

Wytrzymałość elektryczna izolatora rurowego o modyfikowanej powierzchni

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki pomiarów wytrzymałości elektrycznej izolatorów rurowych o modyfikowanej powierzchni wewnętrznej. Zarejestrowano obrazy wyładowań podczas prób napięciem impulsowym i wykonano pomiary intensywności wyładowań niepełnych. Stwierdzono, że pokrycie powierzchni wewnętrznej izolatora zwiększa jego napięcie przeskoku przy próbach napięciem udarowym, umożliwia ujednoczenie rozkładu pola elektrycznego i sterowanie miejscem występowania wyładowań powierzchniowych.

Abstract. The results of the electrical strength of tube insulators with modified inside surface, were shown. The surface discharges during impulse voltage tests were recorded and measurements of partial discharge intensity, were carried out. It was found that the covering the inside surface of insulators increases flashover voltage by lightning impulse voltage tests, allows for unification of electric field distribution and control the place of surface discharges. (**Electrical strength of the tube insulator with modified surface**)

Słowa kluczowe: izolator, lakier półprzewodzący, wyładowania niepełne, wytrzymałość elektryczna.

Keywords: insulator, semiconduction varnish, partial discharges, electric strength.

Wstęp

Zagadnienia przedstawione w pracy dotyczy możliwości ograniczenia wyładowań powierzchniowych na izolatorach rurowych o modyfikowanej powierzchni wewnętrznej. Modyfikacja ma na celu zwiększenie wytrzymałości elektrycznej układu izolacyjnego, podniesienie napięcia przeskoku oraz sterowanie rozkładem pola elektrycznego i miejscem występowania wyładowań powierzchniowych.

Dodatkowo, pokrycie odpowiednio dobraną warstwą półprzewodzącą powoduje ograniczenie intensywności wyładowań niepełnych poprzez odprowadzenie ładunku z powierzchni materiału izolacyjnego.

Powierzchnie izolacyjne w znaczący sposób mogą wpływać na wytrzymałość elektryczną układów z przerwą iskrową znajdującą się w sąsiedztwie izolatora [1, 2]. Ma to związek nie tylko z przenikalnością elektryczną materiału czy też konstrukcją dielektryku stałego, ale również z ładunkiem gromadzonym na lub też przy jego powierzchni.

Gromadzenie się ładunku elektrycznego na powierzchni dielektryka jest powodowane m.in. przez:

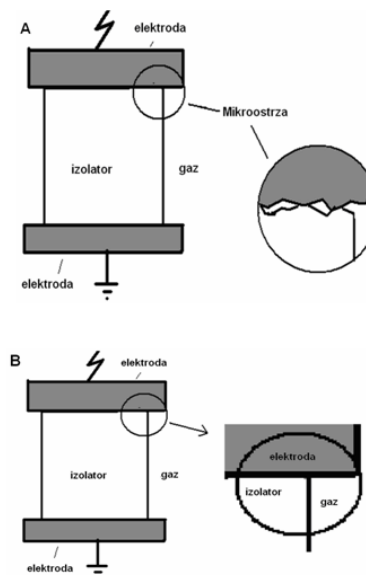
- powierzchniowe przewodnictwo, wynikające z nieliniowej zależności pola elektrycznego od konduktywności powierzchniowej materiału,
- emisję polową elektronów z ostrych krawędzi bliskich elektrodom pobudzonym napięciem ujemnym.
- wyładowania niepełne w sąsiedztwie powierzchni dielektrycznych,
- emisję elektronów z powierzchni dielektryka [3].

Niewątpliwym punktem układów izolacyjnych jest tak zwany punkt potrójny (rys.1B). W punkcie tym, pod wpływem występowania mikroostrzy na styku elektrody i materiału izolacyjnego, występują lokalne zmiany pola elektrycznego prowadzące do emisji elektronów. Pod wpływem pola oddziałują one na powierzchnię izolacyjną, która może emitować z kolei elektrony wtórne [4]. Jeśli z powierzchni jest emitowany więcej niż jeden elektron, powierzchnia izolatora ulega ładowaniu ładunkiem dodatnim. Wtedy pole elektryczne w punkcie potrójnym jest kolejno wzmacniane co prowadzi do dalszej emisji elektronów. Wzrost liczby ładunków może ułatwiać rozwój lawiny wyładowania przebiegającego przy lub na powierzchni materiału izolacyjnego.

W izolacji stałej, w wyniku defektów, mogą pojawiać się puste przestrzenie posiadające niższą stałą dielektryczną niż otaczający materiał co powoduje występowanie wyższego pola elektrycznego. Kiedy pole jest wystarczające do spowodowania przebicia pojawiają się

wyładowania niepełne. Mogą one występować również wzdłuż powierzchni materiału izolacyjnego jeśli składowa styczna pola elektrycznego jest wystarczająco duża aby spowodować przebicie wzdłuż powierzchni izolatora [5]. Jednym z ważnych powodów występowania wyładowań niepełnych może być starzenie się izolacji. Innymi czynnikami, które determinują powstawanie wyładowań niepełnych są [6]:

- geometria izolatora,
- przenikalności dielektryka,
- lokalizacja źródła wyładowań niepełnych w dielektryku,
- szczeliny i defekty w strukturze,
- wymiary pustych przestrzeni.



Rys.1. Mikroostrza (A) oraz punkt potrójny (B) na granicy dielektryka stałego, elektrody przewodzącej i gazu

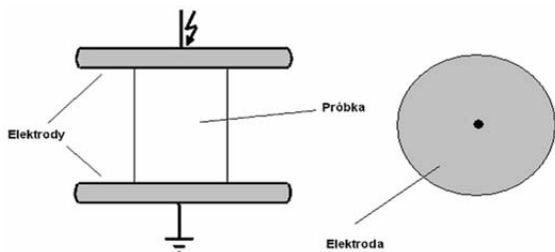
Pomiar wyładowań niepełnych jest jedną z elektrycznych metod detekcji degradacji izolacji. Wykrycie wyładowań niepełnych i podjęcie odpowiednich działań zapobiegawczych może dalszemu niszczeniu dielektryków a w konsekwencji uszkodzeniu wielu urządzeń elektrycznych i elektronicznych [6, 7].

Coraz częstsze badania terenowe wysokonapięciowych linii napowietrznych pozwalają na znalezienie przyczyny

występowania wyładowań niezupełnych na izolatorach liniowych jak i obudowach różnych urządzeń takich jak np. ograniczniki przepięć [8, 9]. Na tego typu zagrożenia narażone są głównie dielektryki pracujące w warunkach wysokiej wilgotności, na terenach o zwiększonym zabrudzeniu czy też wyższym stężeniu soli w powietrzu. W wyniku oddziaływania tych czynników i występowania wyładowań powierzchniowych może dochodzić do trwałych uszkodzeń izolatorów [10, 11].

Próbki do badań

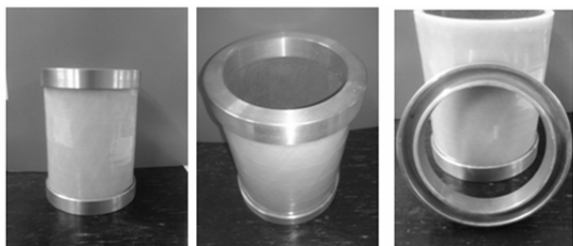
W celu wyselekcjonowania modyfikatora powierzchni charakteryzującego się najwyższą wytrzymałością elektryczną i napięciem przeskoku zastosowano układ z elektrodami jak na rysunku 2. Próbki walców ceramicznych pokryto lakierami o rezystywnościach powierzchniowych z zakresu $10^6 - 10^{12} \Omega$ i umieszczono w polu jednorodnym.



Rys.2. Układ elektrod wykorzystanych do prób przy napięciu udarowym, w polu jednorodnym

Do prób wysokonapięciowych wykorzystano fragmenty rur epoksydowych z włóknem szklanym, wykonywanych jako elementy elektroizolacyjne przez Zakład Doświadczalny III Instytutu Elektrotechniki w Międzyzlesiu Kłodzkim. Rury do badań posiadały średnicę wewnętrzną 80 mm, grubość ścianki 6 mm i wysokość 100 mm. Powierzchnię wewnętrzną badanych próbek pokryto wyselekcjonowanym na podstawie pomiarów wytrzymałości elektrycznej, lakierem półprzewodzącym na bazie żywicy ftalowej styrenowej z węglikiem krzemu o rezystywności powierzchniowej rzędu $10^{11} \Omega$.

Zastosowane do prób elektrody przygotowano w taki sposób, aby modelowały one identyczny rozkład pola elektrycznego zarówno w części wewnętrznej jak i zewnętrznej rury. Rysunek 3 przedstawia próbkę z zamontowanym układem elektrod.

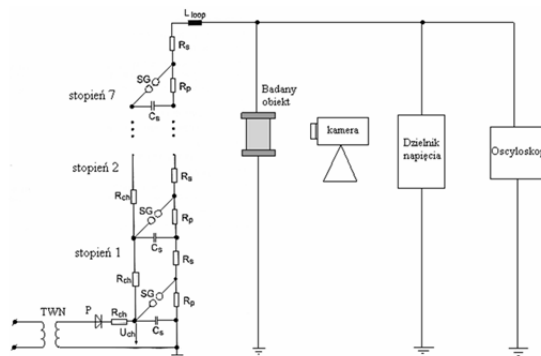


Rys.3. Próбка rury epoksydowej z włóknem szklanym z zamontowanym układem elektrod

Metody badawcze

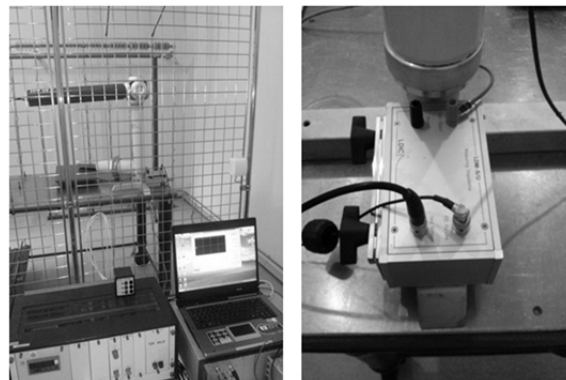
Do wytwarzania impulsów wysokonapięciowych wykorzystano stanowisko pomiarowe składające się z siedmiostopniowego (regulowanego) generatora impulsów napięciowych firmy Haefely o maksymalnej amplitudzie impulsu 700 kV i mocy 35 kJ, zbudowanego w układzie Marxa [12]. Dodatkowo układ posiadał stanowisko sterowania wraz z systemem HIAS umożliwiającym

rejestrację przebiegów udarów napięciowych. Stanowisko uzupełniała kamera do nagrywania obrazów wyładowań na badanych obiektach. Schemat stanowiska pomiarowego przedstawiono na rysunku 4.



R_p – 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 pobierczego

Pomiary wyładowań niezupełnych na rurach epoksydowych z włóknem szklanym wykonano w układzie elektrod jak na rysunku 3. Pomiary wykonano w Zakładzie Doświadczalnym III Instytutu Elektrotechniki w Międzyzlesiu Kłodzkim. Do prób wykorzystano metodę elektryczną z zastosowaniem układu z analizatorem wyładowań niezupełnych LDS – 6 LDIC wraz z oprogramowaniem. Poziom tła podczas pomiarów wynosił 4 pC. Pomiary wykonano podnosząc napięcie aż do pojawienia się wyraźnych wyładowań niezupełnych. Stanowisko pomiarowe przedstawiono na rysunku 5.

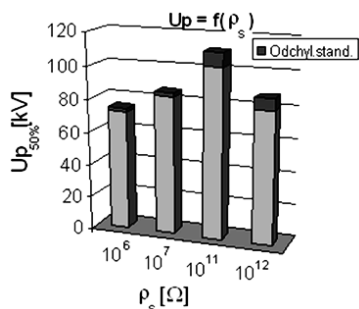


Rys.5. Stanowisko do pomiarów wyładowań niezupełnych

Wyniki pomiarów

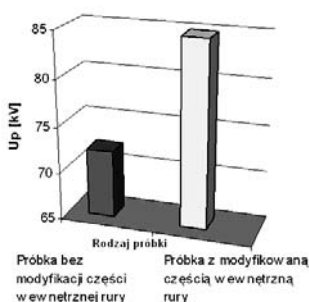
W celu wyselekcjonowania modyfikatora wykorzystywanego do pokrywania powierzchni wewnętrznej rur epoksydowych z włóknem szklanym wykonano pomiary 50% napięcia przeskoku przy próbach napięciem udarowym o polaryzacji dodatniej. Zastosowano metodę „górną – dół”. Próby wykonano na walcach ceramicznych pokrytych lakierami o różnej rezystywności powierzchniowej. Wyniki zestawiono na rysunku 6.

Na podstawie pomiarów 50% napięcia przeskoku stwierdzono, że największą wytrzymałością elektryczną charakteryzowała się próbka pokryta warstwą o rezystywności powierzchniowej rzędu $10^{11} \Omega$. Jej 50% napięcie przeskoku było o ok. 16% wyższe niż próbki o niemodyfikowanej powierzchni.



Rys.6. Wyniki pomiarów 50% napięcia przeskoku przy próbach napięciem udarowym piorunowym o polaryzacji dodatniej

Wyselekcjonowany modyfikator wykorzystano do pokrycia powierzchni wewnętrznej rur epoksydowych z włóknem szklanym. Próbkę o wysokości 100 mm w układzie elektrod jak na rysunku 3 poddano próbom napięciem udarowym piorunowym o polaryzacji dodatniej. Wyznaczono wytrzymałwane napięcie przeskoku a wyniki zestawiono na rysunku 7.

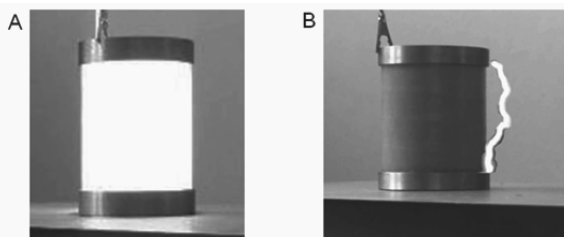


Rys.7. Wyniki pomiarów napięcia przeskoku na izolatorze wsporczym rurowym epoksydowym z włóknem szklanym

Na podstawie pomiarów napięć przeskoku jak i obserwacji wyładowań stwierdzono, że modyfikacja części wewnętrznej rury epoksydowej z włóknem szklanym poprawia jej wytrzymałość elektryczną o ok. 15%.

Tabela 1. Miejsce występowania wyładowań podczas prób napięciem impulsowym piorunowym o polaryzacji dodatniej

Nr próbki	Z modyfikowaną wewnętrzną częścią rury	Bez modyfikacji części wewnętrznej rury
	U_p [kV]	U_p [kV]
1.	84	73
2.	85	74
3.	84	75
4.	83	75
5.	87	72
6.	85	72
7.	85	74
8.	87	70
9.	85	71
10.	85	74
Kolorem jasnym oznaczono wyładowanie na zewnątrz rury		
Kolorem ciemnym oznaczono wyładowanie wewnątrz rury		



Rys.8. Zdjęcia wyładowań wykonane podczas prób napięciem impulsowym na rurze epoksydowej z włóknem szklanym. A – wyładowanie wewnątrz rury nie modyfikowanej powierzchniowo, B – wyładowania na zewnątrz rury modyfikowanej powierzchniowo

Podczas prób napięciem impulsowym piorunowym zarejestrowano miejsce występowania wyładowań (tab.1) oraz wykonano zdjęcia wyładowań powierzchniowych (rys.8).

Obserwacja obrazów wyładowań pozwala stwierdzić, że na próbce o modyfikowanej części wewnętrznej wyładowanie występuje po powierzchni niemodyfikowanej. W przypadku próbki o niemodyfikowanej powierzchni wewnętrznej miejsce występowania wyładowania jest znacznie bardziej przypadkowe.

Dodatkowo na próbce rury epoksydowej z włóknem szklanym, o wysokości 100 mm, wykonano pomiary przyrostu temperatury podczas obciążenia próbki napięciem przemiennym o wartości szczytowej 30 kV. Pomiary wykonywano co godzinę podczas 7 h obciążania próbki. Sprawdzono przyrost temperatury na rurze w wyniku przepływu prądu upływu po powierzchni modyfikowanej warstwą półprzewodzącą. Pomiar temperatury wykonywano pirometrem Abatron AB – 8859, zarówno na powierzchni rury modyfikowanej jak i niemodyfikowanej. Wyniki przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki pomiarów temperatury na badanych obiektach

Czas pomiaru, t [h]	Temperatura na powierzchni modyfikowanej, T_m [°C]	Temperatura na powierzchni niemodyfikowanej, T_n [°C]
0	22,3	22,3
1	22,6	22,5
2	22,8	22,7
3	22,8	22,8
4	23,0	22,8
5	23,0	22,7
6	23,1	22,6
7	23,1	22,8

Stwierdzono, że zastosowanie warstw półprzewodzących o rezystywności powierzchniowej rzędu $10^{11} \Omega$ nie powoduje znaczącego wzrostu temperatury w wyniku przepływu prądu upływu przy obciążeniu próbki napięciem 30 kV w czasie 7 h.

Pomiary wyładowań niepełnych na rurach epoksydowych z włóknem szklanym w układzie elektrod jak na rysunku 3 wykonano wykorzystując metodę elektryczną, z zastosowaniem analizatora wyładowań niepełnych LDS – 6 LDIC wraz z oprogramowaniem. Wyniki przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wyniki pomiarów intensywności wyładowań niepełnych

Badany obiekt	Napięcie na elektrodzie napięciowej [kV]			
	10	20	25	30
	Poziom intensywności wyładowań niepełnych			
Izolator rurowy niemodyfikowany	4 pC	4 pC	4 pC	178 pC
Izolator rurowy modyfikowany warstwą półprzewodzącą o $\rho_s \sim 10^{11} \Omega$	4 pC	44 pC	64 pC	68 pC

Na podstawie wyników pomiarów stwierdzono, że wyładowania niepełne na rurze modyfikowanej powierzchniowo na części wewnętrznej, warstwą półprzewodzącą o rezystywności powierzchniowej rzędu $10^{11} \Omega$, zapalają się szybciej bo już przy napięciu rzędu 20 kV. Wynikać to może z niejednorodnej warstwy półprzewodzącej na powierzchni wewnętrznej próbki. W przypadku rury niemodyfikowanej wyładowania pojawiają się dopiero przy napięciu ok. 27 kV, jednakże poziom ich intensywności rośnie wraz ze wzrostem napięcia.

Podczas pomiarów wykonanych na rurze epoksydowej z włóknem szklanym o modyfikowanej powierzchni nie stwierdzono tak intensywnego wzrostu poziomu wyładowań niepełnych. Wyjaśnieniem może być odprowadzenie

ładunku z powierzchni próbki poprzez wykorzystanie warstwy półprzewodzącej. Dodatkowo powoduje to ujednoczenie rozkładu pola elektrycznego przy elektrodzie napięciowej i ograniczenie słabych punktów mogących być źródłem występowania wyładowań niezupełnych, które w konsekwencji dalszego wzrostu napięcia mogą powodować pojawienie się wyładowań powierzchniowych lub degradację powierzchni materiału izolacyjnego.

Wnioski

Poprzez zastosowanie warstw półprzewodzących o rezystywności powierzchniowej rzędu $10^{11} \Omega$ można podnieść napięcie przeskoku w układach z dielektrykiem stałym. Prowadzi to do wniosku, że z zachowaniem wytrzymałości elektrycznej istnieje możliwość zmniejszenia gabarytów izolacji stałej.

Na podstawie pomiarów napięć przeskoku jak i obserwacji wyładowań stwierdzono, że modyfikacja części wewnętrznej rury epoksydowej z włóknem szklanym poprawia jej wytrzymałość elektryczną o ok. 15%.

Obserwacja obrazów wyładowań pozwala stwierdzić, że na próbce o modyfikowanej części wewnętrznej odpowiednio dobranym materiałem półprzewodzącym wyładowanie występuje po powierzchni niemodyfikowanej. W przypadku próbki o niemodyfikowanej powierzchni wewnętrznej rury taka zależność nie występuje. Można zatem sterować wyładowaniem powierzchniowym w tak skonstruowanym układzie izolacyjnym, co z aplikacyjnego punktu widzenia jest niezwykle istotne. Zastosowanie takich rozwiązań, zwłaszcza w układach typu przepustowego, pozwoli na zwiększenie wytrzymałości elektrycznej systemu izolacyjnego z dielektrykiem stałym.

Na podstawie pomiarów wyładowań niezupełnych oraz ich analizy stwierdzić można, że optymalizacja układu wsporczego z rurą epoksydową z włóknem szklanym może odbywać się poprzez zastosowanie warstwy półprzewodzącej o eksperymentalnie dobranej rezystywności powierzchniowej, rzędu $10^{11} \Omega$, o wysokiej wytrzymałości elektrycznej. Układ typu wsporczego można dodatkowo zoptymalizować poprzez skonstruowanie elektrod ograniczających występowanie ostrych krawędzi, które mogłyby powodować lokalne zmiany natężenia pola elektrycznego.

Zastosowanie warstw półprzewodzących o rezystywności powierzchniowej rzędu $10^{11} \Omega$ nie powoduje znaczącego wzrostu temperatury w wyniku przepływu prądu upływu przy obciążeniu próbki napięciem 30 kV w czasie 7 h.

Autorzy: dr inż. Krzysztof Kogut, Instytut Elektrotechniki OTiME we Wrocławiu, ul. Skłodowskiej – Curie 55/61, 50 – 369 Wrocław, E-mail: k.kogut@iel.wroc.pl; prof. dr hab. inż. Bolesław Mazurek, Instytut Elektrotechniki OTiME we Wrocławiu, ul. Skłodowskiej – Curie 55/61, 50 – 369 Wrocław, E-mail: mazurek@iel.wroc.pl; dr inż. Krzysztof Kasprzyk, Instytut Elektrotechniki OTiME we Wrocławiu, ul. Skłodowskiej – Curie 55/61, 50 – 369 Wrocław, E-mail: k.kasprzyk@iel.wroc.pl; dr inż. Beata Zboromirska – Wnukiewicz, Instytut Elektrotechniki OTiME we Wrocławiu, ul. Skłodowskiej – Curie 55/61, 50 – 369 Wrocław, E-mail: beata@iel.wroc.pl

LITERATURA

- [1] Kogut K., Kasprzyk K., Zboromirska – Wnukiewicz W., Wpływ efektu rozmiarowego na wytrzymałość elektryczną izolatorów średniego napięcia, XI Ogólnopolskie Sympozjum Inżynieria Wysokich Napięć, Będlewo maj 2012, Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033 – 2097, R. 88, (2012), Nr 11b, 138 – 141
- [2] Kogut K., Mazurek B., Kasprzyk K., Zboromirska - Wnukiewicz B., Factors affecting the mechanism of flashover in metal oxide surge arrester, *Archives of Metallurgy and Materials*, Vol 54, (2009), Issue 4, 1013 – 1020
- [3] Kogut K., Mazurek B., Kasprzyk K., Czynniki wpływające na wytrzymałość powierzchniową dielektryków; Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R.84, (2008), NR 10, 79 – 82
- [4] Elizondo J. M., Meredith K., Struvey K., Secondary electron emission measurement from quasi – metallic coated ceramics, *XXth IEEE International Symposium of Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*, (2002), 646 – 649
- [5] Ohki Y., Aiming at a more rigorous understanding in electrical insulating materials research, *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, IEEE Tran. Dielectric Insulation*, Vol. 15, (2008), No. 5, 1201 – 1214
- [6] Bojovschi A., Rowe W. S. T., Wong K. L., Radiation spectra of partial discharge in dielectrics, *Power Engineering Conference, Australasian Universities*, (2009), AUPEC 2009, 1 – 6
- [7] Shurrab I. Y., El – Hag A., Assaleh K., Ghunem R., Partial discharge on – line monitoring of outdoor insulators, *Electrical Insulation (ISEI), Conference Record 2012, IEEE 978-1-4673-0486-3*, (2012), 391 – 394
- [8] Bian X. B., Yu D. Y., Chen L. C., MacAlpine J. M. K., Influence of aged conductor surface conditions on AC corona discharge with a corona cage, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 18, (2011), No. 3, 809 – 818
- [9] Bian X. B., Zhao X., Cao J., Guan L., Aging effects of conductor surface conditions on AC corona discharge, *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, (2010), 1 – 4
- [10] Kogut K., Badania izolatorów długopniowych na Terenowej Stacji Próby Huty Miedzi w Głogowie oraz w komorze wysokiej wilgotności, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 84, (2008), No. 5, 58-61
- [11] Su H., Jia Z., Guan Z., Li L., Mechanism of contaminant accumulation and flashover of insulator in heavily polluted coastal area, *IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 17, (2010), No. 5, 1635 – 1641
- [12] Junfeng Rao, Kefu Liu, Jian Qiu, An efficient all solid-state pulsed generator for pulsed discharges, *IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference*, ISBN 978-1-4673-1222-6, (2012), 473 – 476