

**Paweł Rydlik**  
EthosEnergy Poland S.A. Lubliniec

## WYKRYWANIE ZWARĆ MIĘDZYZWOJOWYCH W WIRNIKACH GENERATORÓW SYNCHRONICZNYCH – DOŚWIADCZENIA WŁASNE

### DETECTION OF ROTOR WINDING SHORTED-TURNS IN SYNCHRONOUS GENERATORS – OWN EXPERIENCE

**Streszczenie:** W artykule przedstawione zostały przypadki zwarć międzyzwojowych wykrytych podczas prób elektrycznych na stanowisku pomiarowym jakim jest wyważarka wysokoobrotowa. Wieloletnie doświadczenie firmy pozwoliło na opracowanie planu badań i prób, który daje możliwość kontroli, czy dany wirnik po remoncie spełnia wszystkie zakładane normy i wymogi klienta. Wysokoobrotowa wyważarka daje możliwość przeprowadzenia wymaganych pomiarów w całym zakresie prędkości obrotowej. Napędy, specjalna konstrukcja wyważarki oraz bunkra daje możliwość montażu wirników o wadze do 80 000 kg. Po wyważeniu wstępnym wirnik przechodzi szereg testów elektrycznych i mechanicznych m.in. pomiar stanu izolacji, pomiar impedancji w funkcji obrotów i napięcia na obrotach znamionowych, oscylogramy zwarć międzyzwojowych, próba wytrzymałości mechanicznej. Wszystkie pomiary elektryczne wykonywane są zarówno przed, jak i po próbie wytrzymałości mechanicznej. Artykuł zawiera przypadki wykrycia zwarć w wirnikach, które sprawiły problemy eksploatacyjne w miejscu pracy. Zwarcia międzyzwojowe bardzo niekorzystnie wpływają na pracę wirnika generatora synchronicznego (zwiększony poziom drgań oraz większy prąd wzbudzenia), a co za tym idzie spada dyspozycyjność jednostki i zwiększa się ryzyko awarii. Niejednokrotnie bywa, że zwarcie międzyzwojowe jest możliwe do wykrycia jedynie w stanie dynamicznym. Dlatego tak ważne są pomiary wykonywane na odwirowni wirników generatorów synchronicznych.

**Abstract:** The article presents the turn-to-turn shorts, detected when electrical tests has been performed during high speed balancing. Many years of experience allowed us to develop a testing plan which let us to control and meet all necessary criteria and standards required by the customers after the repair or the rotors. High speed balancing machine give us the ability to perform all tests at wide range of the RPM. Power of installed engines and construction of balancing machine enable us to balance the rotors up to 80 000kg. After initial balancing, the rotors are put to the series of electrical and mechanical tests e.g. insulation, impedance as a function of rotation (RPM) and voltage at the nominal RPM, oscillograms of turn-to-turn shorts and mechanical endurance test. All electrical tests are performed both before and after mechanical endurance test. The Article includes information about turn-to-turn shorts which caused operational problems in the workplace. Turn-to-Turn shorts adversely affects the work of synchronous generator ( increased vibration levels, higher excitation current) and causes an increase of the chance for the rotor failure. Many times the detection of turn-to-turn short is possible only in a dynamic state. Therefore It's important to perform the measurements during high-speed balancing.

**Słowa kluczowe:** maszyny elektryczne, izolacja zwojowa, zwarcia międzyzwojowe, badania diagnostyczne, wyważanie, wyważarka wysokoobrotowa, diagnostyka

**Keywords:** electrical machines, winding insulation, diagnostic tests, short turned, balancing, balancing machine

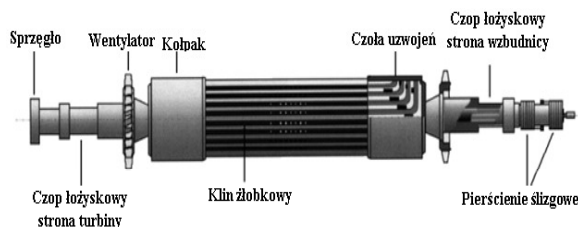
### 1. Wstęp

W poniższym artykule przedstawiono przypadki wykrycia zwarć międzyzwojowych w wirnikach generatorów synchronicznych. Występowanie wyżej wymienionego uszkodzenia izolacji w wirniku generatora jest zjawiskiem niekorzystnym i niepożądanym podczas pracy turbogeneratora. Zwarcia mogą mieć bezpośredni wpływ na zwiększenie się prądu wzbudzenia, podwyższone drgania wir-

nika, lokalne wysokie temperatury uzwojenia, które mogą spowodować uszkodzenie izolacji żłobkowej[1]. Szczególnie niebezpiecznym zjawiskiem są zwarcia między cewkami pod kołpakiem, ponieważ mogą one doprowadzić do jego uszkodzenia.

Odwirownia firmy EthosEnergy Poland S.A. ma możliwość wykonywania pomiarów elektrycznych na wirnikach generatorów synchro-

nicznych w całym zakresie prędkości obrotowej. Podczas procesu wyważania wykonuje się pomiar stanu izolacji, pomiar impedancji w funkcji obrotów i napięcia oraz oscylogramy zwarć międzyzwojowych. W artykule skupiono się na pomiarach oscylogramów zwarć zwojowych. Pomiar wykonywany jest przy pomocy urządzenia firmy Generatortech Inc.



Rys. 1. Wirnik generatora synchronicznego [1]

## 2. Powstawanie zwarć zwojowych [3,4]

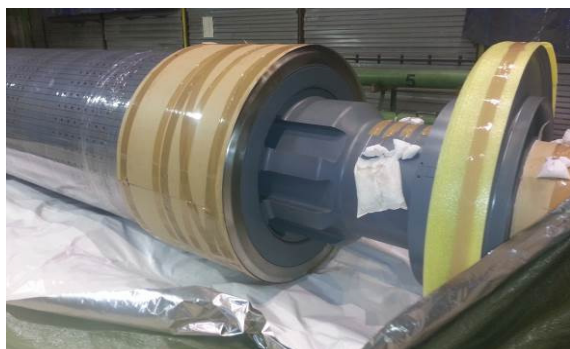
Zwarcia międzyzwojowe powstają w wyniku uszkodzenia izolacji pomiędzy poszczególnymi zwojami uzwojenia wirnika. Naprężenia związane z cyklem rozruchu i zatrzymania, warunki pracy oraz starzenie się izolacji prowadzi do pojawiania się uszkodzeń izolacji i powstawania zwarć międzyzwojowych.

Do najczęstszych przyczyn uszkodzeń izolacji możemy zaliczyć:

- zawilgocenie izolacji,
- rdzewienie stali rdzenia z opadaniem rdzy na uzwojenia,
- ciała obce (wióry, inne metalowe przedmioty).

Przedostanie się do wirnika ciał obcych może doprowadzić do zwarć międzyzwojowych, dlatego ważne jest dobre zabezpieczenie wirnika na czas jego transportu, a jeśli to wirnik rezerwowo to jego magazynowania.

Zwarcia międzyzwojowe mogą powstawać również z powodu przemieszczenia uzwojenia w żłobku.



Rys. 2 Zdjęcia przedstawiają zabezpieczony wirnik przed wysyłką do klienta [2]

Przemieszczenia uzwojenia wskutek rozruchu i zatrzymania mogą spowodować zatkanie kanałów wentylacyjnych, czego efektem może być lokalne przegrzanie. Następstwem tego zjawiska może być uszkodzenie izolacji żłobkowej, a charakterystycznym objawem tego zjawiska jest pojawienie się niewyważenia spowodowanej przyczynami termicznymi oraz wystąpienie podwyższonych drgań wału o częstotliwości 50Hz. Naprężenia i siły działające na uzwojenie podczas cyklu startu i zatrzymania wywierają szczególny wpływ na powstawanie zwarć międzyzwojowych. Jednakże zwarcia te pojawiają się również w wirnikach po remoncie kapitalnym, czyli po przezwojeniu.

Najczęściej zwarcia międzyzwojowe występują pod kołpakami między górnymi zwojami cewek wirnika, jest to o tyle szczególnie niebezpieczne, ponieważ mogą doprowadzić do jego uszkodzenia. Dlatego możliwość wykonania pomiarów elektrycznych oraz procesu nagrzewania uzwojenia na prędkości znamionowej jest tak ważna. Wszystkie te procesy pozwalają na określenie stanu wykonanego remontu oraz wskazanie ewentualnych przyczyn problemów, które wystąpiły podczas eksploatacji.

Proces nagrzewania uzwojenia wirnika ma na celu nagrzanie całego wirnika tj. zarówno uzwojenia, jak i żelaza wirnika do temperatury ok. 100°C. Nagrzewanie uzwojenia dokonuje się poprzez podanie prądu stałego na uzwojenie wirnika podczas jego wirowania na obrotach znamionowych. Następnie poprzez wirowanie wirnika dzięki działaniu sił odśrodkowych zostaje ukształtowane uzwojenie do jego położenia podczas eksploatacji, po czym przeprowadza się próbę wytrzymałości mechanicznej, elektrycznej oraz pozostałe pomiary elektryczne. Możliwość wykonania tego procesu posiada niewiele zakładów remontowych, a po-

zwala on na zasymulowanie warunków i stanu wirnika porównywalnego z pracą eksploatacyjną.



Rys. 3. Zdjęcie przedstawia uszkodzenie izolacji w części żłobkowej [2]



Rys. 4. Przykładowe uszkodzenie izolacji [2]



Rys. 5. Przykładowe uszkodzenie izolacji [2]



Rys. 6. Przykładowe uszkodzenie izolacji [2]

### 3. Próby elektryczne i mechaniczne wykonywane na odwirowni wirników generatorów synchronicznych [2]

W artykule skupiono się na detekcji zwarć za pomocą oscylogramów zwarć międzyzwojowych, jednakże do pełnej oceny stanu badanego obiektu wykonuje się szereg badań. Poniżej przedstawiono standardowy plan badań i prób, które wykonuje się na wysokoobrotowej wyważarce [4].

Próby i pomiary wykonywane na odwirowni:

- wyważenie wstępne wirnika,
- pomiar stanu izolacji dla  $n = 0$  obr/min. bez i ze szczotkotrzymaczem i dla  $n = 3000$  obr/min.,
- pomiar impedancji:
  - w funkcji obrotów dla  $U = U_n$  (co 500 obr/min.),
  - w funkcji napięcia dla  $n = 3000$  obr/min. (co 50V),
- kontrola na obecność zwarć zwojowych, oscylogramy dla  $n = 500, 1500$  i 3000 obr/min. (przy  $I=100A$ ),
- zagrzanie uzwojenia wirnika na obrotach znamionowych do temperatury ok.  $100^{\circ}C$ ,
- wykonanie próby wytrzymałości mechanicznej – 3400 lub 3600 obr/min. – 3 lub 2 min.,
- pomiar stanu izolacji dla  $n = 0$  i 3000 obr/min.,
- próba napięciowa uzwojenia wirnika przy  $n = 3000$  obr/min. i temp. uzwojenia  $\sim 100^{\circ}C$ ,
- pomiar stanu izolacji po próbie napięciowej dla  $n = 0$  i 3000 obr/min.,
- pomiar impedancji:

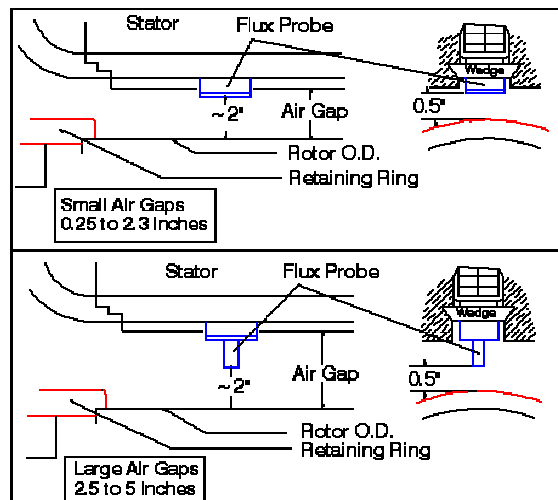
- w funkcji obrotów dla  $U = U_n$ , temperaturze  $= 90^\circ\text{C}$ , od  $n = 0$  do  $n = 3000$  obr./min. i od  $n = 3000$  obr./min. do  $n = 0$  obr./min. co 500 obr./min.,
- w funkcji napięcia przy  $n = 3000$  obr./min. (co 50V),
- wyważenie końcowe wirnika,
- schłodzenie wirnika,
- pomiar impedancji:
  - w funkcji obrotów dla  $U = U_n$ , od  $n = 0$  do  $n = 3000$  obr./min. i od  $n = 3000$  obr./min. do  $n = 0$  obr./min. (co 500 obr./min.),
  - w funkcji napięcia przy  $n=3000$  obr./min. (co 50V),
- pomiar stanu izolacji dla  $n = 0$  obr./min. bez i ze szczotkotrzymaczem i dla  $n = 3000$  obr./min.,



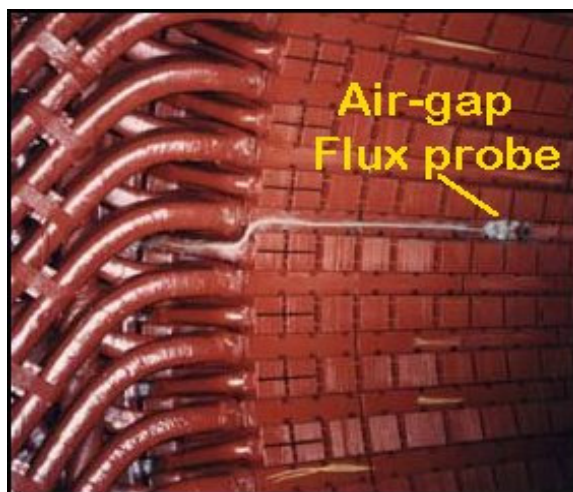
Rys. 7. Zdjęcie przedstawia wirnik generatora synchronicznego podczas badań [2]

### 3.1. Oscylogramy zwarć międzyzwojowych [4]

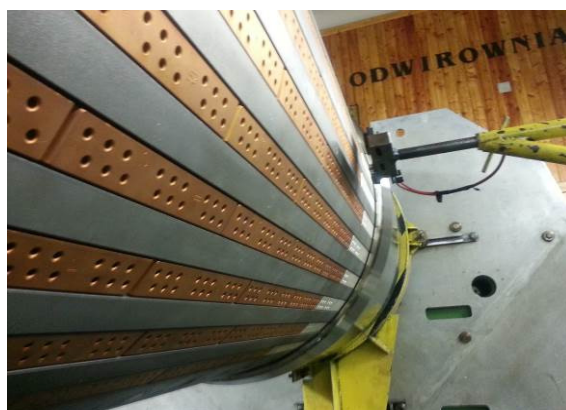
Oscylogramy zwarć międzyzwojowych wykonywane są przy pomocy systemu detekcji zwarć międzyzwojowych firmy Generatortech Inc. Badanie to wykonuje się z przepływającym prądem w uzwojeniu wirnika podczas jego wirowania poprzez pomiar pola rozproszenia za pomocą sondy(cewki) pomiarowej umieszczonej w określonej odległości od wirnika. Napięcie indukowane w cewce pomiarowej rejestrowane jest za pomocą urządzenia i komputera pomiarowego z programem do analizy otrzymanych sygnałów.



Rys. 8. Sposób montażu cewki w stanie dla dużej i małej szczeliny powietrznej [4]

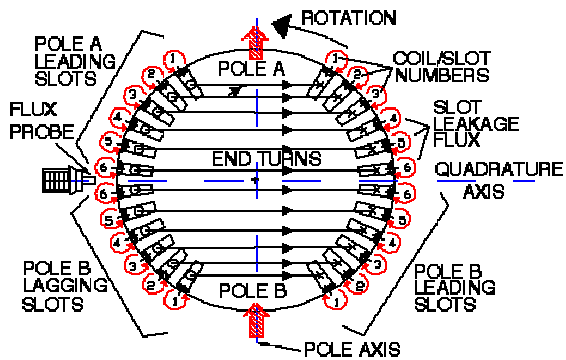


Rys. 9. Sonda pomiarowa zainstalowana w stanie [4]

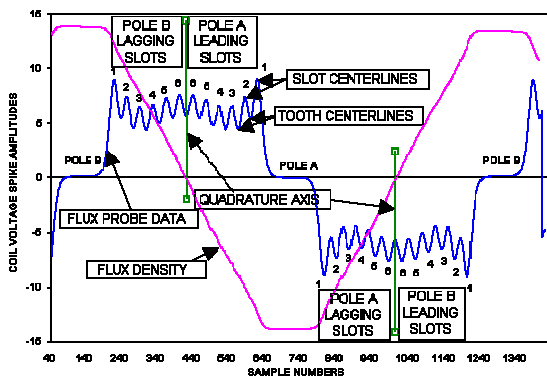


Rys. 10. Sonda pomiarowa zainstalowana na odwirowni [2]

Na rysunku przedstawiono budowę wirnika dwubiegunowego. Każda cewka ma dwa żłobki: żłobek wyprzedzający i żłobek opóźniony.



Rys. 11. Nomenklatura dla wirnika dwubiegunowego [4]



Rys. 12. Sygnał z sondy indukcji magnetycznej [4]

Rysunek 12 przedstawia przebieg sygnału z sondy indukcji magnetycznej w generatorze mającym 6 cewek na biegun w stanie jałowym. Sonda indukcji magnetycznej została tak zaprojektowana, aby wykrywać strumień rozproszony żłobka, gdy żłobek przesuwają nad sondą.

#### 4. Przykłady

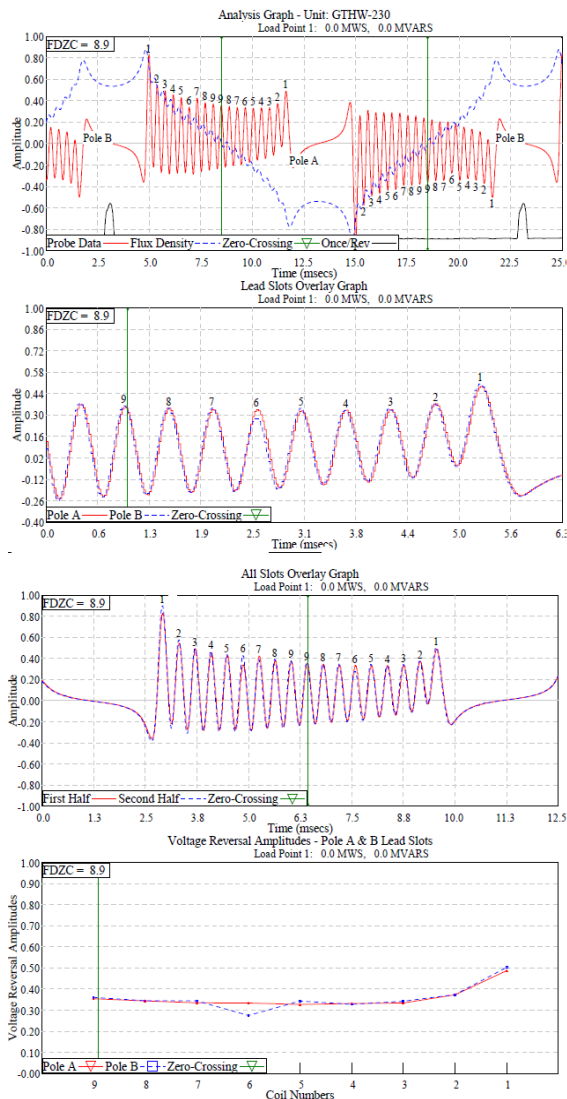
W artykule przedstawiono przykładowe pomiary oscylogramów zwarcie międzyzwojowych wykonanych na odwiorniu dla trzech wirników. Przedstawione oscylogramy wykonane zostały dla prędkości znamionowej zarówno przed remontem, jak i po.

##### 4.1 Przypadek 1

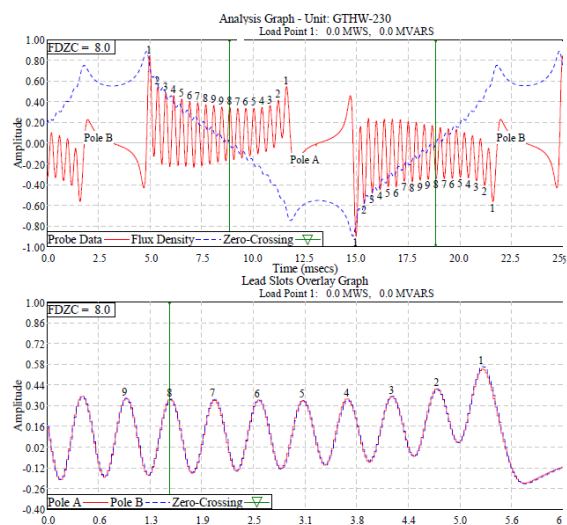
Dane znamionowe:

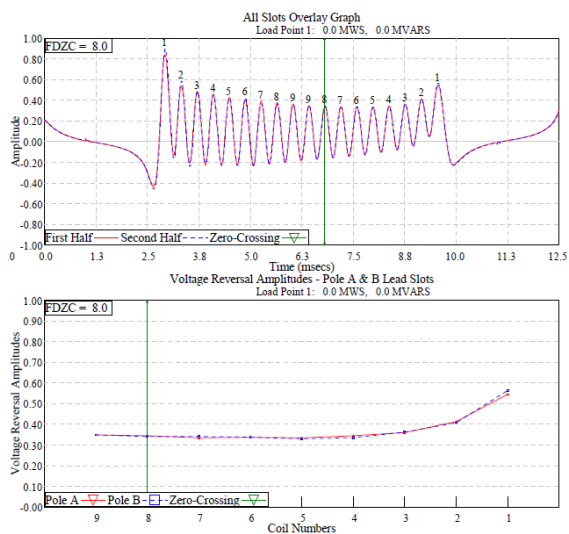
Typ: GTHW-230 Prąd wzbudzenia: 2551A  
 Moc: 230 MW Napięcie wzbudzenia: 350V  
 RPM: 3000 obr/min.

Badany wirnik został przysłany z podejrzeniem zwarcia zwojowego. Podczas wykonywania oscylogramów zwarcie zwojowych wykryto zwarcie w cewce nr 6. Uszkodzenie zostało zlokalizowane i naprawione. Pomiary porównawcze nie wykazały zwarcia zwojowego.



Rys. 12. Oscylogramy zwarcie zwojowych wykonane przed remontem,  $n=3000\text{obr/min.}$ [2]





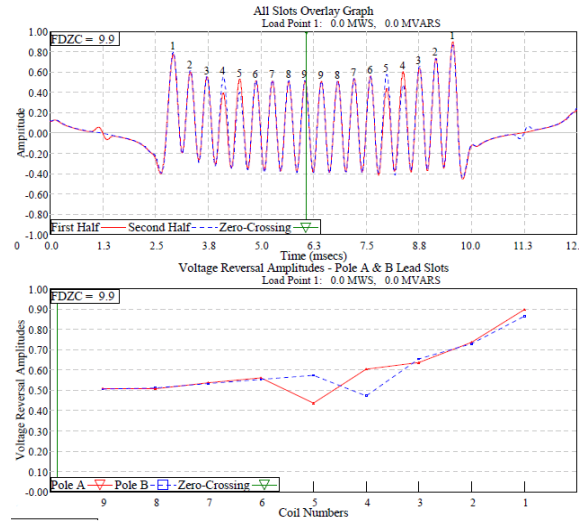
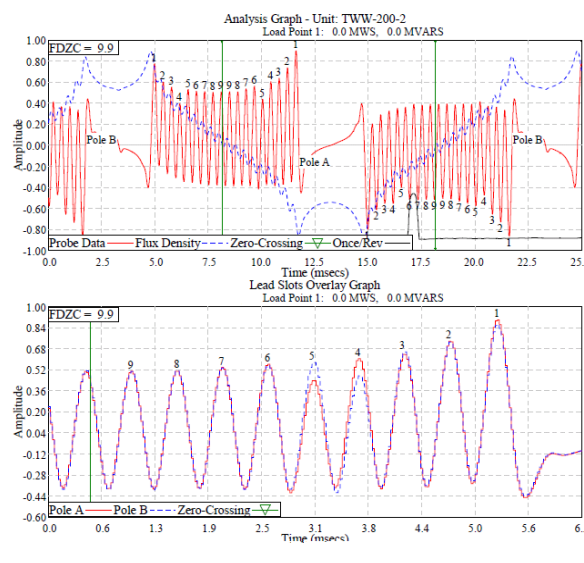
Rys. 13. Oscylogramy zwarć zwojowych wykonywane po remoncie,  $n=3000$  obr./min. [2]

#### 4.2. Przypadek 2

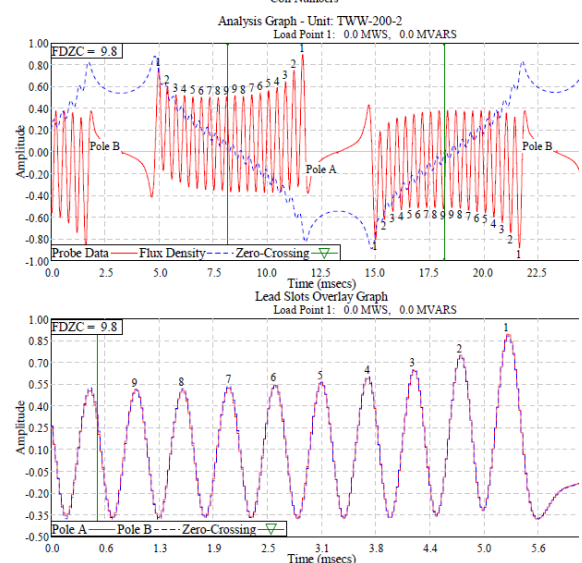
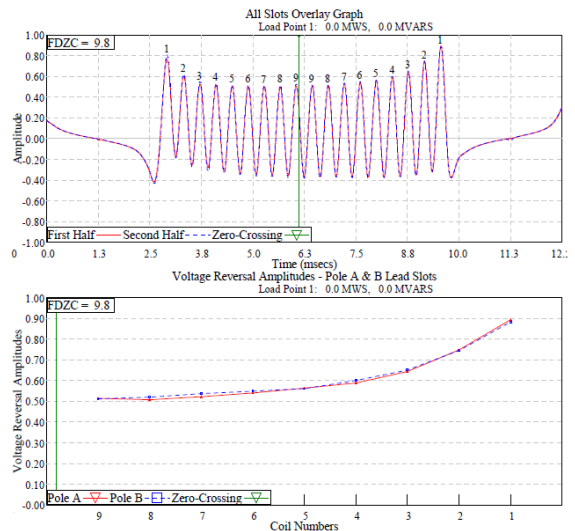
Opisany poniżej przypadek dotyczy wirnika przed remontem. Podejrzewano zwarcie i należało je zlokalizować. W tym celu wirnik został zamontowany na wyważarce i przeprowadzono na nim badania, które potwierdziły występowanie zwarcia w dwóch cewkach (nr 4 i 5). Badany obiekt wrócił na stanowisko pomiarowe po wykonanym remoncie. Oscylogramy wykonane po naprawie nie wykazały zwarcia.

Dane znamionowe:

Typ: TWW-200-2      Prąd wzbudzenia: 2470A  
 Moc: 230 MW      Napięcie wzbudzenia: 342V  
 RPM: 3000 obr./min.



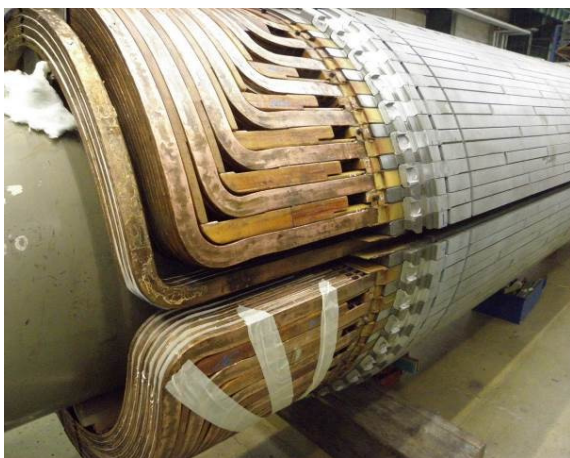
Rys. 14. Oscylogramy zwarć zwojowych z widocznym zwarciem,  $n=3000$  obr./min. [2]



Rys. 15. Oscylogramy zwarć zwojowych wykonywane po naprawie,  $n=3000$  obr./min. [2]

### 4.3. Przypadek 3

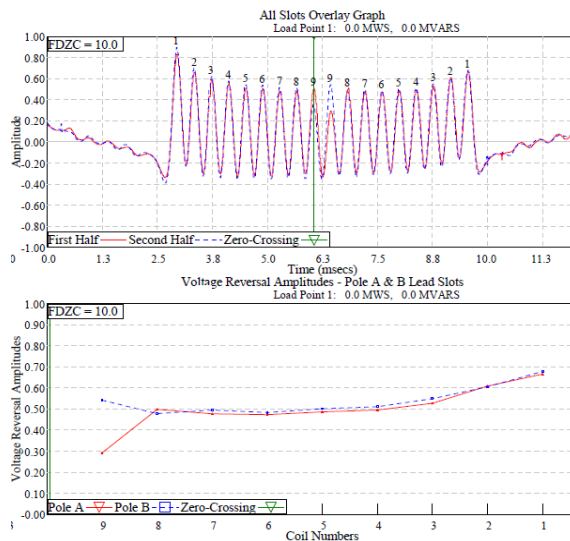
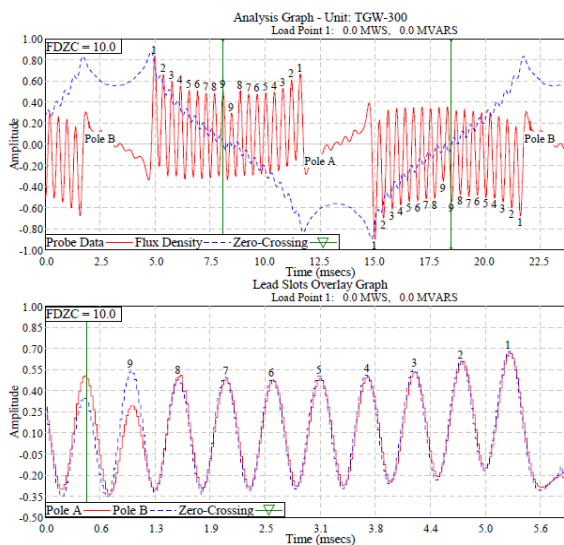
Opisany poniżej przypadek dotyczy wirnika, który został przysłany na wyważenie i wykonanie pełnej diagnostyki. Wirnik przeszedł wszystkie próby w stanie statycznym i został dopuszczony do wyważania i pomiarów w stanie dynamicznym. Oscylogramy zwarć zwojowych przeprowadzone na różnych prędkości ujawniły zwarcie w cewce nr 9. Po zdemontowaniu kołpaków zlokalizowano zwarcie. Oscylogramy oraz pozostałe pomiary elektryczne wykonane po naprawie nie wykazały zwarcia.



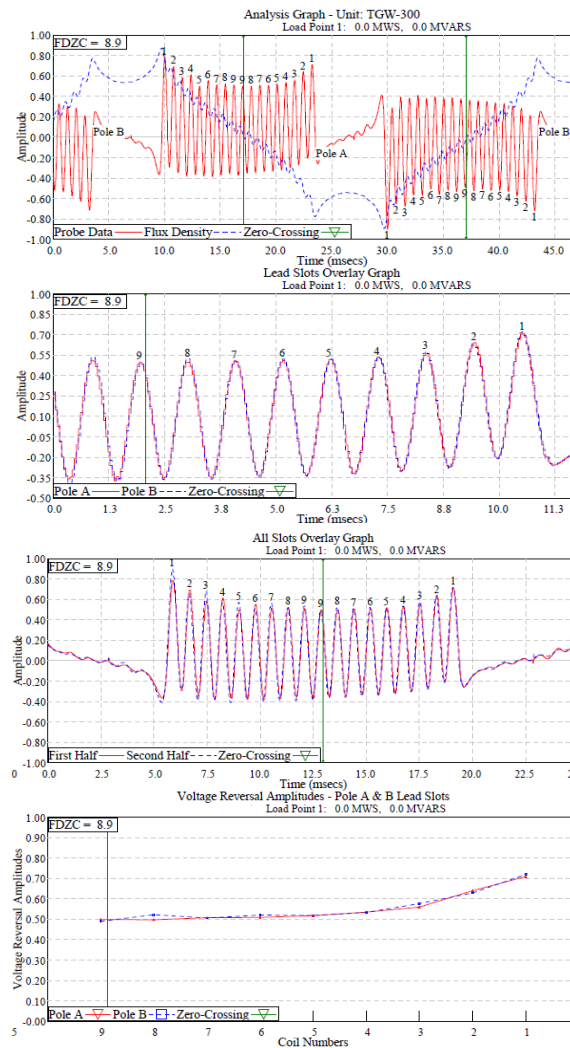
Rys. 16 Zdjęcie przedstawia wirnik podczas naprawy[2]

Dane znamionowe:

Typ: TGV-300      Prąd wzbudzenia: 3130A  
 Moc: 325 MVA      Napięcie wzbudzenia: 454V  
 RPM: 3000 obr/min.



Rys. 17. Oscylogramy zwarć zwojowych z widocznym zwarcie,  $n=3000$  obr/min. [2]



Rys. 18. Oscylogramy zwarć zwojowych wykonane po naprawie,  $n=3000$  obr/min. [2]

## 5. Uwagi końcowe

Zwarcia międzyzwojowe wywierają niekorzystny wpływ na pracę maszyny i należy je w miarę możliwości usunąć, by zapewnić bezawaryjną pracę jednostki. Stanowisko pomiarowe jakim jest wysokoobrotowa wyważarka daje możliwość wykonania pomiarów elektrycznych w całym zakresie prędkości obrotowej. Wykonanie pomiarów na obrotach pozwala zaobserwować, w którym momencie pojawia się problem i dokładnie go zdiagnozować. Jest to ważne, ponieważ siła odśrodkowa działająca na uzwojenie pozwala na ujawnienie wad wirnika, których nie można wykryć podczas pomiarów w stanie statycznym. Celem każdego przeglądu, czy też remontu jest dokładne zdiagnozowanie i wykrycie najsłabszych elementów w naprawianym obiekcie. Oczywiście należy pamiętać, by nie opierać się tylko na jednym badaniu i w miarę możliwości wykonać pozostałe pomiary.

## 6. Literatura

- [1]. Klempner G. Kerszenbaum I.: *Operation and maintenance of large turbo-generators*. ISBN 0-471-61447-5, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Canada 2004.
- [2]. Plany badań i prób, instrukcje wewnętrzne, zdjęcia i wyniki pomiarów – EthosEnergy Poland S.A. Lubliniec.
- [3]. Przybysz J.: *Turbogeneratory – Zagadnienia eksploatacyjne*. Instytut Energetyki 2005
- [4]. <http://www.generatorotech.com/>

## Autor

mgr inż. Paweł Rydlik  
EthosEnergy Poland S.A.  
[www.ethosenergy.pl](http://www.ethosenergy.pl)  
[pawel.rydlik@turbocare.pl](mailto:pawel.rydlik@turbocare.pl)