

Szynoprzewód w izolacji stałej o własności kompensacji mocy biernej

Streszczenie. W pracy przedstawiono koncepcję modelu szynoprzewodu w izolacji stałej do zastosowań średnio napięciowych. Uwzględniono właściwości materiałowe, które miały posłużyć kompensacji mocy biernej. Przedstawiono wyniki prac technologicznych, badań materiałowych oraz wybrane właściwości gotowych szynoprzewodów. Uzyskano oczekiwane parametry materiałowe, spełniające założenia projektowe. Przełożono rozwiązanie w skali laboratoryjnej do półtechnicznej i przemysłowej, uzyskując szynoprzewód umożliwiający pracę w typoszeregu napięciowym do 12 kV.

Abstract. The paper presents the concept of a solid insulated busbar model for medium voltage applications. The material properties used for the reactive power compensation were taken into consideration. The results of technological works, material tests and prototype busbars are presented. The obtained material parameters are meeting the design assumptions. The solution was transferred from the laboratory scale to semi-technical and industrial scale, obtaining a busduct enabling work in the voltage range up to 12 kV. (The solid insulated busbar with the properties to reactive power compensation).

Słowa kluczowe: szynoprzewód, żywice, technologia, próby wysokonapięciowe.

Keywords: busbar, resin, technology, high voltage tests.

Wstęp

Szynoprzewody to sztywne przewody o dużych wymiarach i jednolitej strukturze, służące do przekazywania prądu elektrycznego. Umożliwiają one zasilanie urządzeń jedno i trójfazowych za pomocą jednej linii [1]. Istnieją również szyny prądowe o niewielkich wymiarach (rzędu centymetrów), dedykowane dla niewielkich prądów, o elastycznej konstrukcji, które służą do szybkiego montażu lub demontażu, zapewniające łatwy i estetyczny sposób tworzenia instalacji elektrycznej. Szynoprzewody można podzielić na: segregowane i niesegregowane.

Przedmiotem niniejszego opracowania jest m.in. segregowany trójfazowy szynoprzewód prostokątny, będący osłoniętym, samonośnym przewodem z izolacją powietrzną lub stałą.

Trzy przewody fazowe zabudowane są równolegle we wspólnej obudowie i podparte na izolatorach wsporczych. Poszczególne fazy oddzielone są od siebie metalową przegrodą, dzięki czemu posiada on większą odporność na zwarcia międzyfazowe. Izolatory wsporcze kontrolowane są przez włązy rewizyjne (Rys. 1).



Rys.1. Przykłady szynoprzewodów [2]

Podstawową zaletą szynoprzewodów z izolacją stałą jest możliwość zmniejszenia gabarytów, małe promienie gięcia oraz możliwy trójwymiarowy kształt geometryczny. O ile szynoprzewody z izolacją stałą do sieci średniego napięcia są powszechnie spotykane na rynku, o tyle szynoprzewody, które mogłyby kompensować moc bierną,

są rozwiązaniem niespotykanym [3, 4]. Stąd też zainteresowanie autorów tematem.

Aby uzyskać szynoprzewody w izolacji stałej, które mogłyby kompensować moc bierną, należy dążyć do:

- maksymalnego zwiększenia powierzchni pomiędzy torami prądowymi oraz torami i ekranem;
- zminimalizowania odległości pomiędzy poszczególnymi torami prądowymi oraz pomiędzy torami i ekranem przy zachowaniu odpowiednio dużej wytrzymałości elektrycznej;
- zmaksymalizowania wartości względnej przenikalności elektrycznej materiału izolacji.

Oprócz odpowiedniej przewodności i wynikającego z niej przekroju, szynoprzewody powinny cechować się wysoką wytrzymałością mechaniczną i sztywnością, tak aby nie stwarzać zagrożenia podczas krótkotrwałego przewodzenia największego możliwego prądu płynącego w stanie zwarcia.

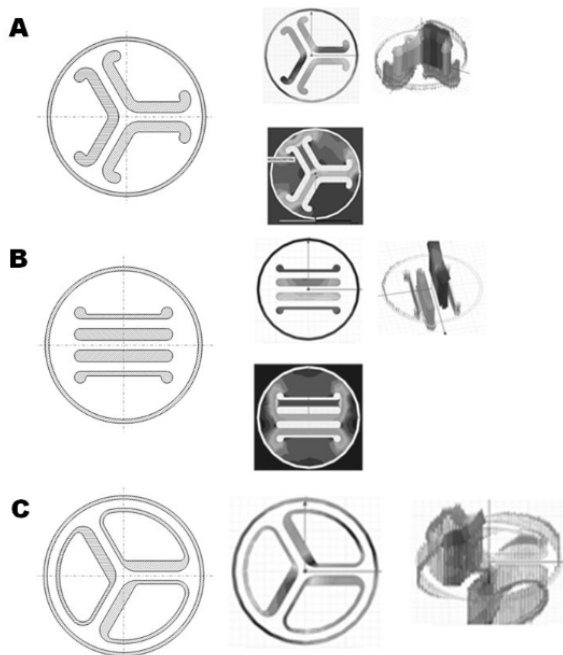
Zadanie zostało zrealizowane w kilku etapach. Obejmowały one zagadnienia związane z opracowaniem materiału o właściwościach lepszych niż materiał wyjściowy (żywice epoksydowe i poliuretanowe), weryfikacji i pomiarach podstawowych parametrów, próbach technologicznych w warunkach laboratoryjnych jak i opracowaniu wytycznych do przeniesienia technologii do warunków przemysłowych.

Modelowanie

Przed przystąpieniem do prac materiałowych wykorzystano możliwość modelowania kształtu i gabarytów szynoprzewodów. Modelowanie i optymalizacja gabarytów powstała w oparciu o obserwację, że gęstość prądu w szynoprzewodach nie jest jednakowa i obciąża nadmiernie jeden fragment toru prądowego kosztem nadmiaru materiału zastosowanego na jego pozostałą część [5, 6]. Stąd też przygotowano kilka modeli, które przedstawiono na rysunku 2.

Modele te pokazują jak rozkłada się gęstość prądu, jednocześnie zachowując symetrię faz oraz ograniczając miejsca gdzie mogłyby powstawać lokalne gradienty pola elektrycznego (rys. 2).

Do analiz, modelowania i obliczeń zastosowano program ANSYS Maxwell.

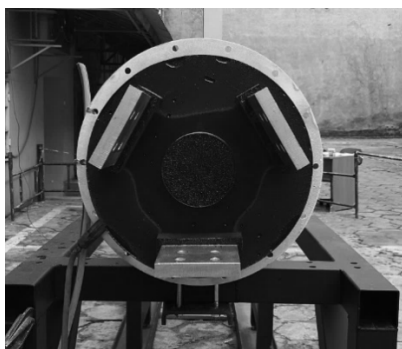


Rys.2. Przykłady opracowanych modeli szynoprzewodów

Modele te pokazują jak rozkłada się gęstość prądu, jednocześnie zachowując symetrię faz oraz ograniczając miejsca gdzie mogłyby powstawać lokalne gradienty pola elektrycznego (rys. 2).

Do analiz, modelowania i obliczeń zastosowano program ANSYS Maxwell.

Na podstawie najkorzystniejszych pod względem ilości niezbędnego materiału na szyny oraz odpowiedniego kształtu torów prądowych wybrano dwa typy szynoprzewodów: klasyczny płaskownikowy oraz ulepszoną wersję IMRVD (rys. 2 c). Na rysunku 3 przedstawiono prototypowy szynoprzewód przygotowany w oparciu o przestawiony model. Wykonany prototyp był zbliżony geometrią do modeli numerycznych.



Rys.3. Prototypowy szynoprzewód przygotowany w oparciu o model IMRVD

Materiały

Zasadniczym celem było opracowanie ciekłej kompozycji żywicznej, która po usieciowaniu zapewni jak najlepszy bilans parametrów użytkowych szynoprzewodu o własności kompensacji mocy biernej. Dla każdego z parametrów osobno, określone zostały cele – poziomy maksymalizacji, które przedstawiono w tabeli 1. Ostateczne wartości tych parametrów są ważone pod względem kompensowania poszczególnych właściwości i zasadności ekonomicznej.

Tabela 1. Maksymalne, pożądane parametry techniczne izolacji szynoprzewodów o własności kompensacji mocy biernej

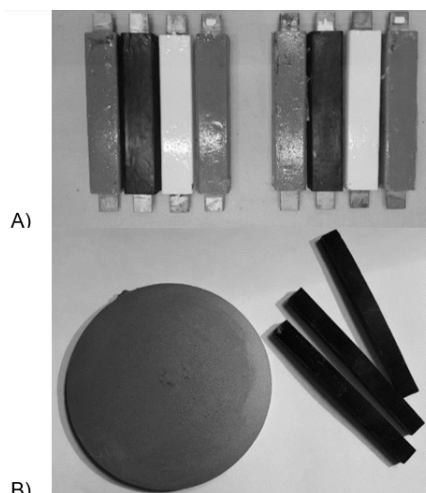
Cecha/funkcjonalność	Pożądane parametry techniczne
Podwyższona wytrzymałość dielektryczna	Podniesienie wytrzymałości dielektrycznej o 5-20% w stosunku do materiału rodzimego.
Podwyższona względna przenikalność dielektryczna	Podniesienie względnej stałej dielektrycznej nawet do wartości powyżej 100 w stosunku do materiału rodzimego.
Podwyższona odporność na wyładowania niepełne	Obniżenie poziomu intensywności wyładowań niepełnych nawet kilkukrotnie w stosunku do materiału rodzimego.
Podwyższona przewodność termiczna	Podniesienie przewodności termicznej nawet dwukrotnie w stosunku do materiału rodzimego.

Zespół badawczy w oparciu o własne doświadczenia związane z materiałami kompozytowymi skupił prace laboratoryjne na doborze materiału matrycy [7]. Weryfikacji poddano wyselekcjonowane żywice epoksydowe i poliuretanowe oraz wypełniacze proszkowe o różnym rozmiarze i kształcie ziarna, a także technologię ich homogenizacji. Stwierdzono, że niezwykle istotną rolę w strukturze i własnościach polimerowych nanokompozytów odgrywa interfejs matryca-wypełniacz. Udział objętościowy interfejsu w nanokompozycie może być równy, a nawet większy niż wypełniacza podczas, gdy w mikrokompozycie jest pomijalnie mały. Wpływa to w istotny sposób na własności dielektryczne kompozytów [7]. Wytworzone materiały przebadano pod kątem poprawy kluczowych parametrów elektrycznych, cieplnych i mechanicznych względem materiału rodzimego. Przygotowano kilkadziesiąt kompozycji materiałowych, obejmujących m.in. żywice epoksydowe, biel tytanową, mączkę kwarcową czy też nikiel dendrytyczny.

Materiały, w których zastosowano wypełniacz w postaci związków baru i tytanianów baru posiadały większą przenikalność elektryczną niż inne przebadane próbki. Jest to zjawisko naturalne, gdyż tytanian baru jest materiałem z grupy perowskitów [8, 9].

Przygotowano kilkadziesiąt próbek umożliwiających wykonanie badań właściwości materiałowych oraz wyznaczenie właściwości elektrycznych nowo opracowywanych materiałów (Rys. 4.).

Podstawowe właściwości opracowanych materiałów przedstawiono w tabeli 2.



Rys.4. Próbkę materiałów izolacyjnych do badań materiałowych A – profile z zastosowaniem opracowanych materiałów na izolację stałą, B – próbki do badań właściwości elektrycznych i mechanicznych

Tabela 2. Właściwości opracowanych materiałów

Rodzaj materiału	Przenikalność elektryczna	tgδ	R [Ω] 100 V DC	K [kV/mm]	Λ [W/mK]
E828Biel30Mks30Nimax	8,4	0,0234	$1,3 \cdot 10^{14}$	3,9	0,49
E828Ba60	11,5	0,0053	$4,1 \cdot 10^{13}$	8,5	0,30
E828Ba60GC1_5MKS	14,2	0,0144	$2,0 \cdot 10^{13}$	3,9	-
E828Biel_60	10,5	0,0309	$4,4 \cdot 10^{13}$	9,2	0,39
E828RFmiel20Biel60	14,2	0,0361	$2,6 \cdot 10^{13}$	3,2	0,35

W oparciu o najlepsze wyniki, do dalszych prac technologicznych oraz badawczych wybrano dwa typy szynoprzewodów z zastosowaniem dwóch opracowanych materiałów stanowiących izolację stałą (tabela 3.).

Tabela 3. Dwa rodzaje modeli szynoprzewodów wraz z odpowiednio dobraną izolacją stałą

SZYNOBRZEWÓD	KOMPOZYT
BASIC	Na bazie żywicy epoksydowej Epikote 828 LEVEL oraz mączki kwarcowej silanizowanej
IMRVD	Na bazie żywicy epoksydowej Epikote 828 LEVEL, bieli tytanowej, silanizowanej mączki kwarcowej oraz niklu dendrytycznego

BASIC - to szynoprzewód trójfazowy z szynami przewodzącymi aluminiowymi o przekroju prostokątnym, zabudowanymi równolegle we wspólnej obudowie-ekranie.

IMRVD - to szynoprzewód trójfazowy z szynami przewodzącymi aluminiowymi o przekroju zamkniętym, zabudowanymi symetrycznie we wspólnej obudowie - ekranie.

Oba modele w skali półtechnicznej przedstawiono na rysunku 5.



Rys.5. Modele szynoprzewodów do badań weryfikacyjnych

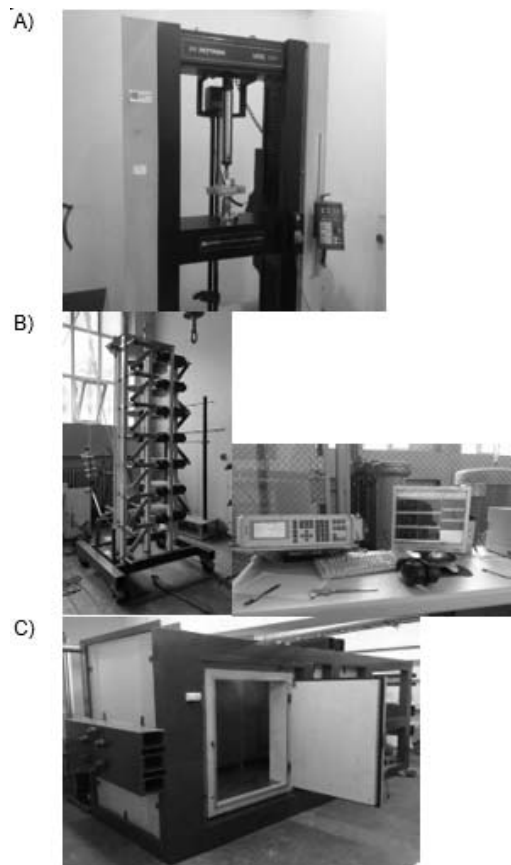
Badania

Badania podzielono na dwa podstawowe rodzaje. Pierwszy stanowiły badania materiałowe obejmujące: przenikalność elektryczną, współczynnik strat dielektrycznych, rezystancję skrośną, pojemność, wytrzymałość elektryczną, wytrzymałość mechaniczną (na zginanie), przewodność cieplną oraz palność. Drugi rodzaj badań związany był z badaniami profili i gotowych wyrobów przygotowanych w oparciu o wytyczne Łukasiewicz – Instytutu Elektrotechniki (Ł – IEL). Obejmowały one wykonanie następujących prób: wytrzymałości elektrycznej, wytrzymałości mechanicznej, próby termomechanicznej, badania przyrostu cieplnego, szoki termiczne, pomiary intensywności wyładowań niezupełnych, pomiary rezystancji obwodu głównego, sprawdzenie prądem ciągłym, sprawdzenie prądem krótkotrwałym wytrzymywaniem i szczytowym wytrzymywaniem oraz pomiary natężenia pola elektromagnetycznego wokół szynoprzewodu przy przepływie prądu znamionowego ciągłego.

Łukasiewicz – Instytut Elektrotechniki dysponuje szerokim zapleczem badawczym zarówno związanym z

wykonywaniem badań akredytowanych jak i unikatowym w skali kraju i Europy sprzętem do prac badawczo-rozwojowych.

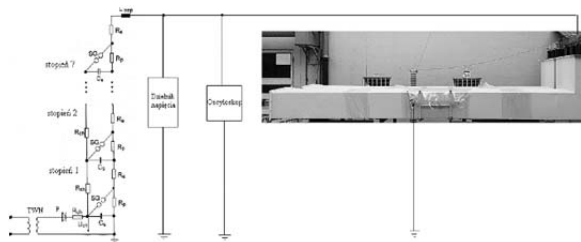
Przykładowe urządzenia i maszyny wytrzymałościowe wykorzystane w ramach realizacji zadania przedstawiono na rysunku 6. Umożliwiały one wyznaczenie wytrzymałości mechanicznej na zginanie, wytrzymałości elektrycznej, w tym przy napięciu udarowym piorunowym, jak i wykonanie prób termomechanicznych.



Rys.6. A – Maszyna wytrzymałościowa INSTRON, B – generator napięć udarowych piorunowych HEAFELY 700 kV, 35 kJ, C – komora do prób termomechanicznych zakres sił do 300 kN (-40 °C +55 °C)

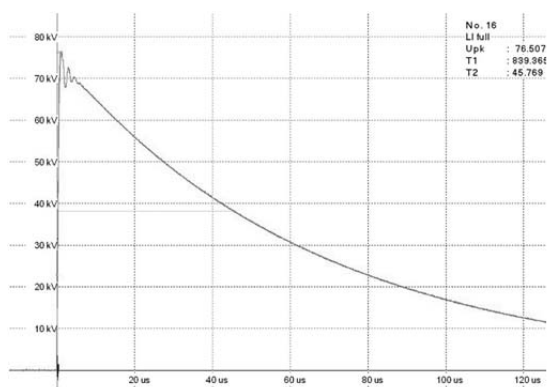
Próby napięciowe gotowych szynoprzewodów przeprowadzono w warunkach rzeczywistych. Wynikało to m.in. z dużych gabarytów opracowanych obiektów. Próbę napięciem przemiennym o częstotliwości sieciowej wykonano na szynoprzewodach aluminiowych i miedzianych, zarówno segregowanych jak i niesegregowanych, zgodnie z PN – EN 62271-1:2017 oraz PN – EN 60060 – 1:2011 [10, 11]. Szynoprzewody poddano próbie napięciem probierczym przemiennym o częstotliwości sieciowej skorygowanym do warunków atmosferycznych i wynoszącym $28,0 \pm 0,3$ kV. Napięcie probiercze przykładano przez 1 minutę pomiędzy tory prądowe L1-L2, L1-L3, L2-L3 oraz L1-GND, L2-GND, L3-GND.

Do prób napięciem udarowym piorunowym wykorzystano układ jak na rysunku 7. W przypadku badań napięciem udarowym piorunowym próby przeprowadzono podając napięcie pomiędzy tory prądowe L1-L2, L1-L3, L2-L3 oraz L1-GND, L2-GND, L3-GND. Zgodnie z normą przykładano 15 udarów o polaryzacji dodatniej oraz 15 o polaryzacji ujemnej, o amplitudzie równej $75,6 \pm 1,1$ kV (skorygowanej do normalnych warunków atmosferycznych).



Rys.7. Schemat stanowiska pomiarowego do prób napięciem impulsowym piorunowym
gdzie: TWN – transformator wysokiego napięcia przemiennego, P – prostownik, R_{ch} – rezystor ładujący, R_p – rezystor równoległy (do grzbietu udaru), R_s – rezystor szeregowy (do czoła udaru), C_s – kondensator impulsowy, SG – iskiernik, L_{loop} – indukcyjność obwodu probierczego

Przykładowy zarejestrowany podczas prób wykres przebiegu napięciowego przedstawiono na rysunku 8.



Rys.8. Przykładowy wykres zmierzonego napięcia udarowego, polaryzacja dodatnia

Ze względu na obszerny zakres prac badawczych, nie zaprezentowano wszystkich wyników pomiarów. Niemniej jednak wszystkie z wymienionych prób dotyczące zarówno materiałów, profili jak i szynoprzewodów przeszły testy z wynikiem pozytywnym. Spełniły one wymagania normy stawiane szynoprzewodom z typoszeregu poziomu napięcia pracy 12 kV. Opracowano materiały stanowiące izolację stałą o parametrach znacząco poprawiających właściwości w stosunku do materiału wyjściowego. Niestety zauważono, że szynoprzewody o gabarytach rzeczywistych posiadają pewne wady, które sprawiają, że kompensacja mocy biernej jest niezwykle trudna i możliwa jedynie w niewielkim zakresie. Wynika to przede wszystkim z trudności technologicznych przeniesienia skali laboratoryjnej do warunków rzeczywistych. W trakcie wykonywania pomiarów zaobserwowano kilka ciekawych zjawisk, które przedstawiono w podsumowaniu.

Podsumowanie

- Wyniki badań materiałowych potwierdzają możliwość wpływania na właściwości dielektryczne oraz polaryzacyjne materiałów dielektrycznych poprzez modyfikację ich składu, zastosowanych wypełniaczy oraz typów matryc.
- Odpowiednie modelowanie geometrią, odległościami oraz składem ilościowym zastosowanych wypełniaczy w materiałach może prowadzić do optymalizacji pojemności szynoprzewodów z izolacją stałą.
- Materiały, w których zastosowano wypełniacz w postaci związków baru i tytanianów baru posiada większą przenikalność elektryczną niż inne przebadane próbki. Jest to zjawisko naturalne, gdyż tytanian baru to materiał z grupy perowskitów.

- Stwierdzono, że oba typy szynoprzewodów spełniają wymaganie napięciowe w zakresie napięcia przemiennego i udarowego stawiane szynoprzewodom z typoszeregu napięcia pracy wynoszącego 12 kV.

- Podczas badania intensywności wyładowań niezupełnych modeli, najprawdopodobniej pod wpływem wcześniejszego kondycjonowania wysoką wartością prądu, doszło do powstania mikroszczelin pomiędzy szynami a materiałem izolacyjnym. Dodatkowo obciążenie w postaci przyłożonej siły jak i działanie niskich temperatur podczas prób termomechanicznych, spowodowało obniżenie jakości materiału izolacyjnego, powstanie mikropęknięć lub szczelin powietrznych. To z kolei powoduje, że stała dielektryczna w pustej przestrzeni jest znacznie niższa niż otaczającego dielektryku, a pole elektryczne występujące w pustej przestrzeni jest znacząco wyższe niż na równoważnym dystansie w dielektryku [12]. Było to przyczyną wzrostu intensywności wyładowań niezupełnych. Proponowanym działaniem korygującym było zastosowanie dylatacji na powierzchni szynoprzewodów, która kompensowała obniżenie jakości materiału izolacyjnego.

- Uzyskano materiały spełniające wymagania stawiane w projekcie oraz przebadano gotowe szynoprzewody z izolacją stałą, w oparciu o wytyczne Ł – IEL, spełniające wymagania norm PN – EN 62271-1:2017 oraz PN – EN 60060-1:2011.

Projekt „Szynoprzewód w izolacji stałej o własności kompensacji mocy biernej” finansowany w ramach programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020 nr konkursu 1/1.1.11/2015

Autorzy: dr. inż. Krzysztof Kogut, dr inż. Ewa Zawadzka, mgr inż. Henryk Brzeziński, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Elektrotechniki, Centrum Badawcze Materiałów Elektrotechnicznych, 50 – 369 Wrocław, ul. Skłodowskiej – Curie 55/61 Wrocław, e-mail: krzysztof.kogut@iel.lukasiewicz.gov.pl; ewa.zawadzka@iel.lukasiewicz.gov.pl; henryk.brzeziński@iel.lukasiewicz.gov.pl

LITERATURA

- [1] <https://www.egsystem.pl/oferta/szynoprzewody>
- [2] www.holduct.pl
- [3] <https://energy-utilities.com/solid-insulated-busbar-system-prod1240595.html>
- [4] <https://www.rtc-electro-m.com/products/tp1>
- [5] Kolańska-Płuska J., Gęstość prądu przewodów drażonych o przekroju prostokątnym, *PAK*, Vol 59, Nr 10/2013, 1076-1079
- [6] Piątek Z., Szczepielniak T., Kusiak D., The Current Density Distribution in Three Phase Bus – Bars System, 2016 *17th International Conference Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), IEEE*, 10.1109/CPEE.2016.7738744, 2016, pp. 1-3
- [7] Zawadzka E., Mazurek B., Moroń L., Nanokompozyty polimerowe- struktura i właściwości dielektryczne, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 84, 2008, nr 4, 80-83
- [8] Kogut K., Zboromirska – Wnukiewicz B., Kasprzyk K., Ceramic nanomaterials based on the barium and titanium compounds, prepared by the sol – gel method, for electrotechnical applications, Białowieża 2011, *Archives of Metallurgy and Materials*, Volume 56, 2011, Issue 4, 1057-1064
- [9] Zeb A., Milne S.J., High temperature dielectric ceramics: a review of temperature-stable high-permittivity perovskites, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 26, 2015, 9243-9255
- [10] PN – EN 62271-1:2017 - Wysokonapięciowa aparatura rozdzielcza i sterownicza
- [11] PN – EN 60060 – 1:2011 - Wysokonapięciowa technika probiercza -- Część 1: Ogólne definicje i wymagania probiercze
- [12] V. Padma and V. S. Raghavan, Analysis of insulation degradation in insulators using partial discharge analysis, *2011 3rd Int. Conf. on Electronics Comp. Technology*, 2011, 110-114