

## OCENA NIEJEDNORODNOŚCI STRUKTURY UKŁADU IZOLACYJNEGO ELEMENTÓW UZWOJEŃ MASZYN ELEKTRYCZNYCH ŚREDNIEGO NAPIĘCIA

Barbara FLORKOWSKA, Wojciech SORBIAN, Paweł ZYDRÓŃ

Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki  
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków  
tel: 012 6173761, 012 6172835, fax: 012 6345721, e-mail: beflor@agh.edu.pl

**Streszczenie:** Narażenia termomechaniczne, będące następstwem równoczesnych, cyklicznych zmian temperatury oraz sił dynamicznych, mają szczególne znaczenie w warunkach eksploatacji maszyn elektrycznych wirujących. Układ izolacyjny maszyn elektrycznych średniego napięcia (ŚN) stanowi izolacja termoutwardzalna, której struktura warstwowa jest formowana w procesie technologicznym w podwyższonej temperaturze i przy odpowiednim ciśnieniu. Efektem narażeń eksploatacyjnych mogą być trwałe uszkodzenia izolacji, pęknięcia i rozwarstwienia, stanowiące źródła wylądowań niezupełnych (wnz), których oddziaływanie prowadzi w warunkach eksploatacji do lokalnych uszkodzeń i jest przyczyną awarii maszyn elektrycznych.

W badaniach laboratoryjnych zastosowano elementy uzwojeń maszyn elektrycznych dla oceny ich układów izolacyjnych, w szczególności lokalnych defektów oraz ich rozłożenia w strukturze prętów uzwojeń. Komputerowa rejestracja i analiza obrazów fazowo-rozdzielczych wylądowań niezupełnych wraz z pomiarami strat dielektrycznych umożliwią opracowanie wniosków o zmianach strukturalnych izolacji termoutwardzalnej.

**Słowa kluczowe:** układy izolacyjne, wylądowania niezupełne, silniki elektryczne, diagnostyka

### 1. WPROWADZENIE

Założenia dotyczące wartości roboczego natężenia pola elektrycznego w maszynach elektrycznych wysokiego napięcia są wynikiem uwzględnienia zespołu narażeń eksploatacyjnych, jakim poddany jest ich układ izolacyjny, w tym: narażeń elektrycznych, termicznych i mechanicznych. Narażenia termomechaniczne są najpoważniejszą z przyczyn zmian zarówno struktur molekularnych, jak i makrostruktury, umożliwiającą inicjowanie elektrycznych procesów degradacji w izolacji. Zmiany struktur molekularnych pod wpływem temperatury, znane jako starzenie termiczne, podlegają prawom kinetyki reakcji chemicznych według Arrheniusa i Eyringa i są czynnikiem decydującym o doborze materiału dla izolacji danej klasy.

W materiałach izolacyjnych klasy B i F stosowanych w maszynach elektrycznych wirujących, proces ten przebiega powoli i w technicznie uzasadnionym czasie nie wpływa znacząco na wytrzymałość elektryczną. Istotne znaczenie mają natomiast zmiany makrostruktury, jako skutek malejących w podwyższonej temperaturze sił wiążących elementy układu wieloskładnikowego. Ich efektem są roz-

warstwienia, pęknięcia, inkluzje gazowe, stanowiące o zawartości fazy gazowej w materiale, a więc o stopniu jego niejednorodności. Decydują one o warunkach inicjowania i rozwoju wylądowań niezupełnych w wieloetapowym procesie degradacji izolacji.

Współczesne systemy wykonywania układów izolacyjnych maszyn elektrycznych, takie jak Samicatherm, Micalastic, Calmicaglass, Micadur, Compact, bazujące na żywicach termoutwardzalnych epoksydowych, poliesterowych i innych, zapewniają dużo większą jednorodność struktury w porównaniu z poprzednio stosowanymi systemami, oraz dopuszczają wyższe wartości roboczego natężenia pola elektrycznego. Nie jest jednak wykluczone występowanie w tak wykonanych układach izolacyjnych wylądowań niezupełnych w mikrowtrącinach gazowych pozostałych po procesie technologicznym, oraz tworzących się na skutek cyklicznych narażeń termomechanicznych [1].

Stosowane metody identyfikacji struktury układu izolacyjnego maszyn elektrycznych, których podstawę stanowiły badania zmian współczynnika strat dielektrycznych  $(dtg\delta/dU)_{max}$ , nie mają obecnie praktycznego zastosowania w układach o bardzo małej zawartości fazy gazowej. Takie możliwości stwarzają pomiary wylądowań niezupełnych w systemach rejestracji impulsowych form wylądowań generowanych w ich źródłach w materiałach dielektrycznych stałych [2-4]. Aktualnie pomiary wylądowań niezupełnych stosowane są dla oceny układów izolacyjnych maszyn elektrycznych, wraz z systemami monitoringu w eksploatacji, przy czym dotyczy to głównie generatorów wysokiego napięcia. W przypadku maszyn elektrycznych na napięcie znamionowe do 6 kV, pomiary wylądowań niezupełnych dostarczają informacji o stanie układu izolacyjnego po procesie technologicznym.

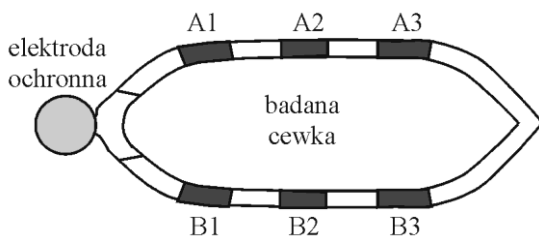
Jednym z najważniejszych problemów w pomiarach wylądowań niezupełnych jest interpretacja wyników pomiarów, zarówno wtedy, gdy wyznaczany jest maksymalny ładunek pozorny, jak również, gdy realizowana jest analiza wieloparametryczna i w jej wyniku tworzone są obrazy fazowo-rozdzielcze impulsów wylądowań.

Artykuł zawiera wyniki pomiarów wylądowań niezupełnych dla oceny niejednorodności struktury elementów uzwojeń maszyn elektrycznych.

## 2. METODA I OBIEKT BADAŃ

Izolacja warstwowa maszyn elektrycznych, zarówno tulejowa jak i ciągła, jest szczególnym przykładem układu izolacyjnego, w którym proces technologiczny i warunki eksploatacyjne sprzyjają występowaniu w nim inkluzji gazowych o bardzo małej grubości i powierzchni, oraz wtrącin płaskich, o małej grubości i stosunkowo dużej powierzchni. Defekty te mogą być zlokalizowane w różnych miejscach układu izolacyjnego, zarówno w obszarze całkowicie dielektrycznym, wewnątrz izolacji warstwowej, jak również w obszarach granicznych, przyległych do elementów konstrukcyjnych wykonanych z materiałów o dużej konduktywności tzn. do elementów toru prądowego lub do powierzchni przewodzących części żłobkowej.

W badaniach, których wybrane wyniki przedstawiono, stosowano cewkę uzwojenia silnika na napięcie znamionowe 6 kV z izolacją termoutwardzalną. W cewce tej, w jej części żłobkowej, poprzez wykonanie indywidualnych zewnętrznych pokryć przewodzących, wyodrębniono fragmenty układu izolacyjnego, oznaczone kodami A1, A2, A3, B1, B2, B3 (rys. 1).



Rys. 1. Uproszczony rysunek cewki z zaznaczonymi fragmentami układu izolacyjnego z pokryciami przewodzącymi

Wartości pojemności wyżej wymienionych fragmentów przedstawiono w tabeli 1. Podczas badań uziemiano pokrycia przewodzące poszczególnych fragmentów, rejestrując wyładowania niepełne powstające w narażanej napięciowo izolacji. Dla eliminacji niepożądanych efektów polowych, mogących pojawiać się na krawędziach doprowadzeń prądowych zostały one zwarte w stalowej elektrodzie kulistej, do której doprowadzano przemienne napięcie probiercze o regulowanej wartości.

Tabela 1. Wartości pojemności fragmentów układu izolacyjnego cewki

Kod	A1	A2	A3	B1	B2	B3
C [pF]	86,2	88,5	86,1	85,0	84,9	81,5

Przy roboczym natężeniu pola elektrycznego wynoszącym ok. 2 kV/mm, przyjęty zakres napięcia probierczego zawierał się w granicach: od  $U_0$  do  $2U_0$ , gdzie  $U_0$  oznacza średnie napięcie początkowe wyładowań niepełnych, wyznaczone w trakcie pomiarów wstępnych, wykonanych dla każdego z fragmentów układu izolacyjnego.

Celem badań było porównanie intensywności wyładowań niepełnych:

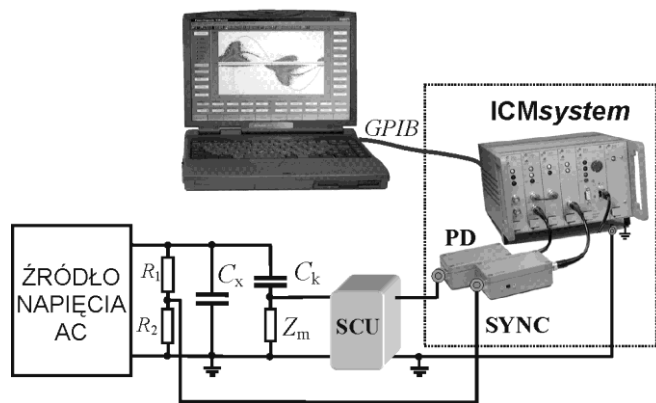
- w wyżej wymienionych fragmentach cewki tzn. A1, A2, A3 oraz B1, B2, B3,
- w częściach żłobkowych A i B cewki ( $A=A1+A2+A3$ , i  $B=B1+B2+B3$ ).

dla oceny jednorodności struktury izolacji i rozpoznania lokalizacji defektów jako źródeł wyładowań.

## 3. SYSTEM DO POMIARU WNZ

Pomiary i analiza wyładowań niepełnych są obecnie jedną z podstawowych metod diagnostycznych stosowanych w badaniach i ocenie stanu różnych rodzajów urządzeń elektroenergetycznych. Wraz z metodami bazującymi na pomiarach wartości parametrów dielektrycznych, stanowią grupę wzajemnie uzupełniających się metod pomiarowych. Faktyczna ich komplementarność polega na tym, iż pomiary parametrów dielektrycznych pozwalają oceniać ogólny stan układu izolacyjnego, natomiast pomiary wyładowań niepełnych ujawniają obecność indywidualnych, lokalnych defektów izolacji.

Badania prowadzono w stanowisku laboratoryjnym z zastosowaniem metody rejestracji impulsowych form wyładowań niepełnych [2, 5]. Układ pomiarowy, zgodny z wymaganiami normy IEC-60270 [6] zawierał (rys. 2): 1) źródło napięcia probierczego, 2) klasyczny układ detekcyjny z impedancją pomiarową umieszczoną w gałęzi równoległej do pojemności badanego obiektu; 3) specjalizowany system do pomiaru wnz *ICM System* firmy *Power Diagnostix*. Dzielnik rezystancyjny  $R_1/R_2$  był stosowany dla uzyskania sygnału synchronizującego moment rozpoczęcia rejestracji impulsów wnz. System pomiarowy był sterowany z komputera nadzorczego poprzez interfejs pomiarowy IEEE-488 (GPIB).



Rys. 2. Blokowa struktura systemu pomiarowego:  $R_1/R_2$  – skompensowany dzielnik wysokiego napięcia,  $C_x$  – pojemność badanego obiektu,  $C_k$  – kondensator sprzęgający,  $Z_m$  – impedancja pomiarowa, SCU – blok wstępnego kondycjonowania sygnałów, PD – przedwzmacniacz toru impulsów wnz, SYNC – przedwzmacniacz toru napięcia

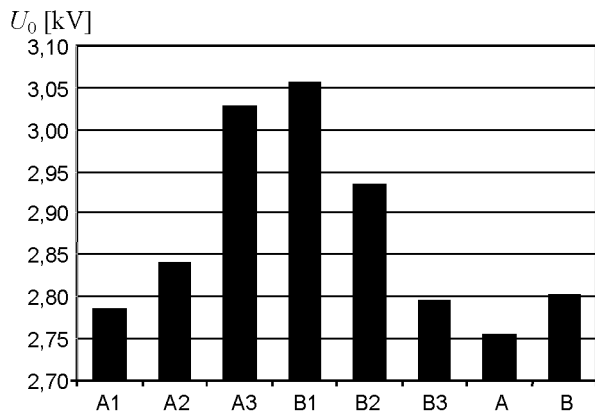
Dane uzyskiwane z systemu *ICM* były następnie przetwarzane i wizualizowane przy zastosowaniu dedykowanych procedur obliczeniowych implementowanych w środowisku programu Matlab.

## 4. WYNIKI BADAŃ

Program wykonanych badań obejmował wyznaczenie:

- napięcia początkowego wyładowań niepełnych  $U_0$ ,
- obrazów fazowo-rozdzielczych wyładowań niepełnych  $D(\varphi, q, n)$ ,
- rozkładów amplitudowych ładunków  $Dn(q)$ ,
- zależności liczby impulsów  $N$  w okresach napięcia  $N(U)$  oraz w połowach okresu  $N^+(U)$  i  $N(U)$ .

Na rysunku 3 przedstawiono wartości napięć początkowych wyładowań niepełnych  $U_0$  zawierających się w zakresie od 2,78 kV do 3,05 kV.

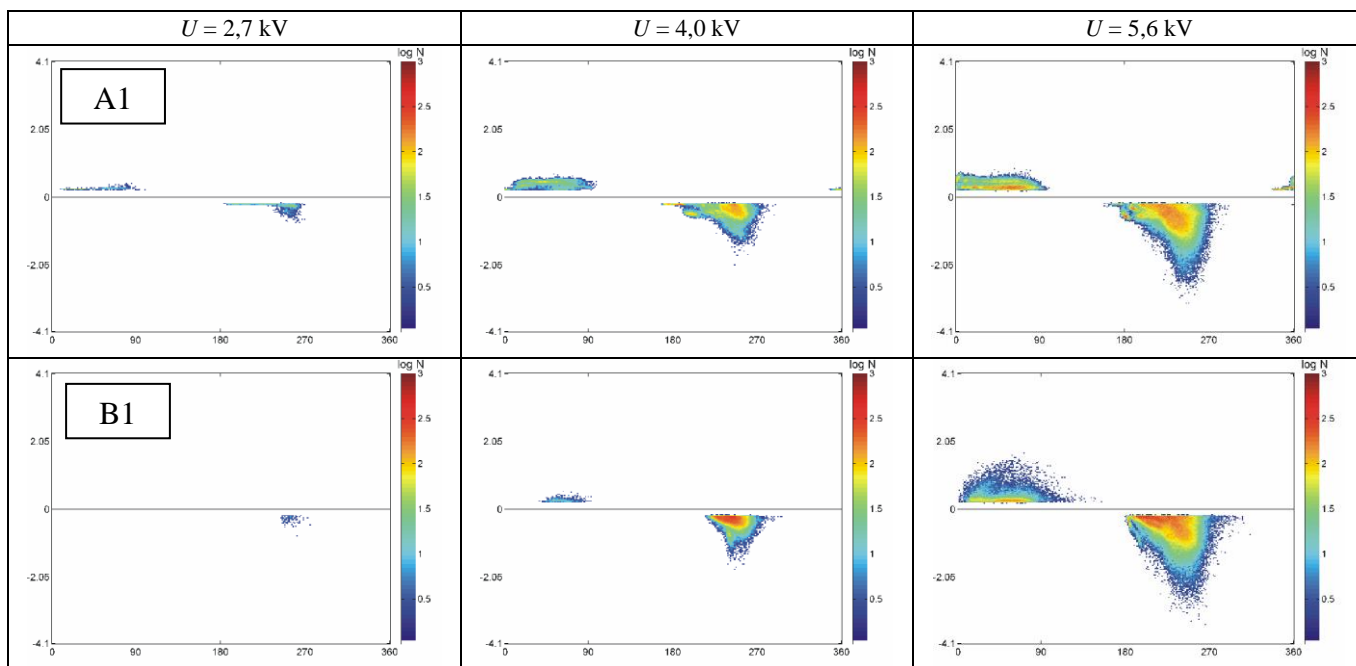


Rys. 3. Wartości napięć początkowych wyładowań niezupełnych  $U_0$  dla wydzielonych fragmentów układu izolacyjnego badanej cewki

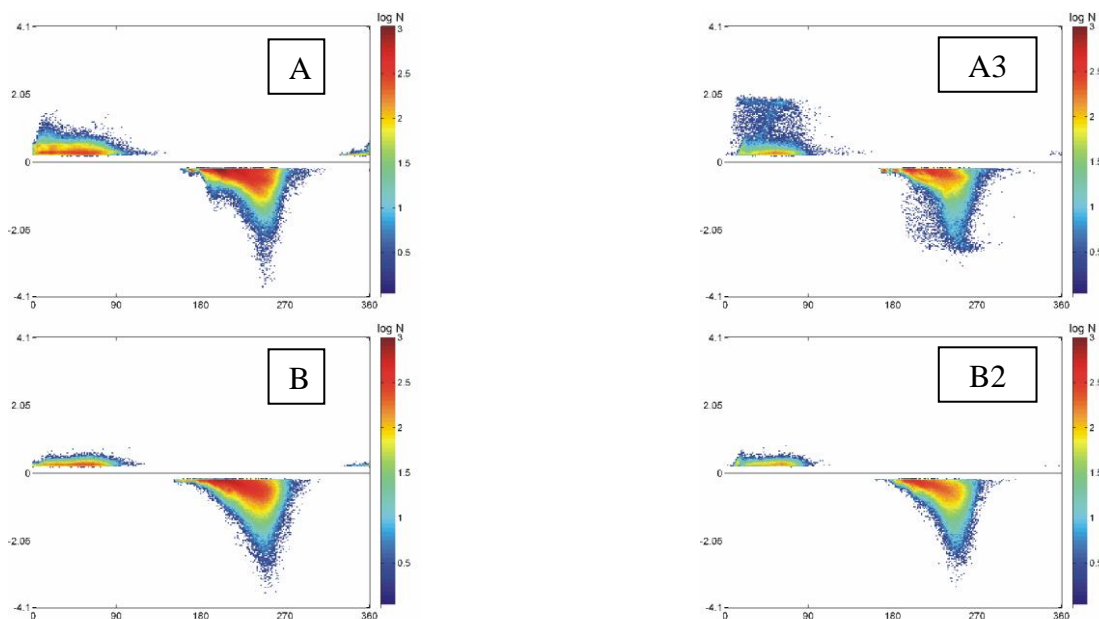
Najniższe wartości napięć początkowych stwierdzono dla fragmentów A1 i B3 znajdujących się przy połączeniach czołowych cewki, natomiast najwyższe we fragmentach A3 i B1, również przy połączeniach czołowych. Miejsca te stanowią zwykle „słabe punkty”, w których mogą zaistnieć warunki dla rozwoju wyładowań niezupełnych. Wyraźny jest jednak wpływ technologii wykonania uzwojenia.

Na rysunku 4 przedstawiono obrazy fazowo-rozdzielcze wyładowań dla indywidualnych fragmentów układu izolacyjnego cewki A1 i B1 przy napięciach 2,7 kV, 4,0 kV i 5,6 kV. Z kolei porównanie obrazów fazowo-rozdzielczych dla części żłbkowych A i B przy napięciu 5,6 kV przedstawiono na rysunku 5.

Charakterystyczna asymetria obrazów fazowo-rozdzielczych przy biegunowości dodatniej i ujemnej jest pokazana na rysunku 6 na przykładzie fragmentów A3 i B2 przy napięciu 3 kV.



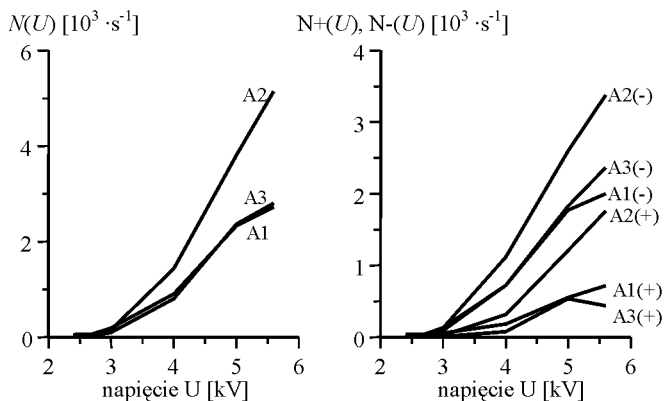
Rys. 4. Wybrane obrazy fazowo-rozdzielcze dla fragmentów A1 i B1 izolacji cewki, rejestrowane przy rosnących wartościach napięcia



Rys. 5. Obrazy fazowo-rozdzielcze dla części żłbkowych izolacji cewki A i B przy napięciu 5,6 kV

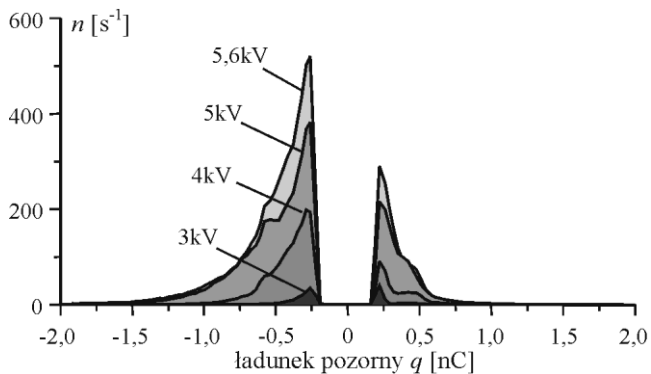
Rys. 6. Asymetria obrazów fazowo-rozdzielczych dla fragmentów izolacji A3 i B2 przy napięciu 3,0 kV

Charakterystyki  $N(U)$  dla fragmentów A1, A2, A3 oraz B1, B2, B3 są podstawą dla wyznaczenia napięcia początkowego wyładowań  $U_0$ , którego wartość w metodzie rejestracji "impuls po impulsie" określa się dla ustalonej częstości impulsów, zwykle  $N = 100 \text{ s}^{-1}$ . Z liniowego lub nieliniowego przebiegu zależności  $N(U)$ ,  $N^+(U)$ .  $N(U)$  (rys. 7) wynika informacja o strukturze zbioru impulsów w okresach napięcia probierczego. Analiza i aproksymacja powyższych zależności oraz przyjęcie odpowiednich schematów zastępczych są podstawą modelowania mechanizmów wzn w niejednorodnych układach izolacyjnych.



Rys. 7. Charakterystyki  $N(U)$  oraz  $N^+(U)$  i  $N^-(U)$  dla fragmentów A1, A2 i A3 układu izolacyjnego cewki

Analiza rozkładów amplitudowych ładunku pozornego  $Dn(q)$  pozwala określić między innymi zmiany intensywności wyładowań o różnych ładunkach, zachodzące pod wpływem wzrostu napięcia probierczego (rys. 8).



Rys. 8. Rozkłady amplitudowe ładunku pozornego  $Dn(q)$  wyładowań niezupełnych w izolacji części żłobkowej A przy wzrastającym napięciu probierczym

## 5. PODSUMOWANIE

Izolacja warstwowa maszyn elektrycznych jest przykładem układu izolacyjnego, w którym proces technologiczny i warunki eksploatacyjne sprzyjają powstawaniu w nim zróżnicowanych pod względem geometrycznym inkluzji gazowych, stanowiących źródła wyładowań niezupełnych. Każde źródło wyładowań w dielektryku opisują napięcia zapłonu  $U_z$  i gaśnięcia  $U_g$ , ładunek pozorny  $q$  oraz częstość wyładowań  $n$  o danym ładunku w przyjętej jednostce czasu. Napięcia zapłonu  $U_z$  i gaśnięcia  $U_g$  są zmiennymi losowymi, które przy równoczesnym działaniu dużej liczby czynników zewnętrznych tworzą odpowiednie rozkłady empiryczne. Pomiary wyładowań niezupełnych, w wyniku których otrzymuje się obrazy fazowo rozdzielcze, mogą dostarczyć informację o strukturze zbioru impulsów rejestrowanych na impedancji detekcyjnej a pośrednio – informację o stanie układu izolacyjnego. Kolejnym etapem w pracach nad oceną skutków działania wyładowań niezupełnych w polimerowych układach izolacyjnych maszyn elektrycznych wirujących są badania z uwzględnieniem narażeń zespolonych.

### Podziękowania

Badania opisane w artykule były częściowo wykonywane w ramach projektu rozwojowego NR01 0019 04 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego

## 6. LITERATURA

1. Stone G.C., Boulter E.A., Culbert I., Dhirani H.: Electrical insulation for rotating machines, IEEE Press Series on Power Engineering, Wiley Interscience, 2004.
2. Florkowska B., Florkowski M., Włodek R., Zydrón P.: Mechanizmy, pomiary i analiza wyładowań niezupełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia, Wyd. IPPT PAN, Warszawa, 2001, ISBN 83-910387-5-0.
3. Florkowska B., Florkowski M., Roehrich J., Zydrón P.: Studies of partial discharges at sinusoidal, non-sinusoidal, and impulse voltages, Przegląd Elektrotechniczny, R. 86, Nr 11b/2010, s. 17-21, ISSN 0033-2097.
4. Florkowska B., Zydrón P.: Interpretation of partial discharge patterns for insulation diagnostic aims, Conf. Proc. 10<sup>th</sup> Int. Symp. on High Voltage Eng. ISH, Montreal, Canada, 1997.
5. Florkowska B., Zydrón P.: Zastosowanie metody obrazów fazowo-rozdzielczych w badaniach wyładowań niezupełnych w izolacji termoutwardzalnej, IV Konf.: „Materiały i układy izolacyjne w przemyśle”, Ustroń-Jaszowice, 1998, s. 110-120.
6. IEC-60270 ed. 3: High voltage measurements - Partial discharge measurement, 2000.

## ASSESSMENT OF INSULATING SYSTEM STRUCTURE INHOMOGENITY FOR WINDINGS OF MEDIUM VOLTAGE ELECTRICAL MACHINES

**Keywords:** insulating systems, partial discharges, electric motors, diagnostics

Thermomechanical stresses produced as result of concurrent, cyclic changes of temperature and electrodynamic forces have specific meaning for rotating electrical machines at in-service conditions. Medium voltage insulating system of electrical machine is made as thermosetting multilayer structure formed in technological process with increased temperature and proper pressure cycle. As effect of in-service stresses many type of defects can arise in insulating system e.g. cavities and delaminations, forming potential partial discharge sources and leading in exploitation conditions to electrical machine failure.

During laboratory measurements parts of electric motors windings have been used for assessment of insulating systems, particularly local defects and their dispersion in insulating structure of motor bar. Computer acquisition and analysis of phase resolved PD patterns together with dissipation factor measurements allow preparing of conclusions about structural changes of thermosetting insulation.