

Marek SKOCZYLAS  
Andrzej WÓJCIK  
Grzegorz PAŚCIAK  
Zbigniew ŚWIERZYNA

## ROZWIĄZANIE TECHNOLOGICZNE WYTWARZANIA PRZEPUSTOWEGO IZOLATORA TURBOGENERATOROWEGO

**Streszczenie** *W artykule przedstawiono rozwiązanie konstrukcyjne i technologiczne wykonania izolatora przepustowego do turbogeneratora elektroenergetycznego średniego napięcia. Rozwiązanie konstrukcyjne wykonano w oparciu o epoksydowy kompozyt lany. Izolatory te będą tańsze od ich importowanych odpowiedników. Wytworzenie izolatorów wymagało wykonania badań materiałowych parametrów elektrycznych, mechanicznych i cieplnych mających na celu optymalny dobór konstrukcji izolatorów oraz zagwarantowanie technologiczności wykonania przy wdrożeniu rozwiązania do produkcji. Przedstawiono zalety i wady tej technologii. Zaprezentowano wyniki badań materiałowych wykonanych na modelach i próbnym izolatorach. Stwierdzono przydatność wybranych materiałów i technologii do zastosowania w przewidywanej produkcji.*

**Słowa kluczowe:** *izolator przepustowy, technologia produkcji, kompozycje epoksydowe*

---

**inż. Marek SKOCZYLAS, mgr inż. Andrzej WÓJCIK**  
mareks@nti.com.pl, biuro@nti.com.pl

NTI Sp. z o. o.  
Nowoczesne Techniki Instalacyjne, Głogów

**dr inż. Grzegorz PAŚCIAK, mgr inż. Zbigniew ŚWIERZYNA**  
pasciak@iel.wroc.pl, zs@iel.wroc.pl

Instytut Elektrotechniki  
Oddział Technologii  
i Materiałoznawstwa Elektrotechnicznego we Wrocławiu.

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 261, 2013

## 1. WSTĘP

---

Dotychczas stosowane przepustowe izolatory do turbogeneratorów elektroenergetycznych charakteryzują się wysoką awaryjnością w warunkach narażeń występujących przy ich eksploatacji. Dlatego przystąpiono do opracowania nowego rozwiązania sposobu wytwarzania takich izolatorów. Izolatory te powinny spełniać wymagania norm dotyczących izolatorów przepustowych oraz potencjalnego odbiorcy. Przy modyfikacji konstrukcji mającej na celu wyeliminowanie chłodzenia wodorowego wykorzystano materiały kompozytowe. Izolatory takie będą odporne na udary mechaniczne i zabrudzenia oraz stosunkowo lżejsze niż z izolacją porcelanową. Opracowane izolatory będą miały nowoczesną polimerową zewnętrzną izolację elektryczną spełniającą wymagania dotyczące izolatorów przepustowych dla generatorów elektroenergetycznych. Wdrożenie technologii nastąpi w firmie NTI Sp. z o. o. działającej na rynku wyrobów elektroizolacyjnych. Przewiduje się, że opracowane izolatory będą tańsze od ich importowanych odpowiedników.

Przedstawiono konstrukcję oraz technologię wykonania izolatorów przepustowych dla elektroenergetycznych turbogeneratorów średniego napięcia, spełniających funkcję izolowania elektrycznego elementów turbogeneratorskiego, jak również funkcję przeprowadzenia toru prądowego z wnętrza generatora do sieci elektroenergetycznej. Rozwiązanie konstrukcyjne wykonano w oparciu o epoksydowy kompozyt lany. Wytworzenie prototypów izolatorów wymaga wykonania szeregu badań materiałowych parametrów: elektrycznych, mechanicznych, cieplnych i środowiskowych mających na celu optymalny dobór konstrukcji izolatorów oraz zagwarantowanie technologiczności wykonania, co jest bardzo istotne przy wdrożeniu rozwiązania do produkcji na skalę techniczną. Opracowane izolatory powinny spełniać wymagania norm dotyczących izolatorów przepustowych (EN 60034, IEC 60137). Obecnie w Polsce stosuje się przepustowe izolatory generatorowe oferowane przez zagranicznych dostawców, a w asortymencie takich izolatorów brak jest odpowiedniej oferty krajowej. Produkowany przez ENERGOSERWIS SA izolator przepustowy generatora ma budowę nieodpowiadającą wymaganiom potencjalnego odbiorcy; ALSTOM Power Systems Sp. z o. o. Stosowane dotychczas izolatory ceramiczne charakteryzują się dużą awaryjnością, szczególnie w warunkach narażeń występujących podczas zjawisk charakterystycznych dla eksploatacji turbogeneratorów, powodujących ekstremalne podwyższenie poziomu narażeń.

Firma NTI Sp. z o. o., wdrażając technologię produkcji elementów izolatorów kompozytowych uzyskała doświadczenie technologiczne w tym zakresie. Także doświadczenie Instytutu Elektrotechniki w zakresie technologii przetwórstwa

materiałów stosowanych do produkcji izolatorów kompozytowych jest pomocne przy wdrażaniu nowoczesnych konstrukcji izolatorów kompozytowych w tej firmie. Izolatory z zewnętrzną częścią polimerową są zdecydowanie lepszym i nowocześniejszym rozwiązaniem w porównaniu do izolatorów porcelanowych, ponieważ ich zastosowanie:

- uodparnia izolator na zabrudzenia (wysoka hydrofobowość i zdolność samooczyszczania elastomeru eliminująca konieczność okresowego czyszczenia izolatora),
- zmniejsza ciężar izolatora, co ułatwia jego transport i montaż, szczególnie przy stosunkowo dużych izolatorach turbogeneratorów,
- zmniejsza ryzyko mechanicznego uszkodzenia izolatora podczas jego transportu, montażu i eksploatacji.

Opracowane izolatory mają polimerowe elektroizolacyjne osłony zewnętrzne spełniające wymogi, dotyczące generatorowej izolacji wysokonapięciowej. Przy konstruowaniu tych osłon uwzględniono doświadczenie uzyskane w IEI-OTiME oraz informacje z najnowszych publikacji literaturowych oparte na aktualnych osiągnięciach materiałowych w zakresie materiałów kompozytowych. Wykonanie prototypów izolatorów wymaga przeprowadzenia szeregu badań materiałowych (składu oraz parametrów: elektrycznych, mechanicznych, cieplnych i środowiskowych), mających na celu optymalny dobór elementów izolatora oraz zagwarantowanie technologiczności konstrukcji, co jest bardzo istotne przy wdrożeniu rozwiązania do produkcji na skalę techniczną. Konstrukcje izolatorów wymagają również przeanalizowania szeregu zagadnień z zakresu inżynierii materiałowej i elektrotechnologii takich jak:

- dobór właściwości mechanicznych izolatorów, ze szczególnym uwzględnieniem współzgodności tworzywa izolacji głównej i elementu przewodzącego prąd pod względem rozszerzalności cieplnej
- dobór parametrów kształtowania izolacji głównej wraz z wewnętrznym ekranem ze względu na rozkład natężenia pola elektrycznego.

Izolatory elektroenergetyczne z tworzyw sztucznych są grupą wyrobów energetycznych, które znajdują coraz szersze zastosowanie w energetyce. Proces wypierania materiałów tradycyjnych, czyli porcelany i szkła trwa nadal, także w zakresie generatorowych izolatorów przepustowych. W obecnej sytuacji rynkowej Polski szereg renomowanych firm światowych oferuje już takie izolatory, jednak o stosunkowo wysokiej cenie. Obecnie do największych producentów izolatorów oferujących swe wyroby na polskim rynku zaliczyć można: ABB Kraftwerke AG, MacLean, Ensto oraz producentów chińskich. Jednak wciąż brak jest znaczącej konkurencji producentów polskich. Izolatory, które są opracowywane powinny być zgodne z wymaganiami obowiązujących kilku norm [1-6].

## 2. WYMAGANE PARAMETRY IZOLATORA DO TURBOGENERATORA

---

Odbiorcy izolatorów stosowanych w turbogeneratorach używają różne ich typy: o różnych prądach i napięciach roboczych, z chłodzeniem wodorowym, wodnym i powietrznym. Określenie wymaganych parametrów izolatora wykonano w oparciu o wytyczne i informacje uzyskane od potencjalnego odbiorcy wyrobu:

Napięcie znamionowe:  $U_n^{1)}$  27,8 kV

Napięcie probiercze AC:  $U_p^{2)}$  85 kV

Napięcie probiercze udarowe piorunowe<sup>3)</sup>: 170 kV

Maksymalne napięcie pracy:  $U_b^{4)}$  17,7 kV

Średnica zewnętrzna przewodu: 120 mm

Długość powłoki uziemiającej od strony powietrznej: L1 570 mm

- 1) Górne ograniczenie dla generatora o napięciu znamionowym  $U_n$  zgodnie z VDE 0530 część 1
- 2) Napięcie probiercze AC:  $U_p = 1,5 \cdot (2U_n + 1kV)$  zgodnie z VDE 0530 część 3
- 3) Napięcie probiercze udarowe piorunowe =  $2 \cdot U_p$
- 4) Maks. dopuszczalne napięcie pracy między przewodem a ziemią  $U_b = 1,1U_n / \sqrt{3}$ .

## 3. IZOLACJA GŁÓWNA IZOLATORA PRZEPUSTOWEGO

---

Jak już wspomniano, osłony polimerowe są zdecydowanie lepszym rozwiązaniem w porównaniu do osłon porcelanowych. Optymalny kształt osłony powinien być rozwiązaniem kompromisowym pomiędzy często sprzecznymi ze sobą wymogami elektroizolacyjnymi i termicznymi (cieplnymi) oraz względami ekonomicznymi. Podczas badań sprawdzana jest zdolność zewnętrznej izolacji osłony do wytrzymywania napięcia probierczego oraz szczelność osłony, a także stopień odprowadzania ciepła przez osłonę do otoczenia.

Na program realizacji składają się następujące, prace:

a) Określenie wymaganych parametrów oraz wstępny projekt konstrukcji modelu izolatora. Parametry te będą określone w oparciu o wytyczne zawarte w normach oraz na podstawie już istniejących analogicznych izolatorów. Model izolatora będzie zaprojektowany przy uwzględnieniu istniejących możliwości technicznych i ekonomicznych.

b) Opracowanie składu i wstępne badania kompozytowej izolacji głównej modeli izolatorów. Zostanie dobrany skład kompozytu typu wypełniacz mineralny – epoksyd oraz zbadane jego parametry mechaniczne (w tym termomechaniczne i zmęczeniowe) jak np. zależność naprężenie – odkształcenie, elektryczne i fizykochemiczne (nasiąkliwość, odporność na korozję i korozję naprężeniową). Określona zostanie również metoda i parametry łączenia elementu przewodzącego prąd z izolacją główną izolatorów (wyznaczenie optymalnej temperatury kształtowania tak, aby nie dochodziło do pęknięcia materiału izolacji głównej i tym samym obniżenia wytrzymałości mechanicznej). Określony zostanie poziom parametrów elektrycznych i mechanicznych. Zaprojektowana będzie kompozytowa izolacja główna modeli izolatorów; gwarantująca pracę izolatorów w warunkach eksploatacyjnych turbogeneratorsa. Wymagania elektroizolacyjne izolatorów to:

- optymalna droga upływu izolacji głównej,
- optymalna grubość izolacji głównej,
- możliwie duża odległość przeskoku pomiędzy rdzeniem przewodzącym a kołnierzem izolatorsa.

Wymagania termiczne (gwarantujące dobre odprowadzanie ciepła przez izolację główną do otoczenia):

- możliwie mała grubość izolacji
- optymalna powierzchnia izolacji głównej.

Względy ekonomiczne:

- minimalne gabaryty (minimalne zużycie materiałów),
- nieskomplikowana technologia produkcji i niskie koszty oprzyrządowania technologicznego.

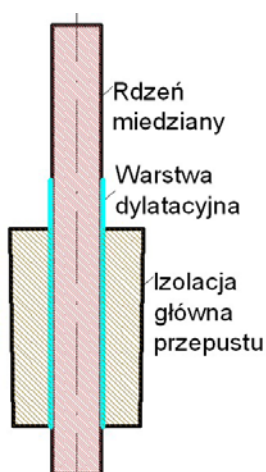
c) Zaprojektowanie i wykonanie form odlewniczych na izolację główną modeli izolatorsa.

## **4. KONSTRUKCJA MODELU IZOLATORSA**

---

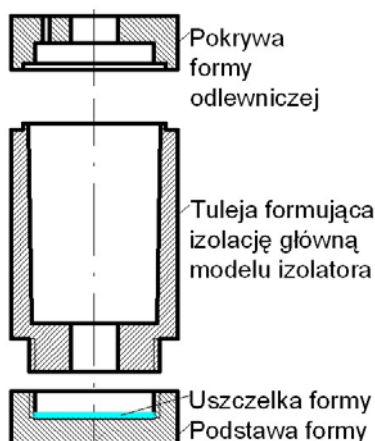
Opracowane modele izolatorsa mają polimerową izolację główną spełniającą wszystkie wymogi dotyczące izolacji wysokonapięciowej stosowanej przy generatorach. W celu wytworzenia izolacji głównej izolatorsa została zaprojektowana forma odlewnicza umożliwiająca spełnienie wymagań technologicznych, dzięki którym wykonany prototypowy izolator będzie odpowiadał wymaganiom co do jego parametrów użytkowych. Projekt konstrukcji modelu izolatorsa został opracowany w celu wykonania wstępnych badań kompozytowej

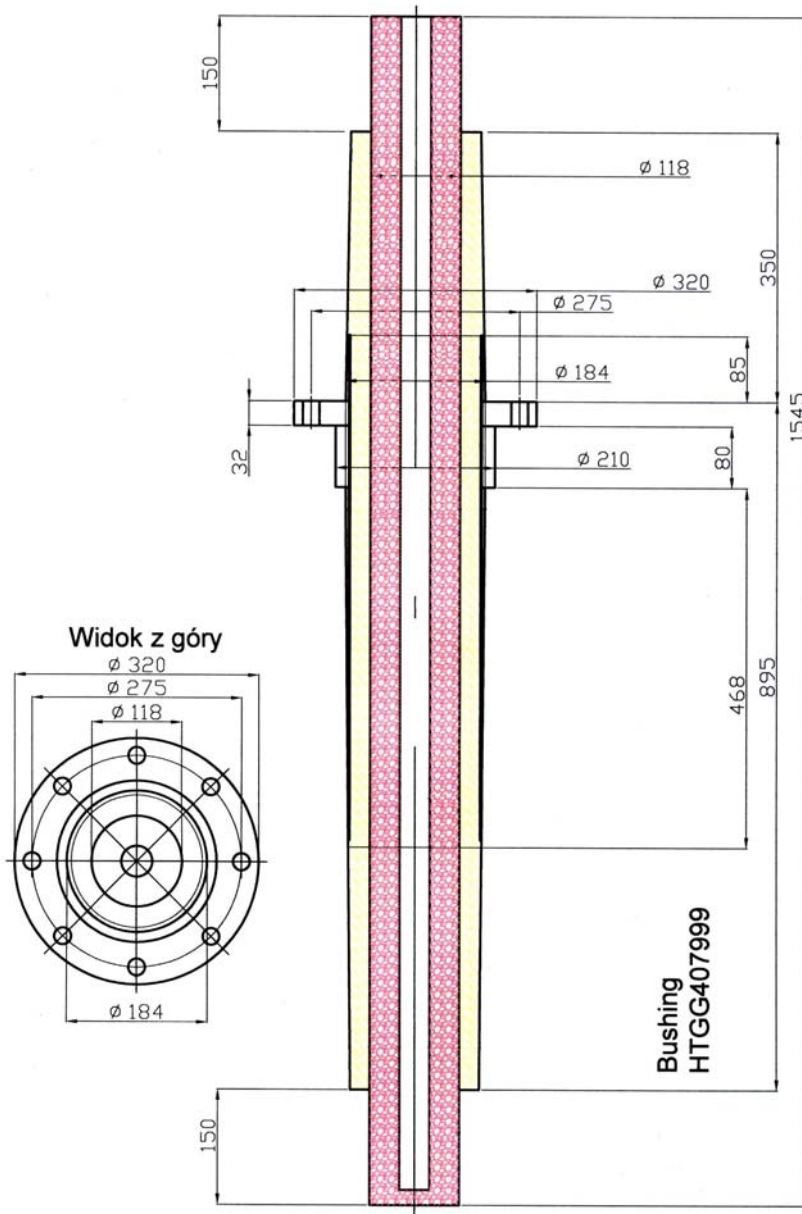
izolacji głównej modeli (rys. 1-4). Wykonano badania alternatywnych modeli izolatorów pod względem wpływu zastosowanych materiałów warstwy dylatacyjnej oraz izolacji głównej na przewodzenie ciepła w obrębie izolatora. Termogramy wykonane przy użyciu kamery termowizyjnej „VarioCAM S/N: 079509” przedstawiono na rysunkach 5 i 6. Na podstawie tych wyników możliwe jest dokonanie wyboru odpowiedniego materiału na izolację główną wraz z materiałem na warstwę dylatacyjną między miedzianym rdzeniem przewodzącym a izolacją główną.



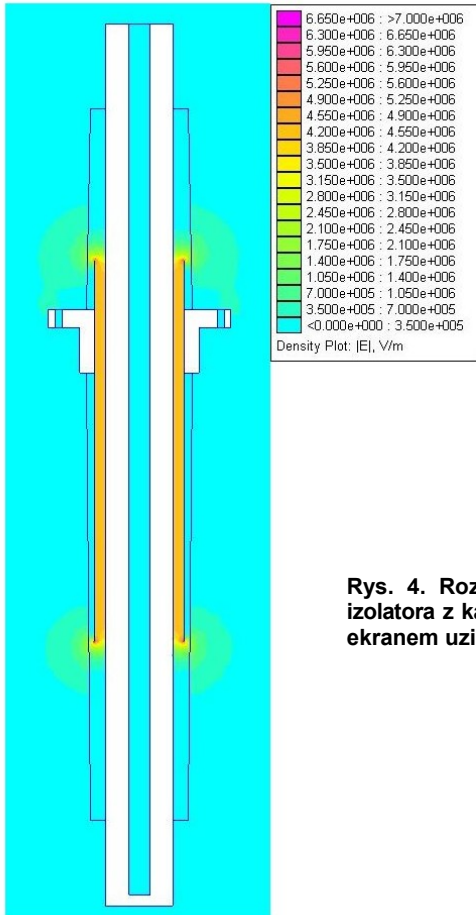
Rys. 1. Model izolatora przepustowego

Rys. 2. Forma do modelu izolatora przepustowego

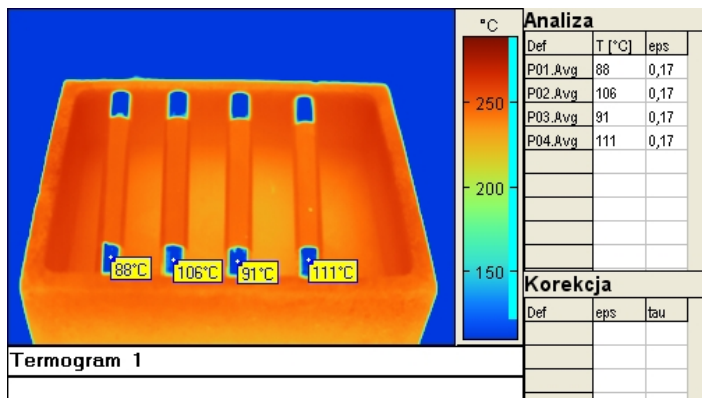




Rys. 3. Schemat izolatora przepustowego do turbogenerators

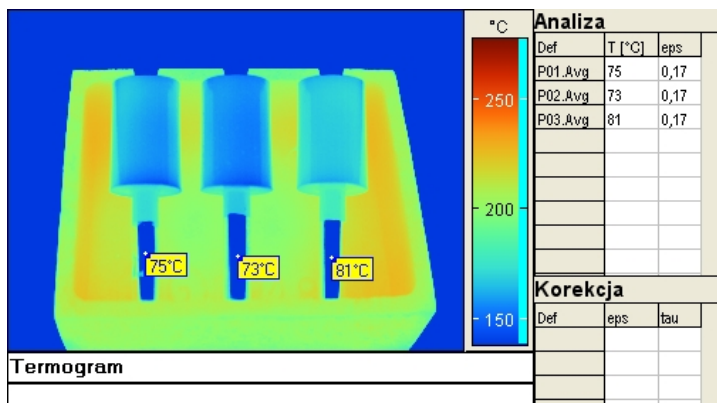


Rys. 4. Rozkład natężenia pola elektrycznego izolatora z kanałem chłodzącym i z wewnętrznym ekranem uziemiającym



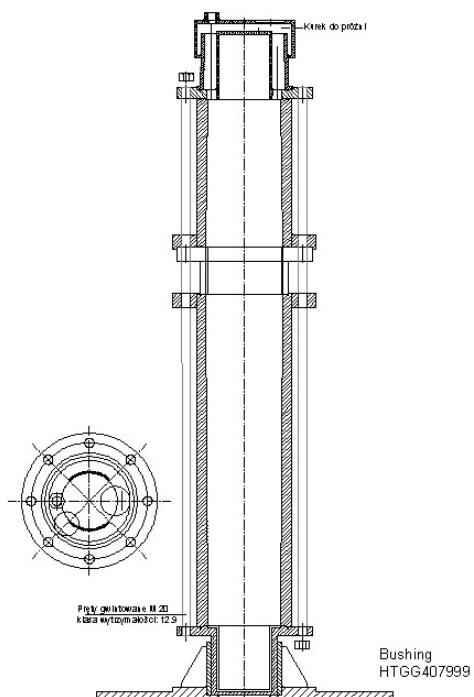
Rys. 5. Pomiar temperatury stygnięcia trzpieni z warstwą dylatacyjną





Rys. 6. Pomiar temperatury stygnięcia modeli izolatorów

Wykonane formy (rys. 7) i oprzyrządowanie zostały wykorzystane do wytworzenia sześciu próbników izolatorów (rys. 8). Podczas próby napięciowej według normy DIN 48 124 izolatory wytrzymały działanie napięcia probierczego w ciągu 1 minuty w powietrzu. Nie stwierdzono rys, odwarstwień, szczelin, obluzowań kołnierza izolatora.



Rys. 7. Schemat formy odlewniczej do izolatora



Rys. 8. Izolator po wyjęciu z formy

## 5. PODSUMOWANIE

---

- W opracowanej konstrukcji izolatora będzie możliwe zastosowanie chłodzenia powietrznego.
- Wykonane formy i oprzyrządowanie będą wykorzystane do wytworzenia prototypowych izolatorów.
- Podczas próby napięciowej izolatory wytrzymały działanie znormalizowanego napięcia probierczego.

### Podziękowanie

Praca została wykonana w ramach projektu celowego nr 6 ZR6 2009 C/07263. Autorzy dziękują Ministerstwu Nauki i Szkolnictwa Wyższego za dofinansowanie tego projektu.

### LITERATURA

1. PN-EN 60034-1:2005(U) Maszyny elektryczne wirujące. Część 1: Dane znamionowe i parametry.
2. IEC 60137 – Bushings for alternating voltage above 1 kV.
3. PN-EN 60034-3:2005 Maszyny elektryczne wirujące – Część 3: Wymagania szczegółowe dotyczące maszyn synchronicznych z wirnikiem cylindrycznym.
4. PN-EN 60034-3:2008 Maszyny elektryczne wirujące – Część 3: Wymagania szczegółowe dotyczące prądnic synchronicznych napędzanych turbinami parowymi lub gazowymi.
5. DIN 48124-1 Natural cooled bushings for hydrogen cooled generators.
6. DIN 48124-2 Durchführungen für wasserstoffgekühlte Generatoren; flüssigkeitsgekühlte Durchführungen.
7. PN-EN 60060-2:2000. Wysokonapięciowa technika probiercza – Układy pomiarowe.

*Rękopis dostarczono dnia 13.03.2013 r.*

### TECHNOLOGICAL ASPECTS OF TURBOGENERATOR BUSHING MANUFACTURING

Marek SKOCZYŁAS, Andrzej WÓJCIK,  
Grzegorz PAŚCIAK, Zbigniew ŚWIERZYŃSKA

#### ABSTRACT

*The article presents a bushing technology implementation to turbo power. It was anticipated that the developed bushings would be cheaper than the imported ones. The body of the*

*bushing was made of epoxy composite using a method of casting. For the optimal selection of the construction of insulators and to ensure manufacturability, the execution of prototypes of insulators needed a series of studies of material parameters (electrical, mechanical, thermal) and taking into account of the environmental policies, which is important in implementing solutions for large scale production. Advantages and disadvantages of this technology are presented. The results of material tests performed on the test model of the insulator are included. The usefulness of selected materials and technologies for the use in the production was asceratained.*

**Keywords:** *bushing, technology of production, epoxy composites*

---

**Dr inż. Grzegorz PAŚCIAK** – absolwent Wydziału Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej (1992 r.). Pracę doktorską obronił w Instytucie Technologii Ciała Stałego Politechniki Wrocławskiej w 1998r. Obecnie pełni funkcję Dyrektora we wrocławskim oddziale Instytutu Elektrotechniki. Jest Członkiem Rady Naukowej IEL oraz Vice-prezesem Polskiego Stowarzyszenia Wodoru i Ogniw Paliwowych. Autor kilkudziesięciu publikacji naukowych, patentów, uczestnik konferencji oraz projektów badawczych krajowych i międzynarodowych realizowanych m.in. w ramach współpracy bilateralnej (z partnerami z Niemiec, Singapuru). Laureat wielu wyróżnień i nagród, m.in. Nagrody Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego za Międzynarodowe Osiągnięcia Wynalazcze (2010). Zainteresowania naukowe: inżynieria materiałowa, przewodność jonowa, materiały ceramiczne, spektroskopia impedancyjna i rentgenowska, ogniwa paliwowe SOFC i PEMFC, kompozytowe materiały elektroizolacyjne.



**Mgr inż. Zbigniew ŚWIERZYŃSKA** – ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej. Od roku 1976 pracownik wrocławskiego oddziału Instytutu Elektrotechniki. Obecnie jako kierownik Zespołu Technologii Małoseryjnej. Realizuje prace badawcze z zakresu układów i materiałów stosowanych do wysokonapięciowej izolacji kompozytowej. Autor i współautor czterestu publikacji naukowych, czterech projektów badawczych i celowych, a także dziesięciu wdrożeń różnych układów elektroizolacyjnych, uczestnik konferencji naukowych krajowych i zagranicznych. Współautor trzech patentów. Odznaczony Brązowym Krzyżem Zasługi.

