



Grzegorz ZIEMAN, Marek OLESZ

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki

Diagnostyka izolacji stojanów generatorów wysokiego napięcia w elektrowni wodnej Żarnowiec metodą próbkowania sekwencyjnego

Streszczenie: W artykule przedstawiono opis systemu „Hydroscan” do monitorowania pracy generatorów wolnobieżnych wysokiego napięcia oraz wstępną analizę pomiarów wyładowań niepełnych zarejestrowanych metodą próbkowania sekwencyjnego pod kątem zmian ładunku, energii i częstości występowania, na wybranych hydrogeneratorach. W pierwszej części zamieszczono opis i zasadę działania systemu. W drugiej części przedstawiono metodykę badań oraz przykładowe przebiegi pomierzonych wielkości: intensywności wyładowań niepełnych (wnz) oraz temperatury, a w trzeciej wyniki analizy zarejestrowanych pomiarów.

Abstract. (Sequential sampling method for diagnosis high voltage stators windings insulation in water power plant Żarnowiec). In the article was shortened introduced description of system “Hydroscan” - to monitoring normal work of high voltage free-wheel hydrogenerators as well as analysis of measurements of partial discharges changes - load, energy and frequency occurrence at an angle of, on chosen hydrogenerator, registered with method of sequential sampling. The description and principle of rule of system were put in first part. In second part were introduced the methodology of measurement and examples of measured parameters: the intensity of partial discharges (WNZ) and the temperature. In third part were introduced analyze registered results of measurement.

Słowa kluczowe: wyładowania niepełne, degradacja izolacji, hydrogeneratory.

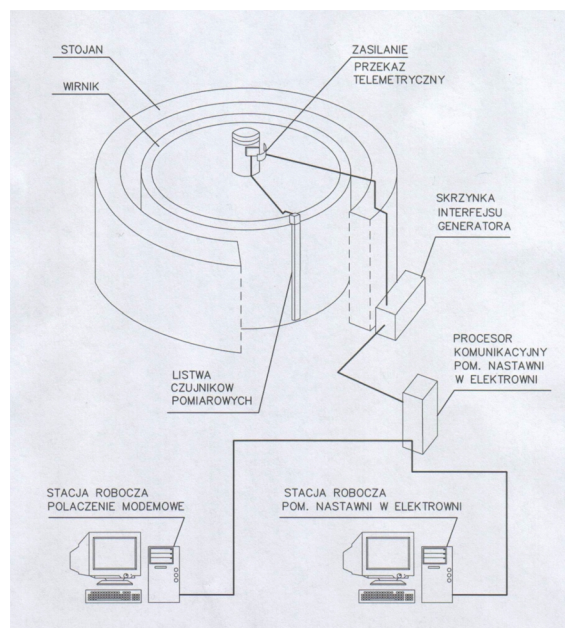
Keywords: partial discharges, insulation degradation, hydrogenerators.

Wstęp

Od maszyn elektrycznych wysokiego napięcia, a w szczególności hydrogeneratorów wymaga się niezawodności, trwałości i odporności na różnego rodzaju szkodliwe czynniki zewnętrzne. Jednocześnie w czasie wieloletniej eksploatacji hydrogeneratory są poddawane narażeniu termicznemu, elektrycznemu oraz mechanicznemu, których efekty kumulując się w czasie prowadzą do trwałych zmian w izolacji żłobkowej oraz w części związanej z ochroną przeciwwarzeniową. Ze względu na znaczne koszty wynikające z wypadnięcia generatora z ruchu zwraca się szczególną uwagę na stan tych maszyn i zachodzące w nich procesy starzeniowe. Wykorzystanie tradycyjnych technik pomiarowych czyni trudną, a wręcz niemożliwą precyzyjną kontrolę najistotniejszych parametrów mechaniczno – elektrycznych hydrozespołu, których znajomość w każdym okresie pracy jest ważna ze względu na ocenę niezawodności pracy maszyny [1, 2].

Idea zainstalowanego w Elektrowni Wodnej Żarnowiec S.A. (EWŻ) systemu pomiarowego HydroScan™ polega na umieszczeniu grupy czujników pomiarowych na specjalnej szynie trwale zamocowanej na wirniku maszyny. System dokonuje pomiarów czynników istotnych dla niezawodności pracy i pozwalających ocenić tempo procesu starzenia hydrogeneratora: temperatury, parametrów elektrycznych i mechanicznych. Budowę systemu pokazano na rysunku 1. W czasie pracy bloku czujniki sekwencyjnie badają żłóbki stojana mierząc dla poszczególnych części generatora różne parametry fizyczne: promieniowanie podczerwone (temperatura powierzchni stojana), zakłócenia radiowe (wyładowania niepełne w izolacji cewek stojana), efekty akustyczne, zakłócenia magnetyczne (przepływy magnetyczne), zmiany przestrzenne szczeliny powietrznej, drgania (w celu wykrycia niepewnych połączeń szyn lub zamocowanych na niej urządzeń). Niewątpliwie ceną zaletę systemu stanowi pomiar poziomu wnz w poszczególnych żłobkach stojana [2, 3].

Część czujników - do pomiaru temperatur, szczelin powietrznych, przepływów magnetycznych oraz drgań, umieszczono na listwie zamontowanej na wirniku hydrogeneratora pomiędzy dwoma sąsiadującymi nabiegunknikami. Jako lokalizatory wnz zastosowano czujniki pojemnościowe (PDL - partial discharges locator) wrażliwe na pole elektrostatyczne. Czujniki te wykrywają i lokalizują źródła wyładowań niepełnych w czasie maksymalnego obciążenia napięciowego dla każdej cewki i podają informacje z rozdzielczością do poszczególnych żłobków.



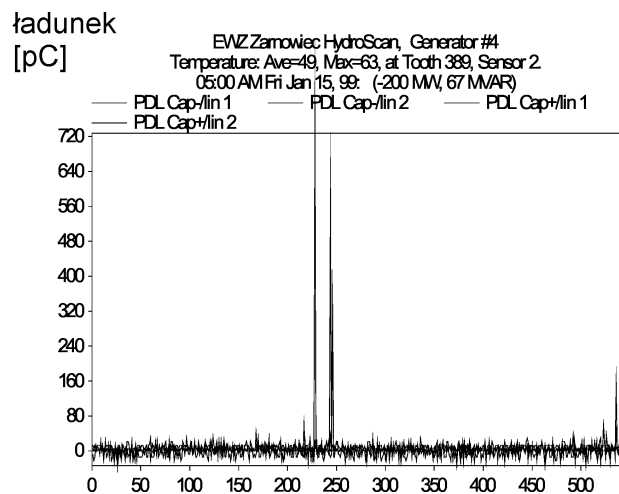
Rys. 1. Budowa systemu HydroScan™

Badania skutków wyładowań niepełnych w polimerach kompozytowych stosowanych w warstwowym układach izolacyjnych maszyn elektrycznych ujawniły kilkietapową degradację. Bezpośrednie skutki wnz to erozja powierzchniowa żywicy, erozja głęboka z odstąpieniem włókien tkaniny szklanej, tworzenie się dendrytów i lokalnych wżerów oraz fragmentów pokrytych białym pyłem [4]. Diagnozowanie izolacji pod kątem wyładowań niepełnych jest istotne, ponieważ ich wzmożona aktywność może być pierwszą oznaką degradacji izolacji, a badanie współczynnika stratności nie oddaje w pełni stanu wysokiej klasy izolacji mikowej. Z doświadczeń wynika, iż wnz pojawiają się kilka miesięcy, a nawet lat wcześniej niż awaria maszyny [5, 6]. Zatem od momentu ich rozpoznania pozostaje wystarczająco dużo czasu do podjęcia odpowiednich działań zapobiegawczych.

Dzięki przeprowadzonym okresowo badaniom wyładowań niepełnych mamy możliwość wykrycia wzmożonej ich aktywności. Możemy stwierdzić jak zmienił się poziom ładunku wyładowań, liczba wyładowań, ich energia oraz szereg innych parametrów [6, 7].

To, co odróżnia metodę zastosowaną w Elektrowni Wodnej Żarnowiec od innych to pomiary dokonywane podczas normalnej pracy hydrozespołu (on-line) oraz unikalna zdolność do lokalizowania wyładowań niepełnych z rozdzielczością do jednego żłobka [3].

Przykład jednej sekwencji pomiarowej pokazano na rysunku 2. Na rysunku 3 przedstawiono rozkład temperatury na powierzchni stojana. Wykorzystanie obu wymienionych informacji – temperatury i wnz być może pozwoli określić rodzaj uszkodzenia izolacji.



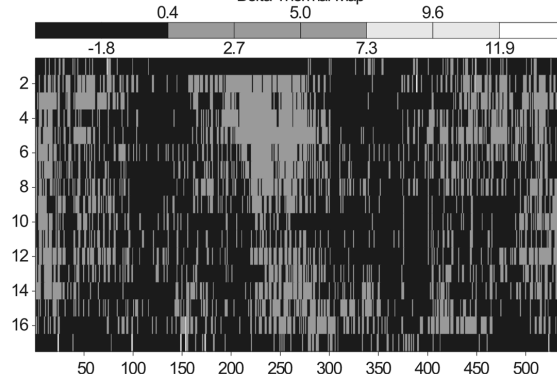
Rys. 2. Przykładowy wynik pomiaru WNZ w uzwojeniu stojana w generatorze nr 4., na osi poziomej zaznaczono kolejne numery żłobków stojana. Pomiaru dokonano 15.01.1999 o godz. 1.00, w chwili pomiaru moc generatora 200 MW w trybie pracy pompowej.

Na podstawie badań [5] określono lokalny spadek liczby wnz typu powierzchniowego na skutek wzrostu temperatury izolacji o około 5°C. Zależność tę można wytłumaczyć w dwojaki sposób: wraz ze wzrostem temperatury skutek rozszerzalności cieplnej zmniejszają się wymiary szczelin, w których powstają wyładowania oraz zmniejsza się wilgotność względna powietrza w generatorze. Zmiany temperatury na wymienionym poziomie mogą być bez problemu wykrywane w systemie Hydroscan.

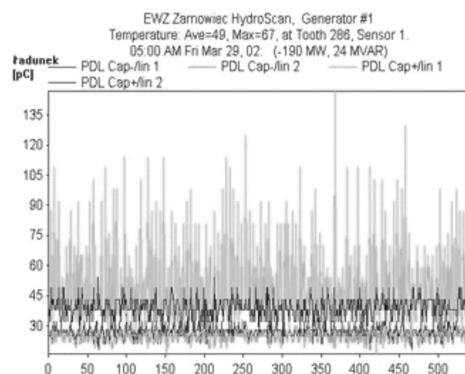
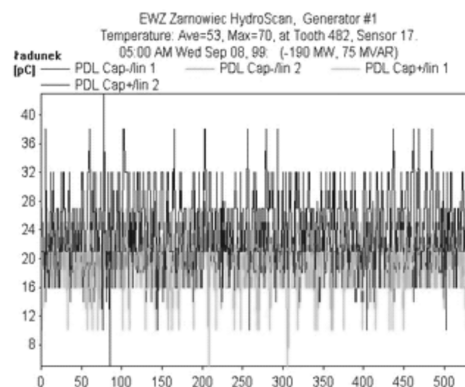
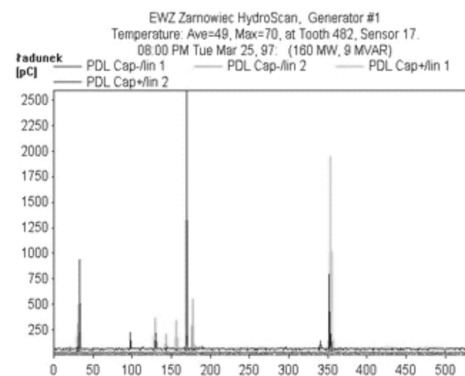
Opisana metoda pomiarowa może być stosowana jedynie w hydrogeneratorach z uwagi na znaczną różnicę prędkości obrotowych wirników turbo- i hydrozespołów oraz

obecność w tych drugich nabiegunków ułatwiających montaż listwy z czujnikami.

EWZ Żarnowiec HydroScan, Generator #4
Temperature: Ave=49, Max=63, at Tooth 389, Sensor 2.
05:00 AM Fri Jan 15, 99: (-200 MW, 67 MVAR)
Delta Thermal Map



Rys. 3. Rozkład temperatury (delta term.) w izolacji stojana. Na osi poziomej zaznaczono kolejne numery żłobków stojana. Pomiar z 15.01.1999 (pomierzony w tej samej chwili jak przedstawiony na rys. 2 obraz wnz).



Rys. 4. Przebiegi wnz w generatorze nr 1 - od góry: przed remontem; tuż po remoncie; po około 3 latach po remoncie. Na osi poziomej zaznaczono kolejne numery żłobków stojana.

Poziomy wnz w izolacji generatorowej

W tradycyjnych, sprawdzonych metodach badania stanu izolacji na podstawie analizy wyładowań niezupełnych inżynierowie diagnostycy dysponują wieloma parametrami wnz, pozwalającymi określić stopień i rodzaj degradacji izolacji [2]. Przy użyciu metody opisywanej w tym artykule dysponujemy tylko poziomem ładunku wnz oraz częstotliwością występowania wyładowań uzupełnionych rozkładem temperatury w poszczególnych prętach stojana. Dodatkowo konieczne jest poddawanie wymienionych danych uciążliwej i czasochłonnej obróbce (do czasu ukończenia prac nad programem komputerowym), gdyż twórcy systemu skupili się na pomiarach i poprawnym interfejsie dla innych wielkości mechanicznych (np. szerokość szczeliny powietrznej, temperatura stojana itd.) Metoda ta jest jednak bardzo pożyteczna i atrakcyjna w stosowaniu, a to ze względu na swoją specyficzną i unikalną zaletę - precyzyjne określanie lokalizacji występowania wyładowań niezupełnych.

Analizując wyniki pomiarów wykonanych na izolacji stojana generatora nr 1 stwierdzono znaczne różnice między poziomem ładunku wyładowań niezupełnych przed dokonaniem remontu (polegającego m.in. na wymianie wszystkich prętów stojana) i po jego zakończeniu.

Poziom ładunku w izolacji starych (około 15-letnich) prętów jest około kilkadziesiąt razy większy niż w nowych. Rejestrowano wnz na poziomie 2500 pC i większym, natomiast w nowych prętach sporadycznie obserwowano ładunek pozorny przekraczający 35 pC.

Na trzecim przebiegu na rysunku 4 widać obraz poziomu wyładowań po około 3 latach od przezwolenia - poziom ładunku wzrósł do około 45 pC i dodatkowo występują wyładowania na poziomie około 150 pC i więcej w większości prętów stojana. Obserwuje się więc wyraźną tendencję narastania wnz w czasie.

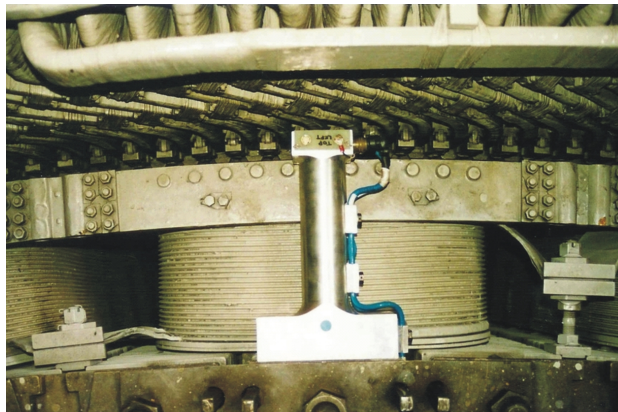
Lokalizacja wnz

Podczas jednego pełnego obrotu wirnika (oraz umieszczonej na nim listwy pomiarowej) dokonywany jest pomiar w każdym z 540 żłobków stojana - co stanowi dane dla jednej sekwencji pomiarowej. Z uwagi na ograniczoną objętość dysków twardej, na których rejestrowano dane pomiarowe, dokonywano rejestracji pracy wszystkich generatorów 4 razy w ciągu doby w godzinach wieczornych (praca generatorowa) oraz nocnych (praca pompowa).

Jako lokalizatory wnz (czujniki PDL - partial discharges locator) zastosowano czujniki pojemnościowe wrażliwe na pole elektrostatyczne. Mierzą one zakłócenia radiowe wywoływane przez wyładowania niezupełne. Cztery takie czujniki zamontowano po przeciwnej stronie mostka czujników, na linii środkowej (symetrycznej), nad dwoma sąsiadującymi nabiegunkami (rys. 5) odpowiednimi dla półfali dodatniej i napięcia przemiennego [7]. Czujniki te dają informacje o poziomie zakłóceń o częstotliwości radiowej z rozdzielczością do poszczególnych żłobków. Na podstawie porównania poziomu zakłóceń mierzonych przez czujniki zainstalowane na biegunach N i S można wnioskować o charakterze zjawiska (ulot, wyładowanie szczelinowe czy inne). W początkowym okresie eksploatacji systemu prowadzono regularną akwizycję i gromadzono bazę danych pomiarowych pozwalającą na wyciągnięcie pierwszych wniosków na temat aktualnego stanu generatorów, określenie poziomu odniesienia dla późniejszych analiz.

Do odczytywania zakodowanych, przestanych i zarejestrowanych wyników pomiarów użyto programu

WinScan napisanego przez firmę MCM Enterprise - dostawcę systemu. Interfejs oraz możliwości obróbki danych tego programu są wysoce niedopracowane. O ile umożliwiono uzyskanie graficznych obrazów długotrwałych zmian temperatur, oraz parametrów mechanicznych to w żaden sposób diagnosta nie ma możliwości przeanalizowania wyników pomiarów wnz.



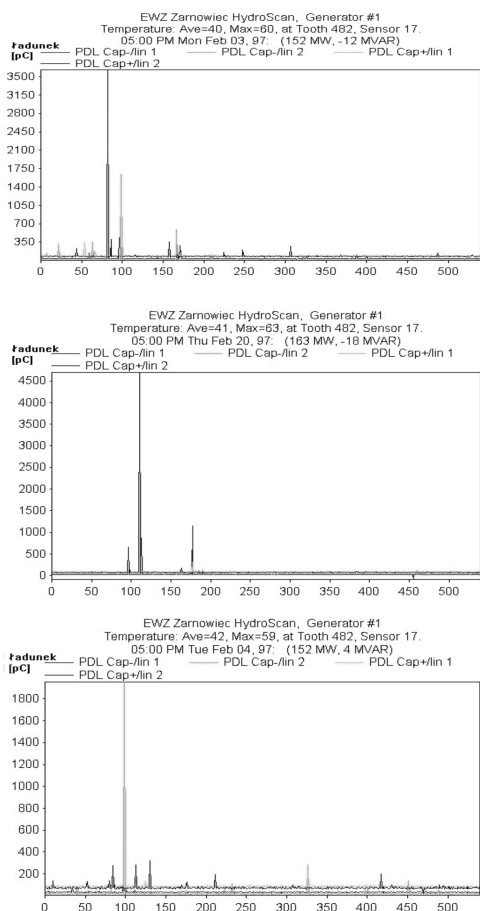
Rys. 5. Czujnik PDL - widok z góry

Może jedynie analizować pojedyncze przebiegi sekwencji pomiarowej (pliki o specyficznym formacie - nie dające się zaimplementować w żadnym dostępnym edytorze charakterystyk typu Grapher, Origin, Excel). Program wizualizuje wyniki pomiarów jako charakterystyki, w których zmienna niezależna to numer kolejny żłobka generatora, a zmienna zależna to wartość danej wielkości mierzonej (np. intensywność wnz, temperatura itp.). Brak opcji umożliwiającej przedstawienie dowolnej wielkości mierzonej w funkcji czasu jest istotną wadą utrudniającą sprawne diagnozowanie stanu generatora.

Pomimo tego, że znamionowa prędkość obrotowa hydrogeneratorów w EWŻ wynosi tylko 166,7 obr/min to całkowity czas, w jakim czujnik „widzi” pojedynczy żłobek stojana stanowi 0,66 ms. Biorąc pod uwagę krótki czas przebywania lokalizatora wnz nad strefą wyróżnionego żłobka oraz dużą ilość rejestrowanych danych (ok. 90 tysięcy na minutę) nasuwają się wątpliwości, dotyczące powtarzalności pomiarów. Przy tak krótkim czasie pomiaru należy bowiem spodziewać się wpływu zakłóceń występujących w żłobkach sąsiadujących z mierzonym w danej chwili.

W celu określenia powtarzalności wyników wybrano z pomiarów wykonanych na tym samym generatorze kilkadziesiąt losowych próbek zarejestrowanych tylko w okresie jednego miesiąca, aby spodziewany poziom ładunku wyładowań został zachowany na jednolitym poziomie (zakładając, że w tym czasie nie nastąpiła w maszynie znaczna degradacja stanu izolacji). Pomiarów dokonano na generatorze nr 2 w lutym 1997 roku. Po przeanalizowaniu kilkudziesięciu próbek, z których pokazano poniżej trzy (rys. 6), można zauważyć, że powtarzalność pomiarów jest zachowana tylko w żłobku o numerze 97.

Jednakże zauważono, że o ile szczyty pików wyładowań przypadają dokładnie na żłobek 97 to szerokość tego impulsu obejmuje również sąsiadujące żłobki - uwidacznia się więc wpływ wyładowań z tych żłobków lub ze żłobka 97 na żłobki sąsiednie.



Rys. 6. Wnz w stanie generatora nr 1 – luty 1997, na osi poziomej zaznaczono kolejne numery żłobków

Podsumowanie

Niezależnie od przyczyny powstawania mierzonych zakłóceń, w każdym przypadku będą one miały charakter stochastyczny. To oznacza, że nie będą one widoczne na każdym z zarejestrowanych przebiegów. Poza tym w związku z postępującą degradacją izolacji uzwojenia oraz z przenikaniem zakłóceń mogą one być rejestrowane nie tylko w źródle wyładowań, lecz również (z mniejszą intensywnością) w innych miejscach. Wynika z tego, że lokalizacja wyładowań i zaobserwowanie pogarszających się parametrów izolacji za pomocą systemu wymaga przeprowadzenia szczegółowej analizy statystycznej

większej liczby zebranych danych w czasie eksploatacji. System ten jest układem monitorującym, którego nie wyposażono w oprogramowanie diagnostyczne, dzięki któremu analiza wyładowań niezupełnych w hydrogeneratorach byłaby dokonywana automatycznie.

Niestety do tej pory brak jest jakichkolwiek kryteriów diagnostycznych dotyczących tej metody, które pozwoliłyby na jednoznaczne i precyzyjne określenie, że w danym żłobku stan degradacji izolacji jest już na niebezpiecznym poziomie, wymuszającym wykonanie w najbliższym czasie przeglądu stanu maszyny i wymiany uszkodzonych elementów jego izolacji.

LITERATURA

- [1] J.F.Lyles, T.E.Goodeve and G.C.Stone, Using Diagnostic Technology for Identifying Generator Winding Maintenance Needs, *Hydro Review*, Vol. XII No 4, June 1993, HCI Publications, pp.58
- [2] Przybysz J., Szydlowski M., Diagnostyka układów izolacyjnych uzwojeń stojanów generatorów, *Materiały VI Sympozjum „Problemy eksploatacji układów izolacyjnych wysokiego napięcia”*, Zakopane 1997
- [3] Stone G.C., Partial Discharge Testing of Rotating Machines, *CIGRE/EPRI Colloquium on Rotating Machines*, Florencia, 1998
- [4] 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
- [5] Łobacz J., Stachowicz Z., Stone G., Zastosowanie diagnostyki off-line i on-line wyładowań niezupełnych dla hydrogeneratorów, *Materiały VII Sympozjum „Problemy eksploatacji układów izolacyjnych wysokiego napięcia”*, Zakopane 1999
- [6] Tułodziecka E., Andrzejewski K., Współczesna diagnostyka i ocena stanu izolacji uzwojeń stojanów krajowych hydrogeneratorów, *Materiały Seminarium „Problemy eksploatacji i diagnostyki hydrogeneratorów”* Instytut Energetyki O/Gdańsk, 26.11.1996
- [7] Łobacz J., Stachowicz Z., System ciągłego monitorowania stanu hydrogeneratorów w elektrowni wodnej Żarnowiec, *Materiały Seminarium „Problemy eksploatacji i diagnostyki hydrogeneratorów”*, Warszawa, 1993

Autorzy: mgr inż. Grzegorz Zieman, Politechnika Gdańska, Katedra Wysokich Napięć i Aparatów Elektrycznych, ul. Własna Strzecha 18A, 80-952 Gdańsk, E-mail: Gzieman@ely.pg.gda.pl; dr inż. Marek Olesz, Politechnika Gdańska, Katedra Wysokich Napięć i Aparatów Elektrycznych, ul. Własna Strzecha 18A, 80-952 Gdańsk, E-mail: Molesz@ely.pg.gda.pl;