

Janusz Petryna, Maciej Sułowicz, Politechnika Krakowska, Kraków
Krzysztof Guziec, SENCO Sp. z o.o., Kraków

NOWE DOŚWIADCZENIA W DIAGNOSTYCE IZOLACJI SILNIKÓW I GENERATORÓW METODĄ WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH

NEW EXPERIENCES IN DIAGNOSIS OF HV GENERATORS AND MOTORS INSULATION BY PD

Streszczenie: Diagnostowanie stanu izolacji dużych maszyn podczas normalnej pracy jest bardzo ważnym zadaniem w diagnostyce eksploatacyjnej całych ciągów technologicznych w procesie produkcyjnym albo wytwarzania energii. Okresowe badania izolacji silników i generatorów dużej mocy podczas normalnej ich pracy są bardzo ważne i stanowią cenne uzupełnienie pełnych prób i badań wykonywanych podczas postoju maszyn w okresie wykonywania ich remontów. Jednym ze sposobów oceny stanu izolacji jest przeprowadzenie pomiarów wyładowań niezupełnych w uzwojeniach maszyn i interpretacja sygnałów wyładowań oraz porównanie ich ze znanymi wzorcami wyładowań typowymi dla określonych uszkodzeń izolacji. Ta metoda oceny stanu izolacji jest stosunkowo łatwa do wykonania i nie wymaga stosowania bardzo drogiej aparatury. Dla tej metody badań niezbędne jest zainstalowanie na przepustach lub przewodach, jak najbliżej wyprowadzenia mocy z generatora lub zasilania silnika dedykowanych cewek Rogowskiego. Zarejestrowane i odpowiednio przetworzone sygnały z cewek pozwalają z bardzo dużym prawdopodobieństwem ocenić stan izolacji badanych maszyn. W artykule przedstawiono kilkuletnie doświadczenia z badań stanu izolacji maszyn prowadzone dla kilkunastu maszyn w energetyce i branży produkcyjnej.

Abstract: Diagnosing the condition of the insulation of large machines during normal operation is a very important task in the diagnosis of complete production lines operating in the manufacturing process or power generation. Periodic insulation testings of high power motors and generators during normal operation are very important and seem to be a valuable addition to the full tests and equipment survey at a standstill during their repairment. One of the ways to assess the state of the insulation is to carry out measurements of partial discharges in machines windings and their interpretation of and to compare obtained signals with the known patterns of typical discharges for specific breakage. This method of assessment of the insulation is relatively easy to perform and does not require the use of very expensive equipment. For this method of research it is necessary to install dedicated Rogowski coils as close as possible to the machine: on generator output bushings or motor supply cables. Properly recorded and processed signals from the coils allow to evaluate the state of insulation of tested machines with a high probability. The article presents several years of experience in researches of h.v. machines insulation based on examples of over a dozen machines in power generation industry and manufacturing industry as well.

Słowa kluczowe: diagnostyka izolacji, wyładowania niezupełne, cewka Rogowskiego

Keywords: diagnosing of insulation, partial discharges, Rogowski coil

1. Wstęp

Izolacja w każdej maszynie elektrycznej jest jednym z elementów, któremu należy poświęcić szczególną uwagę. Na potrzeby diagnostyki stanu izolacji maszyn elektrycznych poszukuje się coraz to nowszych i bardziej skutecznych metod oceny ich stanu [1]-[10].

Na szczególną uwagę zasługują bezinwazyjne metody oceny stanu izolacji on-line podczas normalnej pracy maszyny. Jest to bardzo ważne zadanie w diagnostyce eksploatacyjnej. W artykule przedstawiono:

- wieloletnie doświadczenia z badań stanu izolacji maszyn na przykładzie kilkunastu maszyn w energetyce i branży produkcyjnej,

- wzorce wyładowań i defektów izolacji dla maszyn (w tym z izolacją starego typu) pracujących w trudnych warunkach środowiskowych, statystyki wyładowań i ich korelacja pomiędzy ich intensywnością i lokalizacją,

- doświadczenia z pomiaru wnz generatora na wyprowadzeniu mocy w postaci kabli ekranowanych połączone z laboratoryjnym badaniem tłumienności sygnału przez ekran kabla,

- badanie wpływu defektów i zanieczyszczeń izolatorów przepustowych na zawartość wzorca wyładowań.

2. Metoda wyładowań niezupełnych

2.1. Diagnostyka izolacji silników 6 kV oraz generatorów przy zastosowaniu metody wyładowań niezupełnych z użyciem cewek Rogowskiego

Badanie stanu izolacji maszyn elektrycznych prądu przemiennego wysokiego napięcia on-line tym między innymi różni się od badania na postoju, że maszyny badane są w ruchu, w ich naturalnym stanie pracy i podlegają drganiom, nagrzewaniu i wpływom mechanicznym urządzeń zewnętrznych połączonych z nimi.

Badanie podczas ruchu wymaga jedynie zainstalowania w odpowiednich miejscach cewek lub kondensatorów pomiarowych oraz zapewnienia niezakłóconego przesyłu sygnału pomiarowego do urządzenia rejestrującego. Takie cewki lub kondensatory mogą pozostać w miejscach zainstalowania na stałe i przez to umożliwiać pomiar w dowolnym czasie, bez potrzeby zatrzymywania maszyny.

Nie ma potrzeby stosowania ciężkich zasilaczy i towarzyszących im urządzeń. Nie ma też potrzeby wyciągania wirnika. Cały ciężar gatunkowy pomiaru przesuwają się na przetworzenie zgromadzonych danych pomiarowych i ich interpretacji przy pomocy wyspecjalizowanego oprogramowania, a następnie wykorzystania uzyskanej informacji dla celów diagnozy stanu izolacji bądź interwencji poprzez system zabezpieczeń lub sygnalizacji. Nie oznacza to wcale, że badania na postoju są zbędne. Podczas remontu lub postoju jest okazja, aby dokładnie zbadać izolację uznanymi powszechnie metodami. Niektórych parametrów uzwojenia nie da się uzyskać inaczej, jak na postoju. Szczególnie cenne są wyniki badań prądem stałym (krzywa odbudowy napięcia, przebieg prądu upływu, charakterystyka R60). Praktyka pokazuje, że badania „na ruchu” są bezcenne poprzez swą wygodę i dostępność pomiarową. Uzupełniają się wzajemnie z badaniami na postoju. Nie wymagają angażowania „sił i środków” (ekipy, ciężki sprzęt). Są również bezpieczne.

W szczególności zastosowanie cewek Rogowskiego do pomiarów zapewnia uniknięcie kontaktu z wysokim napięciem.

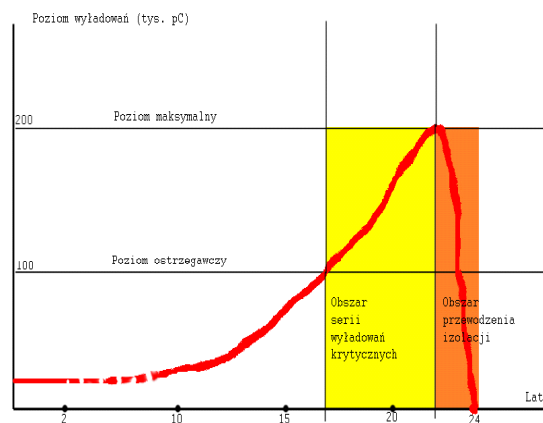
2.2. Zmiana poziomu wyładowań w czasie

Maszyny elektryczne to urządzenia długowieczne. Pracują nierzadko po kilkadziesiąt lat, zwłaszcza, gdy były właściwie eksploatowane i serwisowane. Szczególnie ważne dla każdej

maszyny elektrycznej jest, aby nie przekraczać dopuszczalnej temperatury pracy. Ma to znaczenie zarówno dla samej izolacji, jak i pakietu. Silnik z uszkodzonym termicznie żelazem jest praktycznie „do niczego”: nie da się go obciążyć nawet nominalnie, uszkodzenie laminatu powoduje grzanie nawet na biegu jałowym.

Temperatura jest wrogiem izolacji. Izolację niszczą też rozruchy, szczególnie długotrwałe, przy znacznej krotności prądu. Izolacja jest rozciągana, a następnie kurczy się, również z powodów zmian temperaturowych długości prętów i drutów, z czasem zaś kruszy się i pęka. Na czołach działają znaczne siły elektrodynamiczne, tworzy się osad przewodzący powierzchniowo prąd w zmiennym polu magnetycznym, w żłobkach (w szczególności, kiedy są poluznione klipy) tarcie cewek o ściany żłobków mechanicznie uszkadza izolację, wibracje pakietu rzędu kHz powodują jej mikropęknięcia, itd.

Proces degradacji izolacji trwa latami, a jego długość do śmierci izolacji zależy od różnych czynników: struktury mechanicznej i chemicznej izolacji, stopnia agresywności otoczenia, intensywności eksploatacji, kultury obsługi, reżimu pracy, wreszcie przypadkowych przepięć, przeciążeń itd.



Rys. 1. Zmiana poziomu wyładowań w czasie eksploatacji maszyny

Rys.1 przedstawia symbolicznie zmiany poziomu wyładowań w izolacji w czasie. Jeśli maszyna „przeżyje” okres maksymalnych wyładowań, ich intensywność gwałtownie spada, ponieważ izolacja przewodzi. W każdej chwili może nastąpić doziemienie.

Na zamieszczone zdjęcia, oscylogramy i wykresy warto spojrzeć z perspektywy czasu: metody diagnostyczne tu przytoczone, z trudem przebijające się do praktyki pomiarowej i przemysłu

10 lat temu, dziś są powszechnie stosowane. Dużą w tym zasługą elektroniki, techniki mikroprocesorowej oraz rozwoju oprogramowania użytkowego.

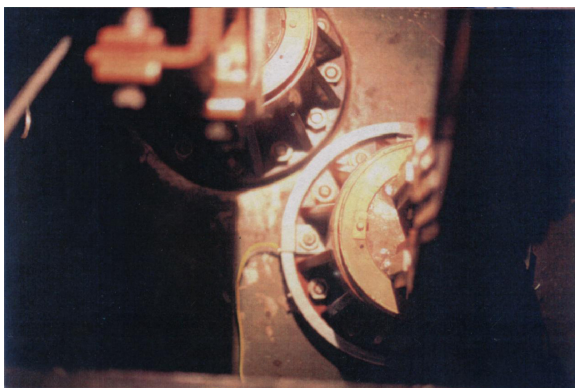
2.3. Cewki Rogowskiego

Do pomiaru wysokoczęstotliwościowych impulsów prądowych generowanych przez wyładowania niezupełne wewnątrz izolacji każdej z faz stojana stosuje się cewki Rogowskiego, zaprojektowane specjalnie i wykonane dla potrzeb diagnostycznych badanych maszyn. Standardową cewkę Rogowskiego w obudowie ekranowanej przedstawia Rys.2. Cewki są rozpinane, co eliminuje konieczność odkręcania przewodów zasilających od zacisków silnika w skrzyni zaciskowej w celu zainstalowania tam cewek.



Rys. 2. Widok standardowej cewki Rogowskiego

Cewki Rogowskiego dla generatorów przedstawiono na kolejnych rysunkach.



Rys. 3. Widok cewki Rogowskiego dla generatora TGH-120

Dla potrzeb diagnostyki generatora TGH-120 pod koniec lat 90 zaprojektowano i wykonano eksperymentalną cewkę Rogowskiego. Ze względów bezpieczeństwa zamontowano ją po

stronie niewodorowej, wokół kołnierza izolatora przepustowego.

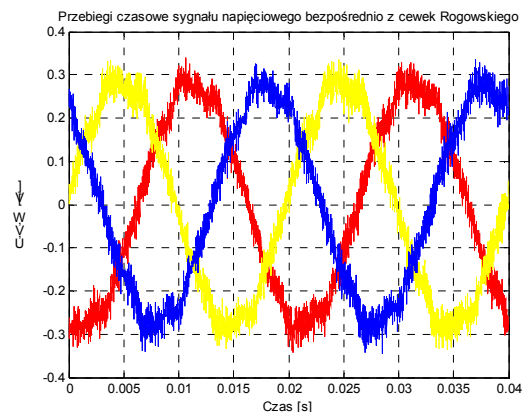
Przykładowe przebiegi sygnałów napięciowych na wyjściu cewek przedstawiono na Rys.6. Sygnał na wyjściu cewki jest sygnałem napięciowym proporcjonalnym do prądu w obwodzie pierwotnym.



Rys. 4. Cewki Rogowskiego zainstalowane na przepustach generatora 40 MW, 6.6 kV



Rys. 5. Cewka Rogowskiego dla generatora 138 MW, 15.75 kV

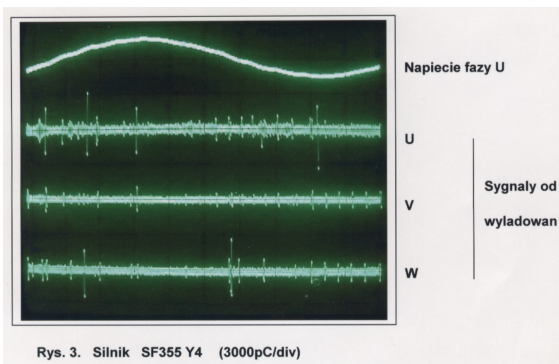


Rys. 6. Sygnały z cewek Rogowskiego

Dzięki rejestracji sygnałów w szerokim zakresie częstotliwości istnieje możliwość śledzenia wysokoczęstotliwościowych impulsów prądowych generowanych przez wyładowania w izolacji. Możliwe jest to po zainstalowaniu cewek jak najbliżej źródła wyładowań, czyli w bezpośredniej bliskości końców uzwojeń fazowych maszyny, na każdej z faz, wokół kabla zasilającego silnik bądź izolatora przepustowego na wyjściu mocy z generatora. Sygnały wyjściowe z cewek o amplitudzie jak na Rys.6 są podawane na wejście wzmacniacza z zespołem filtrów górnoprzepustowych o wysokim stopniu wzmocnienia, który przenosi częstotliwości właściwe dla wyładowań, ale tłumi częstotliwość zasilania oraz harmoniczne związane z pracą maszyny. Obrazy wyładowań w danej fazie, razem z napięciem w obwodzie mocy w tej fazie, są rejestrowane przez układ pomiarowy oparty o wysokiej klasy kartę pomiarową. Dane po zarejestrowaniu są przetwarzane przez program komputerowy specjalnie przygotowany do tego celu.

3. Wyniki pomiarów

Rys.7 przedstawia wyładowania w nowym fabrycznie silniku. Ich poziom wyniósł od 6500pC w fazach U i V do 17000pC w fazie W.



Rys. 7. Wyładowania w fabrycznie nowym silniku

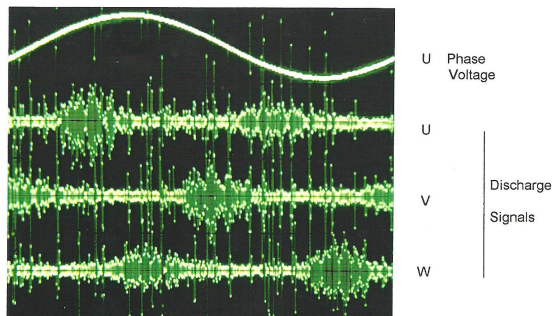
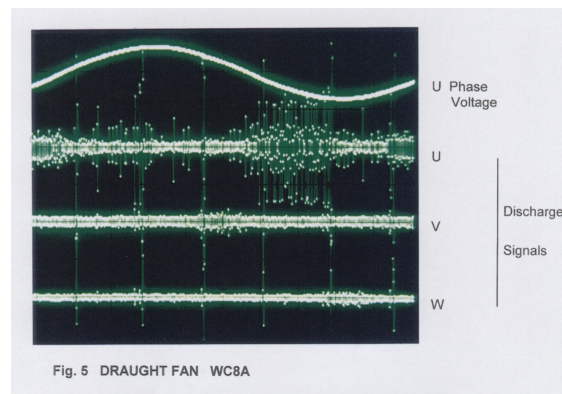


Fig. 3 WATER PUMP 4VC 11D110 - high sensitivity record

Rys. 8. Uszkodzenie izolacji silnika – poziom wyładowań 500 000 pC

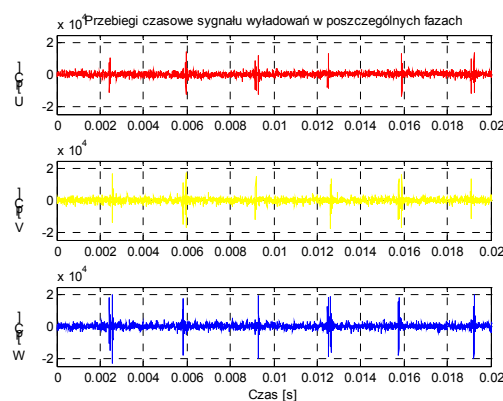
Silnik pompy wody 4VC1D110, klasa izolacji F (Rys.8) doznał rozległej utraty ekranu koronowego w sekcji żłobkowej uzwojenia stojana, zaś degradacja powierzchni izolacji cewek postępuje na skutek kombinacji erozji wyładowczej oraz fizycznego ocierania izolacji o ścianę żłobka.



Rys. 9. Silnik wentylatora ciągu 500 kW - uszkodzenie izolacji głównej w fazie U

W silniku tym poziomy wyładowań wysokie jak na klasę izolacji B: 150 000 pC – do masy (uszkodzenie izolacji głównej w fazie U), wyładowania na czołach pomiędzy wszystkimi fazami rzędu 5000 pC.

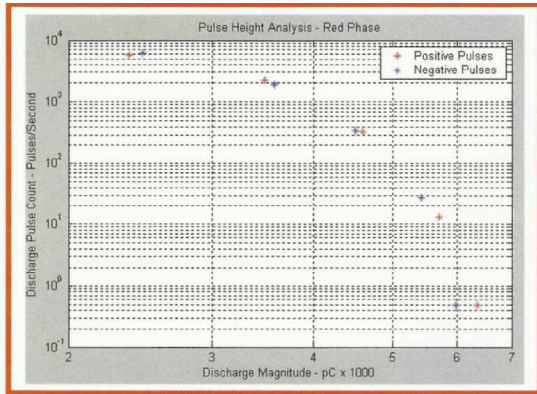
Na Rys.10 przedstawiono przykładowe przebiegi wyładowań niepełnych dla trzech faz (każda w innym kolorze) generatora 138 MVA. Regularnie powtarzające się co okres impulsy w liczbie 6, to wpływ wzbudzenia statycznego (mostka prostowniczego 6-pulsowego).



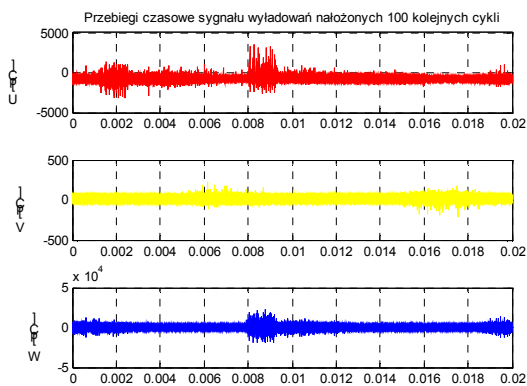
Rys. 10. Przykładowe odfiltrowane sygnały od wyładowań z cewek Rogowskiego

Oprócz wzorca wyładowań analizie poddaje się także poziom maksymalnych powtarzalnych wyładowań (skalibrowanych według wielkości ładunku poprzez zastosowanie metody porównawczej) oraz rozkład ich intensywności

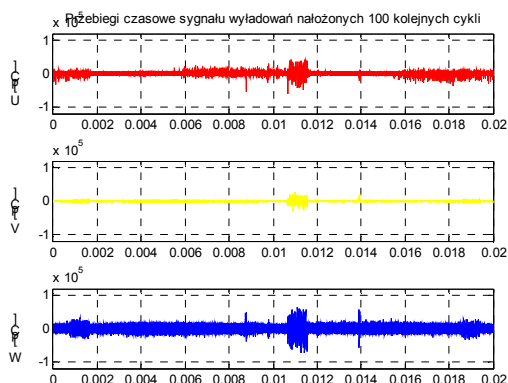
w funkcji amplitud (Rys.11). Diagram taki uściśla diagnozę co do miejsca występowania defektu izolacji. Istotnym kryterium w diagnostyce obrazowej jest powtarzalność wzorca wyładowań.



Rys. 11. Rozkład intensywności wyładowań w funkcji ich amplitud generatora 138 MW



Rys. 12. Powtarzalność wyładowań dla każdej fazy silnika kompresora tłokowego gazu dla 100 kolejnych cykli napięcia zasilającego



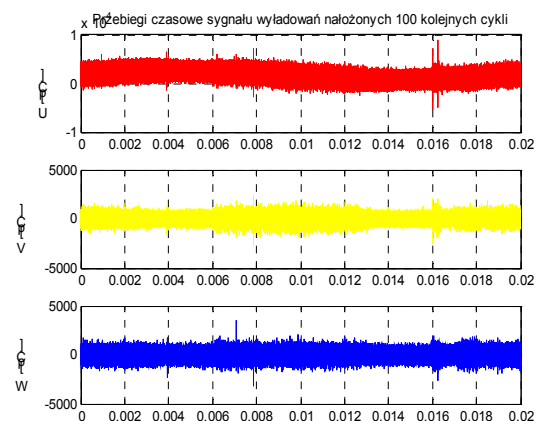
Rys. 13. Nałożenie wzorców dla 100 kolejnych cykli napięcia generatora TG5 40 MW, 6 kV

Zdarza się jednak czasem, że niektóre istotne dla analizy, charakterystyczne sygnały pojawiają się nieregularnie, np. co kilkadziesiąt lub

nawet kilkaset okresów. Dlatego należy przeszukiwać dłuższe przedziały czasowe zarejestrowanych przebiegów.

4. Szczególny przypadek pomiarów wnz

W jednej z elektrociepłowni zaistniała konieczność wykonania pomiarów wnz generatora 43 MVA, 11 kV na przejściu kablowym pomiędzy wyjściem mocy a transformatorem. Cewki Rogowskiego zainstalowano na ekranowanych kablach. Od razu nasunęło się pytanie, czy pomiar wychwyci wszystkie istotne składowe przebiegi pomimo tłumiącego sygnał ekranu?



Rys. 14. Powtarzalność wyładowań dla 100 kolejnych cykli napięcia generatora 43 MVA

Maksymalne powtarzalne amplitudy wystąpiły w fazie „czerwonej” i wynosiły 9000 pC. Widoczna równoczesność impulsów we wszystkich fazach – lecz raczej nie występują one w każdym cyklu. Może to oznaczać sporadyczne wyładowania między fazami na czołach, o charakterze powierzchniowym.

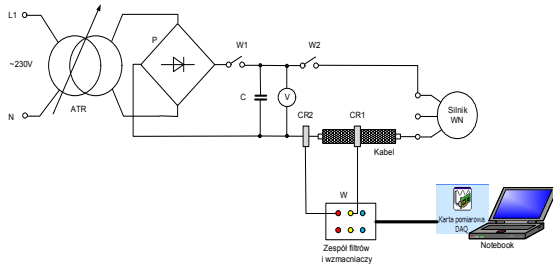
Na potrzebę jednoznacznego oszacowania stopnia tłumienia i zniekształcania przez pancierz kabla amplitudy i wzorca wyładowań przeprowadzono badania dwójakiego rodzaju:

- badania pojedynczych impulsów uzyskiwanych drogą rozładowania kondensatora w obwodzie stojana silnika WN;
- rejestrację i analizę przebiegów czasowych ciągów impulsów generowanych przez źródło PWM w obwodzie, którego obciążenie stanowił silnik indukcyjny.

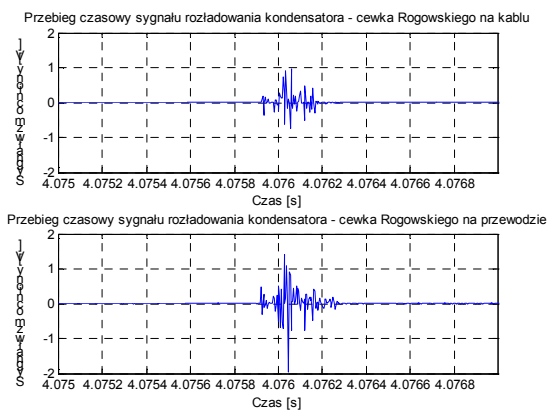
Podczas pracy maszyny WN w izolacji stojana generowane są zarówno pojedyncze, często wysokoenergetyczne wyładowania w liczbie od jednego do kilku na okres napięcia oraz ciągi impulsów, najczęściej nisko- i średnioenergetycznych.

Metoda badania wykorzystująca rozładowanie kondensatora w obwodzie silnika WN generuje pojedynczy impuls wyładowania o dużym ładunku, co symuluje warunki, które są często obserwowane przy rejestracji wyładowań niepełnych w normalnych warunkach pracy maszyny WN.

Natomiast rejestracja i analiza przebiegów czasowych ciągów impulsów generowanych przez źródło PWM [3] w stojanie silnika indukcyjnego nn pozwala na obserwację zjawiska, w którym ciąg impulsów wyładowań oddziałuje w sposób ciągły na układ izolacyjny. Wyładowania niepełne powstają w kolejnych cyklach przełączeń układu PWM charakteryzujących się dużą szybkością zmian napięcia, co jest jednym z warunków koniecznych powstawania wyładowań niepełnych w układzie izolacyjnym. Jako obiekt badań wykorzystano jedną żyłę kabla parametrami zbliżonego do parametrów kabla PROTOTHEN X N2 X5Y 8x500 mm²/fazę wyprowadzającego moc z generatora 43 MVA.



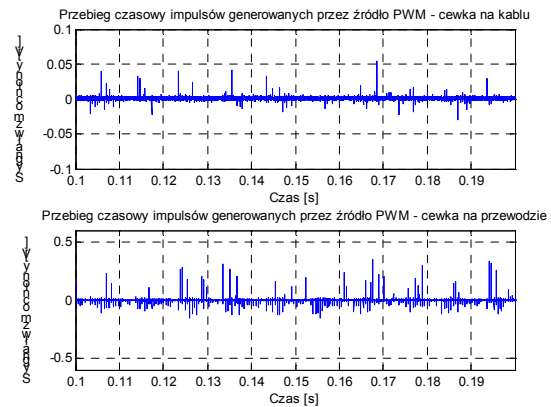
Rys. 15. Schemat układu do pomiaru tłumienia sygnału przez ekran kabla



Rys. 16. Przebieg czasowy wzmocnionych sygnałów rozładowania kondensatora 60µF dla cewki Rogowskiego zamontowanych na kablu i przewodzie zasilającym

Wnioski z przeprowadzonych eksperymentów są następujące: postać czasowa przebiegu tłumionego przeważnie jest zubożona w porówna-

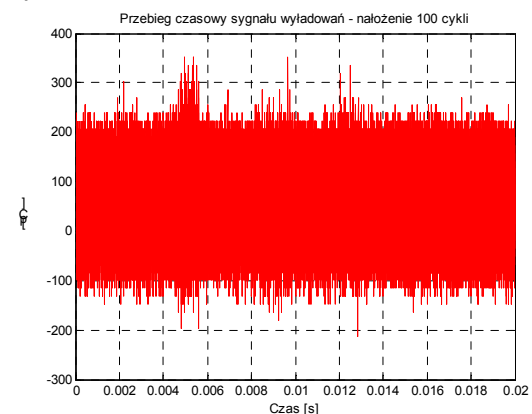
niu z wzorcem uzyskanym bezpośrednio z rejestracji sygnału z cewki okalającej sam przewód. Sam sygnał podlega tłumieniu co do amplitudy, od 2 do 5 razy. Jednak istotne z punktu widzenia diagnostyki sygnały przedostają się przez ekran i są na tyle wyraźne i czytelne, że w razie konieczności i braku możliwości zainstalowania cewek na izolatorach można taki sygnał wykozystać do ekspertyzy.



Rys. 17. Przebieg czasowy wzmocnionych impulsów generowanych przez źródło PWM dla cewek Rogowskiego zamontowanych na kablu i przewodzie zasilającym

5. Wpływ stanu izolatorów maszyn WN na wzorec wyładowań

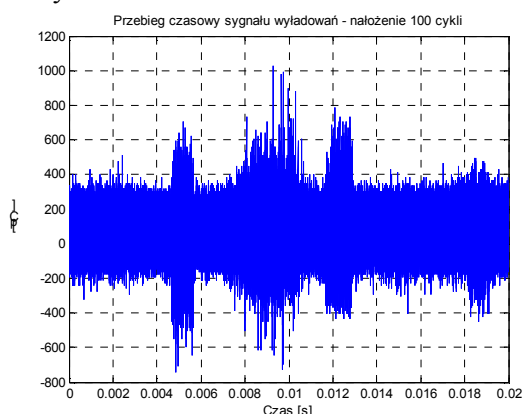
W praktyce pomiarowej doświadczenie pokazuje, że na wynik badania stanu izolacji i jego interpretację może wpływać stan zewnętrznych elementów maszyny – izolatorów przepustowych.



Rys. 18. Przebieg sygnału wyładowań – izolator czysty - nałożenie 100 cykli

Na Rys.18 i Rys.19 przedstawiono przebiegi wyładowań na powierzchniach dwóch porcelanowych izolatorów przepustowych, umieszczonych jeden za drugim na wspólnym przewodzie zasilającym jedną z faz silnika 6 kV. Jeden

z nich był nowy i czysty, drugi zaś używany, lecz nieuszkodzony i w naturalny sposób zabrudzony.



Rys. 19. Przebieg sygnału wyładowań – izolator brudny - nałożenie 100 cykli

Widać wyraźne różnice zarówno we wzorcach wyładowań na powierzchniach obu izolatorów, jak i w amplitudach impulsów. Posługując się metodą obrazową, należy zatem mieć na uwadze stan kabli i izolatorów.

6. Podsumowanie

W artykule przedstawiono nowe doświadczenia w diagnostyce izolacji silników i generatorów metodą wyładowań niezupełnych. Doświadczenia te są poparte licznymi badaniami przeprowadzonymi w przemyśle w okresie ostatnich kilku lat.

Okresowe badania izolacji silników i generatorów dużej mocy opisaną metodą podczas normalnej pracy tych maszyn są bardzo ważne i stanowią cenne uzupełnienie pełnych prób i badań wykonywanych podczas postoju maszyn w okresie wykonywania ich remontów. Ta metoda oceny stanu izolacji nie wymaga stosowania ciężkiej i drogiej aparatury diagnostycznej. Wystarcza komplet dedykowanych cewek Rogowskiego i dobrej klasy system zbierania i przetwarzania sygnałów dostępnych on-line na wyjściu cewek.

7. Literatura

- [1]. Edwards D. G.: *Planned maintenance of high voltage rotating machine insulation based upon information derived from on-line discharge measurements*. International Conference on Life Management of Power Plants, Edinburgh 1994.
- [2]. Petryna J., Guziec K., Weinreb K.: *Diagnostyka On-line wirujących maszyn elektrycznych prądu przemiennego przy użyciu systemów Stator- oraz Motor-Monitor*. Materiały IV Konferencji Nauko-

wo-Technicznej "Awaryjność i Diagnostyka w Energetyce", Solina "Jawor", październik 1998.

- [3]. Glinka T., Kulesz B.: *Wyładowania niezupełne w izolacji zwojowej silników indukcyjnych zasilanych z falowników PWM*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej Nr 21/2000, s. 96-103.
- [4]. Florkowska B., Florkowski M., Włodek R., Zydrón P.: *Mechanizmy, pomiary i analiza wyładowań niezupełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia*, Wydawnictwo IPPT PAN, Warszawa 2001.
- [5]. Szymaniec S.: *Diagnostyka maszyn indukcyjnych klatkowych z wykorzystaniem cewek Rogowskiego*. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne nr 72, 2005, wyd. BOBRME KOMEL, s. 167-172.
- [6]. Szymaniec S.: *Diagnostyka stanu izolacji uzwojeń i stanu łożysk silników indukcyjnych klatkowych w warunkach przemysłowej eksploatacji*. Studia i Monografie z. 193, Wyd. Politech. Opolskiej, Opole 2006.
- [7]. Glinka T., Polak A., Decner A.: *Degradacja izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych pod wpływem czasu ich eksploatacji*. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne nr 74, 2006, wyd. BOBRME KOMEL, s. 51-56.
- [8]. Szymaniec S.: *Analiza wyników pomiarów wyładowań niezupełnych w silnikach elektrycznych*. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne nr 76, 2007, wyd. BOBRME KOMEL, s. 95-100.
- [9]. Drak B.: *Zagadnienia elektromechaniczne uzwojeń stojanów maszyn indukcyjnych dużej mocy*, Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne nr 87, 2010, wyd. BOBRME KOMEL, s. 15-22.
- [10]. Drak B.: *Typowe uszkodzenia silników indukcyjnych dużej mocy*, Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne nr 89, 2011, wyd. BOBRME KOMEL, s. 7-14.

Autorzy

dr inż. J. Petryna, jpetryna@pk.edu.pl
 dr inż. M. Sułowicz, pesulowi@cyf-kr.edu.pl
 Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Instytut Elektromechanicznych Przemian Energii
 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24
 mgr inż. K. Guziec, office@senco.krakow.pl
 SENCO Sp. z o.o., 30-716 Kraków
 ul. Albatrosów 10a