

**Łukasz Surowy**

**Zakład Bezpieczeństwa Przeciwybuchowego Głównego Instytutu Górnictwa  
Kopalnia Doświadczalna „Barbara”, Mikołów**

## **BADANIA KONSTRUKCJI UKŁADU IZOLACYJNEGO STOJANA SILNIKÓW WYSOKONAPIĘCIOWYCH BUDOWY WZMOCNIONEJ Z WYKORZYSTANIEM MIESZANIN WYBUCHOWYCH**

### **TESTS OF THE STATOR WINDINGS OF HIGH-VOLTAGE INCREASED SAFETY MOTORS WITH EXPLOSION TEST MIXTURES**

**Streszczenie:** Wysokonapięciowe silniki indukcyjne są szeroko stosowane w przemyśle w miejscach zaklasyfikowanych do stref zagrożenia wybuchem. Wymaga to jednak zastosowania właściwie dobranych środków zabezpieczających tak, aby zapobiec ewentualnemu zapłonowi atmosfery wybuchowej. Prowadzone w latach 90-tych ubiegłego wieku badania potwierdziły, że istnieje realne ryzyko powstania iskrzenia w obrębie stojana w dowolnym momencie podczas pracy silnika. Typowym zjawiskiem jest powstawanie krótkotrwałych rozładowań z czoł uzwojeń stojana silnika określanych często mianem „korony”. Ryzyko powstania iskrzenia we wnętrzu silnika wzrasta wraz z możliwością występowania przepięć w sieci zasilającej, starzenia izolacji lub powstawania zanieczyszczeń na powierzchni uzwojeń stojana. Jednym z typowych rozwiązań jest zastosowanie budowy wzmocnionej Exe charakteryzującej się zwiększonym bezpieczeństwem wobec możliwości powstania nadmiernych temperatur, łuków i iskier zarówno w warunkach normalnej pracy, jak i w określonych stanach pracy uznanych za nieprawidłowe. W niniejszym artykule opisano czynniki mające wpływ na powstawanie niebezpiecznych zjawisk podczas pracy wysokonapięciowych silników budowy wzmocnionej. Zaprezentowano również możliwości dotyczące prowadzenia badań i oceny silników budowy wzmocnionej. Niniejszy artykuł opisuje wyniki pierwszych, przeprowadzonych w Polsce badań układów izolacyjnych silników zasilanych napięciem >1kV z wykorzystaniem najnowszych metod badawczych.

**Abstract:** High voltage induction motors are widely used in the industry in zones classified as potentially explosive areas. However, the use of motors to drive machinery in hazardous areas requires the appropriate protection means to prevent the possible ignition of an explosive atmosphere. Conducted in the 90-ies of the last century, research has confirmed that there is a real risk of sparking at any time during motor operation. A common phenomena is the formation of short-term discharges in the motor stator windings often described as the corona discharge. The risk of sparking increases with the possibility of occurrence of over voltage at the mains and the aging of insulation or the formation of impurities on the surface of the stator windings. One of the common solutions is Exe type of protection which is characterized by increased security against the excessive temperatures, arcs and sparks, both in normal operation and in certain operating conditions deemed as irregular. This paper describes the factors influencing the formation of dangerous phenomena during high voltage motors operation. It also presents opportunities for research and construction assessment of Exe motors. This article describes the high-voltage motor's insulation systems test results which are the first tests conducted in Poland using the latest testing methods.

**Słowa kluczowe:** budowa wzmocniona, ATEX, IECEx, bezpieczeństwo, silnik wysokonapięciowy, bezpieczeństwo przeciwybuchowe

**Keywords:** increased safety, ATEX, IECEx, safety, high voltage motor, explosion proof safety

### **Wstęp**

Wysokonapięciowe, indukcyjne silniki budowy wzmocnionej to urządzenia napędowe, w których zastosowano dodatkowe środki konstrukcyjne zapewniające zwiększone bezpieczeństwo wobec możliwości powstania nadmiernych temperatur, łuków i iskier. Konstrukcja silnika powinna zapewniać wysoki poziom zabezpieczenia podczas rozruchu, w warunkach

normalnej pracy, jak i w określonych stanach pracy uznanych za nieprawidłowe. „Dodatkowe środki” zostały opisane szczegółowo w normie zharmonizowanej PN-EN 60079-7 Atmosfery wybuchowe Część 7: Zabezpieczenie urządzeń za pomocą budowy wzmocnionej „e”. [1]

W latach 80-tych i 90-tych ubiegłego wieku zarejestrowano kilka wypadków związanych z za-

stosowaniem w przestrzeniach zagrożonych wybuchem silników budowy wzmocnionej zasilanych napięciem  $>1\text{kV}$ . W wyniku badań przyczyn wypadków stwierdzono, że w urządzeniach wystąpiły źródła iskier elektrycznych zarówno w pakietach stojana, jak i wirnikach feralnych silników [3]. Doprowadziło to do sformułowania wniosku, że wymagania zawarte w obowiązujących wówczas normach były niewystarczające.

Prowadzone w latach 90-tych ubiegłego wieku przez producentów badania [2] potwierdziły, że istnieje realne ryzyko powstania iskrzenia w obrębie stojana w dowolnym momencie podczas pracy silnika. Ryzyko to wzrasta wraz z możliwością występowania przepięć w sieci zasilającej, starzenia lub powstawania zanieczyszczeń na powierzchni uzwojeń stojana. Wynikiem prac badawczych było wprowadzenie obowiązkowych ocen ryzyka związanych z stosowaniem silników budowy wzmocnionej mających pracować w strefach zagrożenia wybuchem [1].

Wspomniana wyżej norma zawiera nowe podejście do problemu. Opracowaną wcześniej ocenę ryzyka traktuje się obecnie, jako informacyjną, a nie normatywną. Podejście takie jest związane z faktem, że ocena ryzyka zawiera elementy związane ze środowiskiem pracy, w jakim silnik został zabudowany, na co producent nie ma wpływu. Praktyka pokazuje również, że niejednokrotnie nie ma możliwości sprecyzowania parametrów środowiskowych przed zamówieniem silnika. Dodatkowo warunki środowiskowe mogą ulegać dużym zmianom na przestrzeni lat użytkowania silnika.

Nowe podejście zakłada również przeprowadzenie, w ramach badania typu WE, szeregu badań w mieszaninach wybuchowych. Jako jedną z metod badawczych przyjęto zaproponowaną przez niemiecki instytut PTB metodykę badania za pomocą impulsów wysokonapięciowych w obecności mieszanin wybuchowych [3]. W niniejszym opracowaniu przedstawiono możliwości dotyczące prowadzenia badań i oceny silników budowy wzmocnionej ze szczególnym uwzględnieniem konstrukcji układów izolacyjnych. Niniejszy artykuł opisuje również wyniki pierwszych przeprowadzonych w Polsce badań układów izolacyjnych silników zasilanych napięciem  $>1\text{kV}$  z wykorzystaniem najnowszych metod badawczych.

## Źródła zapłonu – zjawisko ulotu z czoł uzwojeń

Typowe źródła zapłonu, jakie należy wziąć pod uwagę podczas oceny konstrukcji silnika budowy wzmocnionej to:

- wysokie temperatury wewnętrznych i zewnętrznych części silnika,
- tarcie mechaniczne,
- możliwość wystąpienia iskrzenia w szczelinie powietrznej,
- możliwość wystąpienia iskrzenia na powierzchni wirnika,
- możliwość wystąpienia iskrzenia na powierzchni uzwojeń stojana.

Metody analizy i badań większości typowych źródeł zapłonu, jak powstawanie wysokich temperatur w wyniku pracy urządzenia lub utknięcia (czas  $t_E$ ) oraz konstrukcji wirnika klatkowego zostały już szeroko omówione w poprzednim artykule [4].

Nowym elementem stanowiącym obiekt rozważań w trakcie badań jest konstrukcja układu izolacyjnego stojana. Podczas pracy maszyn wirujących następuje zjawisko jonizacji molekuł powietrza w polu elektrycznym pomiędzy uzwojeniami stojana silnika. Jonizacja powietrza powoduje pogarszanie się własności materiałów izolacyjnych. W takim przypadku na powierzchni uzwojeń stojana silnika mogą powstawać krótkotrwałe rozładowania będące wynikiem dużej różnicy występujących tam potencjałów. Zjawisko to najczęściej występuje podczas pracy silnika [2]. Widoczne wówczas iskrzenie jest często określane mianem „korony” (rys. 1).



Rys. 1. Wylądowanie w uzwojeniu silnika - zjawisko "korony" (źródło: Chroma System Solution)

W celu zapobiegania powstawaniu wspomnianych rozładowań, stosuje się następujące rozwiązania konstrukcyjne:

- zastosowanie taśm półprzewodzących, których zadaniem jest zmniejszenie różnic potencjałów występujących pomiędzy sąsiednimi punktami uzwojeń,
- stosowanie zwiększonych odstępów izolacyjnych pomiędzy:
  - fazami,
  - zaciskami przyłączowymi, a końcówkami zwojów,
  - elementami pomiarowymi (czujniki temperatury), a uzwojeniami,
  - uzwojeniami, a obudową,
- prowadzenie przewodów łączących uzwojenia z zaciskami przyłączowymi w odpowiedniej odległości od obudowy silnika.

Dodatkowo cewki uzwojeń zasilanych napięciem > 1kV powinny być nasycane żywicą lub powinny być wykonane z bezkorpusowych, impregnowanych metodą próżniową zezwojów. Dodatkowo silnik powinien być wyposażony w grzałki antykondensacyjne, stanowiące zabezpieczenie przed zawilgoceniem, co z kolei eliminuje możliwość powstawania miejsc o wysokich gradientach potencjałów. Jednocześnie konstrukcja silnika powinna umożliwiać zastosowanie dodatkowych środków zapewniających, że w trakcie rozruchu, w jego wnętrzu nie występuje mieszanina wybuchowa. Typowym środkiem zapobiegawczym występowaniu mieszaniny jest stosowanie przewietrzania przed rozruchem lub stosowanie systemu detekcji gazu we wnętrzu urządzenia. Dopuszczalne są również inne rozwiązania – niemniej jednak wszystkie dodatkowe środki powinny być szczegółowo opisane w instrukcjach obsługi i zatwierdzone przez jednostkę badawczą. Należy tutaj koniecznie podkreślić, że za zastosowanie dodatkowych środków np. w postaci przewietrzania silnika przed rozruchem odpowiedzialny jest użytkownik, który powinien postępować wg zaleceń norm PN-EN 60079-14 oraz PN-EN 60079-17. Zgodnie z wymaganiami PN-EN 60079-7 użytkownik jest zobowiązany do zastosowania dodatkowych środków ochronnych w sytuacji, gdy ocena ryzyka możliwości wyładowań z uzwojeń stojana wykaże taką konieczność (współczynnik ryzyka zapłonu >6). Obliczony na podstawie wspomnianej oceny współczynnik ryzyka zapłonu jest sumą współczynników wynikających z warunków pracy takich, jak napięcie znamionowe, częstotliwość rozruchów, częstotliwości przeglądów, stopnia ochrony IP czy też warunków środowiskowych (tablica 1).

Pomimo zastosowania tak dalece idących środków bezpieczeństwa poprawność wymienionych powyżej rozwiązań konstrukcyjnych układu izolacyjnego stojana musi zostać potwierdzona badaniami w mieszaninach wybuchowych.

Tablica 1. - Ocena możliwości wyładowań z uzwojenia stojana - Współczynniki ryzyka zapłonu [3]

Parametr	Wartość	Współczynnik
Napięcie znamionowe	> 6,6 kV do 11 kV	4
	> 3,3 kV do 6,6 kV	2
	> 1 kV do 3,3 kV	0
Średnia częstotliwość rozruchów podczas pracy	> 1 / godzinę	3
	> 1 / dzień	2
	> 1 / tydzień	1
	< 1 / tydzień	0
Czas pomiędzy szczegółowymi przeglądami (patrz IEC 60079-17, tablica 1, typ D)	> 10 lat	3
	> 5 do 10 lat	2
	> 2 do 5 lat	1
	< 2 lat	0
Stopień ochrony (IP)	< IP44 <sup>a</sup>	3
	IP44 i IP54	2
	IP55	1
	> IP55	0
Warunki środowiskowe	Bardzo brudno i wilgotno <sup>b</sup>	4
	Warunki zewnętrzne w strefie przybrzeżnej	3
	Inne warunki zewnętrzne	2
	Czyste warunki zewnętrzne	1
	Czyste i suche warunki zewnętrzne	0
a) wyłącznie w środowisku czystym i regularnie obsługiwane przez przeszkolony personel		
b) umiejscowienie „bardzo brudno i wilgotno” dotyczy tych miejsc, które mogą być zalane, lub obejmują otwarte pokłady lokalizacji przybrzeżnych.		

## Badania

W zależności od ustaleń, pomiędzy jednostką badawczą, a producentem, badania mogą być prowadzone na jednej z czterech rodzajów próbek:

- kompletnym stojanie,
- kompletnym stojanie wraz z obudową silnika,

- kompletnym silniku,
- częściowo uzwojonym stojanie.

Wybrana próbka powinna w jak najwierniejszy sposób reprezentować kompletny stojan silnika z jego charakterystycznymi elementami konstrukcyjnymi jak wstępne naprężenie, umocowanie, obwiązanie, impregnacja, wykładka zabezpieczająca przed ulotem z czoł uzwojeń itp. W ramach pierwszego badania układ izolacyjny wraz z przewodami przyłączeniowymi umieszcza się w mieszaninie wybuchowej, a następnie poddaje się działaniu napięcia o wartości równej 1,5-krotnej wartości znamionowego napięcia międzyprzewodowego przez czas, co najmniej 3 min. Szybkość narastania napięcia nie powinna przekraczać 0,5kV/s. Składy badawczych mieszanin wybuchowych podano w tabelicy 2.

Tablica 2. Wybuchowe mieszaniny badawcze

Grupa urządzenia	Mieszanina badawcza z powietrzem [v/v]
IIC	(21 ± 5) % wodoru
IIB	(7,8 ± 1) % etylenu
IIA	(5,25 ± 0,5) % propanu

Zgodnie z normą PN-EN 60079-7 układ izolacyjny i przewody przyłączeniowe stojana należy dodatkowo poddać działaniu dziesięciu impulsów napięciowych spełniających poniższe kryteria [3]. Badania należy przeprowadzić w mieszaninach wybuchowych wg tablicy 2.

- wartość impulsu powinna być większa od trzykrotnej wartości maksymalnego napięcia fazowego z tolerancją ±3%,
- czas narastania impulsu powinien zawierać się w przedziale  $0,2\mu\text{s} \div 0,5\mu\text{s}$ ,
- czas osiągnięcia połowy wartości impulsu (w rozładowaniu) powinien wynosić, co najmniej 20 $\mu\text{s}$ .

Napięcie powinno być przyłożone pomiędzy fazami oraz pomiędzy każdą z faz a masą.

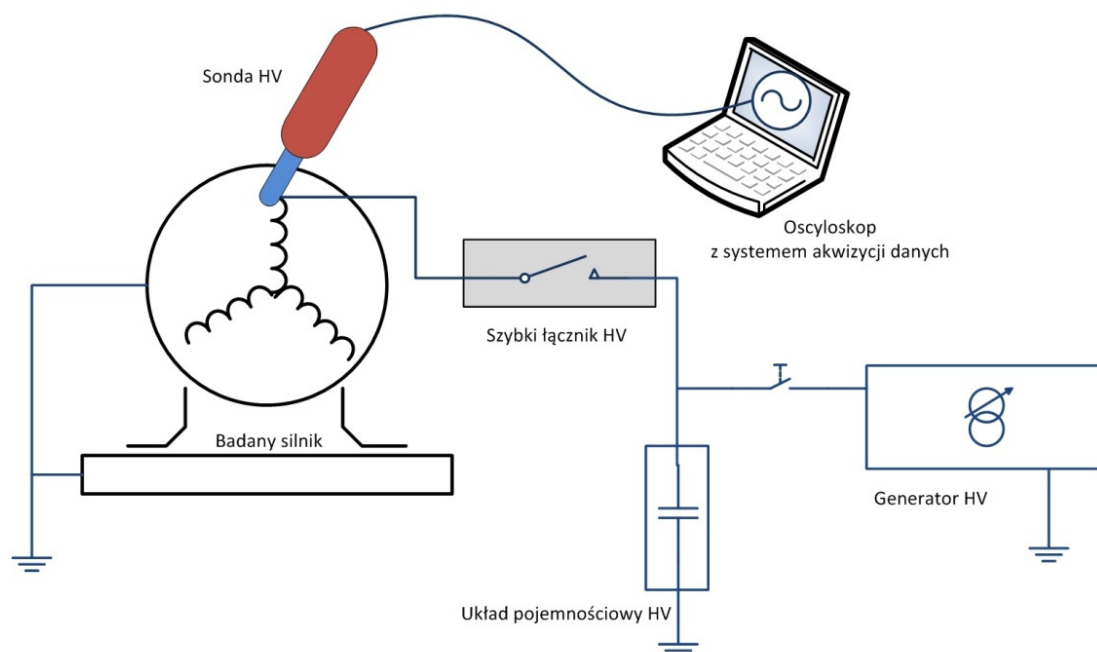
Na potrzeby niniejszego opracowania przyjęto następujące oznaczenia:

$U_p$  – wartość szczytowa impulsu [kV],

$t_n$  – czas narastania impulsu,

$t_{0,5}$  – czas opadania – czas wymagany do osiągnięcia połowy wartości impulsu  $U_p$  podczas rozładowania impulsu napięciowego przez uzwojenia stojana silnika.

Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat poglądowy stanowiska do badania układów izolacyjnych stojana silnika budowy wzmocnionej metodą impulsów HV

Podstawę stanowiska stanowił generator wysokich napięć (rys. 3).



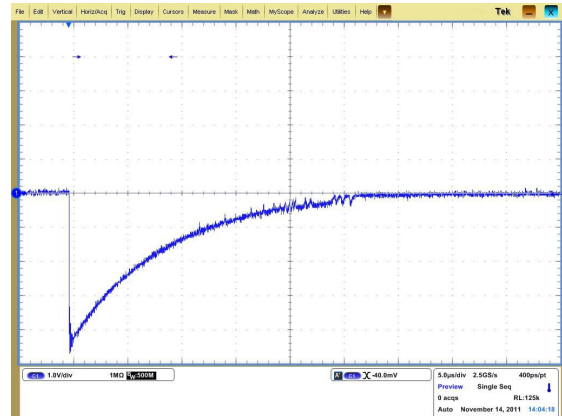
Rys. 3. Generator wysokich napięć wraz z woltomierzem HV prod. PHENIX Technologies

Z uwagi na konieczność uzyskania impulsów o dużej wartości napięcia i szybkim czasie narastania ( $0,2\mu\text{s} \div 0,5\mu\text{s}$ ) jako element gromadzący energię do wygenerowania impulsu zastosowano układ pojemnościowy HV. Do pomiaru parametrów impulsu napięciowego zastosowano szybki oscyloskop wyposażony dodatkowo w sondę wysokonapięciową (rys. 4).



Rys. 4. Układ pojemnościowy HV wraz z sondą pomiarową

Pierwsze uruchomienie stanowiska przeprowadzono z wykorzystaniem rezystora dużej mocy zastosowanego w zastępstwie uzwojeń stojana silnika. Miało to na celu potwierdzenie możliwości kształtowania impulsu oraz możliwości pomiarowych zastosowanego układu. Uzyskany impuls HV przedstawiono na rysunku 5. Pomimo, że zaobserwowany czas osiągnięcia połowy wartości napięcia był znacznie krótszy od przyjętych założeń postanowiono kontynuować badania z użyciem silników modelowych celem sprawdzenia układu na próbie rzeczywistej.



Rys. 5. Impuls napięciowy 4,8kV,  $t_n=0,44\mu\text{s}$ ,  $t_{0,5}=6\mu\text{s}$

Wstępne badania przeprowadzono z wykorzystaniem modeli silników małej mocy bez użycia mieszanin wybuchowych. Badania wstępne wykonano na modelowym stanowisku badawczym z wykorzystaniem silnika małej mocy zasilanych napięciami  $< 1\text{kV}$  oraz  $< 3,3\text{kV}$  obejmujące:

- badanie możliwości uzyskania impulsu odpowiedniej wartości na modelu rzeczywistym,
- badanie możliwości kształtowania impulsu (czas narastania i opadania),
- badanie powtarzalności zadawanych uderzeń napięciowych,
- sprawdzenie możliwości pomiarowych.

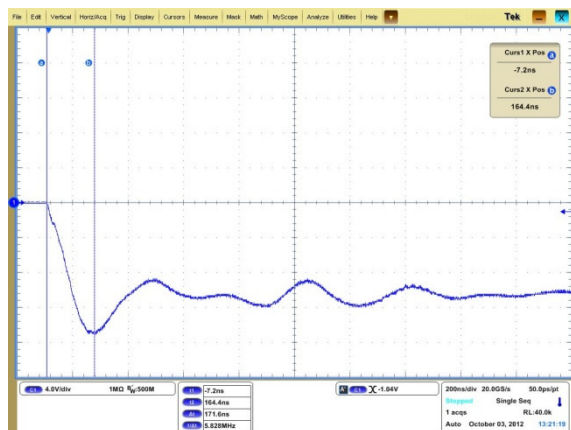
Obiecujące wyniki badań, a przede wszystkim możliwość kształtowania impulsów badawczych stanowiły podstawę do rozpoczęcia badań z wykorzystaniem mieszanin wybuchowych.

Do badań w mieszaninach wybuchowych użyto silnik 1200kW zasilany napięciem 6kV (50Hz) produkcji ZME „EMIT” w Żychlinie. Widok czołowy uzwojeń silnika przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Izolacja uzwojeń badanego silnika





Rys. 7. Uzyskany impuls HV podczas badania modelowego silnika

Jak wynika z rysunku 7 uzyskano impuls o poziomie napięcia 11,2kV, czasie narastania  $t_n=0,16\mu s$ . Podczas analizy pełnego przebiegu impulsu stwierdzono, że uzyskany czas opadania  $t_{0,5}$  jest dłuższy od  $20\mu s$ .

Badania prowadzono w obecności mieszaniny propanowej 5,25% propanu + powietrze reprezentatywnej dla podgrupy IIA. W trakcie badań nie wystąpiło zapalenie mieszaniny. Następnie powtórzono cykl badań z wykorzystaniem mieszaniny wybuchowej reprezentatywnej dla podgrupy IIB wg tablicy 2. Podczas piątej próby nastąpiło zapalenie mieszaniny wybuchowej (7,8% etylenu + powietrze). Część stanowiska badawczego wraz z obiektem badań po wybuchu mieszaniny pokazano na rys. 8.



Rys. 8. silnik 1200kW / 6kV produkcji ZME „EMIT” w Żychlinie na stanowisku badawczym

## Wnioski

Prowadzenie badań w mieszaninach gazowych jest jedyną skuteczną metodą potwierdzenia poprawności zastosowania przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych. Budowa i wdrożenie stanowiska badawczego silników wysokonapię-

ciowych budowy wzmocnionej, w Kopalni Doświadczalnej „Barbara”, zapewni możliwość prowadzenia badań w Polsce. Istotną korzyścią jest możliwość potwierdzenia zgodności silników z wymaganiami dyrektywy 94/9/WE (ATEX) lub schematu IECEx. Pozytywny, poparty certyfikatem wynik badań konstrukcji zarówno wirnika, jak i stojana silnika daje pewność bezpiecznego stosowania urządzenia w przestrzeniach zagrożonych wybuchem. Należy przy tym pamiętać, że zaprezentowana metoda badawcza nie wyczerpuje zagadnienia badań silnika. Jest to jedynie element całego szeregu badań, jakie powinny być prowadzone w przypadku oceny konstrukcji silników budowy wzmocnionej np.: badania konstrukcji wirników klatkowych w obecności mieszanin wybuchowych [4].

Dodatkowo użytkowanie silników budowy wzmocnionej zasilanych napięciem HV wymaga zaangażowania zarówno ze strony producenta, jak i użytkownika. Użytkownicy końcowi są zobowiązani do przeprowadzania ocen ryzyka i zastosowania dodatkowych środków (np. wstępnego przewietrzania) w przypadku, gdy wynikowy współczynnik ryzyka przekroczy wartość krytyczną.

## Literatura

- [1]. „Possible risks associated with the use of explosion-protected motors types Ex ‘N’ and Ex ‘e’” – Operational Circular OC 498/12 (REV) and associated Information Document, Health and Safety Executive, Field Operations Division, 1995.
- [2]. “Report on an investigation by UK manufacturers of large electrical machines into problems of electrical motors of type Exe and ExN operating in potentially explosive atmospheres”, London UK: Rotating Electrical Machines Association, 1990.
- [3]. PN-EN 60079-7:2010 Atmosfery wybuchowe Część 7: Zabezpieczenie urządzeń za pomocą budowy wzmocnionej „e”.
- [4]. „Wysokonapięciowe silniki przeciwwybuchowe budowy wzmocnionej”, Michał Górny, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, Nr 2/2012 (95).