

mgr inż. Paweł Rydlik, EthosEnergy Poland S.A., rydlikp@ethosenergygroup.pl

## Diagnostyka wirników generatorów synchronicznych

W artykule przedstawiony został zakres badań i prób jakimi zostaje poddany każdy wirnik na końcowym etapie remontu jakim jest wyważanie i sezonowanie. Obecnie w przemyśle energetycznym wymaga się by przestoje maszyn były jak najkrótsze, a maszyny były jak najbardziej niezawodne. Aby spełnić ten wymóg, prace wykonane podczas remontu muszą zostać zweryfikowane na kompletnie zmontowanym wirniku w stanie dynamicznym w warunkach najbardziej zbliżonych do pracy remontowanej jednostki.

Wysokoobrotowa wyważarka daje możliwość przeprowadzenia pomiarów w całym zakresie prędkości obrotowej wyważanego wirnika. Plan badań i prób został tak dostosowany, by mieć możliwość pełnej oceny remontu oraz wykrycia ewentualnych wad. Specjalna konstrukcja wyważarki daje sposobność zamontowania wirników o masie do 80 000 kg zarówno dwułożyskowych, jak i trójłożyskowych. Wyposażenie odwirowni posiada zdolność nagrzewania wirników prądem na obrotach znamionowych. Podczas tego procesu w uzwojeniu wirnika płynie prąd stały (do 1000 A), który nagrzewa uzwojenie do temp. ok. 100°C, co daje opcję obserwacji stanu dynamicznego wirnika w zależności od wzrostu jego temperatury.

W poniższym tekście przedstawiony został proces wielopłaszczyznowego wyważania wirnika generatora synchronicznego, pomiary elektryczne, próba wytrzymałości mechanicznej, proces nagrzewania wirnika oraz dwa przypadki wykrycia zwarć międzyzwojowych. Podczas wyważania każdego wirnika monitorowane są zarówno drgania bezwzględne łożysk, jak i drgania względne wału dla każdego łożyska.

Granice strefy	Prędkość obrotowa wału [obr./min]			
	1500	1800	3000	3600
Maksymalne przemieszczenie Sp-p [µm]				
A/B	100	90	80	75
B/C	200	185	165	150
C/D	320	290	260	240

Rys. 1. Wartości graniczne drgań względnych wału turboszespolów o mocy powyżej 50 MW [5]

Granice strefy	Prędkość obrotowa wału [obr./min]	
	1500 lub 1800	3000 lub 3600
Prędkość drgań vRMS [mm/s]		
A/B	2.8	3.8
B/C	5.3	7.5
C/D	8.5	11.8

Rys. 2. Wartości graniczne drgań bezwzględnych łożysk turboszespolów o mocy powyżej 50 MW [5]

Stan dynamiczny wirnika po wyważeniu musi spełniać międzynarodowe normy (ISO 10816, ISO 7919, ISO 1940, ISO 10814) i powinien zawsze być w grupie A.

Możemy wymienić następujące etapy diagnostyki wirnika na odwirowni:

- wyważenie wstępne,
- pomiary elektryczne przed procesem nagrzewania i próbą wytrzymałości mechanicznej,

- proces nagrzewania,
- próba wytrzymałości mechanicznej,
- pomiary elektryczne wirnika ciepłego,
- wyważenie końcowe.

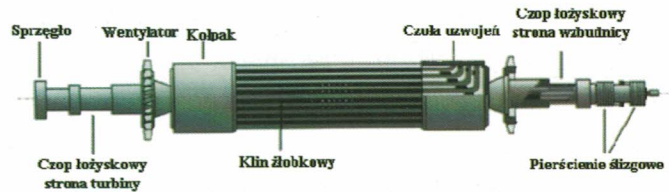
Wirniki maszyn elektrycznych możemy podzielić na wirniki sztywne i giętkie. Wirniki turbogeneratorów wielkiej mocy zaliczamy do grupy wirników giętkich, dlatego muszą być wyważane w wielu płaszczyznach i w całym zakre-

sie dopuszczalnych prędkości obrotowych [2].

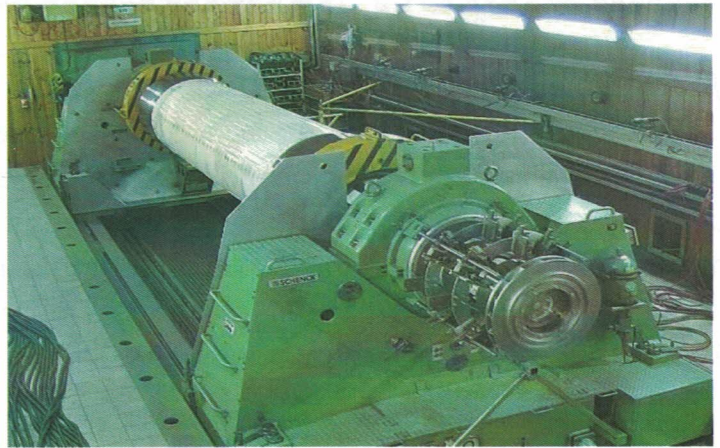
Wirniki turbogeneratorów składają się z wielu odrębnych elementów wykonanych z różnych materiałów. Niektóre części osadzone są na wale wirnika „ze skurczem” (sprzęgło, kołpaki, piasty wentylatorów). Pod wpływem sił odśrodkowych oraz wskutek nagrzania wirnika mogą wystąpić trwałe przemieszczenia poszczególnych jego elementów. Z tego powodu kontrola niewyważenia i doważenie powinno odbywać się w stanie nagrzanym podobnym do warunków w jakich wirnik jest eksploatowany. Wirnik przed ostatecznym wyważeniem jest odwirowany. Wykonanie tzw. zwężki obrotów jest próbą wytrzymałości mechanicznej, dlatego każdorazowo po wykonaniu próby przed ponownym najazdem należy dokonać szczególnych oględzin wirnika. Ocena stanu dynamicznego wirnika opiera się na pomiarze drgań bezwzględnych łożysk i względnych drgań wału (ISO 1940, ISO 11342, ISO 7919). Proces wyważania zakończony jest zdjęciem charakterystyk 1f i 2f stanu dynamicznego wyważanego wirnika.

Próby i pomiary elektryczne wykonywane na odwirowni:

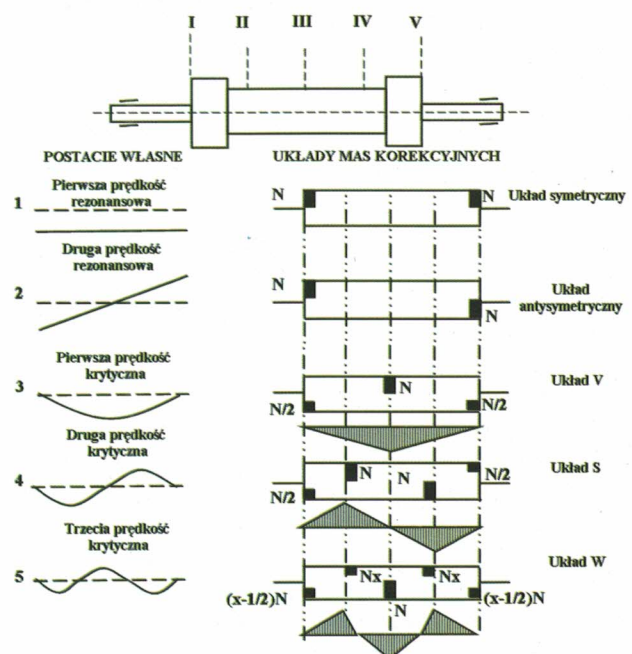
- pomiar stanu izolacji dla  $n = 0$  obr./min. bez i ze szczotkotrzymaczem i dla  $n = 3000$  obr./min.,
- pomiar impedancji:
  - w funkcji obrotów dla  $U = U_n$  (co 500 obr./min.),
  - w funkcji napięcia dla  $n = 3000$  obr./min. (co 50V),
- kontrola na obecność zwarc zwojowych, oscylogramy dla  $n = 500, 1500$  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.



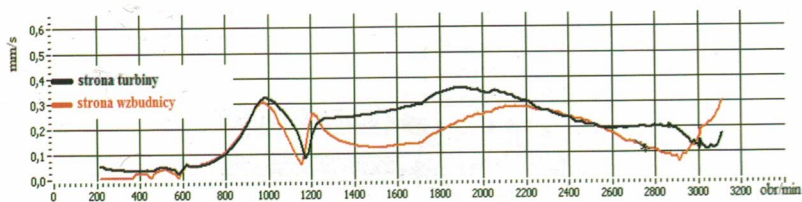
Rys. 3. Wirnik generatora synchronicznego [1]



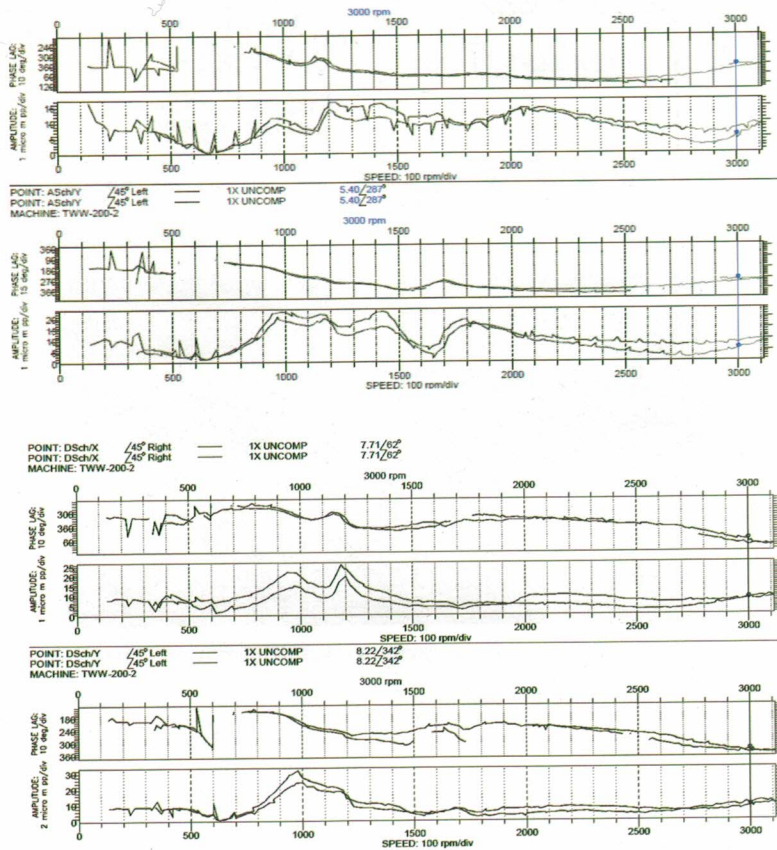
Rys. 4. Wirnik turbogeneratora podczas pomiarów elektrycznych [2]



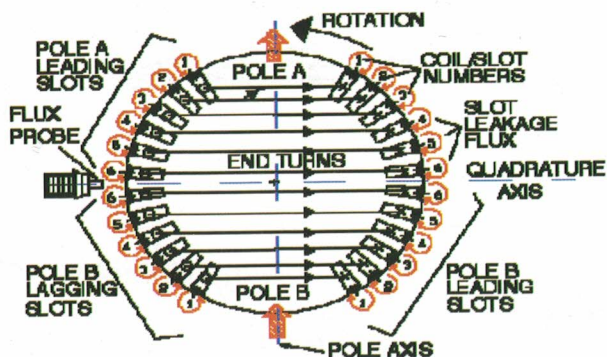
Rys. 5. Pełny cykl wyważania wirnika turbogeneratora w pięciu płaszczyznach korekcji [4]



Rys. 6. Charakterystyka 1f drgań bezwzględnych łożysk w kierunku poziomym [2]



Rys. 7. Charakterystyki 1x przedstawiają poziomy drgań względnych wałów [2]



Rys. 8. Nomenklatura dla wirnika dwubiegunowego [3]

- uzwojenia  $\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,
- 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.

Proces nagrzewania uzwojenia wirnika ma na celu nagrzanie całego wirnika, tj. zarówno uzwojenia, jak i żelaza wirnika do temperatury ok. 1000C. 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.

W artykule przedstawiony został pomiar oscylogramów zwarc zwojowych. Oscylogramy zwarć zwojowych wykonywane są dwukrotnie (przed próbą wytrzymałości mechanicznej i procesem nagrzewania oraz po przeprowadzeniu grzania w stanie ciepłym). 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. Zwarcia międzyzwojowe powstają w wyniku uszkodzenia izolacji pomiędzy poszczególnymi zwojami uzwojenia wirnika. Do najczęstszych przyczyn uszkodzeń izolacji możemy zaliczyć:

- zawilgocenie izolacji,
- rdzewienie stali rdzenia z opadaniem rdzy na uzwojenia,
- ciała obce.

Rys. 9 przedstawia przebieg sygnału z sondy indukcyjnej magnetycznej w generatorze mającym 6 cewek na biegun w stanie jałowym. Sonda indukcyjnej magnetycznej została tak zaprojektowana, aby wykrywać strumień rozproszony żłobka, gdy żłobek przesuwają nad sondą.

### ■ Przypadki wykrycia zwarcia zwojowych:

#### Przypadek 1:

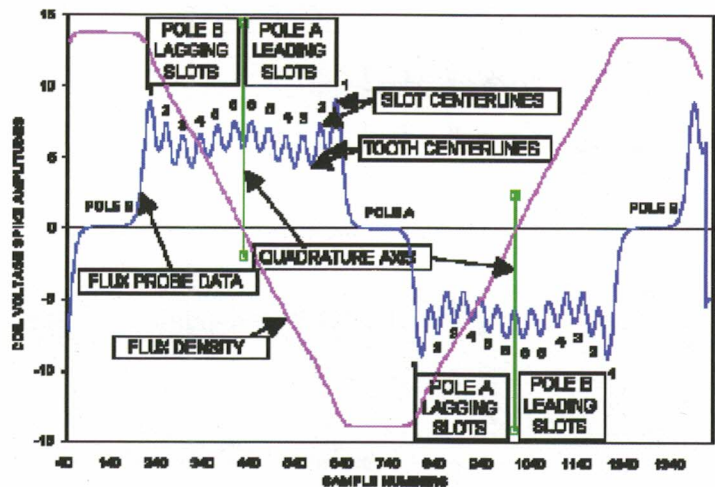
Dane znamionowe:  
Moc: 325 MVA  
RPM: 3000 obr./min.

Charakterystyki przedstawione poniżej dotyczą 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 zwarcia zwojowych przeprowadzone na różnych prędkościach ujawniły zwarcie w cewce nr 9. Po zdemontowaniu kołpaków zlokalizowano zwarcie. Oscylogramy oraz pozostałe pomiary elektryczne wykonane po naprawie nie wykazały zwarcia.

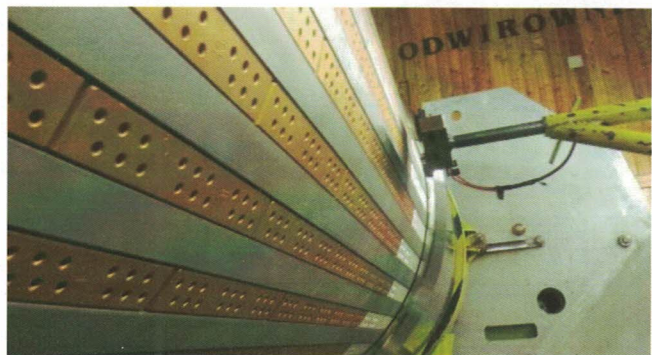
#### Przypadek 2:

Dane znamionowe:  
Moc: 230 MW  
RPM: 3000 obr./min.

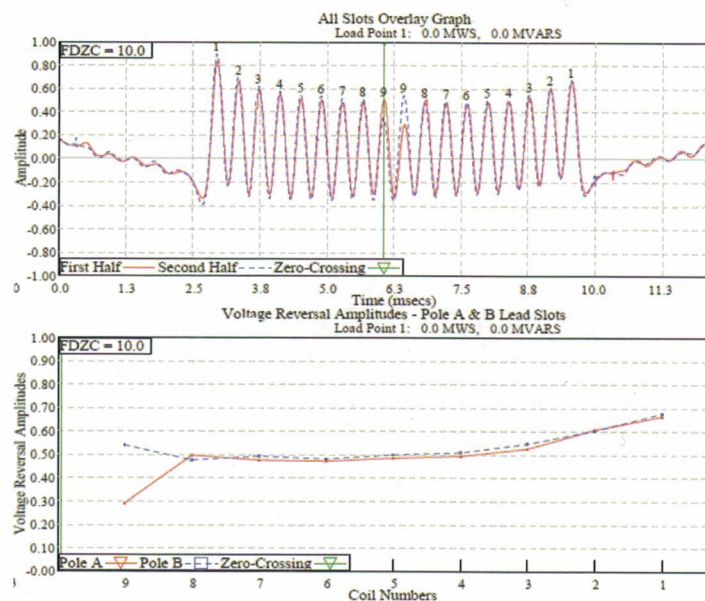
Opisany poniżej przypadek dotyczy wirnika przed remontem. Podejrzewano zwarcie i należało je zlokalizować. W tym celu wirnik został zamontowany na wyważarce i przeprowadzono na nim badania, które potwierdziły występowanie zwarcia w dwóch cewkach (nr 4 i 5). Badany obiekt wrócił na stanowisko pomiarowe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



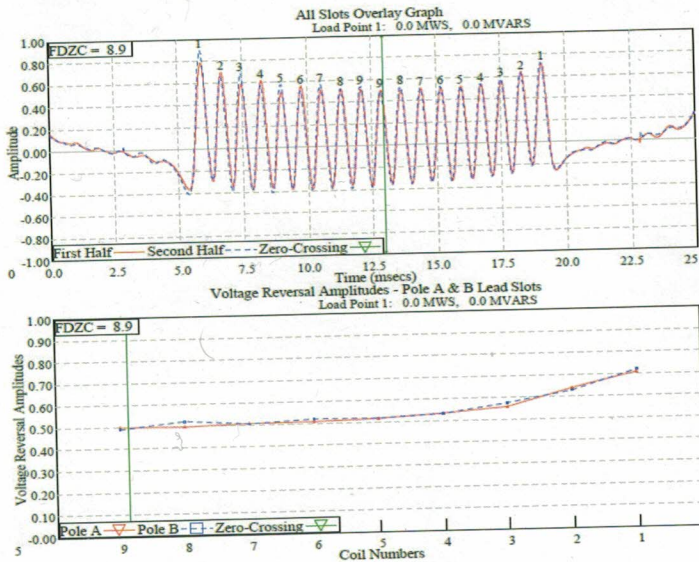
Rys. 9. Sygnał z sondy pomiarowej [3]



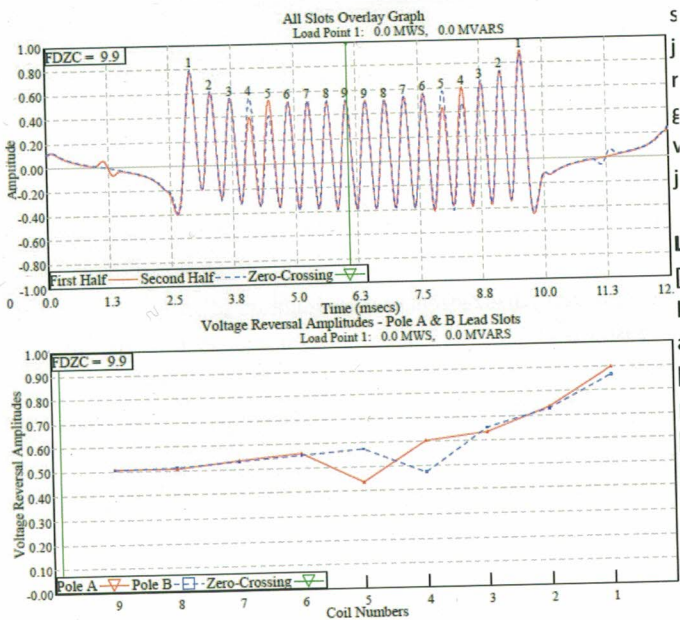
Rys. 10. Sonda pomiarowa zainstalowana na odwirowni [2]



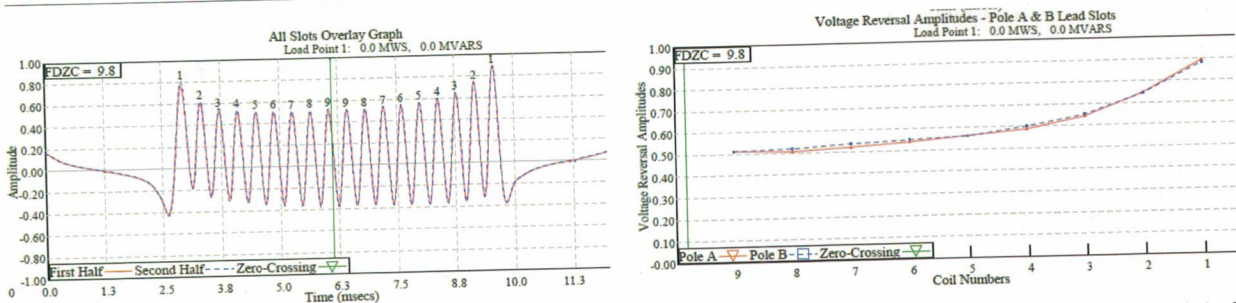
Rys. 11. Oscylogramy zwarcia zwojowych wykonane przed naprawą, n=3000 obr./min. [2]



Rys. 12. Oscylogramy zwarć zwojowych wykonane po naprawie,  $n=3000$  obr./min. [2]



Rys. 13. Oscylogramy zwarć zwojowych wykonane przed naprawią,  $n=3000$  obr./min. [2]



Rys. 14. Oscylogramy zwarć zwojowych wykonane po naprawie,  $n=3000$  obr./min. [2]

W celu zapewnienia bezawaryjnej pracy maszyny, materiały użyte do produkcji nowych elementów wirnika powinny spełniać wszystkie normy i posiadać odpowiednie certyfikaty. Wysokoobrotowa wyważarka z opcją przepływu prądu przez uzwojenie daje możliwość przeprowadzenia pomiarów elektrycznych przy obrotach znamionowych remontowanego wirnika w warunkach odpowiadających warunkom eksploatacyjnym. Ponieważ podczas pracy wirnika na uzwojenie działa duża siła odśrodkowa, zyskujemy możliwość wykrycia wad niewidocznych podczas wykonywania pomiarów w stanie statycznym. Niejednokrotnie bywa, że zwarcie międzyzwojowe jest możliwe do wykrycia jedynie w stanie dynamicznym. 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.

#### Literatura

- [1]. Klempler 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]. [www.generatorotech.com](http://www.generatorotech.com)
- [4]. Łączkowski R.: *Wyważanie elementów wirujących*. WNT Warszawa 1979.
- [5]. J. Przybysz - „*Turbogeneratory - Zagadnienia eksploatacyjne*” - Instytut Energetyki Warszawa 2003 r.