

Michał Górny

Główny Instytut Górnictwa, Kopalnia Doświadczalna „BARBARA”, Mikołów

## PROPAGACJA WYBUCHU PRZEZ SZCELINĘ POWIETRZNĄ SILNIKA OGNIOSZCZELNEGO

### GAS EXPLOSION PROPAGATION THROUGH FLAMEPROOF INDUCTION MOTOR'S AIR GAP

**Streszczenie:** W publikacji przedstawiono opis zjawiska przenoszenia się płomienia przez szczelinę powietrzną silnika ognioszczelnego (Exd). Dokonano porównania średnic gasnących i prześwitów gaszących (parametry mieszaniny gazowej) ze szczelinami powietrznymi typowych silników ognioszczelnych. Przeprowadzono ponadto analizę turbulencji powstających w szczelinie powietrznej silnika i w jej sąsiedztwie (w obszarze czoła uzwojeń).

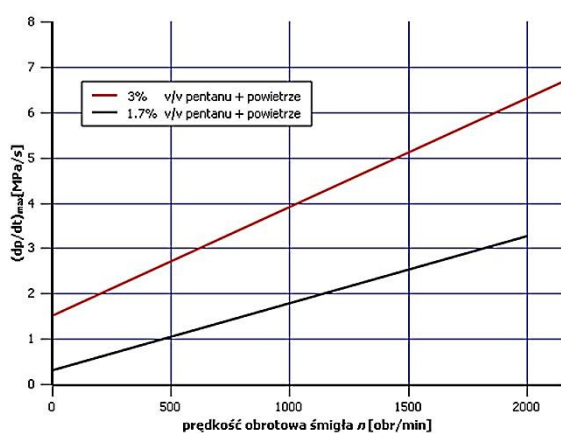
**Abstract:** This paper presents short description of flame transmission phenomena through air gap of flameproof motor (Exd). A comparison of quenching diameters and quenching distances (gas mixture parameters) with typical flameproof motor's air gap dimension was made. Moreover an turbulence analysis forming in air gap and in its nearby (in region of endshield) was made.

**Słowa kluczowe:** maszyny elektryczne, osłona ognioszczelna, ciśnienie wybuchu, turbulencja

**Keywords:** electrical machines, flameproof enclosure, explosion pressure, turbulence

#### 1. Wstęp

Rozprzestrzenianie się płomienia w przepływie turbulentnym odbywa się ze znacznie większą prędkością niż w spokojnej mieszance. Wpływ turbulencji wstępnej na przebieg wybuchu mieszanki gazowej w zamkniętym zbiorniku był wielokrotnie badany, przeważnie przez generację turbulencji za pomocą wirującego śmigła. Przykładowe wyniki takich badań w zbiorniku o objętości 2.53 m<sup>3</sup> przedstawia Rys. 1.

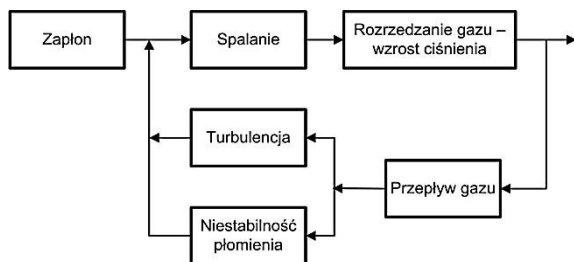


Rys. 1 Zależność maksymalnej szybkości wzrostu ciśnienia wybuchu mieszaniny pentanu z powietrzem od prędkości obrotowej śmigła [1]

Wstępna turbulencja może być wywołana także innym zaburzeniem, np. przez wprowadzenie do zbiornika turbulentnego strumienia gazu,

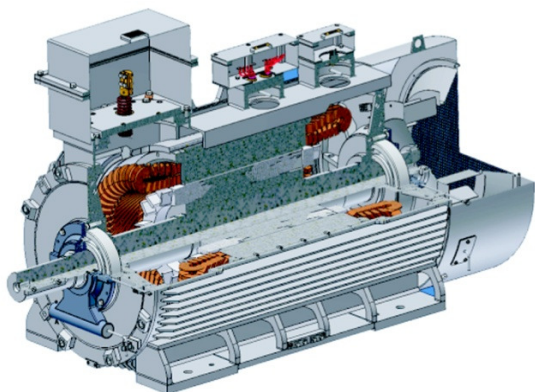
silne zawirowanie czynnika lub wrzucenie do zbiornika rozdrobnionego ciała stałego. Generalnie, gwałtowniejszy przebieg wybuchu w przepływie turbulentnym niż w spokojnej mieszance jest spowodowany większą prędkością propagacji płomienia w burzliwym ośrodku.

Płomień rozprzestrzeniający się w spokojnej mieszaninie, na skutek autoturbulizacji może przejść w płomień turbulentny. Najistotniejszym jest hydromechaniczny mechanizm turbulizacji. Ważną rolę w tym mechanizmie odgrywają przeszkody. Rozprężające się spaliny napierają na świeżą mieszankę przed czołem płomienia, indukując przepływ w części zbiornika nie objętej spalaniem. W pobliżu ścian powstaje warstwa graniczna, a za przeszkodami tworzą się obszary recyrkulacji - gdzie przepływ łatwo staje się burzliwy. Płomień napotykając na strefę burzliwego ruchu gwałtownie przyspiesza, co wywołuje kolejne zaburzenia pola prędkości przed nim i dalszą turbulizację przepływu, w wyniku czego powstaje dodatnie sprzężenie zwrotne polegające na przyspieszeniu płomienia w obszarach intensywnej turbulencji i generowaniu przed płomieniem coraz silniejszych zaburzeń pola przepływu (Rys. 2).



Rys. 2. Mechanizm przyspieszania płomienia turbulentnego

Zjawisko przyspieszania płomienia „na przeszkodach” występuje tym łatwiej im szybszy jest płomień laminarny. Przyspieszeniu płomienia towarzyszy szybki wzrost ciśnienia wybuchu, a maksymalna wartość ciśnienia wybuchu  $P_{\max}$  zwykle przekracza  $P_{\max}$  mierzone w warunkach standardowych. Co więcej, nawet w przypadku zastosowania otwartego (częściowo) zbiornika, to w wyniku autoturbulizacji płomienia ciśnienie wybuchu może znacznie przekroczyć  $P_{\max}$  w zamkniętym zbiorniku.



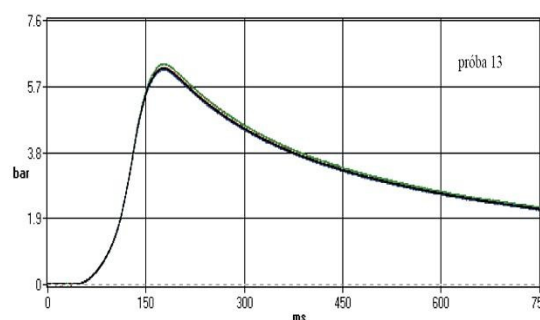
Rys. 3. Przekrój silnika indukcyjnego ExdIIB (ZME "EMIT")

Odnosząc się do wewnętrznej konstrukcji silnika (Rys. 3) można zauważyć, że po obydwu stronach wirnika, w obszarach w pobliżu tarcz łożyskowych będzie występowała turbulencja opisywana skalą całkową (duża skala turbulencji), natomiast w bezpośrednim sąsiedztwie skrzydełek przewietrzających wirnika, w pobliżu czoł uzwojeń, a zwłaszcza w szczelinie powietrznej silnika będzie występowała turbulencja mikroskopowa. Szczególnie podatnym na turbulencje mikroskopową będzie obszar wzdłuż szczeliny powietrznej silnika. Zarówno powierzchnia zewnętrzna wirnika oraz powierzchnia wewnętrzna pakietu stojana są porowate - w obydwu elementach występują rowki (wzdłużne), co w połączeniu ze średnicą

i prędkością obrotową silnika stwarza dogodne warunki do powstawania turbulencji mikroskopowej.

## 2. Propagacja wybuchu we wnętrzu silnika indukcyjnego

Przeprowadzając pomiary ciśnienia wybuchu w osłonie ognioszczelnej o regularnym kształcie (prostokątnej skrzynce) otrzymywane są powtarzalne przebiegi zmian wartości ciśnienia w czasie. Przykład typowego przebiegu przedstawia Rys. 4. W poniższym przykładzie przedstawiono przebieg ciśnienia wybuchu w przypadku mieszaniny metanu z powietrzem.

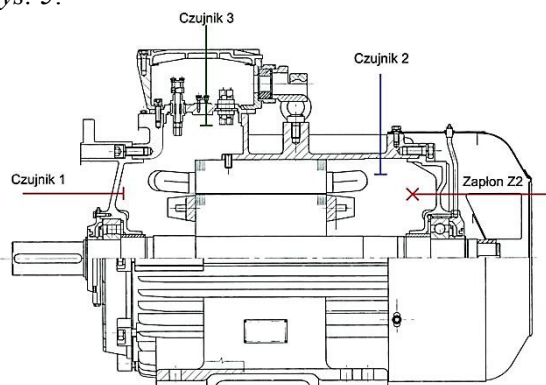


Rys. 4. Przebieg ciśnienia wybuchu w skrzynce o regularnych kształtach (o regularnym kształcie)

Jak można zaobserwować przebieg ma charakter dwuwykładniczy z rozładowaniem ciśnienia. Rozładowanie ciśnienia następuje przez złącze ognioszczelne oraz na skutek ochładzania przez ścianki skrzynki ognioszczelnej. Praktyczna realizacja układu do pomiaru ciśnienia wybuchu zawiera cztery niezależne kanały pomiarowe. W przypadku skrzynki o regularnych kształtach cztery czujniki ciśnienia zostały umieszczone w bezpośrednim sąsiedztwie. Rys. 4 faktycznie przedstawia cztery niezależne przebiegi czasowe. Taki wynik pomiaru ciśnienia wybuchu dowodzi poprawności konstrukcji układu pomiarowego.

Przeprowadzając próby dla różnych mieszanin gazowych, można zaobserwować różnice w uzyskanych przebiegach. Obserwowanymi zmianami są: czas narastania i wartość maksymalna. Szybkość rozładowania dla tej samej konfiguracji układu (dla tej samej skrzynki ognioszczelnej) jest taka sama - złącze ognioszczelne jest wciąż takie samo. Można zaobserwować jedynie wpływ wartości energetycznej (opalowej) mieszanki gazowej na uzyskane wartości maksymalne.

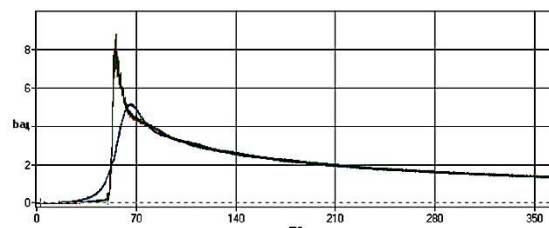
Badania silników indukcyjnych w osłonie ognioszczelnej są przeprowadzane w Laboratorium<sup>1</sup> wg powtarzalnej procedury badawczej. Wpływ konstrukcji wewnętrznej na wielkość ciśnienia wybuchu był dyskutowany w innych publikacjach [2]. Na podstawie wieloletnich doświadczeń, jako najistotniejsze punkty pomiaru ciśnienia wybrano punkty w obydwu tarczach łożyskowych oraz w płycie pośredniej pomiędzy skrzynką przyłączową, a komorą stojana. Rozmieszczenie czujników ciśnienia oraz punktów zapłonu w typowym silniku przedstawia Rys. 5.



Rys. 5. Przekrój silnika indukcyjnego w osłonie ognioszczelnej. Zaznaczone czujniki ciśnienia i punkt zapłonu (CELMA INDUKTA SA w Cieszyńcu).

Wymagane normą PN-EN 60079-1 badanie maszyn elektrycznych wirujących obliguje do przeprowadzania badań zarówno w przypadku silnika w spoczynku, jak i w przypadku silnika w ruchu[3]. Wewnętrzna konstrukcja silnika, warunki wewnętrznej wentylacji silnika oraz wydzielanie się ciepła na skutek przepływu prądu podczas pracy silnika prowadzą do przebiegów ciśnień wybuchu znacznie odbiegających od przebiegów uzyskiwanych podczas badań skrzynki o regularnych kształtach.

Najbardziej niekorzystne (dające najwyższe wartości ciśnienia wybuchu) jest badanie silnika w ruchu. Takie badanie skutkuje powstawaniem turbulencji, podgrzewaniem mieszaniny w szczelinie powietrznej silnika oraz powstawaniem lokalnych różnic ciśnień na skutek pracy wewnętrznego układu przewietrzającego. Taką sytuację przedstawia Rys. 6.



Rys. 6. Ciśnienia wybuchu we wnętrzu silnika. Badanie silnika w ruchu

Najbardziej istotne elementy konstrukcji silnika, które mają wpływ na propagację ciśnienia wybuchu, określono jako[2]:

- dwie objętości oddzielone stosunkowo długą cylindryczną szczeliną;
- praca wewnętrznego układu chłodzenia powodująca lokalne różnice ciśnień;
- turbulencja w obszarach zabudowy przewietrzników (wentylatorów) wewnętrznych;
- turbulencja w szczelinie powietrznej silnika;
- podgrzewanie przestrzeni w szczelinie powietrznej na skutek przepływu prądu w uzwojeniach wirnika oraz stojana;
- dodatkowa wolna objętość pod skrzynką przyłączową umieszczona za przewężeniem.

Osobnym zagadnieniem jest wpływ temperatury na propagację, a tym samym na wielkość maksymalnego ciśnienia wybuchu. Źródła literaturowe potwierdzają wzrost ciśnienia wybuchu wraz ze spadkiem temperatury [2].

Niniejsze opracowanie nie obejmuje zagadnień związanych z próbami zapłonu silników budowy wzmocnionej (Exe), ale należy zauważyć, że wewnętrzna konstrukcja silników budowy wzmocnionej i silników w osłonie ognioszczelnej jest podobna [4].

### 3. Wewnętrzne układy przewietrzające silników

Układy chłodzenia silników indukcyjnych ujęte są w normie PN-EN 60034-6:1999[5]. Norma ta wprowadza oznaczenie kodowe (kod IC) oraz klasyfikację układów chłodzenia. Odnośnie silników w wykonaniu przeciwwybuchowym, wykorzystywane są jedynie 3 wykonania: chłodzenie za pomocą wentylatora wewnętrznego i zewnętrznego, chłodzenie za pomocą jedynie wentylatora zewnętrznego oraz chłodzenie za pomocą dodatkowej chłodnicy powietrze - powietrze. W przypadku silników górniczych oraz silników do ciężkich warunków przemysłowych (np. do pracy w zapyleniu) stosowane są również silniki z zewnętrznym płaszczem wodnym (chłodzenie wodne), ale niniejsze opracowanie

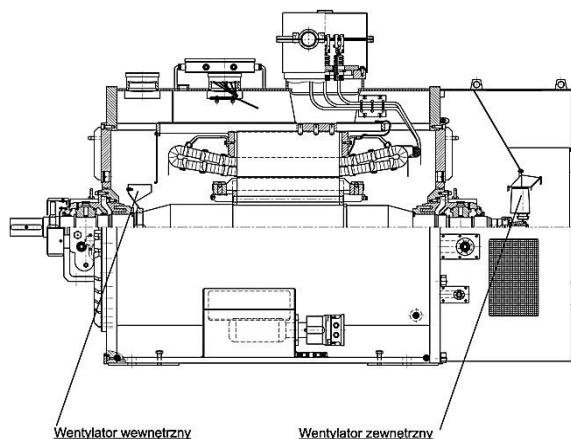
<sup>1</sup> Laboratorium Systemów i Zabezpieczeń Przeciwwybuchowych oraz Eksplozometrii - laboratorium własne GIG KD „BARBARA”

ogranicza się jedynie do wnętrza silnika, więc chłodzenie zewnętrzne nie jest rozważane.

Na potrzeby niniejszego opracowania omówione zostaną jedynie układy przewietrzające najbardziej typowe dla silników w wykonaniu ognioszczelnym (Exd) tzn. chłodzenie za pomocą wentylatora wewnętrznego oraz chłodzenie bez wewnętrznego wentylatora.

### Chłodzenie za pomocą wentylatora wewnętrznego

Ten rodzaj chłodzenia stosowany jest w przypadku maszyn o dużych mocach, w których uzwojenia pracują w zakresie temperatur bliskich dopuszczalnym. W przypadku silników górniczych, ten rodzaj wewnętrznego przewietrzania stosowany jest w przypadku silników chłodzonych wodą. Schematycznie silnik z takim układem chłodzenia przedstawiono poniżej (Rys. 7).



Rys. 7. Silnik z chłodzeniem wymuszonym wentylatorem wewnętrznym (ZME „EMIT” w Żychlinie)

Układ ten charakteryzuje się zabudową wentylatora wewnętrznego (promieniowego lub osiowego) wymuszającego wewnętrzny przepływ powietrza w kierunku przeciwnym (zazwyczaj) do kierunku przepływu powietrza wymuszonego przez wentylator (przewietrznik) zewnętrzny.

Producenci silników, dążąc do zwiększenia sprawności silników starają się ograniczać straty wentylacyjne, więc taki rodzaj chłodzenia korzystny jest w przypadku maszyn o dużych mocach lub w przypadku maszyn specjalistycznych. Poprawność funkcjonowania tego typu chłodzenia wymaga specjalnych kanałów chłodzących pozwalających powietrzu opływać stojan silnika.

### Chłodzenie bez wewnętrznego wentylatora dodatkowego

Najbardziej rozpowszechnioną konstrukcją wewnętrzną silników jest układ bez dodatkowego wentylatora przewietrzającego. Wymagany przepływ powietrza wewnętrznego realizowany jest za pomocą skrzydełek wirnika. Wirnik aluminiowy na skutek zastosowania technologii zalewania aluminium wyposażony jest w wystające na ok. 2-7 cm aluminiowe skrzydełka rozmieszczone symetrycznie na obwodzie wirnika (patrz Rys. 3). Takie rozwiązania ma na celu przede wszystkim chłodzenie najbardziej narażonych na przegrzewanie pierścieni zwierających klatkę wirnika. W przypadku wirników prętowanych, wykonywanych z prętów miedzianych lub mosiężnych przyspawanych do pierścieni zwierających stosowane jest podobne rozwiązanie - przy czym liczba wystających skrzydełek jest równa liczbie prętów klatki wirnika. Dodatkowym efektem (poza chłodzeniem klatki) zastosowania skrzydełek jest wymuszenie przepływu powietrza chłodzącego czoła uzwojeń stojana wystające poza pakiet.

Najczęściej spotykanym rozwiązaniem wśród polskich producentów jest umieszczenie skrzydełek w kierunku prostopadłym do pierścieni zwierających. W przypadku silników małej mocy, w miejsce skrzydełek stosowane są cylindryczne nadlewki.

Umieszczenie skrzydełek po obu stronach wirnika powoduje powstanie dwóch niezależnych obszarów przewietrzania.

Mimo, iż jest to najbardziej powszechne rozwiązanie chłodzenia zarówno pierścieni zwierających, jak i czoł uzwojeń, nie jest ono opisane żadnymi ogólnymi regułami. Każda z fabryk silników stosuje własne rozwiązania konstrukcyjne. Dobór liczby i wymiarów skrzydełek wynika z własnych doświadczeń i nie jest poparty badaniami modelowymi. Po części powodem jest pomijalnie mały wkład konstrukcji skrzydełek na straty wentylacyjne. Przy małych objętościach wewnętrznych, niewielkim sprężu przewietrznika oraz stosunkowo mało zwartej zabudowie obszarów po obydwu stronach wirnika, takie rozwiązanie nie przenosi się na dodatkowe obciążenie silnika.

Jednak z punktu widzenia własności propagacji wybuchu takie rozwiązanie wydaje się być bardzo istotne. Nawet niewielkie podniesienie ciśnienia (lokalnie) w połączeniu z powstawa-

niem turbulencji zwiększa prędkość spalania mieszaniny gazowej i prowadzi do zwiększenia podatności na przeniesienie się wybuchu na wzdłuż szczeliny powietrznej silnika drugą stroną wirnika.

#### 4. Turbulencja

Turbulencja jest właściwością przepływu płynu. W teorii turbulencji rozróżnia się trzy podstawowe skale (rozmiary) zawirowań turbulentnych. Największą skalę mają zawirowania wzbudzone naprężeniami stycznymi powstałymi przy przepływie. Mają one rozmiar charakterystyczny dla źródła wzbudzenia turbulencji (warunki początkowe). Wiry rozpadają się następnie na mniejsze wskutek lepkości, która powstaje na brzegach cienkich strużek uformowanych w przepływie. Silnik elektryczny, ze względu na swą konstrukcję, zasadę działania i metodę chłodzenia jest źródłem turbulencji.

#### Całkowa skala turbulencji

Skala całkowita nazywana także makroskalą turbulencji jest zdefiniowana następująco:

$$l = \int_0^{\infty} R_x dx \quad (1)$$

gdzie  $R_x$  jest współczynnikiem korelacji (autokorelacji) przestrzennej i określa związek między turbulentną pulsacją prędkości  $u'_0$  w punkcie o współrzędnej  $x_0$  i pulsacją prędkości  $u'_x$  w odległości  $x$  od tego punktu w tej samej chwili i wyrażony jest zależnością:

$$R = \frac{u'_0 u'_x}{\sqrt{u'^2_0 u'^2_x}} \quad (2)$$

Fizycznie skala całkowita jest miarą średniej średnicy największych zawirowań i od niej zależy dyfuzja masy, pędu i energii. Jest także identyfikowana z prandtlowską drogą mieszania.

#### Mikroskala Kołomogorowa

Mikroskala Kołomogorowa  $\eta_K$  jest rozmiarem najmniejszych zawirowań. Charakteryzuje turbulentną dyssypację energii kinetycznej małych wirów, która zamienia się w ciepło. Skala długości Kołomogorowa wyrażona jest jako funkcja lepkości kinematycznej  $\nu$  oraz średniej szybkości dyssypacji energii kinetycznej turbulencji  $\varepsilon$ .

$$\eta_K = \left( \frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{1/4} \quad (3)$$

przy czym

$$\varepsilon = \frac{k^2}{l} \quad [4]$$

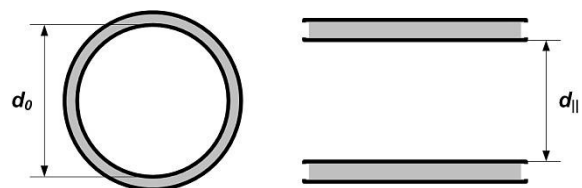
gdzie  $k$  jest energią kinetyczną.

W przypadku, gdy w płynie powstanie turbulencja, zostanie zapoczątkowana przez duże różnokierunkowe wiry, które następnie na skutek rozrywania zawirowań przejdą w turbulencję mikroskopową.

#### 5. Szczelina powietrzna silnika, a „quenchingdistance”

##### Średnica gasząca ( $d_0$ ) oraz prześwit gaszący ( $d_1(l)$ )

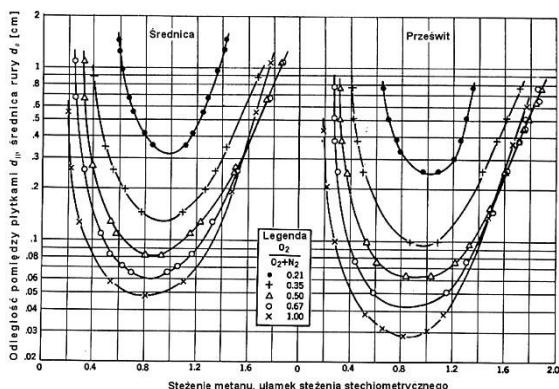
Pojęcie „quenchingdistance”, czyli średnicy gaszącej (prześwitu gaszącego) zostało wprowadzone przez Bernarda Lewisa i Güntera von Elbe[6]. Badając własności spalania oraz parametry wybuchowości gazów, obliczyli oraz potwierdzili eksperymentalnie istnienie granicznej wartości średnicy rury ( $d_0$ ) oraz prześwitu pomiędzy płytkami ( $d_1(l)$ ), poniżej której wybuch się nie może rozwinąć. Pierwsze zastosowanie tej właściwości miało miejsce w zabezpieczeniach palników gazowych, chociaż jak sami autorzy uważają, w sposób spontaniczny prześwit gaszący zastosował sir HumphryDavy w swojej bezpiecznej górniczej lampie wskaźnikowej.



Rys. 8. Średnica gasząca  $d_0$  oraz prześwit gaszący  $d_1(l)$

Quenchingdistance jest zależny od składu mieszaniny, ciśnienia, ilości gazu obojętnego (balastu), temperatury itp. Wartości odległości i średnic gaszących dla metanu, przy różnych składach przedstawia Rys. 9.





Rys. 9. Średnice gaszące  $d_0$  oraz prześwit gaszący  $d_1(l)$  dla mieszanin metan-tlen-azot w temperaturze pokojowej i przy ciśnieniu atmosferycznym [6]

### Szczelina powietrzna silnika

Konstrukcja silnika indukcyjnego wymaga, aby w celu zapewnienia jak najlepszych parametrów elektrycznych, szczelina powietrza była jak najmniejsza oraz równomierna na całym obwodzie. Również kształt żłobków wirnika i stojana ma istotny wpływ na jednorodność pola elektromagnetycznego w szczelinie powietrznej. Typowe wielkości szczelin powietrznych dla popularnych silników podano w *Tablica 1*. Jak można zauważyć, szczelina powietrzna silnika jest mniejsza od prześwitu gaszącego. Należy jednak zwrócić uwagę na niejednorodność powierzchni zewnętrznej wirnika i powierzchni wewnętrznej pakietu stojana. Rowki w pakiecie stojana powiększają lokalnie prześwit o ok. 3-5 mm. Powstają w ten sposób kanały wypełnione burzliwą mieszaniną gazową.

### Przeniesienie płomienia przez szczelinę powietrzną silnika

Uwzględniając dotychczasowe rozważania odnośnie turbulencji oraz prześwitu gaszącego z przebiegami ciśnień wybuchu można odnaleźć analogię. Wybuch mieszanki gazowej w silniku indukcyjnym łatwiej przenosi się na drugą

stronę wirnika wzdłuż szczeliny powietrznej gdy silnik badany jest w ruchu. Oczywiście spotykane są sytuacje, gdy nawet badając silnik w spoczynku dochodzi do przeniesienia się wybuchu, ale dotyczy to raczej większych maszyn. Istotne wtedy są wymiary żłobków pakietu stojana i stopień ich wypełnienia oraz konstrukcja wirnika. W przypadku wirników prętowanych, analogiczne rowki wzdłuż pakietu powstają na zewnętrznej powierzchni wirnika.

Można założyć, że w przypadku skonstruowania silnika z idealnie wypełnionymi rowkami, w którym na całym obwodzie wirnika szczelina powietrzna byłaby mniejsza od 1 mm (bez lokalnych powiększeń na skutek kształtu rowków) - w silniku takim uzyskano by niższe wartości ciśnienia wybuchu. Założenie to wymaga potwierdzenia dodatkowymi badaniami.

### 6. Podsumowanie

Jako główny czynnik decydujący o propagacji wybuchu we wnętrzu silników indukcyjnych należy przyjąć powstającą turbulencję. Ruch obrotowy wirnika prowadzi do powstawania turbulencji dużej skali w przestrzeniach przyległych do tarcz łożyskowych (wolne objętości po obu stronach wirnika) oraz do powstawania turbulencji małej skali wzdłuż szczeliny powietrznej silnika. Turbulencja małej skali jest odpowiedzialna za zwiększenie burzliwości czoła płomienia, a tym samym za łatwe przenoszenie się wybuchu na drugą stronę wirnika.

W przypadku silników indukcyjnych parametry konstrukcyjne decydujące o propagacji ciśnienia we wnętrzu można uszeregować od najważniejszych do mniej istotnych:

- turbulencja w tym wielkość prędkości obrotowej i średnica wirnika,
- kształt komory ognioszczelnej silnika (przeżenia),
- nadciśnienia na skutek pracy układu przewietrzającego (również w przypadku silników bez wewnętrznego wentylatora),

Tablica 1. Szczeliny powietrzne i średnice wirników popularnych silników (CELMA INDUKTA w Cieszynie)

Silnik	Średnica wirnika [mm]	Szczelina powietrzna [mm]	Długość szczeliny powietrznej [mm]
cSg 200 L2A	187,4	1,3	160
EcSg 225 M6	268,8	0,6	220
cSgb 250 M2	226,8	1,5	190
cSg 280 S8	323,8	0,6	180

- podgrzewanie mieszaniny wybuchowej w szczelinie powietrznej silnika.

Dalszym badaniom należy poddać ostatni czynnik. Badania można by przeprowadzić wprowadzając silniki w ruch za pomocą zewnętrznego napędu i porównując uzyskane rezultaty (ciśnienia wybuchu, nadciśnienia przewietrzania) z wynikami uzyskanymi podczas pracy silnika z napędem własnym.

## 7. Literatura

- [1]. K. Kordylewski, Spalanie paliwa, Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1999.
- [2]. M. Górny, „Ciśnienie wybuchu we wnętrzu ognioszczelnych silników indukcyjnych w niskich temperaturach,” *Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne*, nr 80, pp. 99-105, 2008.
- [3]. Polska Norma, PN-EN 60079-1 "Urządzenia elektryczne w przestrzeniach zagrożonych wybuchem. Część 1 - Osłony Ognioszczelne", Polski Komitet Normalizacyjny, 2011.
- [4]. M. Górny, „Wysokonapięciowe silniki przeciwwybuchowe budowy wzmocnionej,” *Zeszyty*

*Problemowe - Maszyny Elektryczne*, nr 95, pp. 77-82, 2012.

[5]. Polska Norma, PN-EN 60034-6:1999 "Maszyny elektryczne wirujące -- Sposoby chłodzenia (kod IC)", Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 1999.

[6]. G. von Elbe i B. Lewis, *Combustion Flames and Explosion of Gases*, Academic Press Inc., 1961.

## O autorze

dr inż. Michał Górny  
Główny Instytut Górnictwa  
Kopalnia Doświadczalna „BARBARA”  
tel. (32) 32 46 550, fax. (32) 32 24 931  
e-mail. m.gorny@gig.eu, www.kdbex.eu

## Podziękowanie

Autor pragnie podziękować producentom silników w wykonaniu przeciwwybuchowym (ZME „EMIT”, CELMA INDUKTA SA, DFME „DAMEL”) za udostępnienie materiałów pomocnych w opracowaniu publikacji.