

Barbara Florkowska<sup>1</sup>, Marek Florkowski<sup>2</sup>, Paweł Zydrón<sup>1</sup>

## WPŁYW CZĘSTOTLIWOŚCI NAPIĘCIA PROBIERCZEGO NA OBRAZY FAZOWE WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH

**Streszczenie:** W referacie przedstawiono wyniki pomiarów wyładowań niezupełnych w zakresie częstotliwości od 0,1 Hz do 50 Hz, stanowiące podstawę oceny wpływu częstotliwości na obrazy fazowe wyładowań i ich parametry. Zmiany parametrów wyładowań, w tym zmniejszenie się liczby wyładowań, ładunku maksymalnego i średniego oraz zakresu fazowego przy niskiej częstotliwości napięcia probierczego, interpretowano w oparciu o podstawowe schematy zastępcze mechanizmów wyładowań. Konsekwencje tych zmian omówiono w aspekcie zastosowania obrazów fazowych wyładowań przy niskiej częstotliwości w diagnostyce układów izolacyjnych.

**Słowa kluczowe:** wyładowania niezupełne (wnz), diagnostyka układów izolacyjnych

### 1. Wprowadzenie

Jednym z aktualnych kierunków badań w diagnostyce układów izolacyjnych, istotnym z punktu widzenia praktycznych zastosowań, są pomiary wyładowań niezupełnych przy napięciu przemiennym o niskiej częstotliwości – zazwyczaj 0,1 Hz [1,2]. Zastosowanie napięcia probierczego o tej częstotliwości umożliwia wykonywanie badań na obiektach o dużych pojemnościach, w miejscach ich zainstalowania, bez konieczności stosowania źródeł napięcia o dużych mocach – np. stosując napięcia o takiej samej wartości przy częstotliwości 0,1 Hz następuje ok. 500-krotne zmniejszenie obciążenia w stosunku do obciążenia przy częstotliwości 50 Hz. Uwzględniając np. wymagania norm na próby napięciowe kabli elektroenergetycznych, dla których stosowane jest napięcie  $2U_f$  przy częstotliwości 50 Hz i  $3U_f$  przy częstotliwości 0,1 Hz ( $U_f$  – napięcie fazowe kabla), współczynnik zmniejszenia wymaganej mocy jest niższy i wynosi 222 [2].

Inną metodą, rozwiązującą częściowo problem źródła o dużej mocy i podobną do opisywanej, jest detekcja wyładowań niezupełnych przy napięciu probierczym impulsowym lub oscylacyjnym. W pierwszym przypadku stosowane są impulsy napięciowe o takich wartościach czasów narastania i opadania, aby stworzyć zbliżone warunki narażeń napięciowych

<sup>1</sup> Akademia Górniczo-Hutnicza, Zakład Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

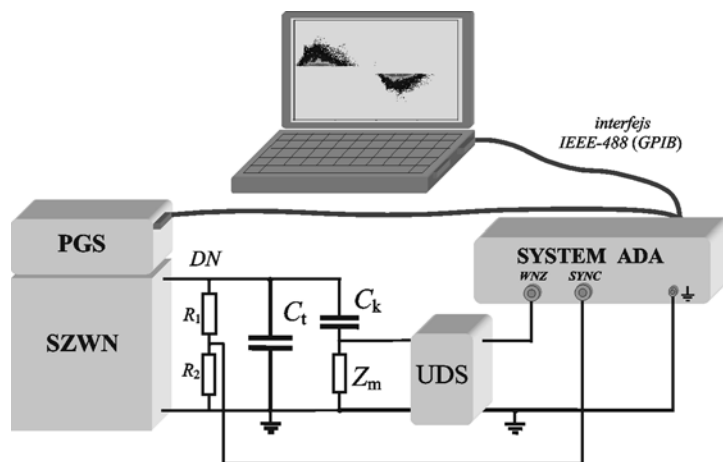
<sup>2</sup> ABB Corporate Research, ul. Starowiślna 13A, 31-038 Kraków

jak dla napięcia przemiennego 50 Hz np. czas narastania 5 ms i czas opadania 50 ms lub czas narastania 10 s i czas opadania 10 ms. Generowane są wówczas zarówno impulsy o biegunowości dodatniej, jak i ujemnej, a rejestracji podlegają powstające w wyniku narażenia impulsy wyładowań. Kolejna metoda polega na generowaniu tłumionego przebiegu oscylacyjnego napięcia o częstotliwości drgań zbliżonej do częstotliwości napięcia roboczego. Początkowo kabel jest ładowany do pewnej wartości napięcia stałego, a następnie poddawany działaniu napięcia oscylacyjnego, powstającego w obwodzie rezonansowym, utworzonym w wyniku dołączenia poprzez specjalny układ zwierający odpowiednio dobranej indukcyjności  $L$ . Napięcie o częstotliwości zbliżonej do napięcia roboczego pozwala na przeprowadzenie pomiarów wyładowań niepełnych oraz ich lokalizację. Rozwiązanie to jest stosowane w praktyce np. w badaniach diagnostycznych kabli średnich napięć [3, 4].

Zagadnieniem badawczym związanym ze stosowaniem napięcia probierczego o niskiej częstotliwości jest ocena tej metody w odniesieniu do pomiaru wyładowań niepełnych oraz oszacowanie korelacji pomiędzy jej wynikami, a rezultatami uzyskiwanymi przy częstotliwości znamionowej. Problem ten przedstawiono w niniejszej pracy analizując obrazy fazowo-rozdzielcze wyładowań niepełnych w różnych obiektach, wyznaczane w zakresie częstotliwości od 0,1 Hz do 50 Hz.

## 2. Układ pomiarowy

Głównymi elementami stanowiska pomiarowego do badania wyładowań niepełnych przy zmiennej częstotliwości napięcia probierczego (Rys. 1) są: sterowane źródło wysokiego napięcia – wzmacniacz wysokonapięciowy *TREK*<sup>®</sup> typ 20/20B, programowany generator sygnałów *Analogic*<sup>®</sup> typ 2030 oraz system pomiaru wyładowań niepełnych *ADA*, rejestrujący ich obrazy fazowo-rozdzielcze [5].



**Rys. 1.** Konfiguracja sterowanego komputerowo stanowiska pomiarowego: PGS – programowany generator sygnałów, SZWN – sterowane źródło wysokiego napięcia, UDS – układ dopasowania sygnału, ADA – system pomiarowy wyładowań niepełnych,  $C_t$  – pojemność badanego obiektu,  $C_k$  – pojemność sprzęgająca,  $Z_m$  – impedancja detekcyjna, DN – dzielnik napięcia

Zastosowana aparatura umożliwia wykonywanie pomiarów przy napięciu probierczym do 20 kV i prądzie obciążenia do 20 mA. Impulsy wyładowań niepełnych mierzone w klasycznym układzie detekcji z kondensatorem sprzęgającym i impedancją pomiarową  $Z_m$  są rejestrowane bipolarnie z rozdzielczością amplitudowo-fazową matrycy obrazu  $256 \times 256$  elementów.

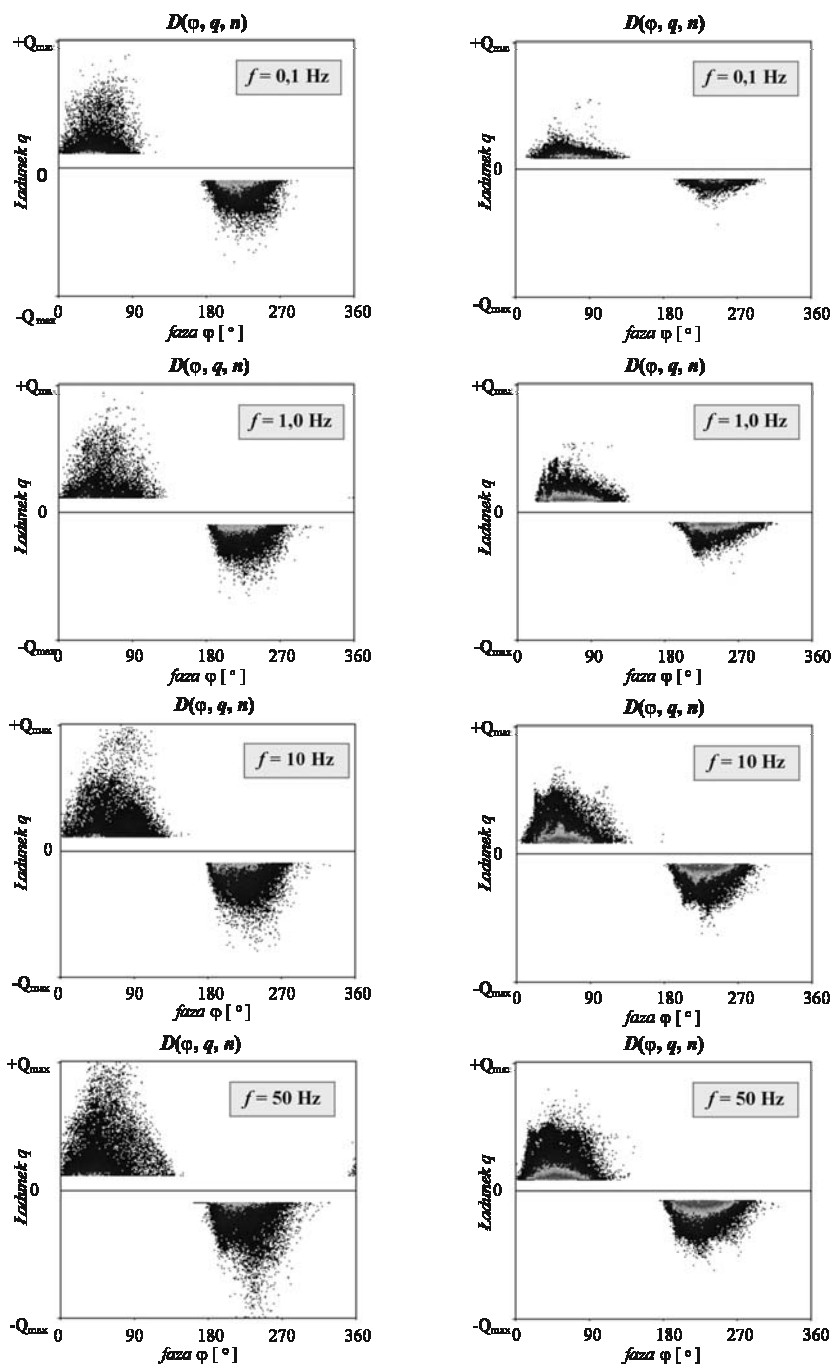
### 3. Wyniki badań i analiza

Przykłady obrazów fazowych  $D(\varphi, q, n)$  wyładowań niepełnych w izolacji termo-utwardzalnej maszyn elektrycznych i izolacji papierowo-olejowej kabli elektroenergetycznych, wyznaczonych przy rejestracji 500 okresów napięcia probierczego równego  $1,5U_0$  ( $U_0$  – napięcie początkowe wyładowań), w zakresie częstotliwości od 0,1Hz do 50Hz przedstawiono na rysunku 2. Podstawą analizy wyników są wybrane wielkości charakterystyczne, a mianowicie:  $N$  – całkowita liczba impulsów w okresie napięcia probierczego;  $Q_{\max}, q_{\text{sr}}$  – ładunki maksymalny i średni;  $z_\varphi$  – zakres fazowy impulsów w połowach okresu. Przebiegi zmian tych wielkości w funkcji częstotliwości (Rys.3) wskazują na częstotliwość równą ok. 10Hz, poniżej której występuje ich zależność od częstotliwości, a powyżej której są one praktycznie stałe dla badanych układów izolacyjnych. Kolejne podstawowe stwierdzenie wynikające z porównania obrazów przy 0,1Hz i 50Hz to: mniejsze wartości wymienionych wyżej parametrów przy częstotliwości 0,1Hz. Oznacza to odmienny charakter przemian energetycznych w źródłach wyładowań przy niskiej i znamionowej częstotliwości.

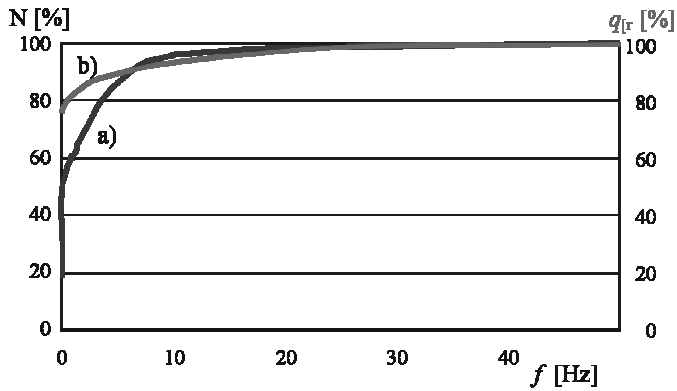
Odnosząc analizę tych przemian do schematów zastępczych układów izolacyjnych z uwzględnieniem wyładowań niepełnych, można przyjąć iż podstawowy schemat pojemnościowy (tzw. *model a-b-c*) [6] jest właściwym do interpretacji wyników pomiarów tylko w zakresie większych częstotliwości (powyżej ok. 10Hz). Wówczas całkowita liczba wyładowań  $N$  w każdej połowie okresu napięcia zależy tylko od napięć zapłonu  $U_{cz}$  i gaśnięcia  $U_{cg}$ , oraz napięcia probierczego  $U_{cm}$  [7]:

$$N = 2 \frac{1 - U_{cg} / U_{cm}}{U_{cz} / U_{cm} - U_{cg} / U_{cm}} \quad (1)$$

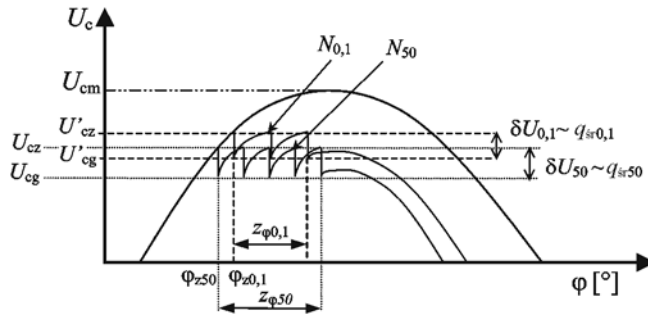
i zawiera się w zakresie fazowym  $z\varphi$  (Rys.4). Kąt zapłonu wyładowań  $\varphi_z$  zależy – przy danym napięciu probierczym – tylko od statycznego napięcia zapłonu  $U_{cz}$ , co określa zależność:  $\sin\varphi_z = U_{cz} / U_{cm}$ . Można przedstawić hipotezę, że zmniejszenie się liczby wyładowań przy niskiej częstotliwości ( $N_{0,1}$  przy 0,1Hz) jest efektem wzrostu napięcia zapłonu  $U_{cz}$  do  $U_{cz}'$  przy równoczesnym takim zwiększeniu się napięcia gaśnięcia od  $U_{cg}$  do  $U_{cg}'$ , że impulsy napięciowe  $\delta U$ , proporcjonalne do ładunku pozornego wyładowania, spełniają warunek:  $\delta U_{0,1} < \delta U_{50}$ . Zwiększenie wartości napięcia  $U_{cz}$  do  $U_{cz}'$  oznacza inicjowanie wyładowań przy większym kącie fazowym:  $\varphi_{z0,1} > \varphi_{z50}$ , a zatem zmniejszenie się zakresu fazowego wyładowań w połowie okresu:  $z_{\varphi 0,1} < z_{\varphi 50}$  (Rys. 4). Szybkość narastania napięcia  $dU/dt$  w źródle wyładowań (Rys.5) jest przy 50Hz duża, a więc odstęp czasu między impulsami jest rzędu 0,1ms, podczas gdy przy 0,1Hz i małej szybkości zmian napięcia – odstęp ten jest rzędu 50ms, tzn. kilkaset razy większy.



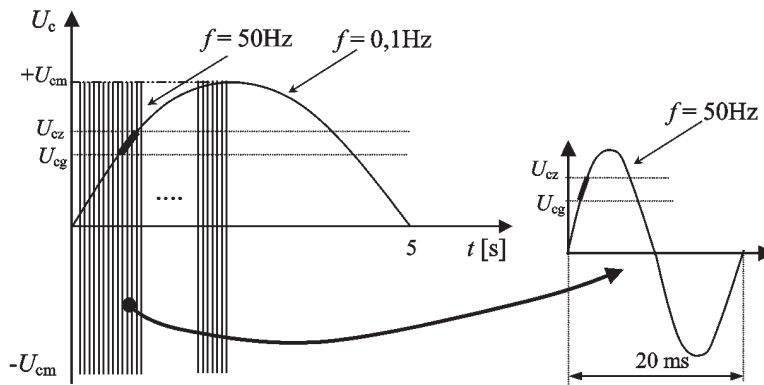
Rys. 2. Obrazy fazowo rozdzielcze  $D(\varphi, q, n)$  wyladowań niezupełnych a) w izolacji termoutwardzalnej maszyn elektrycznych, b) izolacji papierowo-olejowej kabla elektroenergetycznego – dla serii pomiarów przy napięciu probierczym o częstotliwości: 0,1Hz; 1,0Hz; 10Hz i 50Hz



Rys. 3. Zależność: a) liczby wyładowań  $N$  oraz b) ładunku średniego  $q_{tr}$  od częstotliwości napięcia probierczego  $f$

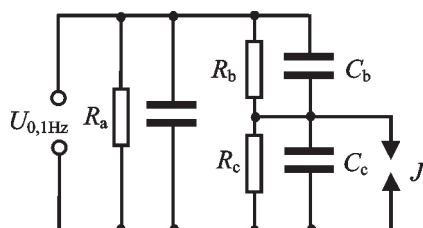


Rys. 4. Model mechanizmu wyładowań niepełnych (indeksy 0,1 i 50 oznaczają odpowiednie częstotliwości),  $\varphi_z$  – kąt zapłonu wyładowań,  $\delta U$  – impuls napięciowy w źródle wyładowań



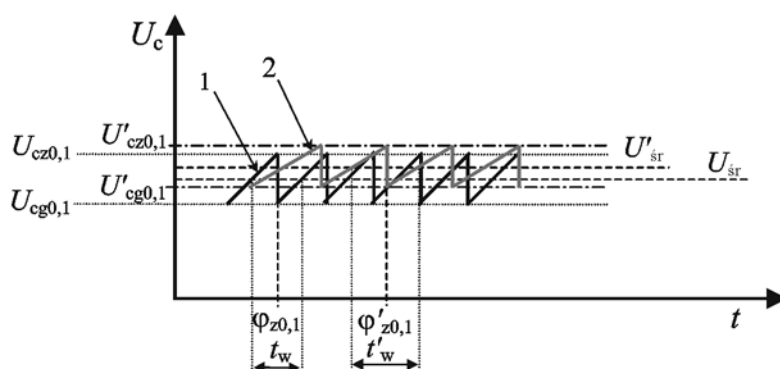
Rys. 5. Przebiegi czasowe napięć o częstotliwości 0,1 Hz i 50 Hz

Kolejne wyładowania można zatem traktować jako zdarzenia niezależne, w których nie występuje wpływ wyładowań poprzednich na następne. Przy niskiej częstotliwości elektrony pułapkowane w dielektryku w dodatniej połowie okresu są w niej utrzymywane przez długi czas i po zmianie biegunowości mogą być uwalniane. Dopiero wzrost wartości natężenia pola elektrycznego i wytwarzanie pola elektrycznego dodatkowego od ładunku przestrzennego, przeciwnego do pola zewnętrznego, może ten stan zmienić. Istotnym elementem analizy mechanizmu wyładowań w zakresie niskich częstotliwości jest uwzględnienie rezystancji izolacji  $R_a$ ,  $R_b$  i rezystancji powierzchniowej  $R_c$  w źródle wyładowań (Rys.6) oraz ładunku przestrzennego, których wpływ powoduje opóźnienie momentu wystąpienia wyładowania, a więc wzrost wartości  $U_{cz}$ .



**Rys. 6.** Rozszerzony schemat zastępczy układu izolacyjnego:  $R_a$ ,  $R_b$  – rezystancje izolacji i  $R_c$  – rezystancja w źródle wyładowań oraz odpowiadające im pojemności  $C_a$ ,  $C_b$ ,  $C_c$ ;  $J$  – iskiernik reprezentujący wyładowania niezupełne

Rozkład natężenia pola elektrycznego w niejednorodnym układzie izolacyjnym zależy przy niskiej częstotliwości nie tylko od przenikalności elektrycznych warstw i wymiarów geometrycznych elementów układu izolacyjnego, w tym źródeł wyładowań (jak przy częstotliwości 50Hz), ale również od ich rezystywności. Rozkład ten może być modyfikowany przez ładunek przestrzenny w źródle wyładowań.



**Rys. 7.** Przebiegi napięcia w źródle wyładowań przy  $f = 0,1$  Hz: 1 – podstawowy, 2 – z opóźnieniem

Dla warunków wyładowań w źródle o pojemności  $C_c$  stała czasowa  $\tau$  schematu zastępczego wynosi w przybliżeniu:

$$\tau = \frac{R_b R_c}{R_b + R_c} (C_c + C_b) \quad (2)$$

i przy częstotliwości 50Hz jest o wiele rzędów większa od czasu trwania okresu tego napięcia i może nie być brana pod uwagę – przeciwnie niż przy częstotliwości niskiej. Wypadkowe rezystancje równoległe  $R_b$  i  $R_c$  opóźniają ładowanie pojemności  $C_c$  źródła wyładowań i tym samym powodują wydłużenie czasu do osiągnięcia napięcia zapłonu w inkluzji gazowej (Rys.7). Dodatkowo, zapłon i gaśnięcie wyładowania są procesami stochastycznymi, co wprowadza statystyczne zmiany odstępów czasu między impulsami.

#### **4. Zakończenie**

1. Pomiar wyładowań niezupełnych jako jedna z metod oceny układów izolacyjnych urządzeń elektrycznych po procesie technologicznym, mogą stanowić narzędzie diagnostyki w eksploatacji gdy zapewnione zostaną warunki wynikające z mocy zespołów probierczych. Z tego powodu badania przy niskiej częstotliwości (np. 0,1Hz) wykazują istotne zalety w porównaniu z wykonywanymi przy 50Hz – przy zmniejszonej mocy źródła zasilającego dają możliwość pomiarów wyładowań niezupełnych i strat dielektrycznych.
2. Zastosowanie niskiej częstotliwości w pomiarach wyładowań niezupełnych, podobnie jak jest to stosowane w próbach napięciowych kabli elektroenergetycznych, nie stanowi obecnie przeszkody ze względu na wyposażenie aparaturowe, wymaga jednak badań dla właściwej interpretacji wyników pomiarów i określenia korelacji z wynikami uzyskanymi przy częstotliwości znamionowej.
3. Liczne czynniki mają wpływ na mechanizm wyładowań niezupełnych. Należą do nich: wartość napięcia probierczego, rodzaj materiałów izolacyjnych, warunki wyzwalań elektronów inicjujących wyładowanie, temperatura, ciśnienie, wymiary geometryczne i rodzaje defektów stanowiących źródła wyładowań. Statystyczny czas opóźnienia wyzwalań elektronów inicjujących wyładowanie, ma decydujący wpływ na dynamikę przemian w ich źródłach. Można przyjąć, że w badaniach wykonanych przy natężeniu pola elektrycznego przewyższającym o 50% napięcie początkowe wyładowań, opóźnienie wyzwalań elektronów inicjujących wyładowania spowodowało zmniejszenie ich intensywności przy niskiej częstotliwości. Badania w szerszym zakresie natężeń pól elektrycznych pozwolą wyjaśnić zakres utrzymywania się takiej relacji.
4. Nie stwierdzono bezpośredniej zależności pomiędzy wynikami pomiarów w badanym zakresie częstotliwości, co pozwoliłoby na ekstrapolację wyników pod względem ilościowym. Istnieje jednak bardzo dobra korelacja między typami obrazów fazowych, reprezentujących rodzaje defektów, stanowiących źródła wyładowań. Pomiar wyładowań niezupełnych wskazuje na obecność takich defektów, stanowiących załączki procesów erozyjnych lub mechanizmów drzewienia.
5. Obrazy fazowe wyładowań wyznaczone przy częstotliwości 0,1Hz dostarczają informacji o obecności źródeł wyładowań, a typ obrazu może wskazać na ich formę (np. wyładowania w inkluzjach gazowych, powierzchniowe, ulotowe) co w połączeniu z wartością

napięcia początkowego wyładowań oznacza możliwość oceny stanu układu izolacyjnego w eksploatacji.

### Literatura

- [1] **Holbøll J.T., Edin H.** – „*PD detection vs. loss measurement at high voltages with variable frequencies*”, Conf. Proc. 11<sup>th</sup> ISH, paper 3417, Montreal, Canada, 1997
- [2] **Muhr M., Sumereder C., Woschitz R.** – „*The use of the 0,1 Hz cable testing method as substitution to 50 Hz measurement and the application for PD measuring and cable fault location*”, Conf. Proc. 12<sup>th</sup> ISH, paper 6-38, Bangalore, India, 2001
- [3] **Lemke E., Schmiegel P.** – „*Complex Discharge Analysing (CDA) – an alternative procedure for diagnosis tests on HV power apparatus of extremely high capacity*”, Conf. Proc. 9<sup>th</sup> ISH, paper 5617, Graz, Austria, 1995
- [4] **Gulski E., Wester F.J., Smit J.J., Seitz P.N., Turner M.** – „*Advanced partial discharge diagnostic of MV power cable system using oscillating wave test system*”, IEEE EI Mag., Vol. 16, No. 2, pp. 17-25, 2000
- [5] **Florkowski M.** – „*System diagnostyczny oceny układów elektroizolacyjnych wysokiego napięcia*”, Rozprawa doktorska, AGH, Kraków, 1994
- [6] **Florkowska B., Florkowski M., Włodek R., Zydrón P.** – „*Mechanizmy, pomiary i analiza wyładowań niezupełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia*”, PAN, Warszawa, ISBN 83-910387-5-0, 2001
- [7] **Florkowska B.** – „*Wyładowania niezupełne w układach izolacyjnych wysokiego napięcia analiza mechanizmów. form i obrazów*”, PAN, ISBN 83-90627-6-0, Warszawa 1997

### INFLUENCE OF TEST VOLTAGE FREQUENCY ON PARTIAL DISCHARGE PHASE-RESOLVED PATTERNS

Measurement results and analysis of partial discharge (PD) at different frequencies of test voltage are presented in the paper. Advanced laboratory system for PD measurement in wide frequency range is also described. Comparison and short discussion of results for two different kinds of high voltage insulation, assuming extended C-R model of insulation are made.

Badania przedstawione w niniejszym referacie realizowano m.in. w ramach umów nr: 10.10.120.138/p oraz 10.10.120.510/p finansowanych przez Komitet Badań Naukowych.