

Jerzy Przybysz\*, Marek Szydłowski\*

## DIAGNOSTYKA UKŁADÓW IZOLACYJNYCH UZWOJEŃ STOJANÓW GENERATORÓW

**Streszczenie:** Przedstawiono współcześnie stosowane metody „on-line” badania układów izolacyjnych uzwojeń stojanów generatorów. Podano przykładowe wyniki badań.

### 1. Wstęp

Badania wyładowań niepełnych (wnz) podczas pracy generatorów „on-line” podjęte były ponad 40 lat temu [1]. Rozwój metod badawczych zmierzał do wyeliminowania wpływu zakłóceń na wyniki pomiarów co stało się możliwe dzięki rozwojowi elektroniki w ostatnich latach.

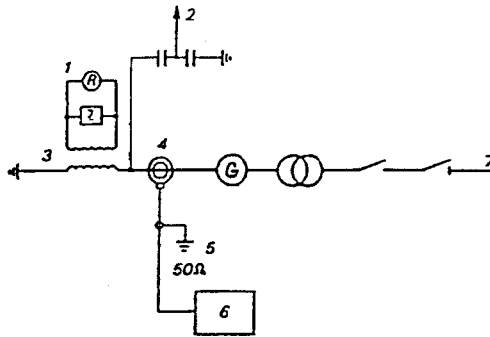
Chociaż diagnostyka on-line nie wyeliminuje diagnostyki off-line, która pozostanie w dalszym ciągu jako ostatecznie weryfikująca stan izolacji, diagnostyka on-line jest niezmiernie przydatna we wczesnym wykrywaniu uszkodzeń [2].

### 2. Pomiary impulsów prądowych związanych z wnz, za pomocą przekładnika wysokiej częstotliwości

W latach siedemdziesiątych rozwijano — przede wszystkim w Stanach Zjednoczonych — metodę badania wnz za pomocą przekładnika wysokiej częstotliwości zainstalowanego na przewodzie uziemiającym punkt zerowy uzwojenia stojana [3]. Pomiary wykonywane są za pomocą mierników zakłóceń radioelektrycznych w paśmie częstotliwości radiowych 0,14 do 30 MHz. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 1.

---

\* Instytut Energetyki, ul. Mory 8, 01-330 Warszawa



**Rys. 1.** Układ do bezpośredniego pomiaru impulsów wysokiej częstotliwości w przewodzie łączącym punkt zerowy uzwojenia stojana z ziemią; 1 – zabezpieczenie ziemnozwarciowe uzwojenia stojana, 2 – pojemnościowy dzielnik napięcia, 3 – przekładnik napięciowy, 4 – przekładnik prądowy wysokiej częstotliwości, 5 – impedancja kabla, 6 – miernik zakłóceń radioelektrycznych, 7 – sieć

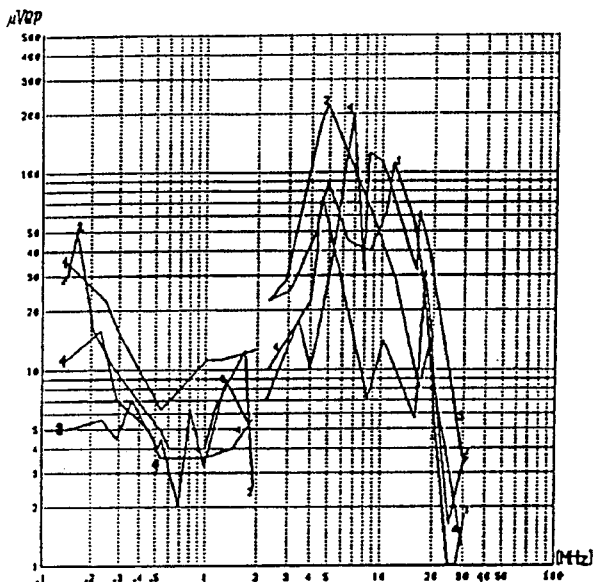
Na rysunku 2 przedstawiono widma charakterystyczne impulsów od wnz o częstotliwościach radiowych [4]. Można stwierdzić wysoki poziom wnz w paśmie częstotliwości od 4 do 15 MHz. Badania porównawcze wnz wykonane za pomocą urządzenia TEAS-570 dla połączonych trzech uzwojeń fazowych oraz wyniki oględzin cewek wykazały, że brak było połączenia wewnętrznej ochrony przeciwwarzeniowej z miedzią prętów. Wartość maksymalnego ładunku pozornego przy znamionowym napięciu fazowym wynosiła dla maszyn 1, 2, 3, 4 odpowiednio 1200 nC, 1200 nC, 400 nC, 1100 nC [5].

Zaletą omawianej metody jest to, że można zlokalizować duże wartości wnz np. w przypadku hydrogeneratorów oraz łatwo można wykryć wyładowania o charakterze łukowym np. na szczotkach i pękniętych elementarnych przewodnikach

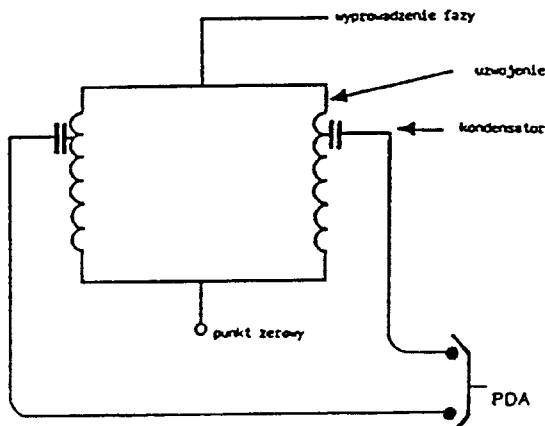
Do wad metody należy znaczny wpływ na wynik pomiaru zakłóceń pochodzących od źródeł zewnętrznych zwłaszcza w paśmie częstotliwości do 1 MHz (przede wszystkim w turbogeneratorach) oraz oddalenie miejsca pomiaru od źródła wnz, które zazwyczaj występuje w pobliżu wyprowadzeń uzwojeń fazowych. Między innymi z tych powodów zaistniała potrzeba opracowania bardziej precyzyjnych metod badania wnz możliwych do stosowania podczas pracy generatora.

### 3. Pomiary impulsów prądowych od wnz za pomocą kondensatorów sprzęgających

W ciągu ostatnich kilkunastu lat rozwinięto, szczególnie w Kanadzie, metodę pomiaru wnz za pomocą kondensatorów sprzęgających [3, 6]. Obecnie są na stałe instalowane wewnątrz generatora kondensatory sprzęgające o pojemności 50 do 100 pF do obu gałęzi równoległych każdego uzwojenia fazowego stojana. Na rysunku 3. przedstawiono sposób podłączenia kondensatorów sprzęgających [6].



Rys. 2. Widma charakterystyczne impulsów od wnz o częstotliwościach radiowych hydrogeneratorów nr 1, 2, 3, 4 o mocy 209 MVA w EW Żarnowiec



Rys. 3. Sposób podłączenia kondensatorów sprzęgających do gałęzi równoległych uzwojenia fazowego

Zakłócenia elektryczne przychodzące z zewnątrz do uzwojenia fazowego dochodzą jednocześnie do obu kondensatorów i są eliminowane w urządzeniu różnicowym. Natomiast impulsy od wnz, powstałe w jednej z gałęzi, docierają do drugiego kondensatora poprzez połączenia zazwyczaj o długości około 10 m (dla hydrogeneratorów dużej mocy) po czasie około 30 ns i są przepuszczone przez wzmacniacz szerokopasmowy o środkowej częstotliwości 50 MHz. Czas trwania impulsu od wnz jest rzędu

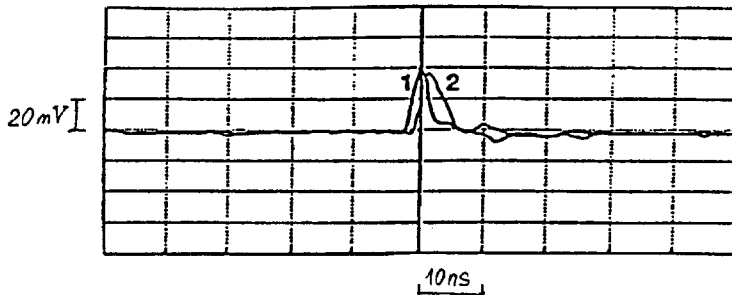
5 ns. Metoda ta z zastosowaniem urządzenia PDA (Partial Discharge Analyzer) ma następujące zalety: umożliwia ciągły pomiar podczas pracy generatora, pomiary mogą być wykonywane przez personel elektrowni.

Metodę tą stosuje się na ponad 750 hydrogeneratorach na całym świecie z czego na ponad 140 hydrogeneratorach w Kanadzie i Stanach Zjednoczonych [7].

Metoda ta stosowana jest również na turbogeneratorach [2, 3, 8]. Jednak ze względu na to, że połączenia uzwojeń są bardzo krótkie, jest utrudnione rozróżnienie od której z gałęzi równoległych uzwojenia fazowego pochodzą sygnały. Między innymi z tego powodu specjalnie dla turbogeneratorów opracowano inną metodę pomiaru wnz.

#### 4. Pomiary impulsów prądowych od wnz za pomocą anten

Metoda ta jest stosowana na całym świecie na kilkudziesięciu turbogeneratorach, przede wszystkim w elektrowniach jądrowych [6]. Stosowane są czujniki typu SSC (Stator Slot Couplers) z przyrządem TGA (Turbine Generator Analyzer). Czujniki te są instalowane w żłobkach pod klinami na wyprowadzeniach uzwojeń fazowych. Czujniki umieszczone są na powierzchni prętów pokrytej przewodzącym lakierem. Typowo kontrolowane jest sześć żłobków stojana. Na rysunku 4 i 5 przedstawiono impulsy od wyładowań w uzwojeniu stojana turbogeneratora 500 MW, 22 kV zarejestrowane cyfrowym oscylografem 1 GHz (HP54111D) [7]. Na rysunku 4 przedstawiono dwa impulsy od wnz zarejestrowane z dwóch wyjść anteny. Bardzo istotną obserwacją jest to, że impulsy mają czas trwania tylko kilka nanosekund.

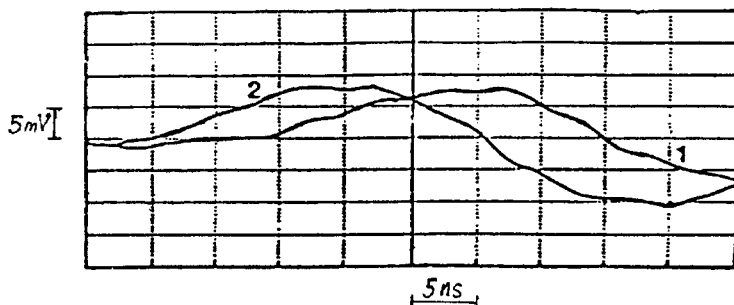


Rys. 4. Odpowiedź obu wyjść SSC na wnz występujące poza żłobkiem

Impuls „1” na rysunku 4 jest wzięty z wyjścia SSC na końcu żłobka stojana, natomiast impuls „2” jest wzięty z drugiego wyjścia, które jest umieszczone 45 cm wzdłuż żłobka. Impuls „1” który jest odpowiedzią na impuls wnz i był wykryty jako odpowiedź pierwsza, natomiast impuls „2” jest opóźniony o 2 ns, co świadczy o tym, że wnz występują w izolacji pręta poza żłobkiem. Na rysunku 5 przedstawiono odpowiedź SSC na wyładowania łukowe na wyprowadzeniach z generatora. Rejestrowane przebiegi mają charakter oscylacyjny o czasie trwania ponad 20 ns.

W metodzie tej rozpatruje się tylko te impulsy od wnz, które mają czas trwania do około 5 ns. Inne impulsy które mają czas trwania powyżej 10 ns do mikrose-

kund, zależnie od źródła zakłóceń — są eliminowane. Łatwo jest lokalizować miejsce występowania wnz — wewnątrz czy na zewnątrz żłobka.



Rys. 5. Odpowiedź obu wyjść SSC na wyładowania łukowe w szynach ekranowanych generatora

W ostatnim czasie podjęto próby wykorzystania jako czujniki wnz rezystancyjne termometry zainstalowane fabrycznie w żłobkach stojana. Do pomiaru zastosowano przekładnik prądowy wysokiej częstotliwości o szerokości pasma przenoszenia 15 kHz–250 MHz oraz szerokopasmowy analizator widma HP8591A o szerokości pasma  $\Delta f$  oraz środkowych częstotliwościach  $f_1$  i  $f_2$ . Podczas badań  $\Delta f$ ,  $f_1$  i  $f_2$  wynosiły 3 MHz, 13 MHz i 24,5 MHz odpowiednio [9].

## 5. Pomiary pola elektrostatycznego od wnz w szczelinie hydrogeneratora

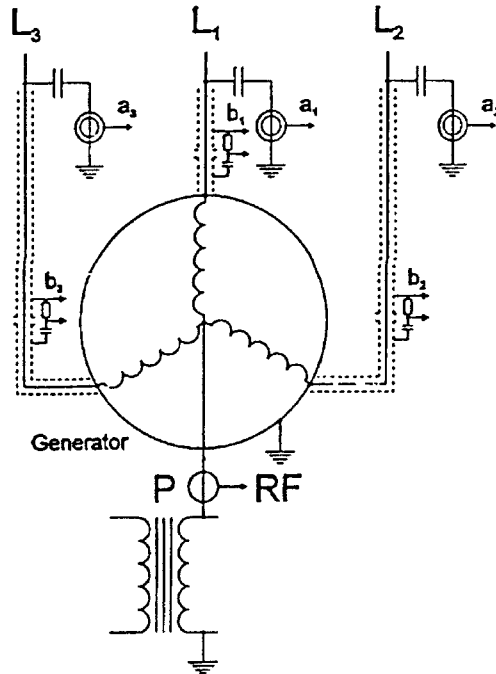
Amerykańska firma MCM Enterprise opracowała system Hydroscan, który wyposażony jest w zespół czujników umieszczonych na wirniku. Są to czujniki temperatury, magnetyczne, szczeliny powietrznej, wibracji i wyładowań niepełnych.

Jako lokalizatory wyładowań niepełnych (PDL — Partial Discharges Locator) służą czujniki pojemnościowe wrażliwe na pole elektrostatyczne. Cztery takie czujniki są zamontowane na przeciwległych końcach dwóch wybranych sąsiadujących z sobą nabiegowników. Lokalizacja tych czujników w osi biegunów  $N$  i  $S$  podyktowana jest tym, aby mierzyć wyładowania elektrostatyczne w chwili, gdy każda cewka jest w pobliżu maksymalnej dodatniej oraz ujemnej wartości napięcia. Czujniki te dają informację o poziomie wyładowań niepełnych z rozdzielczością poszczególnych żłobków. Na podstawie porównania poziomu wyładowań nierzonych przez czujniki zainstalowane na biegunach  $N$  i  $S$  można wnioskować o charakterze zjawiska (wyładowania szczelinowe, powierzchniowe). O charakterze zjawiska można wnioskować też przez zestawienie wskazań czujników PDL ze wskazaniem czujników termicznych lub magnetycznych.

Dwa takie systemy są zainstalowane w El. Żarnowiec na hydrogeneratorach/silnikach o mocy 209/228/MVA, 15,75 kV, 166,7 obr/min, izolacja uzwojenia stojana typu RESIN-RICH z wewnętrzną ochroną przeciwjarzeniową [10].

## 6. Pomiary impulsów prądowych od wnz w konstrukcjach generatora

W Instytucie Energetyki do pomiaru impulsów od wnz jest stosowany własny analizator wyposażony w dyskryminator amplitudy, umożliwiający selekcję impulsów w zależności od wartości ładunku pozornego.



**Rys. 6.** Schemat podłączenia czujników do pomiaru impulsów wysokiej częstotliwości.  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  – kondensatory sprzęgające i przekładniki pomiarowe;  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  – czwórniki RC;  $P$  – przekładnik prądowy wysokiej częstotliwości;  $RF$  – miernik zakłóceń radioelektrycznych

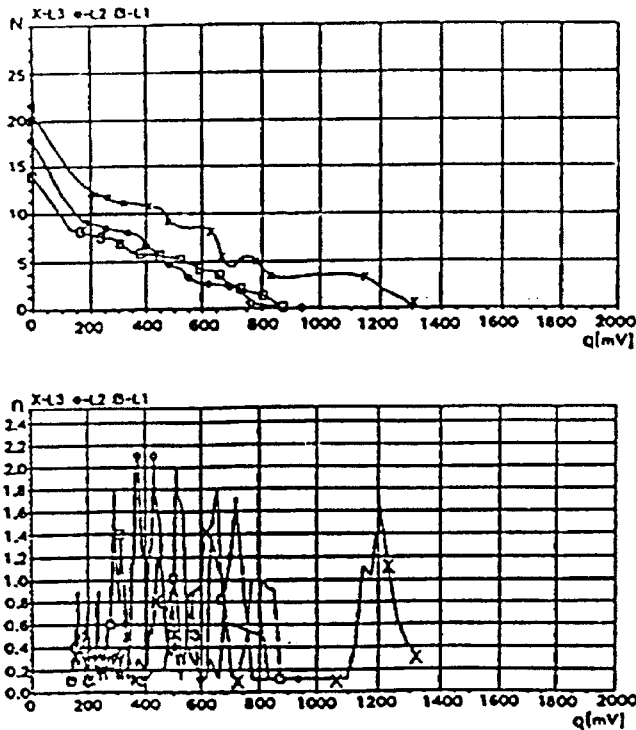
Przy zliczaniu impulsów stosowana jest ich oscylograficzna kontrola. Na rysunku 6 przedstawiono sposób podłączenia czujników RC do ekranu szyn ekranowanych generatora, kondensatorów sprzęgających i przekładników pomiarowych.

Dla każdego uzwojenia fazowego stojana analizuje się: ilościowe wartości intensywności wnz  $P = \sum q_i \cdot N_i$ ; kształt i ilościowe wartości spektrum amplitudowego wnz  $N_i(q_i)$ , ( $q_i$  – wartość amplitudy danego impulsu,  $N_i$  – liczba impulsów o amplitudzie  $q_i$ ).

Wartości te są porównywane z przyjętym poziomem dopuszczalnym.

Na rysunku 7 przedstawiono charakterystyki  $N(q)$  i  $n(q)$  w ciągu jednego okresu napięcia częstotliwości sieciowej [11].

Na podstawie przedstawionych na rysunku 7 wyników badań można stwierdzić, że stan izolacji uzwojeń fazowych turbogeneratora jest zadawalający [11].



Rys. 7. Spektrum amplitudowe wzn  $N(q)$  w formie całkowitej (a) i  $n(q)$  w formie różniczkowej (b) turbogeneratora nr 7, 120 MW w EC Siekierki podczas pracy

Metoda badania wzn za pomocą szerokopasmowego całkującego analizatora impulsów w paśmie 1 do 10 MHz charakteryzuje się znaczną czułością, po pierwsze dzięki temu, że mierzone impulsy mają duże amplitudy (przy ładunku pozornym 1000 pC i pojemności uzwojenia 1  $\mu$ F amplituda impulsu wynosi około 1 V), a po drugie, że w zakresie wysokich częstotliwości wpływ zakłóceń nie jest znaczący, duży jest stosunek sygnału mierzonego do sygnału zakłócającego.

Podstawową zaletą tej metody jest to, że nie wymaga ona instalowania czujników wewnątrz generatora. Czujniki instaluje się np. na ekranach szyn ekranowanych wyprowadzających moc z generatora. Natomiast pewną wadą jest to, że mierzone są impulsy pochodzące nie tylko od uzwojeń fazowych ale z szyn ekranowanych oraz ich wyposażenia.

## 7. Podsumowanie

Przedstawione metody pomiaru on-line impulsów prądowych przede wszystkim od wzn umożliwiają kontrolowanie na bieżąco stopnia degradacji izolacji uzwojeń fazowych stojanów generatorów. Są bezpieczne dla obsługi i generatora.

## Literatura

- [1] **Johnson J. S., Warren M.:** *Detection of slot discharges in high voltage stator windings during operation.* AIEE Trans., vol. 70, Part II, pp. 1998–2000, 1951
- [2] **Grünwald P., Weidner P.:** *Possibilities and experience with off-and on-line diagnosis of turbine insulations generator stator winding.* CIGRE, Session, 1994, paper 11-206
- [3] **Harrold R. T., Emery F. T.:** *Radio Frequency Diagnostic Monitoring of Electrical Machines.* IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 2. No 2 pp. 18–23 March 1986
- [4] **Przybysz J.:** *Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego nr 901069101 pt. Radiowe monitorowanie wyładowań w turbogeneratorach.* Opracowanie Instytutu Energetyki, Warszawa 1993
- [5] **Tułodziecka E., Andrzejewski K.:** *Współczesna diagnostyka i ocena stanu izolacji uzwojeń stojanów krajowych hydrogeneratorów.* Materiały seminarium pt. Problemy eksploatacji i diagnostyki hydrogeneratorów. Instytut Energetyki O/Gdańsk 26.11.1996
- [6] **Stone G. C.:** *Partial Discharge — Part VII: Practical Techniques for Measuring PD in Operating Equipment —* IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 7 No 4 pp. 9–19 July/August 1991
- [7] **Sedding H. G. et al.:** *E new on-line partial discharge test for turbine generators.* CIGRE, Session 1992, paper 11-303
- [8] **PAMOS —** Partial discharge monitoring system ABB Dolmel Ltd, Wrocław 1995
- [9] **Itoh K. et al.:** *Techniques on Pulse-by-pulse Basis for On-line Partial Discharge Measurement of Turbine Generators.* New Noise Rejection IEEE TEC vol. 11, No 3, pp. 585–594 September 1996
- [10] **Łobacz J., Stachowicz Z.:** *System ciągłego monitorowania stanu hydrogeneratorów w elektrowni wodnej Żarnowiec.* Materiały seminarium pt. Problemy eksploatacji i diagnostyki hydrogeneratorów. Instytut Energetyki O/Gdańsk 26.11.1996
- [11] **Przybysz J.:** *Wykorzystanie zjawiska interferencji elektromagnetycznej do diagnostyki generatorów.* Prace Instytutu Energetyki. Zeszyt 22, Instytut Energetyki, Warszawa 1996

### DIAGNOSTICS OF INSULATION SYSTEMS OF GENERATORS STATORS WINDINGS

There are presented actually applied „on-line” test methods of insulation systems of generators stators windings. Examples of test results are given.