejsza jest korelacja pomiędzy mpz oraz minimalnym napięciem łuku U_{min}, przedstawiona na rys. D-5. Widoczna jest dla kadmu zbieżność najmniejszej wartości mpz oraz minimalnego napięcia łuku.

Tablica D-6

Porównanie minimalnych napięć łuku U_{min}

Lp.	Metal	Symbol	Minimalne napięcie łuku w [V]			
			Fink (1938)	Holm (1958)	SMRE (1966)	Kasajew (1965)
1	Kadm	Cd	-	11	8,5	9,8
2	Cynk	Zn	9	10,5	9,5	10
3	Ołów	Pb	7,5	-	9	-
4	Żelazo	Fe	8	13	-	15,1
5	Cyna	Sn	-	13,5	10,5	12
6	Nikiel	Ni	8	14	-	15,0
7	Miedź	Cu	8,5	13	11	16
8	Aluminium	Al	-	14	11	14,4
9	Platyna	Pt	13,5	17,5	-	-
10	Wolfram	W	10	15	-	16,1
11	Srebro	Ag	8	12	-	15,3
12	Złoto	Au	9,5	15	-	15,5



Rys. D-5. Korelacja pomiędzy mpz i minimalnymi napięciami łuku dla iskiernika IEC z dyskami o różnych materiałach [42]

D o d a t e k 3

UWAGI AUTORA O POMIARACH PRZY STOSOWANIU ISKIERNIKA IEC

1. Uwagi ogólne o wyznaczaniu mpz

a. Ze względów bezpieczeństwa korzystniej jest doprowadzać składniki mieszaniny probierczej z oddzielnych butli i mieszać je we wspólnym przewodzie doprowadzającym do iskiernika. Skład ustala się przez pomiar przepływów składników rotametrem. Stosunkowo szybko ustala się najniebezpieczniejszy skład mieszaniny, gdy stosuje się definicję Allsopa mzp. Ustala się wartość prądu większą od mpz i zmienia się przepływ metanu $\dot{V}_{CH_4}$ (gdy składnikiem palnym jest metan) przy stałym przepływie powietrza $\dot{V}_{pow}$.
Podane w niniejszej pracy oraz w [21] wyniki autora odnoszą się do tak ustalonego składu mieszanin probierczych.

b. Wyniki pomiarów dla "nowej" elektrody kadmowej nie różnią się od wyników dla "starej" elektrody.

c. Czułość iskiernika zmniejsza się wraz z narastaniem ilości wykonanych obrotów uchwytu elektrod wolframowych, gdy bada się obwód indukcyjny. Jest to wynikiem wyginania się elektrod, co prowadzi do zmiany efektywnej długości elektrod wolframowych (zmiana d na rys. D-3). Wyprostowanie elektrod prowadzi do powrotu czułości do normy. Trzeba je wykonywać co 150 ÷ 200 obrotów. Tylko wówczas można praktycznie mówić o powtarzalności warunków, w jakich zachodzą kolejne iskrzenia.
Według rys. D-3a d wynosi 1 mm. Powiększenie d do 2 mm zwiększa nieco czułość iskiernika dla obwodu indukcyjnego. Jednak elektrody wolframowe szybko pękają. Obserwuje się zmniejszenie mpz o około 5%, gdy d = 2 mm.

e) Dla elektrod wolframowych uciętych bez obtapiania końców czułość jest taka, jak z obtapianiem. Elektrody jednak szybciej się zużywają. Po około 500 obrotach uchwytu elektrody się rozwarstwiają.

f) Historę typowego doświadczenia dla obwodu indukcyjnego prądu stałego: U = 24 V, I = 100 mA, L = 95 mH, można zapisać w następujący sposób:
N : 185, 0/506
Pr : 24, 38,2, 0/248
N : 27, U
N : 0/196
Pr : 13, 10, 55, 0/214
Pr : 51, 78, 64, 210, 25, 183, 217, 365

N : 76, 0/381
Pr : 92, 25, 23, 0/198
N : 153, 50, 0/321, U;

gdzie: N - nowe elektrody; Pr - prostowanie elektrod; U - uszkodzenie elektrod; 24 - po 24 obrotach uchwytu elektrod uzyskano m = 1 wybuch; 0/214 - po 214 obrotach nie uzyskano wybuchu. Po każdym wybuchu czy operacji liczy się ilość obrotów od początku.

Wartość zaobserwowaną prawdopodobieństwa zapalenia wylicza się ze stosunku ilości wybuchów m i ilości iskrzeń n, która równa jest sumie obrotów (z wyłączeniem wyników, dla których uzyskano 0 wybuchów) pomnożona przez 4.

2. Pomiary wykonywane zgodnie z definicją statystyczną mpz

W tej metodzie wyznacza się wartości p^*_{ij} dla zadanych I^*_{ij} (lub U^*_{ij} w obwodach o charakterze pojemnościowym), gdzie $i = 1,2,\ldots,n$; $j=1,2,\ldots,k$. Zwykle n oznacza zadane wartości prądu, zaś k oznacza określony dzień pomiaru. Niżej podane uwagi wiążą się z pomiarami, których celem było wyznaczenie krzywej wzorcowej oraz wartości mpz.

a. Wyznaczenie mpz tą metodą (przy wyznaczaniu graficznym dla i = 3 lub 4) trwa przeciętnie dwukrotnie dłużej niż wyznaczenie mpz zgodnie z definicją Allsopa. Eksperyment jest trudny, gdyż wymagana jest wielokrotna wymiana elektrod dla wyznaczenia jednej wartości mpz. Dla dużych wartości p wystarczy jeden zestaw elektrod, zaś dla małych p trzeba je wymieniać przynajmniej po około 400 obrotach.

b. Dla obwodu indukcyjnego zależność $p = f(I)$ w okolicy $p \approx 10^{-2}$ ma duże nachylenie. To sprawia, że dla wartości $p^* < 10^{-3}$ trudno wyznaczyć eksperymentalnie krzywą wzorcową.

3. Pomiary wykonywane zgodnie z definicją Allsopa mpz

a. Przy wyznaczaniu mpz metodą Allsopa krytyczna jest także konieczność prostowania elektrod. Należy ją wykonywać po około 150 obrotach.

b. Dla obwodu prądu stałego: U = 24 V, L = 95 mH sprawdzano, czy jest obojętne, od jakiej wartości rozpoczyna się wyznaczania mpz. Przykładowy wynik jest następujący:

I początkowe [mA]	120	130	135
mpz [mA]	105	100	103

Jak widać, praktycznie jest obojętne, od jakiej wartości prądu rozpoczyna się wyznaczanie mpz.

c. Metoda Allsopa nie odzwierciedla rzeczywistej czułości iskiernika, przez co wynik ostateczny mniej zależy od jej zmian. Zmiany czułości można obserwować przez obserwację częstości względnej wybuchów m/n dla tej samej wartości prądu I. Ilustruje to następujący przykład doświadczalny dla dwu kompletów elektrod o różnej czułości (obwód: U = 24 V, L = 95 mH):

I [mA]	120	114	109	104	99
*) m/n (komplet 1)	1/1	1/10	1/10	1/21	0/458
*) m/n (komplet 2)	1/3	1/36	1/71	1/98	0/420

*) n - oznacza tutaj ilość obrotów uchwytu elektrod wolframowych

Wartość prądu 99 mA uznano za mpz dla obu czułości iskiernika, pomimo że wyraźnie czułości się różnią.

4. Pomiary dla obwodu rezystancyjnego

Obwód rezystancyjny stanowi szczególną trudność przy wyznaczaniu dopuszczalnych prądów bezpiecznych. Wyraźnie stwierdza się zwiększenie dwukrotne czułości, gdy elektrody wolframowe są ustawiane zgodnie z rys.D-3b lub D-3c. Stwierdzono, że ilościowe porównanie (przy tym ustawieniu) pomiędzy poszczególnymi pomiarami jest możliwe wówczas, gdy mocuje się tylko jedną elektrodę. Wynika to stąd, że trudno jest wyregulować właściwy docisk 4 elektrod wolframowych tak, aby uzyskać maksymalną czułość. Z jedną elektrodą i tak trudno jest nadal ustalić ile wystąpiło iskrzeń. Jedynie co można zrobić, to uznać, że obrót jest równoznaczny z zaiskrzeniem.

Przy badaniu obwodu rezystancyjnego dokonano następujących ważnych spostrzeżeń:

a. Największą czułość w metodzie SMRE (rys. D-3c) uzyskuje się, gdy po doprowadzeniu do styku między elektrodą kadmową a wolframową obserwuje się, przy dalszym zmniejszaniu dystansu, powstanie ciągu iskier o kolorze lekko pomarańczowym. Wówczas stan poprzedni, gdy iskry są wyraźnie rozróżnialne o intensywnym niebieskim kolorze, jest stanem o największej czułości.

b. W metodzie SMRE bardzo trudno ustalić maksymalną czułość, gdy p jest poniżej wartości 10^{-3}. Doświadczenie jest czasochłonne.

c. W metodzie IEC (rys. D-3a) stwierdza się małą zależność prawdopodobieństwa zapalenia od prądu (w zakresie powyżej $p=10^{-3}$). Czułość elektrod

wzrasta w miarę zginania się elektrod w trakcie pomiarów. Elektrody wolframowe ustawiają się wówczas podobnie, jak w metodzie SMRE.

d. W obu metodach elektrody silnie pokrywają się sadzą. Korzystne jest ich czyszczenie lub wymiana, aby zmniejszyć pochłanianie energii cieplnej. Elektroda kadmowa łatwo się wypala i wymaga częstego szlifowania.

e. Dla obwodu rezystancyjnego uzyskuje się wyniki bardziej niepowtarzalne. Duże znaczenie ma równoległość płaszczyzn dysku kadmowego i uchwytu elektrod wolframowych.

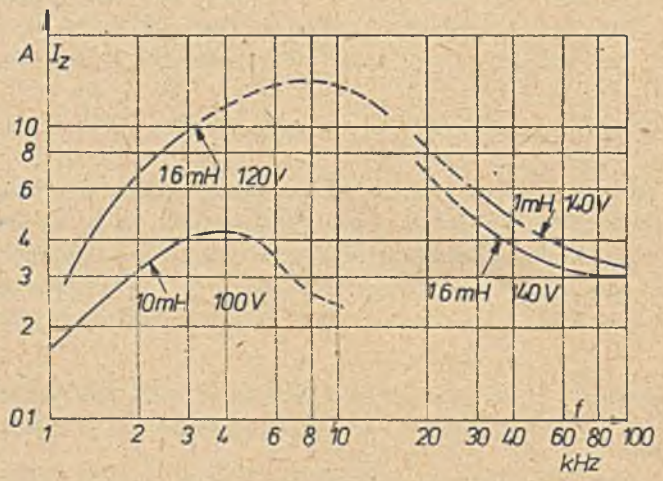
D o d a t e k 4

WPŁYW CZESTOTLIWOSCI NA MPZ

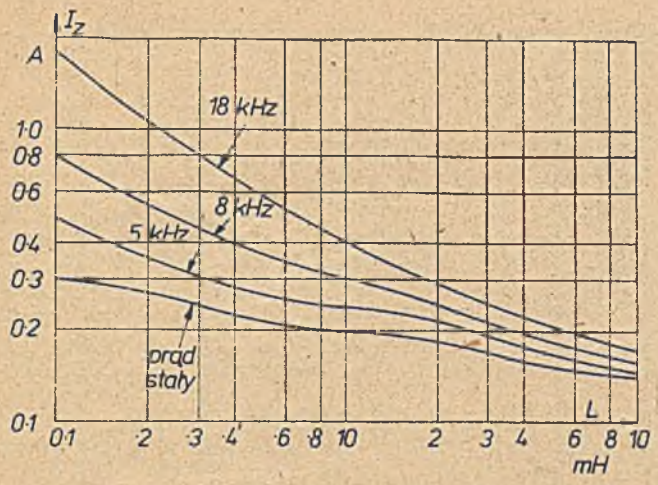
Zdecydowana większość badań i publikacji z zakresu iskrobezpieczeństwa poświęcona jest obwodom prądu stałego. Dla prądu przemiennego dokonywano pomiarów, których celem było ustalenie, na ile można posługiwać się charakterystykami iskrobezpieczeństwa wyznaczanymi dla obwodu prądu stałego w różnych zakresach częstotliwości. Na podstawie prac Wheelera [43] Gawrilczenki [D3], Krawczenki [D5, D6] (omówionych także w pracy Thomasa [D11] i Grzywaka [28]), można wyciągnąć następujące wnioski:

1. W zakresie częstotliwości (50-150 Hz) można posługiwać się charakterystykami iskrobezpieczeństwa dla obwodów prądu stałego. Za wartość prądu obwodu należy przyjąć amplitudę prądu przemiennego (podobnie z napięciem). Ten sposób postępowania jest wykorzystany przy projektowaniu w [D12].

2. Przy wysokich częstotliwościach nigdy nie otrzymuje się mpz mniejszych od uzyskanych dla prądu stałego. Efekt ten zauważono szczególnie silnie dla indukcyjności mniejszych od 10 mH. Według danych Gawrilczenki obserwuje się, że można uzyskać maksimum mpz dla pewnych parametrów obwodu. Wyniki badań są przedstawione na rys. D-6, D-7. Dla tego samego iskierni-



Rys. D-6. Zależność mpz od częstotliwości prądu wg [D3]



Rys. D-7. Zależność mpz od częstotliwości prądu wg [D6]

ka, w obwodzie bezindukcyjnym. Krawczenko uzyskał mpz przy częstotliwości 1000 Hz 1,6 raza większy od mpz dla prądu stałego, zaś dla 100 kHz ok. 11 razy większy.

Pewnej weryfikacji wyników dla wysokiej częstotliwości dokonali Furmanow i Czetwierow [D2]. Wiążą oni rezultaty doświadczeń ze sposobem rozwierania obwodów. Wyniki doświadczalne zinterpretowali na drodze teoretycznej. Ustalili, że w obszarze wysokich częstotliwości można spodziewać się wystąpienia rezonansu w sytuacji, gdy są rozwarte styki iskiernika. Najbardziej niebezpieczny jest przypadek, gdy przy rozwieraniu elektrod napięcia na pojemności zastępczej, widzianej od strony elektrod iskiernika, osiągnie wartość maksymalną i wówczas nastąpi wyładowanie w postaci jednej iskry. Wyniki eksperymentów Furmanowa i Czetwierowa zestawiono w tabl. D-7, gdzie przyjęto mpz dla prądu stałego za 1.

Sposób postępowania dla prądu przemiennego byłby słuszny wówczas, gdy zachodziłaby pewność, że przerwa obwodu zawsze nastąpi przy maksymalnej wartości prądu. Praktycznie to nie będzie miało miejsca. Możemy jedynie przyjąć, że w przypadku przerwania obwodu przy maksymalnej wartości prądu będzie to przypadek najbardziej niekorzystny.

Tablica D-7

Wartości względne mpz dla obwodu prądu przemiennego przy wysokiej częstotliwości zależnie od sposobu rozwierania elektrod

Częstotliwość [Hz]	Amplituda napięcia [V]	Pojemność [μF]	Względne wartości amplitud mpz dla indukcyjności w [H]					
							dla iskiernika	
			0,001	0,01	0,1	1	0,1	1
5000	70	1	-	-	-	1,01	-	1,41
10000	70	2	-	-	1,08	-	1,66	-
40000	70	1,5	-	0,97	-	-	--	-
90000	200	2	1,17*)	-	-	-	-	-

*) odniesieniem jest amplituda mpz dla 50 Hz.

LITERATURA

[1] 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.

[2] BARRETO E.: The Formation of Sparks of Minimum Ignition Energy. IEEE Trans. on Ind. Applic., Vol. IA-14, No 6, Nov/Dec. 1978.

[3] BARTELS A.L.: Ignition energies of methane/air mixtures as a function of electrical discharge-type. IEEE Conference Publication No 134, London 1975.

[4] 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.

[5] CAPP B.: The power balance in electrode dominated arcs with a tungsten anode and a cadmium o zinc cathode in nitrogen. J.Phys. D: Appl. Phys., Vol. 5, 1972.

[6] CAPP B., WIDGINTON D.W.: The intrinsic safery of resistive circuits. IEE Conference Publication No 134, London 1975.

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

[8] DEUSCHLE R.C.: Intrinsic safety - the state of the art in North America today. IFAC 1978. 7th Triennial World Congress, S12 - Intrinsic Safety: Differences in Standards.Helsinki, 12 - 16 June, 1978.

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

[10] FRĄCZEK J.: O kompensacji wpływu zmiany temperatury otoczenia na czułość analizatora termokonduktometrycznego. Zesz. Nauk. Politechniki Śląskiej, s "Automatyka", nr 8, Gliwice 1967.

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

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

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

[14] FRĄCZEK J.: Statystyczna ocena iskrobezpieczeństwa obwodów elektrycznych. Zesz. Nauk. Politechniki Śląskiej, s."Automatyka", nr 17, Gliwice 1971.

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

[16] 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.

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

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

[19] FRĄCZEK J.: Przeciwwybuchowe urządzenia kontrolno-pomiarowe w wykonaniu iskrobezpiecznym. Rozdz. 2 skryptu: Systemy pomiarowe. Zagadnienia wybrane. Pod red. J. Piotrowskiego. Skrypt uczelniany nr 573, Politechnika Śląska, Gliwice 1974.

[20] 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.

[21] FRĄCZEK J.: Podstawy oceny zagrożenia wybuchowego od urządzeń kontrolno-pomiarowych w wykonaniu iskrobezpiecznym w aspekcie stosowania iskiernika IEC. Zesz. Nauk. Politechniki Śląskiej, s. "Automatyka", nr 38, Gliwice 1977.

[22] FRĄCZEK J.: Probabilistyczny model zagrożenia wybuchowego od urządzeń iskrobezpiecznych. Archiwum Górnictwa, tom 24, zesz. 2, 1979.

[23] FRĄCZEK J.: Theory of the breakflash apparatus as a measuring instrument used for assesing of the sefety level for intrinsically safe measuring apparatus. Komunikat na międzynarodową konferencję "EMISCON 79" (Automation of Measurement in Science and Technology), Brno 2-4.X.1979.

[24] FRĄCZEK J.: Procedury kontroli czułości iskiernika oraz procedury atestacyjne w badaniach iskrobezpieczeństwa. Archiwum Górnictwa, tom 25, zesz. 1, 1980 (w druku).

[25] FRĄCZEK J.: Analiza parametrów zapewniających iskrobezpieczeństwo urządzeń automatyki górniczej. Referat na VI Międzynarodową Konferencję Automatyzacji Górnictwa "ICAMC-80" Katowice, maj 1980 (ref. nr 74).

[26] FRĄCZEK J.: Przekaźniki kontaktronowe w przeciwwybuchowych iskrobezpiecznych obwodach elektrycznych. Referat na konferencję nauk.-techniczną "KONTAKTRONIKA-80", Bydgoszcz, maj 1980 (materiały Sekcji C).

[27] FURMANOW B.M.: K woprosu ustanowlenija kriterija ocienki iskrobiezopasnosti elektriczeskich sistem. WUGI, Sbornik 11, Ugletiechizdat 1954.

[28] GRZYWAK A.: Obwody iskrobezpieczne w układach automatyki górniczej. Praca nauk.-badawcza ZKMPW, Gliwice 1969.

[29] KRAWCZENKO W.S.: Wierojatnostnaja priroda wospłamienienija mietana elektriczeskim iskrienijem. Sbornik statiej. Moskwa 1948, Ugletiechizdat.

[30] KRAWCZENKO W.S.: Wospłomieniajemost razlicznych gazo-parowozdusznych wzrywczatych sred, ich kłassifikacija po wospłamieniajemosti ot elektriczeskich razriadow i pierspektiwy rasszirienija primienienija iskrobiezopasnych sistem w razlicznych wzrywczatych sriedach. Kratkij nauczny otczet. Moskwa 1964. IGD.

[31] KRAWCZENKO W.S. i inni: Iskrobiezopasnost elektriczeskich ciepiej. Izd. Nauka, Moskwa 1976.

[32] KOWALEW P.F.: Principy wzrywobiezopasnosti rudnicznogo elektrooborudowanija, Ugletiechizdat, Moskwa 1951.

[33] LEWIS B., Von ELBE G.: Combustion, flames and explosins of gases. 2nd edition, Academic Press Inc., New York 1961.

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

[35] MONOGRAPH 111. Instrument Society of America. Pittsburgh, 1967.

[36] McKINNEY A.H.: Electrical ignition of combastible atmospheres. ISA Monograph 111, Electrical Safety Practices, The Instrument Society of America, Pittsburgh 1972.

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

[38] MEEK J.M., CRAGGS J.D.: Electrical Breakdown of Gases. John Wiley and Sons, Ltd. Chichester-New York-Brisbane-Toronto, 1978.

[39] PARMENTIER C.J.C.: Intrinsic safety in Europe. IFAC 1978, Helsinki.

[40] SUŁTANOWICZ A.U. i inni: Osobiennosti projektirowanija wzrywozaszczi-szczennych priborow i sredstw awtomatizacji neftjanoj promyszlennosti: Niedra, Moskwa 1973.

[41] TOWLE L.C.: A status report on intrinsic safety within the United Kingdom in 1977. IFAC 1978, Helsinki.

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

[43] WHEELER R.V.: The Electric Ignition of Firedamp. Alternating and Continuous Currents Compared. SMRB Paper No 20, HSMO 1929.

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

[45] Young W.: A History of Intrinsic Safety in Mines. The Mining Electrical und Mechanical Engineer, January 1959.

LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA DO DODATKÓW "D"

[D1] BARTELS A.L., HOWES J.A.: The variation of minimum igniting currents with pressure, temperature and oxygen enrichment. IEE Conference Publication No 74, London, March 1971.

[D2] FURMANOW B.M., CZETWIEROW B.U.: Nowyje issledowanija iskrobiezopasnosti elektriczeskich cepiej. Kratkij nauczny otczet. IGD,Moskwa 1964.

[D3] GAWRILCZENKO L.I.: Iskrobiezopasnost wzrywnych sietiej pri primienieniju tokow wysokoj czastoty. Woprosy Gornoj Elektrotechniki,trudy MakNII, tom IX, wyp. 2, Ugletiechizdat 1959.

[D4] GLIŃSKI S.: Urządzenia elektryczne w obszarach zagrożonych wybuchami. Warszawa 1972, WNT.

[D5] KRAWCZENKO W.S.: Wospłamieniajuszczaja sposobnost elektriczeskich razriadow pri razmykaniu cepiej toka promyszlennoj, zwukowoj i ultrazwukowoj czastoty. Elektriczestwo, No 1, 1954.

[D6] KRAWCZENKO W.S., SUN YUI-CHI: Iskrobiezopasnost elektriczeskich cepiej pieremiennowo toka wysokoj czastoty. Elektriczestwo, No 1, 1961.

[D7] MORGAN M.J.: Electrodes, wiring and barriers. ISA Monograph 113,Pittsburgh 1972.

[D8] PILC A.: Niebezpieczeństwo wybuchów mieszanin palnych par i gazów z powietrzem. Przemysł Chemiczny z. 9, 10, 1966.

[D9] SIEROW W.I., WINOGRADOW W.P.: Uniwersalnyj sposob ispytanija iskrobiezopasnych ciepiej. Biezop. Truda w Prom., No 9, 1974.

[D10] ŚWIERŻEWSKI N.: Instalacje elektryczne w przestrzeniach zagrożonych wybuchami. WNT, Warszawa 1977.

[D11] THOMAS V.M.: Design of intrinsically safe apparatus for use in coalmines. A review of data and techniques. The Mining Electrical and Mechanical Engineer, May/June 1964.

[D12] WIDGINTON D.W.: Some aspects of the design of intrinsically safe circuits. SMRE Research Report No 256, Sheffield 1968.

NORMY "N"

[N1] BRITISH STANDARD INSTITUTION. British Standard 5501 Part 7 1977.

[N2] CENELEC. Electrical Apparatus for potentially explosive atmosphere. Intrinsically safe apparatus. Specific requirements for construction and testing. First edition July 1974 (projekt do użytku wewnętrznego).

[N3] PN-72/E-08107. Urządzenia iskrobezpieczne. Ogólne wymagania i badania.

[N4] RS-4986-75. Sowiet Ekonomiczeskoj Wzaimopomoszczi. Rekomendacja po standartizacji. Techniczeskije trebowanija. Mietody ispytanij.

[N5] VDE 0170/0171 d/2.65. Vorschriften für Schlagwettergeschützte/explosionsgeschütze elektrische Betriebsmittel. Verband Deutscher Elektrotechniker (VDE) e. V.1965.

METODY ANALIZY DOPUSZCZALNYCH PRĄDÓW BEZPIECZNYCH
W ISKROBEZPIECZNYCH URZĄDZENIACH KONTROLNO-POMIAROWYCH

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

W pracy dokonano analizy stanu badań w technice iskrobezpieczeństwa w zakresie wykorzystania minimalnych energii zapalających oraz minimalnych prądów zapalających do oceny zagrożenia wybuchowego. Autor wykorzystał w tym celu literaturę oraz prace własne.

Przedstawiono metody analizy dopuszczalnych prądów bezpiecznych, uwzględniając:

- wpływ sposobu przeprowadzania doświadczenia na wynik uzyskanego minimalnego prądu zapalającego;
- warunki eksploatacji urządzeń iskrobezpiecznych,
- wpływ częstotliwości i kształtu prądu na minimalny prąd zapalający.

Iskiernik IEC analizowano jako przyrząd pomiarowy. Podano sposób wyznaczania krzywej wzorcowej iskiernika, która pozwala na porównanie minimalnych prądów zapalających wyznaczonych stosownie do różnych definicji minimalnych prądów zapalających. Autor dokonał przy tym analizy wpływu procedury kontroli czułości iskiernika oraz procedury atestacyjnej na wynik uzyskanego minimalnego prądu zapalającego.

Zagrożenie wybuchowe w warunkach eksploatacji urządzeń iskrobezpiecznych autor ujął w modelu probabilistycznym. Model uwzględnia niezawodność urządzeń, częstość pojawiania się mieszaniny wybuchowej oraz liczbę urządzeń zlokalizowanych w strefie wybuchowej. W efekcie podano sposób oceny możliwości zmiany dopuszczalnego prądu bezpiecznego zależnie od liczby urządzeń.

Autor udokumentował pracę wynikami doświadczeń. Własne pomiary autor wykonał w Kopalni Doświadczalnej "Barbara" oraz w The Safety in Mines Research Establishment w Sheffield.

МЕТОДЫ АНАЛИЗА ДОПУСТИМЫХ ЗНАЧЕНИЙ БЕЗОПАСНЫХ ТОКОВ В ИСКРОБЕЗОПАСНОЙ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЕ

Р е з ю м е

В работе проведено анализ состояния исследований в искробезопасной технике в области использования минимальных воспламеняющих энергий и минимальных воспламеняющих токов для оценки опасности взрывов. С этой целью автор использовал литературу и собственные труды.

Представлено методы анализа допустимых безопасных токов учитывая:

- влияние способа проведения опыта на полученное значение минимального воспламеняющего тока,
- условия эксплуатации искробезопасного оборудования,
- влияние частоты и формы тока на минимальный воспламеняющий ток.

Взрывную камеру IEC проанализировано как измерительный прибор. Подано способ определения градуировочной кривой взрывной камеры, которая даёт возможность сравнивать минимальные воспламеняющие токи определённые по различным формулировкам минимальных воспламеняющих токов. При этом автор провёл анализ влияния процедуры контроля чувствительности взрывной камеры а также процедуры градуировки на полученное значение минимального воспламеняющего тока.

Опасность взрыва в условиях эксплуатации автор учёл в вероятностной модели. Модель учитывает надёжность оборудования, частоту выступания взрывной смеси и количество оборудования во взрывоопасной зоне. В итоге подано способ оценки возможности изменения допустимого безопасного тока соответственно количеству оборудования.

Автор обосновал работу результатами опытов. Измерения автор реализовал на Kopalni Doświadczalnej "Barbara" а также The Safety in Mines Research Establishment in Sheffield.

METHODS OF ANALYSIS OF THE PERMISSIBLE CURRENTS
FOR THE INTRINSICALLY SAFE CHECK-MEASURING APPARATUS

S u m m a r y

Review of the state of the research-work dealing with the use of the minimum ignition energies and the minimum ignition currents for assesing the safety level has been performed. The author presents methods of analysis of the safe permissible currents and the following problems are taken into consideration:

- influence of the experimemtal procedure on the achieved minimum ignition current,
- conditions of exploitation of the intrinsically safe apparatus,
- influence of the frequency and shape of the current on the minimum ignition current.

The IEC breakflash apparatus has been analysed as a measuring instrument and its regression model is equivalent to the calibrating curve. This makes possible to compare the minimum ignition currents which are assessed according to the different definitions.

The probabilistic model for describing the electrical explosion risks is suggested. Reliability of the apparatus, frequency of appearance of the explosive gas mixtures and the number of apparatus are taken into account in this model. The possibility of the safe permissible currents' changes according to the number of apparatus are being presented as a result of this considerations.

The author has supported his work by the results of experiments. The measurements of his own have been performed at the Experimental Mine "Barbara" and at the Safety in Mines Research Establishment in Sheffield.

BIBLIOTEKA GŁÓWNA
Politechniki Śląskiej
D 3342/80/57

WYDAWNICTWA NAUKOWE I DYDAKTYCZNE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ MOŻNA NABYĆ W NASTĘPUJĄCYCH PLACÓWKACH:

44-100 Gliwice — Księgarnia nr 096, ul. Konstytucji 14 b
44-100 Gliwice — Spółdzielnia Studencka, ul. Wrocławska 4 a
40-950 Katowice — Księgarnia nr 015, ul. Żwirki i Wigury 33
40-096 Katowice — Księgarnia nr 005, ul. 3 Maja 12
41-900 Bytom — Księgarnia nr 048, Pl. Kościuszki 10
41-500 Chorzów — Księgarnia nr 063, ul. Wolności 22
41-300 Dąbrowa Górnicza — Księgarnia nr 081, ul. ZBoWiD-u 2
47-400 Racibórz — Księgarnia nr 148, ul. Odrzańska 1
44-200 Rybnik — Księgarnia nr 162, Rynek 1
41-200 Sosnowiec — Księgarnia nr 181, ul. Zwycięstwa 7
41-800 Zabrze — Księgarnia nr 230, ul. Wolności 288
00-901 Warszawa — Ośrodek Rozpowszechniania Wydawnictw Naukowych PAN — Pałac Kultury i Nauki

Wszystkie wydawnictwa naukowe i dydaktyczne zamawiać można poprzez Składnicę Księgarską w Warszawie, ul. Mazowiecka 9.