

**Michał Górny**

Główny Instytut Górnictwa, Kopalnia Doświadczalna „BARBARA”, Mikołów

## CIŚNIENIE WYBUCHU WE WNETRZU OGNIOSZCZELNYCH SILNIKÓW INDUKCYJNYCH W NISKICH TEMPERATURACH

### EXPLOSION PRESSURE INSIDE FLAMEPROOF ELECTRICAL MOTORS IN LOW TEMPERATURES

**Abstract:** This paper presents results of research of low temperature effect for explosion pressure value inside electrical squirrel-cage induction motors. Research were carried out in accordance with PN-EN 60079-1 (IEC 60079-1) for motor mechanical size “250”, “280” and “315” in temperatures +20°C, -20°C, -30°C, -40°C and -50°C. Gas mixtures appropriate for subgroup IIB and IIC (ethylene, hydrogen + methane, hydrogen with air) were applied.

Obtained results were related to results of analogous tests carried out for simply construction flameproof enclosure. The analyze of critical elements for values of obtained explosion pressures was made (geometry and dimensions, run of the motor, turbulences and local compression of gas mixture).

#### 1. Wstęp

Kiedy w 1889 roku zaprezentowano elektryczny silnik indukcyjny, nie sądzono, że będzie tak rozpowszechnioną konstrukcją. Powszeczność nie ominęła również wykonania przeciwwybuchowych. Wśród całej gamy urządzeń elektrycznych w wykonaniu przeciwwybuchowym, pośród aparatury rozdzielczej i łączeniowej, urządzeń automatyki, opraw oświetleniowych, to właśnie silnik indukcyjny jest najbardziej rozpowszechnioną konstrukcją.

Przy czym, jak to często ma miejsce, prostota konstrukcji nie idzie w parze z prostotą opisu własności fizycznych.

Najstarszą i jednocześnie najbardziej typową konstrukcją przeciwwybuchową jest osłona ognioszczelna. Przypominając za właściwą normą [1]:

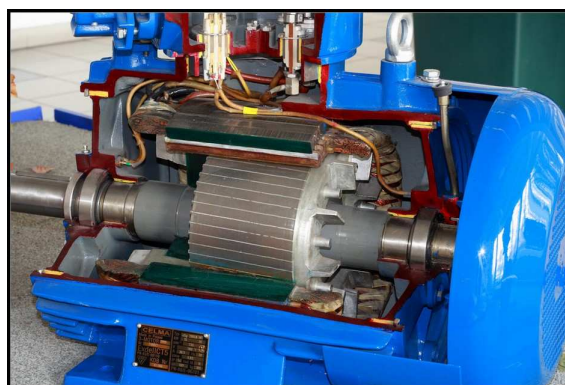
*Osłona ognioszczelna jest to osłona, w której umieszczone są elementy mogące wywołać zapłon atmosfery wybuchowej i która może wytrzymać ciśnienie powstające podczas wewnętrznego wybuchu mieszaniny wybuchowej oraz która zapobiega przeniesieniu się wybuchu do atmosfery wybuchowej, otaczającej osłonę.*

Czyli inaczej mówiąc osłona ognioszczelna zabezpiecza przed wydostaniem się wybuchu z wnętrza urządzenia na zewnątrz.

Mieszaniny wybuchowe charakteryzowane są za pomocą wyznaczonej doświadczalnie wartości MESG.

Maksymalny doświadczalny bezpieczny prześwit definiowany jest jako [1]:

*maksymalny prześwit złącza o długości 25 mm, który zapobiega przeniesieniu się wybuchu w trakcie 10 prób przeprowadzonych w warunkach określonych w IEC 60079-1-1[2]*



*Fot. 1. Przekrój nowoczesnego silnika w osłonie ognioszczelnej*

Za pomocą parametru MESG zrealizowano podział mieszanin gazowych na poszczególne grupy wybuchowości: IIA, IIB oraz IIC. Dla mieszanin gazowych grupy wybuchowości IIA  $MESG > 0.9$  mm, dla mieszanin grupy IIC  $MESG < 0.5$  mm. Podczas badań potwierdzających odpowiedni poziom bezpieczeństwa przeciwwybuchowego (badań typu przeprowadzanych przez stację badawczą wg odpowiednich norm) określane jest maksymalne ciśnienie wybuchu. Metodyka badawcza narzuca odpowiednie składy mieszanin testowych (różne dla różnych zastosowań urządzenia).

W przypadku urządzeń górniczych badania przeprowadza się odpowiednią mieszanką me-

tanu z powietrzem, dla urządzeń przeznaczonych do pracy w przemyśle chemicznym stosuje się natomiast mieszanki propanu, etylenu, wodoru oraz acetylenu z powietrzem.

Ze względu na charakter badania typu, metodyka stosowana w normach nakłada obowiązek stosowania marginesów bezpieczeństwa. Maksymalne ciśnienie wybuchu wyznaczone jest w wyniku szeregu prób (wybuchów) ze zmienną konfiguracją układu badawczego. Parametrami zmiennymi są: skład mieszanki gazowej, punkt inicjacji wybuchu, punkty pomiarowe ciśnienia oraz w przypadku maszyn wirujących warunki pracy urządzenia (badania w ruchu i w spoczynku). Mimo iż mechanizm fizyczny propagacji wybuchu mieszanki gazowej w określonej prostej objętości jest dobrze znany, to badania obudów o skomplikowanych kształtach oraz nieokreślonych parametrach termicznych mogą dawać wyniki odbiegające od przewidywań obliczeniowych. Mimo iż maszyny elektryczne wirujące są urządzeniami o stosunkowo prostej konstrukcji mechanicznej kumulują się w nich wszystkie parametry wpływające na przebieg wybuchu. Można w nich zaobserwować: przeżęcia, ruch i turbulencje mieszaniny wybuchowej, różnice temperatur mieszaniny wybuchowej, lokalne różnice ciśnień mieszaniny wybuchowej, odbijanie się fali ciśnieniowej.

Największy wpływ na ilość czynnika palnego a tym samym na wartość ciśnienia wybuchu danej mieszaniny ma ciśnienie wstępne oraz temperatura mieszaniny.

W niniejszej pracy przedstawiono pewne aspekty propagacji ciśnienia wybuchu w temperaturach poniżej typowych temperatur eksploatacji.

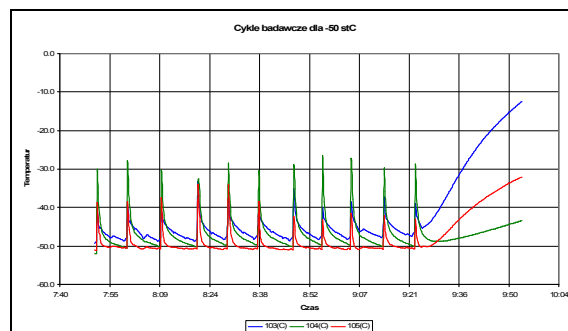
## 2. Realizacja stanowiska badawczego

Głównym elementem stanowiska jest komora niskich temperatur, pozwalająca uzyskać temperatury ujemne w zakresie do  $-55^{\circ}\text{C}$ . Komora ma budowę modułową, z wyodrębnioną częścią agregatową oraz częścią użytkową (badawczą). Konstrukcja części badawczej wykonanej z lekkich płyt oraz otwory dekompresyjne zapewniają odpowiedni poziom bezpieczeństwa w przypadku niekontrolowanego wybuchu, np. w wyniku rozprzestrzenienia się eksplozji poza wnętrze badanego obiektu (silnika lub skrzynki testowej).

Biorąc pod uwagę właściwości fizyczne gazów, należało zapewnić, aby mieszanka gazowa wprowadzana do wnętrza badanej obudowy

(skrzynka testowa lub silnik) miała temperaturę zbliżoną do temperatury badanej budowy. W przeciwnym przypadku, schłodzenie mieszanki gazowej we wnętrzu badanej obudowy doprowadziłoby do powstawania lokalnego obniżenia ciśnienia (w skrajnym przypadku podciśnienia) i rozrzedzenia mieszanki testowej gazem zassanym z atmosfery otaczającej (z wnętrza części badawczej komory chłodniczej).

Zastosowano więc odpowiednią chłodnicę gazu zapewniającą ochłodzenie mieszanki gazowej, do temperatury próby, zanim trafiała ona do wnętrza badanej obudowy. Temperatury dopływającej mieszanki gazowej oraz badanego obiektu były kontrolowane przez odpowiednio skonstruowane czujniki (termorezystory Pt100). Czujniki były umieszczane: w strumieniu dopływającego gazu w punkcie wejścia do badanego obiektu, w ścianie badanej obudowy (od strony wewnętrznej) oraz w punkcie wyjścia mieszanki gazowej. Zastosowanie dwóch czujników temperatury gazu pozwalało kontrolować proces przedmuchiwania badanej obudowy po każdej próbie (patrz poniższy wykres).



Rys. 1. Temperatury charakterystyczne podczas badań

## 3. Ciśnienie wybuchu w osłonie ognioszczelnej o prostej konstrukcji

Pomiary przeprowadzono dla skrzynki ognioszczelnej o objętości ok.  $8\text{ dm}^3$  (wewnętrzne wymiary skrzynki:  $220 \times 220 \times 170\text{ mm}$ ).

Pomiary przeprowadzono stosując 4 czujniki piezoelektryczne wraz z odpowiednim układem rejestrującym. Wybór obudowy o takim kształcie pozwalał na powtarzalną symulację pracy szczelin ognioszczelnych - złącza ognioszczelne zapewniają częściowe obniżenie ciśnienia wybuchu.



Fot. 2. Skrzynka testowa. Widoczne czujniki ciśnienia

Badania przeprowadzono dla mieszanek gazowych w stężeniach stechiometrycznych:

- metan: 9.8% CH<sub>4</sub> + powietrze;
- propan: 4.6% C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> + powietrze;
- etylen: 8% C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> + powietrze;
- wodór: 31% H<sub>2</sub> + powietrze;
- acetylen: 14% C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> + powietrze.

Próby przeprowadzono w temperaturach: +20°C, -20°C, -30°C, -40°C oraz -50°C, za wyjątkiem acetyleny, dla którego przeprowadzono badania w temperaturach +20°C, -20°C oraz -50°C. Dla każdej temperatury przeprowadzono po dwie próby (wybuchy). Zastosowane czujniki temperatury pozwalały identyfikować zapłon oraz zapewniały dostateczny czas przedmuchiwania (wymiany mieszanki po próbie) zapewniający powtórne schłodzenie skrzynki testowej. Czujniki umieszczone były obok siebie (pomiar w tej samej ścianie obudowy), więc jako wynik pomiaru przyjmowano wartość średnią ze wskazań poszczególnych czujników (n=4):

$$p_{\tau} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} p_{\tau i} \quad (1)$$

Dla każdej mieszanki gazowej obliczono również współczynnik przyrostu ciśnienia wybuchu dla każdej temperatury w odniesieniu do wartości ciśnienia w temperaturze +20°C.

$$\Delta p = \frac{p_{\tau}}{p_{\tau=+20}} \quad (2)$$

Poniżej przedstawiono zbiorcze wyniki prób dla poszczególnych mieszanek gazowych.

Tablica 1 Wyniki prób dla mieszaniny metanu

Ciśnienie wybuchu [bar]	Temperatura [°C]	Δp
6.14	20.00	1.00
6.43	-20.00	1.05
6.52	-30.00	1.06
7.10	-40.00	1.16
7.92	-50.00	<b>1.29</b>

Tablica 2 Wyniki prób dla mieszaniny propanu

Ciśnienie wybuchu [bar]	Temperatura [°C]	Δp
6.87	20.00	1.00
7.46	-20.00	1.09
7.85	-30.00	1.14
8.25	-40.00	1.20
9.12	-50.00	<b>1.33</b>

Tablica 3 Wyniki prób dla mieszaniny etylenu

Ciśnienie wybuchu [bar]	Temperatura [°C]	Δp
7.42	20.00	1.00
8.27	-20.00	1.11
8.72	-30.00	1.17
9.04	-40.00	1.22
9.93	-50.00	<b>1.34</b>

Tablica 4 Wyniki prób dla mieszaniny wodoru

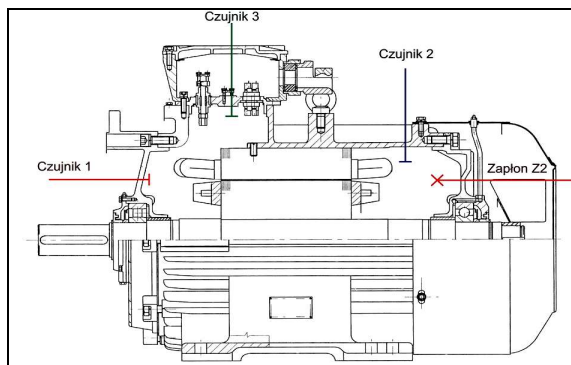
Ciśnienie wybuchu [bar]	Temperatura [°C]	Δp
6.46	20.00	1.00
7.46	-20.00	1.15
7.83	-30.00	1.21
8.20	-40.00	1.27
8.80	-50.00	<b>1.36</b>

Tablica 5 Wyniki prób dla mieszaniny acetyleny

Ciśnienie wybuchu [bar]	Temperatura [°C]	Δp
8.49	20.00	1.00
9.44	-20.00	1.11
-	-30.00	-
-	-40.00	-
11.62	-50.00	<b>1.37</b>

#### 4. Ciśnienie wybuchu we wnętrzu osłony ognioszczelnej o skomplikowanej konstrukcji

Jak już wspomniano najczęściej spotykanym urządzeniem o nieregularnym kształcie przestrzeni wewnętrznej jest maszyna elektryczna wirująca (np. silnik elektryczny).

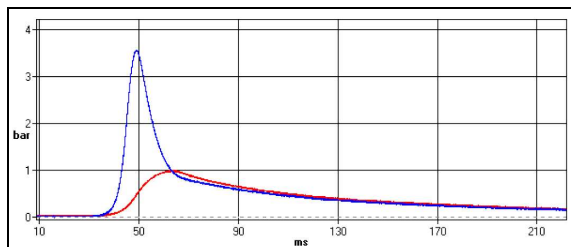


Rys. 2. Silnik w przekroju, uwidocznione czujniki ciśnienia i punkt zapłonu

Na złożoność propagacji fali ciśnieniowej składają się następujące czynniki:

- dwie wolne przestrzenie oddzielone cylindryczną szczeliną powietrzną silnika o skrajnych wymiarach (stosunkowo mały prześwit przy znacznej długości);
- ruch mieszanki gazowej na skutek pracy silnika
- lokalne zmiany ciśnienia we wnętrzu silnika powstające na skutek pracy silnika i wewnętrznego przewietrzania;
- różnice temperatur mieszanki gazowej w wyniku nagrzewania się uzwojenia silnika, zwłaszcza uzwojenia wirnika, które dodatkowo istotnie podgrzewa mieszaninę gazową w szczelinie powietrznej silnika;
- konstrukcja silnika umożliwiającą odbijanie się fali ciśnienia.

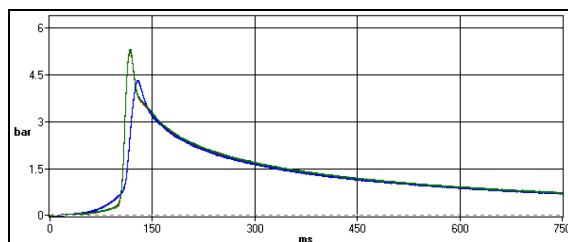
W dobrze skonstruowanym silniku grupy I (przeznaczonym do pracy w górnictwie), podczas badań w spoczynku nie uzyskuje się niebezpiecznie wysokich wartości ciśnień. Poniżej przedstawiono najbardziej typowy przebieg ciśnień podczas wybuchu mieszanki metanowej.



Rys. 3. Typowy przebieg ciśnienia we wnętrzu dobrze skonstruowanego silnika

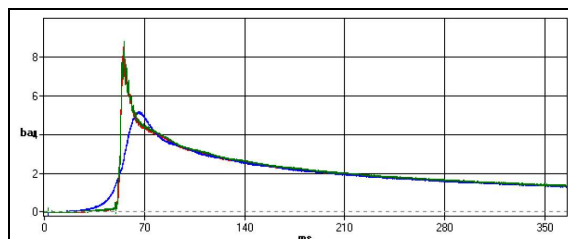
Czujniki ciśnienia umieszczono w tarczach łożyskowych po stronie DE (napędowej) oraz NDE (przeciwnapędowej). W powyższym przykładzie wybuch po jednej stronie wirnika nie przenosi się na drugą stronę. Obserwowany

przebieg ciśnienia po drugiej stronie wirnika nie jest efektem działania termicznego, a jedynie skutkiem działania fali. Kształt przebiegu ciśnienia ulega zmianie gdy zastosowana mieszanina gazowa charakteryzuje się mniejszą wartością MESG (np. w miejsce metanu zastosowany będzie etylen). Poniżej przykład przebiegu potwierdzającego „przeniesienie się” wybuchu na drugą stronę wirnika.



Rys. 4. Przebiegi ciśnień w silniku w przypadku rozprzestrzenienia się wybuchu na drugą stronę wirnika

Jak można zaobserwować, wartości ciśnień zarejestrowane przez czujniki po obydwu stronach są zbliżone. Przebiegi ciśnień ulegają dalszej modyfikacji gdy badania przeprowadza się w ruchu (silnik pracuje). W wyniku pracy wewnętrznego przewietrznika mieszanina gazowa po jednej stronie wirnika jest sprężona do wyższego ciśnienia, ponadto w wyniku różnicy ciśnień następuje intensywny przepływ mieszanki gazowej przez szczelinę powietrzną silnika. Dodatkowo przepływający w szczelinie gaz jest ogrzewany przez pracujące uzwojenia. Wszystkie te parametry (podniesienie ciśnienia, przepływ mieszaniny oraz wzrost temperatury) powodują obniżenie wartości parametru MESG mieszaniny gazowej. Przebiegi ciśnień podczas wybuchu we wnętrzu pracującego silnika przedstawia poniższy rysunek:



Rys. 5. Przebieg ciśnień wybuchu we wnętrzu silnika w ruchu

Wybuch został zainicjowany po jednej stronie wirnika, a następnie przeniósł się do wstępnie sprężonej mieszaniny po drugiej stronie wirnika - uzyskując wyższe wartości ciśnień.

Zarejestrowane wartości ciśnień wybuchu dla silników poszczególnych wielkości zebrano w poniższych tablicach:

Tablica 6. Wyniki prób dla silnika w. m. „250”

Ciśnienie wybuchu [bar]			Temperatura [°C]	Δp		
Etylen (C2H4)	Gaz Palny (H2/CH4)	Wodór (H2)		Etylen (C2H4)	Gaz Palny (H2/CH4)	Wodór (H2)
4.97	4.63	5.88	20.00	1.00	1.00	1.00
6.19	6.00	6.95	-20.00	1.25	1.30	1.18
6.29	5.67	7.43	-30.00	1.27	1.22	1.26
6.36	6.30	8.83	-40.00	1.28	1.36	1.50
13.71	6.59	10.33	-50.00	<b>2.76</b>	<b>1.42</b>	<b>1.76</b>

Tablica 7. Wyniki prób dla silnika w. m. „250” w ruchu

Ciśnienie wybuchu [bar]			Temperatura [°C]	Δp		
Etylen (C2H4)	Gaz Palny (H2/CH4)	Wodór (H2)		Etylen (C2H4)	Gaz Palny (H2/CH4)	Wodór (H2)
5.22	6.83	6.94	20.00	1.00	1.00	1.00
15.94	8.26	9.16	-50.00	<b>3.05</b>	<b>1.21</b>	<b>1.32</b>

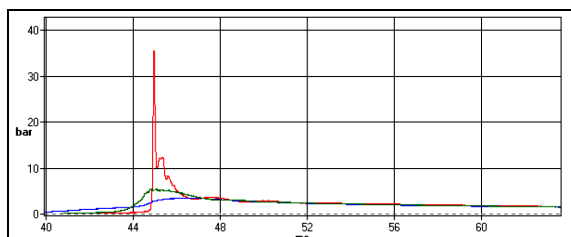
Tablica 8. Wyniki prób dla silnika w. m. „280”

Ciśnienie wybuchu [bar]			Temperatura [°C]	Δp		
Etylen (C2H4)	Gaz Palny (H2/CH4)	Wodór (H2)		Etylen (C2H4)	Gaz Palny (H2/CH4)	Wodór (H2)
5.89	5.45	11.21	20.00	1.00	1.00	1.00
6.87	6.33	13.31	-20.00	1.17	1.16	1.19
14.61	7.22	12.84	-30.00	<b>2.48</b>	1.32	1.15
12.51	6.71	17.24	-40.00	2.12	1.23	1.54
13.72	7.48	18.49	-50.00	<b>2.33</b>	<b>1.37</b>	<b>1.65</b>

Tablica 9. Wyniki prób dla silnika w. m. „315”

Ciśnienie wybuchu [bar]			Temperatura [°C]	Δp		
Etylen (C2H4)	Gaz Palny (H2/CH4)	Wodór (H2)		Etylen (C2H4)	Gaz Palny (H2/CH4)	Wodór (H2)
8.65	5.95	5.90	20.00	1.00	1.00	1.00
9.40	8.14	7.10	-20.00	<b>1.09</b>	1.37	1.20
5.45	8.79	8.34	-30.00	0.63	1.48	1.41
5.78	9.22	9.44	-40.00	0.67	1.55	<b>1.60</b>
6.00	9.51	8.88	-50.00	<b>0.69</b>	<b>1.60</b>	<b>1.51</b>

Najbardziej niekorzystną konstrukcją silnika (powodującą powstawanie najwyższych wartości ciśnień) są silniki posiadające dodatkową wolną objętość pod skrzynką przyłączową. W takich konstrukcjach ciśnienie o wysokiej wartości dodatkowo spręża mieszaninę gazową pod skrzynką przyłączową powodując osiągnięcie lokalnie bardzo dużych wartości ciśnienia w warunkach wybuchu. Taką sytuację obrazuje poniższy przykład:



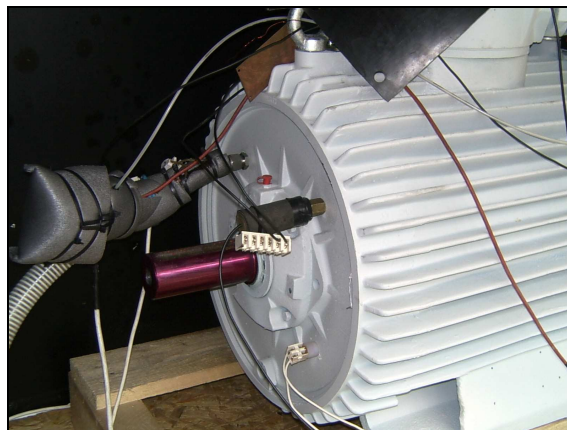
Rys. 6. Przebieg ciśnienia wybuchu we wnętrzu silnika z dodatkową wolną objętością

Podsumowując powyższe rozważania można stwierdzić, że nawet pozornie niewielkie zmiany parametrów mieszaniny wybuchowej we wnętrzu silnika mogą doprowadzić do skrajnych różnic w uzyskiwanych ciśnieniach wybuchu. Należy więc spodziewać się, że obniżenie temperatury mieszaniny gazowej ma istotny wpływ na wartości otrzymywanych ciśnień wybuchu. Można założyć, że zmiany te powinny być dużo większe niż zmiany obserwowane podczas badań skrzynki o regularnych kształtach.

## 5. Ciśnienie wybuchu we wnętrzu silnika indukcyjnego w temperaturach poniżej $-20^{\circ}\text{C}$

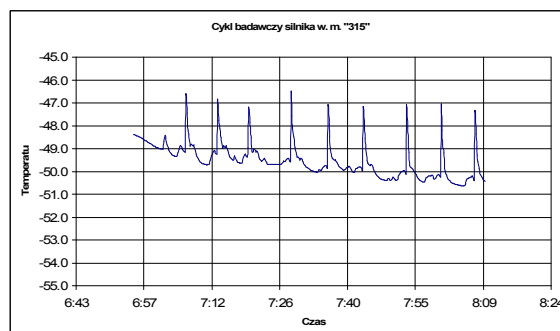
Badania w niskich temperaturach postanowiono przeprowadzić dla silników wielkości mechanicznych „250”, „280” oraz „315”. Wielkości te są najbardziej typowe i rozpowszechnione w przemyśle. Podobnie jak podczas badań skrzynki testowej, próby przeprowadzono dla temperatur  $+20^{\circ}\text{C}$ ,  $-20^{\circ}\text{C}$ ,  $-30^{\circ}\text{C}$ ,  $-40^{\circ}\text{C}$  oraz  $-50^{\circ}\text{C}$ . Badania ograniczono do prób silników w spoczynku. Próby w ruchu przeprowadzono jedynie dla najniższych temperatur ( $-50^{\circ}\text{C}$ ). Silniki przygotowano do prób korzystając z wcześniejszych doświadczeń badawczych. Czujniki ciśnienia umieszczono w tarczach łożyskowych po stronie DE (napędowej) i NDE (przeciwnapędowej) oraz w płycie pośredniej pod skrzynką przyłą-

czową. Punkt zapłonu umieszczono w tarczy łożyskowej po stronie NDE (patrz rys. 2).



Fot. 3. Badany silnik - rozmieszczenie elementów w tarczy po stronie DE

Korzystając z doświadczeń podczas badania skrzynki, silnik zaopatrzono w czujniki temperatury (Pt100) umożliwiające określenie temperatur: mieszanki gazowej na wlocie do silnika, mieszanki gazowej na wylocie z silnika oraz kadłuba silnika. Parametry temperaturowe były rejestrowane na bieżąco podczas prób.



Rys. 7. Cykl termiczny podczas badań w temperaturze  $-50^{\circ}\text{C}$

Powyższy wykres obrazuje cykl termiczny podczas badania silnika. Gwałtowne wzrosty wartości obrazują poszczególne próby wybuchowe.

Badania silników przeprowadzono w szerszym zakresie, tzn. stosując następujące mieszanki gazowe:

- etylen: 8%  $\text{C}_2\text{H}_4$  + powietrze;
- wodór: 31%  $\text{H}_2$  + powietrze;
- gaz palny 24% ( $85\% \text{H}_2 + 15\% \text{CH}_4$ ) + powietrze.

Stosowanie „gazu palnego” wymagane jest przez Polską Normę [1] podczas badania urządzeń podgrupy IIB (etylen) w przypadku

powstawania spiętrzeń ciśnienia. W silnikach elektrycznych spiętrzenia są zjawiskiem normalnym.



Fot. 4. Silnik w komorze niskich temperatur

## 6. Podsumowanie wyników badań

Podczas badań przeprowadzono ponad 250 prób wybuchowych. Analizując wyniki tych prób można stwierdzić:

- przyrosty ciśnień w badanych silnikach były znacząco większe od odpowiadających im przyrostów ciśnień w skrzynce testowej o prostej konstrukcji;
- zaobserwowano powtarzającą się sytuację większych ciśnień wybuchu dla mieszaniny etylenu (podgrupa wybuchowości IIB) niż dla mieszanin wodoru (podgrupa IIC) - tablice 6, 7, 8, 9;
- największe przyrosty ciśnienia uzyskano podczas badań silnika w ruchu - tablica 7;
- stosowana metodyka badań (przeprowadzenie kolejnych prób w serii) narzuca pewne ograniczenia. Analizując wyniki badań silników w. m. „280” i „315” (tablice 8 i 9) można zaobserwować maksymalną wartość ciśnienia wybuchu dla temperatur pośrednich:  $-30^{\circ}\text{C}$  w przypadku silnika w. m. „280” oraz  $-20^{\circ}\text{C}$  i  $-30^{\circ}\text{C}$  w przypadku silnika w. m. „315”. Najprawdopodobniej spowodowane jest to osadzaniem się szronu (para wodna powstaje w procesie spalania) wzdłuż szczeliny powietrznej silnika i ograniczanie możliwości propagacji wybuchu wzdłuż wirnika silnika. Pozwala to zauważyć, że możliwe jest takie rozwiązanie konstrukcji wewnętrznej silnika, które ograniczy niekorzystne zjawiska podczas propagacji wybuchu mieszaniny gazowej.

W celu potwierdzenia poprawności zastosowanych metod badawczych przeprowadzono

również badanie silnika wielkości mechanicznej „630” (620 kW, 6000V, 9000kg).



Fot. 5. Silnik 620 kW (9000 kg) w komorze badawczej

Uzyskanie prawidłowego rozkładu temperatur badanego silnika (dostateczne schłodzenie) monitorowane było za pomocą kamery termowizyjnej:



Fot. 6. Rozkład temperatur silnika bezpośrednio po otwarciu komory badawczej

## 7. Literatura

- [1]. Polska Norma PN-EN 60079-1:2006 *Urządzenia elektryczne w przestrzeniach zagrożonych wybuchem -- Część 1: Osłony ognioszczelne "d"*.
- [2]. Norma międzynarodowa IEC 60079-1-1 *Electrical apparatus for explosive gas atmospheres - Part 1-1: Flameproof enclosures 'd' - Method of test for ascertainment of maximum experimental safe gap.*

## Autor

mgr inż. Michał Górny  
Zakład Bezpieczeństwa Przeciwybuchowego,  
Kopalnia Doświadczalna „BARBARA”  
Głównego Instytutu Górnictwa  
43-190 Mikołów, ul. Podleska 72  
tel. +48 (32) 32 46 556  
e-mail: [m.gorny@gig.eu](mailto:m.gorny@gig.eu)