

## Spektroskopia impedancji – metoda oceny stopnia wyeksploatowania kołpaków wirników generatorów

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono metodykę badawczą umożliwiającą ocenę stopnia wyeksploatowania paramagnetycznej stali kołpaków wirników generatorów w cyklach przeglądów eksploatacyjnych. Parametry elektryczne i magnetyczne stali, zarówno ferro jak i paramagnetycznych, podlegają zmianom wynikającym z charakteru obciążeń, zarówno mechanicznych jak i termicznych. Parametry te można wyodrębnić metodą spektroskopii impedancji sondy pomiarowej. Badanie zmienności parametrów, powodowanej eksploatacyjnymi procesami zmęczeniowymi, umożliwia dokonywanie oceny stopnia degradacji zmęczeniowej i prognozowania dalszej eksploatacji materiału. Podstawy prezentowanej metodologii były opracowane dla pojazdów szynowych – w zakresie diagnostyki zestawów kołowych. Wyniki badań materiału fabrycznie nowego oraz wyeksploatowanego potwierdzają możliwość wykrywania procesów degradacyjnych na poziomie struktury materiału, często na długo przed powstaniem nieciągłości geometrycznych (pęknięć). Zaprezentowana metoda może być alternatywą lub cennym uzupełnieniem powszechnie stosowanych metod diagnostycznych. W artykule oprócz wyników przeprowadzonych badań materiału wyeksploatowanego i próbek poddanych cyklem obciążeń zmęczeniowych, przedstawiono rolę kołpaków wirników w pracy generatorów, podkreślono znaczenie okresowych kontroli stanu technicznego kołpaków metodami nieniszczącymi oraz wskazano zagrożenia wynikające z niewłaściwie prowadzonej eksploatacji.

**Abstract.** The paper presents a testing method which enables evaluation of fatigue wear of paramagnetic steel of generator rotor retaining rings in the cycles of operating inspections. Electric and magnetic parameters of both ferromagnetic and paramagnetic steels are subject to changes resulting from the loads, both mechanical and thermal ones. These parameters can be extracted using a method of measuring probe impedance spectroscopy. Investigation of parameters variability, caused by the operational fatigue processes, enables to assess the degree of fatigue degradation and forecast further use of the material. Basics of the presented methodology were developed for rail vehicles - in the area of wheel sets diagnostics. Results for brand new and worn-out materials confirm the possibility of degradation process detection at the level of material structure, often long before appearance of geometrical discontinuities (cracks). The presented method can be an alternative or a valuable complement to the commonly used diagnostic methods. This article, in addition to the results of the research on the worn-out material and the samples subjected to fatigue load cycles, presents also the role of rotor retaining rings in the operation of generators, emphasizes the importance of periodic technical inspections of retaining rings using non-destructive methods and identifies risks of improperly conducted operation. (**Impedance spectroscopy – method of fatigue wear evaluation of generator rotor retaining rings**).

**Słowa kluczowe:** spektroskopia impedancji, eksploatacyjna zmiana parametrów fizycznych materiału, badania nieniszczące, proces zmęczeniowy, przenikalność magnetyczna efektywna/skuteczna, zmiana przenikalności magnetycznej, zmiana przewodności elektrycznej  
**Keywords:** impedance spectroscopy, operational change of material physical parameters, non-destructive tests, fatigue process, effective magnetic permeability, change of magnetic permeability, change of electric conductivity

doi:10.12915/pe.2014.03.59

### Kołpaki wirników generatorów - wprowadzenie

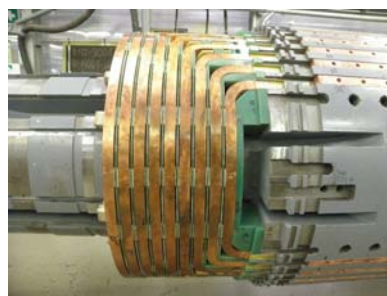
Kołpaki (rys.1, 2) są elementami wirników generatorów służącymi do zabezpieczenia połączeń czołowych uzwojenia wzbudzenia przed skutkami oddziaływania sił odśrodkowych i elektrodynamicznych w czasie pracy. Kołpaki wirników są najbardziej mechanicznie wyężonymi elementami generatora, narażonymi na rozerwanie. W czasie pracy muszą zrównoważyć siły odśrodkowe od ich masy własnej oraz od masy połączeń czołowych uzwojenia wirnika wraz z elementami usztywniającymi (rys.3). Ponadto w kołpakach występują naprężenia wywołane skurczowym osadzeniem ich na beczce wirnika i pierścieniu centrującym. W zależności od konstrukcji osadzenia kołpaka na beczce wirnika, w trakcie eksploatacji w kołpakach mogą występować naprężenia dodatkowe, jak np. naprężenia przemiennie-kierunkowe wynikające z ugięć wału, czy też naprężenia osiowe wynikające z wydłużeń termicznych uzwojenia wzbudzenia.



Rys.1. Przykładowy widok turbogeneratora 210MW w trakcie demontażu wirnika ze stojana, z widocznym kołpakiem



Rys.2. Kołpak na stanowisku do badań nieniszczących



Rys.3. Widok elementów wirnika chronionych przez kołpak

Ekstremalnie wysokie naprężenia w połączeniu z innymi czynnikami (jak np. śladową zawartością wilgoci w generatorze czy też obecnością związków agresywnych, np. jonów chlorkowych i fosforanowych) były przyczyną najpoważniejszych awarii generatorów, z nagłym rozerwaniem kołpaka włącznie. Awarii takich więcej odnotowano w energetyce amerykańskiej z uwagą na

wyższą prędkość obrotową wirników turbogeneratorów (3600obr/min, 60Hz) w stosunku do turbogeneratorów europejskich (3000obr/min, 50Hz).

Kołpaki wirników są elementami generatora strategicznymi dla bezpieczeństwa pracy bloków energetycznych w elektrowni, dlatego tak ogromne znaczenie ma diagnostyka ich stanu technicznego.

### Diagnostyka kołpaków

Celem zachowania niezawodności eksploatacyjnej i bezpieczeństwa pracy, kołpaki wirników generatorów należy poddawać okresowym badaniom ich stanu technicznego metodami nieniszczącymi, aby wykryć wszelkiego rodzaju uszkodzenia i zmiany w materiale na jak najwcześniejszym etapie ich rozwoju.

Prowadzone badania kołpaków (tab.1) mogą mieć charakter powierzchniowy lub objętościowy. Większość stosowanych powszechnie metod służy do wykrywania już istniejących defektów geometrycznych, tj. pęknięć, nieciągłości i wad materiałowych. Metodą zasadniczo różniącą się od pozostałych jest pomiar tłumienia fali ultradźwiękowej w materiale kołpaka, gdyż daje pewien obraz o stanie jego struktury i stopniu zaawansowania procesu zmęczeniowego.

Tabela 1. Powszechnie stosowane metody badań nieniszczących kołpaków wirników generatorów

Metody badań kołpaków		Rodzaj wykrywanych defektów
Podstawowe	wizualne	geometryczne, powierzchniowe
	ultradźwiękowe	geometryczne, objętościowe
	penetracyjne	geometryczne, powierzchniowe
Dodatkowe	metalograficzne (zglądy)	geometryczne, powierzchniowe
	tłumienia fali ultradźwiękowej	<b>strukturalne, objętościowe</b>
Do wdrożenia	<b>spektroskopii impedancji</b>	<b>strukturalne, objętościowe</b>

Metodą dającą pełny obraz o stanie struktury materiałowej kołpaka, a tym samym o stopniu jego wyeksploatowania, jest metoda spektroskopii impedancji.

### Wymagania materiałowe

Kołpak jako element generatora o najwyższym znaczeniu z punktu widzenia bezpieczeństwa pracy, musi spełniać ostre wymagania materiałowe. Od materiału kołpaka wymaga się m.in. wysokiej granicy plastyczności, odpowiedniej rozszerzalności cieplnej, wysokiej odporności na korozję, wysokiej odporności zmęczeniowej oraz niemagnesowalności.

Od ponad dwudziestu lat kołpaki wykonywane są z paramagnetycznej stali austenitycznej chromowo-manganowej w gatunku G18H18 (18%Mn, 18%Cr). W przeszłości na kołpaki stosowano paramagnetyczną stal austenityczną w gatunku G18H3 (18%Mn, 3-5%Cr), którą w latach 80-tych wycofano z produkcji z uwagi na jej podatność na korozję naprężeniową, jednak kołpaki wykonane z tej stali ciągle jeszcze pracują w energetyce.

W tabeli 2 przedstawiono podstawowe parametry magnetyczne i elektryczne powyższych stali (dane katalogowe dla materiału nowego, tj. bez degradacji zmęczeniowej).

W praktyce obowiązuje również wymóg eksploatacyjny:  $\mu_r \leq 1,05$ . Jak wynika z tabeli 2, wartości przewodności elektrycznej właściwej i rezystywności są uzależnione od własności mechanicznych stali oraz zastosowanej obróbki cieplnej.

Tabela 2. Parametry magnetyczne i elektryczne materiałów na kołpaki (dane katalogowe)

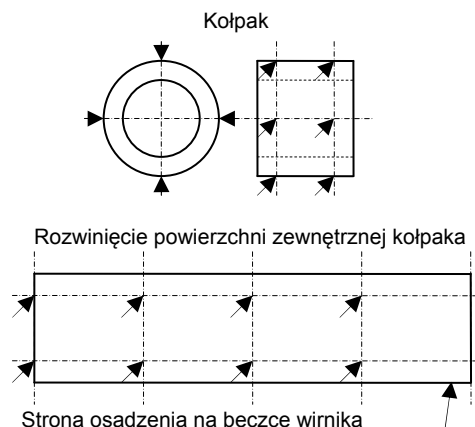
Materiał	Przenikalność magnetyczna względna $\mu_r$ [-]	Przewodność elektryczna wł. $\gamma, (\sigma)$ [S/m] (Rezystywność $\rho$ [ $\Omega$ m])		
		przesycony	$R_{p0,2}$ 900 MPa	$R_{p0,2}$ 1000 MPa
G18H18	$\leq 1,004$	$1,380 \cdot 10^6$ ( $0,725 \cdot 10^{-6}$ )	$1,370 \cdot 10^6$ ( $0,730 \cdot 10^{-6}$ )	$1,400 \cdot 10^6$ ( $0,714 \cdot 10^{-6}$ )
G18H3 (dawniej)	$\leq 1,004$	$1,330 \cdot 10^6$ ( $0,752 \cdot 10^{-6}$ )	$1,320 \cdot 10^6$ ( $0,758 \cdot 10^{-6}$ )	$1,290 \cdot 10^6$ ( $0,775 \cdot 10^{-6}$ )

### Badania zmian parametrów fizycznych materiału

W wyniku eksploatacyjnych procesów zmęczeniowych, przede wszystkim mechanicznych i cieplnych, w stalach (również paramagnetycznych) zachodzą zmiany na poziomie strukturalnym. W rezultacie parametry fizyczne stali (m.in. elektryczne i magnetyczne) ulegają zmianom, które można wykorzystać do oceny postępu degradacji zmęczeniowej. Celem poznania zakresu tych zmian przeprowadzone zostały badania, których wyniki zaprezentowano poniżej.

### Pomiar tłumienia fali ultradźwiękowej

Pomiary tłumienia fali ultradźwiękowej wykonano dla 8 dostępnych wyeksploatowanych kołpaków, wycofanych z eksploatacji na podstawie wyników standardowych badań nieniszczących, oraz dla materiału fabrycznie nowego G18H18. Kołpaki pochodziły z czterech różnych generatorów o mocach w zakresie od 50 do 250MW. Dwa kołpaki były wykonane z materiału G18H18, natomiast pozostałych sześć - z produkowanego w przeszłości materiału G18H3. Pomiary tłumienia wykonano w punktach pomiarowych zlokalizowanych zgodnie z rysunkiem 4.



Rys.4. Rozmieszczenie punktów pomiarowych na powierzchni zewnętrznej kołpaka

Przyjęte w praktyce wartości charakterystyczne tłumienia materiału kołpaka:

- < 3 dB/m (wartość zbliżona do 0 dB/m) - tłumienie materiału fabrycznie nowego,
- 60 dB/m - przyjęta w praktyce graniczna wartość tłumienia, świadcząca o wyeksploatowaniu materiału.

W tabeli 3 zamieszczono wartość średnią wyników pomiarów tłumienia dla poszczególnych kołpaków wyeksploatowanych oraz dla materiału nowego.

Wyniki pomiarów potwierdziły zajście zmian w strukturze materiałowej, spowodowanych eksploatacyjnym procesem zmęczeniowym. Wyniki odzwierciedlają stan wyeksploatowania.

Tabela 3. Uśrednione wyniki pomiarów tłumienia fali ultradźwiękowej materiałów kołpaków

Kołpak (gatunek stali)	K1.1 (G18H3)	K1.2 (G18H3)	K2.1 (G18H3)	K2.2 (G18H3)	K3.1 (G18H3)	K3.2 (G18H3)	K4.1 (G18H18)	K4.2 (G18H18)	mat. nowy (G18H18)
Wartość śr. tłumienia fali ultradźwięk. [dB/m]	61	41	73	66	84	80	38	50	ok. 0

### Badania zmęczeniowe materiału

W celu wykonania badań zmienności parametrów fizycznych stali kołpaków w zależności od stopnia zaawansowania procesu zmęczeniowego, przeprowadzone zostały próby zmęczeniowe materiału. Do badań zmęczeniowych przygotowano próbki płaskie (rys.5) o wymiarach 5mm x 10mm x 100mm, cięte elektroerozyjnie, z przewężeniem zmęczeniowym w części środkowej. Próbki wykonano z materiału odkuwki kołpaka fabrycznie nowego, tj. stali G18H18. Próbki poddano działaniu mechanicznych obciążeń zmęczeniowych w urządzeniu obciążającym, którego zasadę działania przedstawiono na rysunku 6 (cykl odzerowo tętniący).



Rys.5. Próbka do badań zmęczeniowych



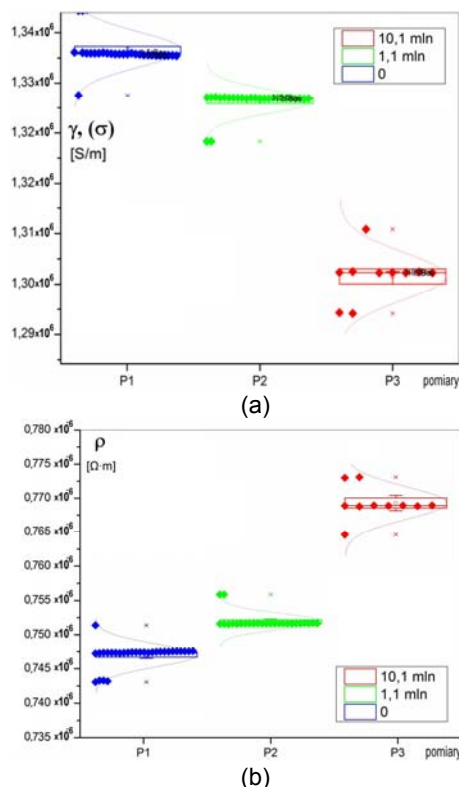
Rys.6. Zasada działania mechanizmu do obciążeń zmęczeniowych i wykres momentu gnącego

Po osiągnięciu ustalonych ilości cykli obciążeń zmęczeniowych, próbki poddawane były pomiarom zmian ich parametrów fizycznych (wyniki przedstawiono w części dalszej).

### Pomiar zmian parametrów elektrycznych

Po seriach mechanicznych obciążeń zmęczeniowych próbki poddawano badaniom zmian ich parametrów elektrycznych. Na rysunku 7 przedstawiono wyniki pomiarów przewodności elektrycznej właściwej  $\gamma_e$  ( $\sigma$ ) [S/m] i rezystywności  $\rho$  [ $\Omega$ m] próbek materiału G18H18 nowego (tj. przed rozpoczęciem obciążeń zmęczeniowych) oraz po seriach 1.100.000 i 10.100.000 cykli. Próbki obciążano momentem gnącym wywołującym naprężenia na poziomie maksymalnych naprężeń eksploatacyjnych (strzałka ugięcia 0,7mm).

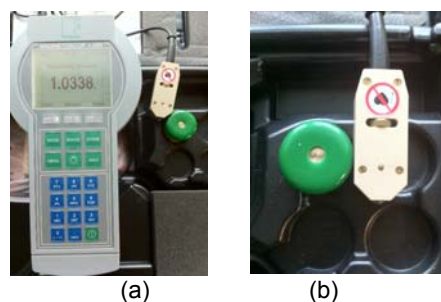
Wyniki pomiarów próbek wykazały kilkuprocentową (2,5% po 10,1mln cykli) zmianę ich parametrów elektrycznych po seriach obciążeń zmęczeniowych. Wzrost liczby cykli obciążeń przekłada się na spadek przewodności elektrycznej właściwej (czyli wzrost rezystywności). Zmierzone zmiany są istotne dla oceny stanu technicznego stali, odzwierciedlają poziom jej degradacji zmęczeniowej.



Rys.7. Zmiany przewodności elektrycznej właściwej (a) i rezystywności (b) próbek materiału G18H18 po seriach obciążeń zmęczeniowych

### Pomiar zmian parametrów magnetycznych

Pomiary zmian wybranych parametrów magnetycznych wykonano na 8 kołpakach wyeksploatowanych (wcześniej poddanych pomiarom tłumienia fali ultradźwiękowej), oraz na materiale fabrycznie nowym G18H18. Pomiary przeprowadzono magnetoskopem Förstera 1.069 (rys.8) w tych samych punktach pomiarowych, w których mierzono współczynniki tłumienia (rys.4). Zastosowany magnetoskop umożliwia prowadzenie specjalistycznych pomiarów przenikalności magnetycznej względnej z bardzo wysoką rozdzielczością (do 0,00001).



Rys.8. Magnetoskop Förstera (a) z sondą pomiarową (b)

W tabeli 4 przedstawiono wyniki pomiarów przenikalności magnetycznej względnej  $\mu_r$  i podatności magnetycznej  $\chi$  badanych materiałów. Czcionką pogrubioną zaznaczono wyniki dla stali G18H18 wyeksploatowanej i nowej, które można wzajemnie porównywać.

Z uwagi na brak stali G18H3 w stanie początkowym (od lat 80-tych nie jest już produkowana), nie mamy odniesienia do materiału nowego.

Tabela 4. Wyniki pomiarów przenikalności magnetycznej względnej i podatności magnetycznej materiałów kołpaków

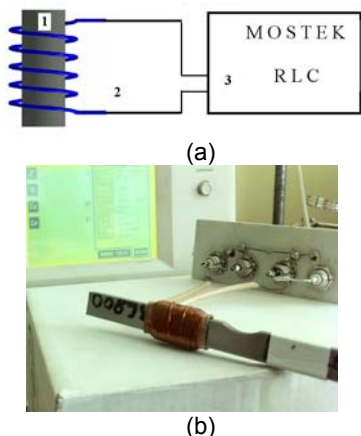
Kołpak (gatunek stali)	K1.1 (G18H3)	K1.2 (G18H3)	K2.1 (G18H3)	K2.2 (G18H3)	K3.1 (G18H3)	K3.2 (G18H3)	K4.1 (G18H18)	K4.2 (G18H18)	mat. nowy (G18H18)
Wartość średnia $\mu_r$ [-]	1,00275	1,00270	1,00270	1,00270	1,00265	1,00275	1,00355	1,00375	1,00320
Wartość średnia $\chi$ [-]	0,00275	0,00270	0,00270	0,00270	0,00265	0,00275	0,00355	0,00375	0,00320

Wyniki pomiarów wykazały kilkunastoprocentową (11-17%) zmianę podatności magnetycznej stali wyeksploatowanej G18H18 w stosunku do stali fabrycznie nowej. Eksploatacyjny proces zmęczeniowy przekłada się na wzrost przenikalności magnetycznej względnej i podatności magnetycznej. Zmierzony zakres zmian jest istotny dla badań procesu wyeksploatowania materiału, odzwierciedla poziom jego zdegradowania zmęczeniowego.

### Metoda spektroskopii impedancji i wyniki pomiarów

Coraz wyższe wymagania, stawiane również maszynom elektrycznym, wymuszają doskonalenie metod badawczych dających możliwość oceny postępu degradacji zmęczeniowej oraz prowadzenia prognozy eksploatacyjnej dla materiałów. Do takich metod należy metoda spektroskopii impedancji.

Metoda spektroskopii impedancji oparta jest o pomiary zmian składowych czynnej i urojonej przenikalności magnetycznej efektywnej (=skutecznej)  $\underline{\mu}_{eff}$  [12] (pojęcie wprowadzone przez Förstera) cewki pomiarowej, bez i z badanym materiałem, wraz ze zmianą częstotliwości. Metoda umożliwia badanie próbek materiału jak również obiektu. Zasadę pomiaru wraz z realizacją praktyczną zilustrowano na rysunku 9.



Rys.9. Zasada pomiaru (a) i cewka sondy pomiarowej z próbką materiału (b)

Metodyka badań wykorzystuje teoretyczne związki opracowane przez Förstera dla celów defektoskopii

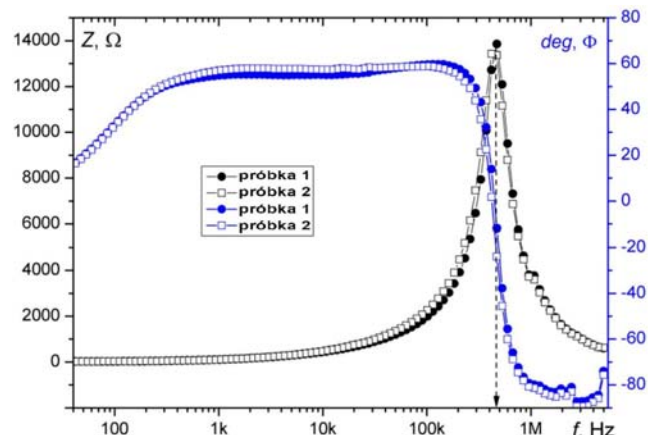
$$\frac{\Delta R}{\omega L_0} = \eta \mu_r (-\text{Im} \underline{\mu}_{eff})$$

$$\frac{\omega L}{\omega L_0} = 1 - \eta + \eta \mu_r (\text{Re} \underline{\mu}_{eff})$$

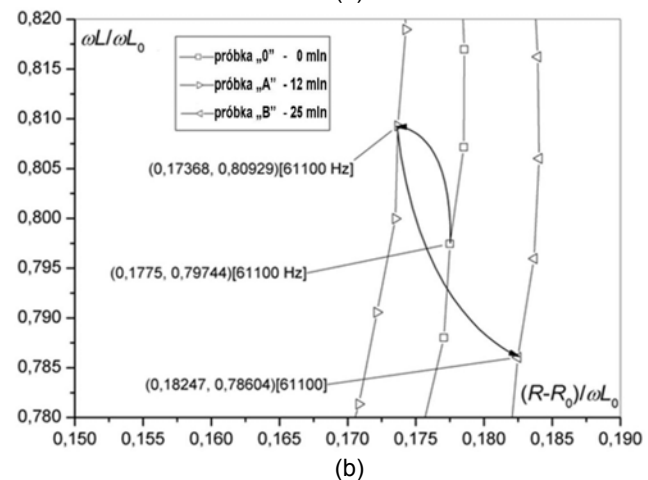
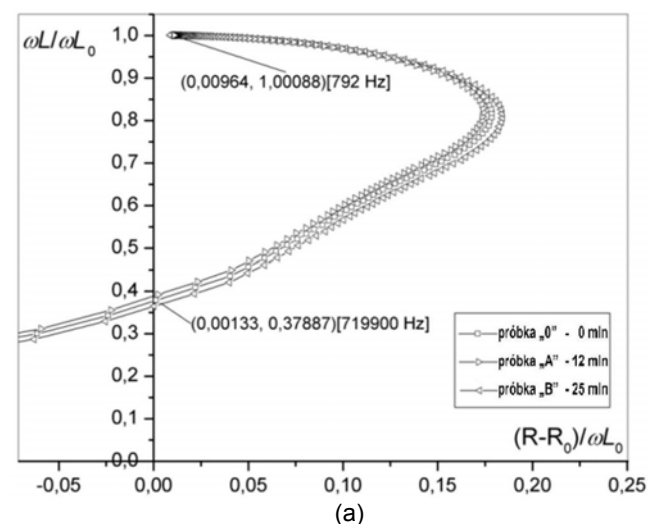
gdzie:

$$\frac{\Delta R}{\omega L_0}, \frac{\omega L}{\omega L_0} - \text{unormowane składowe impedancji, } \underline{\mu}_{eff} -$$

przenikalność magnetyczna efektywna/skuteczna;  $\mu_r$  - przenikalność magnetyczna względna;  $\eta$  - współczynnik wypełnienia cewki pomiarowej



Rys.10. Wykres zmian impedancji i kąta przesunięcia fazowego materiału G18H18 nowego i po 12mln cykli obciążeniowych w funkcji częstotliwości



Rys.11. Wykresy zmian składowych czynnej i urojonej przenikalności magnetycznej skutecznej dla materiału G18H18 (a) - przebieg pełny w zakresie częstotliwości do 1 MHz (b) - szczegół wykresu dla częstotliwości 61100Hz

Pomiary wykonano mostkiem RLC. Cewkę pomiarową (rys.9b) zasilano napięciem w dostępnym zakresie częstotliwości, tj. od 42Hz do 5MHz. Zakres pomiarowy zastosowanego mostka RLC wynika z minimalnej podatności magnetycznej badanej stali paramagnetycznej (katalogowo  $\chi \leq 0,004$ ) oraz wysokiej eksploatacyjnej stabilności jej parametrów elektrycznych i magnetycznych.

Wyniki pomiarów próbek materiału nowego G18H18 i po 12mln cykli obciążeń zmęczeniowych, przedstawione jako zmiana impedancji i kąta przesunięcia fazowego w funkcji częstotliwości (rys.10), wykazują zbieżność swoich przebiegów.

Na rysunku 11 przedstawiono inną metodykę prezentowania wyników, w oparciu o zmiany wartości składowych przenikalności magnetycznej skutecznej. Z przeprowadzonych pomiarów Z, R, L cewki pomiarowej wyznaczono zmiany wartości składowych czynnej i urojonej przenikalności magnetycznej skutecznej. Przebiegi zmian zostały wyznaczone dla próbek materiału nowego G18H18 („0”), po 12mln cykli obciążeń zmęczeniowych („A”) i po 25mln cykli („B”).

Otrzymałone zależności wskazują względne zmiany przenikalności magnetycznej i przewodności elektrycznej właściwej (przy określonych częstotliwościach), jakie zaszły w materiałach próbek w wyniku działania obciążeń zmęczeniowych. Analiza zmian składowych czynnej i urojonej umożliwia dokonanie oceny stopnia degradacji zmęczeniowej badanego materiału. Na wykresie (rys.11b) widoczna jest, klasyczna w mechanice zmęczenia, charakterystyczna dla określonego materiału i sposobu obciążenia, faza umocnienia/osłabienia materiału w początkowym okresie eksploatacji.

Przeprowadzone pomiary są powtarzalne.

## Podsumowanie

Obecnie ocena stanu technicznego kołpaków wirników generatorów oparta jest na podstawowych badaniach nieniszczących, tj. penetracyjnych, ultradźwiękowych i gdy zachodzi potrzeba - metalograficznych. Większość stosowanych powszechnie metod służy wykrywaniu już istniejących detekcji i nieciągłości geometrycznych, jak np. pęknięcia i pustki.

**Metoda spektroskopii impedancji** należy do metod diagnostyki nieciągłości strukturalnych, powodowanych procesami zmęczeniowymi, zarówno mechanicznymi jak i cieplnymi. Przeprowadzone badania potwierdziły jej uniwersalność. Metoda może służyć detekcji zmian strukturalnych w elementach stalowych, zarówno ferromagnetycznych jak i paramagnetycznych, o wysokiej stabilności eksploatacyjnej parametrów elektrycznych i magnetycznych. Ponadto umożliwia badanie próbek materiału jak i obiektu. Jej innowacyjność polega na ujednoczeniu metodyki badawczej dla stali ferro i paramagnetycznych.

Przedstawiona metodyka doskonale nadaje się do badań stanu technicznego paramagnetycznego materiału kołpaka, w wyniku których otrzymujemy pełny obraz

degradacji zmęczeniowej jego struktury materiałowej. Zaletą wiodącą metody jest prostota, za którą przemawia zastosowanie średniej klasy mostka RLC oraz bardzo wysoka powtarzalność pomiarów. Ponadto metodę wyróżniają niskie koszty badań, wielokrotnie niższe od innych nowoczesnych metod badawczych. Metoda może być alternatywą lub cennym uzupełnieniem standardowych metod diagnostyki kołpaków.

Zaprezentowana metodyka z powodzeniem jest stosowana w pojazdach szynowych, w badaniach stanu technicznego zestawów kołowych.

## LITERATURA

- [1]. ŻUREK Z. H.: NN5102383 38, pt. Metoda diagnostyki stanu stalowych (paramagnetycznych i ferromagnetycznych) elementów maszyn elektrycznych na przykładzie bandaży i kap wirników generatorów
- [2]. ŻUREK Z. H., BARON D.: P.402532 z dn. 24.01.2013, Sposób wykrywania degradacji zmęczeniowych w wysoko-stabilnych stalach paramagnetycznych chromowo manganowych metodą indukcyjną
- [3]. ŻUREK Z. H.: P.402531 z dn. 24.01.2013, Sposób i układ wzorcowania przetworników indukcyjnych do wykrywania degradacji zmęczeniowych stali ferro i paramagnetycznych
- [4]. ŻUREK Z. H., BARON D.: Spektroskopia impedancji – metoda oceny stanu technicznego kołpaków wirników generatorów, XVIII Konferencja Energetyki – Gnień 2013
- [5]. ŻUREK Z. H., BARON D.: Niestabilność eksploatacyjna parametrów magnetycznych i elektrycznych blach rdzenia stojana generatora TWW-200-2A, Przegląd Elektrotechniczny (wysłany do druku)
- [6]. ŻUREK Z. H., BARON D.: Badanie stabilności eksploatacyjnej parametrów magnetycznych i elektrycznych blach rdzenia stojana generatora typu TWW-200-2A, XVIII Konferencja Energetyki – Gnień 2013
- [7]. ŻUREK Z. H., BARON D.: Spektroskopia impedancji – uniwersalny parametr diagnostyki elementów maszyn i urządzeń, XLIX Sympozjum SME - Gdynia/Gdańsk 2013
- [8]. ŻUREK Z. H., BARON D.: Pomiar zmian wartości przenikalności magnetycznej i przewodności elektrycznej właściwej kołpaków generatorów, XLVIII Sympozjum SME - Książ 2012
- [9]. ŻUREK Z. H., KUKLA D., BARON D.: Materiałowe warunki brzegowe blach elektrotechnicznych krzemowych, XLVIII Sympozjum SME - Książ 2012
- [10]. ŻUREK Z. H., BARON D.: Pomiar zmian wartości przenikalności magnetycznej i przewodności elektrycznej właściwej kołpaków generatorów”, XXI Seminarium Naukowo-Techniczne KOMEL PEMINE - Ryto 2012
- [11]. ŻUREK Z. H., KURZYDŁOWSKI K. J., KUKLA D., BARON D.: Material Edge Conditions of Electromagnetic Silicon Steel Sheets, Przegląd Elektrotechniczny nr 2b/2013, str.112-115
- [12]. HEPTNER H., STROPPE H.: Magnetyczne i indukcyjne badania metali (w oryginalu: Magnetische und magnetinduktive Werkstoffprüfung), Wydawnictwo „Śląsk” 1972

## Autorzy

mgr inż. Dariusz Baron, TurboCare Poland S.A., E-mail: [dariusz.baron@turbocare.pl](mailto:dariusz.baron@turbocare.pl)  
dr hab. inż. Zbigniew Hilary Żurek, prof. nzw. Politechniki Śląskiej, Wydział Transportu, E-mail: [zbigniew.zurek@polsl.pl](mailto:zbigniew.zurek@polsl.pl)