

## Spektroskopia impedancji i rezonans w badaniach stanu technicznego kołpaków wirników turbogeneratorów

**Streszczenie.** W artykule zaproponowano nową metodę nieniszczącego badania paramagnetycznej stali kołpaków wirników turbogeneratorów, umożliwiającą ustalanie stopnia eksploatacyjnej degradacji zmęczeniowej ich struktury materiałowej, dokonywanie oceny ich stanu technicznego oraz prognozowanie czasu ich dalszej eksploatacji. Proponowaną metodą badawczą jest metoda **spektroskopii impedancji i rezonansu** sondy pomiarowej, tj. metoda diagnostyki nieciągłości strukturalnych oparta na badaniu eksploatacyjnej zmienności parametrów fizycznych materiału (elektrycznych i magnetycznych) mającej swoje odniesienie w poziomie degradacji struktury materiałowej powodowanej eksploatacyjnymi procesami zmęczeniowymi (przede wszystkim mechanicznymi i cieplnymi). Metoda spektroskopii impedancji ma możliwość wskazania z wyprzedzeniem miejsc potencjalnie zagrożonych awarią już na etapie pojawienia się zmian w strukturze materiałowej, które poprzedzają powstawanie pęknięć. Proponowana metoda jest prosta, tania i uniwersalna, nadaje się do badań wszystkich gatunków stali, paramagnetycznych i ferromagnetycznych. Posiada wszelkie zalety, by mogła być powszechnie stosowana w praktyce. W artykule zaprezentowano wyniki przeprowadzonych badań materiału kołpaków wycofanych z eksploatacji i fabrycznie nowego oraz próbek materiałowych poddanych procesowi zmęczeniowemu, potwierdzające możliwość wykrywania procesów degradacyjnych na poziomie struktury materiałowej poprzez badanie eksploatacyjnej zmienności parametrów elektrycznych i magnetycznych materiału. Zaproponowano nisko-kosztowe rozwiązania praktyczne w postaci urządzeń pomiarowych. W artykule przybliżono również temat kołpaków i ich strategiczną rolę w bezpieczeństwie eksploatacji turbogeneratorów. Przybliżono problematykę diagnostyki i eksploatacji kołpaków wraz z zagrożeniami z nimi związanymi.

**Abstract.** The paper presents a new method of NDT testing of turbogenerator rotor retaining rings (paramagnetic steel), enabling to evaluate their material structure operational fatigue wear degree, to evaluate their technical condition and to predict their further safe operation time. The proposed method is induction coil **impedance spectroscopy and resonance** method. The method belongs to diagnostics of structural discontinuities and it is based on testing/analysis of operational changeability of material physical parameters (i.e. electric and magnetic), which has its correlation to the level of material structure degradation (caused by operational fatigue processes, mainly mechanical and thermal). Using the impedance spectroscopy method it is possible to indicate in advance the places of material potentially danger to the operational safety. It enables early detection of defect, i.e. on the stage of creation of changes in the material structure preceding material cracking formation. The proposed method is simple, inexpensive and universal, it is suitable to test all grades of steel, both paramagnetic and ferromagnetic. It has all advantages to be generally used in practice. The paper presents the test results for retaining rings materials withdrawn from operation and brand-new and also for test samples put to fatigue process, which confirm the usability of degradation process detection on the level of material structure, by testing operational variability of its electric and magnetic parameters. There are proposed some inexpensive practical solutions. The article presents also the subject of retaining rings and their strategic role in the turbogenerator operational safety. It presents the main issues connected with their diagnostics and operation together with some basic risks. (**Impedance spectroscopy and resonance in testing of turbogenerator rotor retaining rings technical condition**)

**Słowa kluczowe:** kołpak wirnika turbogenerators, spektroskopia impedancji, rezonans, eksploatacyjna zmiana parametrów fizycznych

**Keywords:** turbogenerator rotor retaining ring, impedance spectroscopy, resonance, operational change of material physical parameters

### Wprowadzenie

W przemyśle w ostatnich latach obserwuje się potrzebę rozwoju diagnostyki procesów zmęczeniowych, której ogromną zaletą jest możliwość oceny stopnia degradacji zmęczeniowej struktury badanego materiału od stanu początkowego i prognozowania jego dalszej eksploatacji. Dotyczy to przede wszystkim materiałów poddawanych skrajnie dużym eksploatacyjnym obciążeniom mechanicznym i cieplnym. W branży energetycznej, do grupy materiałów, w których występują bardzo wysokie naprężenia eksploatacyjne, należy stal kołpaków wirników turbogeneratorów. W tych strategicznych dla bezpieczeństwa eksploatacji turbogenerators elementach w czasie pracy naprężenia mechaniczne mogą sięgać wartości rzędu 600 MPa, a w czasie prób – nawet wyższych, zależnie od wielkości mocy znamionowej i konstrukcji turbogenerators.

Jeśli chodzi o badania kołpaków wirników turbogenerators, wyraźnie zauważalny jest brak skutecznej metody nieniszczącej, umożliwiającej ocenę stanu technicznego materiału na poziomie stopnia degradacji jego struktury. Taką możliwość zapewniają metody rentgenowskie, neutronowe i ultradźwiękowe (pomiar tłumienia fali ultradźwiękowej w materiale), jednak nie znalazły one powszechnego zastosowania w praktyce eksploatacyjno-diagnostycznej. Badania kołpaków prowadzone są według ogólnie przyjętych zasad oraz wymagań i instrukcji producentów turbogenerators [1, 11, 12]. Aktualnie ocena stanu technicznego kołpaków jest prowadzona na podstawie wyników badań uszkodzeń

geometrycznych (takich jak pęknięcia, pustki, nieciągłości i inne wady materiałowe), gdy już doszło do ich powstania. Decyzje dotyczące dalszej eksploatacji kołpaków są podejmowane w oparciu o stwierdzone nieciągłości geometryczne, przy braku informacji o stopniu degradacji zmęczeniowej ich struktury materiałowej. W rezultacie prognozowanie dalszej eksploatacji materiału jest utrudnione i obciążone ryzykiem eksploatacyjnym.

W zakresie badań kołpaków pomocne byłoby wprowadzenie badań nieniszczących wykrywających zmiany na poziomie ich struktury materiałowej, mające swoje odniesienie w zmianach parametrów fizycznych poprzedzających powstawanie nieciągłości geometrycznych. Proponowaną metodą badawczą jest metoda spektroskopii impedancji [3, 16, 20, 22] dająca pośredni obraz stanu struktury materiałowej kołpaka, tj. stopnia jej degradacji zmęczeniowej w zmianach parametrów elektrycznych i magnetycznych. Ma ona możliwość wskazania z wyprzedzeniem miejsc potencjalnie zagrożonych awarią już na etapie pojawienia się zmian w strukturze materiałowej, poprzedzających powstanie pęknięć. Proponowana metoda może być cennym uzupełnieniem powszechnie stosowanych metod diagnostycznych.

W literaturze naukowej można znaleźć wiele publikacji na temat badań różnych stali austenitycznych (np. AISI 304, 316, 321), jednak brak jest informacji na temat badań degradacji zmęczeniowej struktury stali G18H18 stosowanej na kołpaki wirników turbogenerators i metod badawczych. W literaturze naukowej można również

znaleźć wiele publikacji dotyczących spektroskopii impedancji, jednak dotyczą one w głównej mierze medycyny, chemii, biologii.

W części dalszej przedstawiono tematykę związaną z kołpakami oraz zaprezentowano metodę spektroskopii impedancji wraz z wynikami przeprowadzonych badań.

### Kołpaki wirników turbogeneratorów – informacje podstawowe

Kołpaki (rys. 1, 2) są istotnymi elementami wirników turbogeneratorów, łączącymi w sobie szczególne cechy wytrzymałościowe, magnetyczne, elektryczne i odpornościowe (na korozję naprężeniową, temperaturę, zmęczenie). Z punktu widzenia konstrukcyjnego mają budowę pierścienia i są nakładane na obydwie końce beczki wirnika turbogeneratora. Służą do zabezpieczania połączeń czołowych uzwojeń wirników przed skutkami oddziaływania sił odśrodkowych i elektrodynamicznych w czasie eksploatacji.



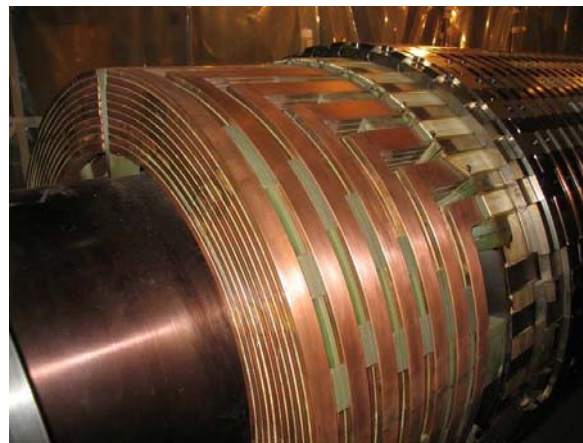
Rys.1. Widok turbogeneratora o mocy 210MW w czasie demontażu wirnika ze stojana, z widocznym kołpakiem



Rys.2. Widok kołpaków zdemontowanych z wirników, na stanowisku do badań nieniszczących

Kołpaki wirników są najbardziej mechanicznie wyczerpanymi elementami turbogeneratorów, narażonymi na rozerwanie. W czasie pracy muszą zrównoważyć siły odśrodkowe od ich masy własnej oraz masy połączeń czołowych uzwojenia wzbudzenia wraz z elementami usztywniającymi i izolacyjnymi (rys.3). Ponadto w kołpakach występują naprężenia wywołane połączeniami odkształceniowymi, tj. skurczowym osadzeniem ich na beczce wirnika i pierścieniu centrującym (lub oporowym), działające również w stanie postoju wirnika. W zależności od konstrukcji osadzenia kołpaka na wirniku, 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 wirnika.



Rys.3. Widok połączeń czołowych uzwojenia wirnika i elementów usztywniających, zabezpieczanych kołpakiem

Ekstremalnie wysokie naprężenia w kołpaku w połączeniu z takimi czynnikami jak np. śladową zawartością wilgoci w turbogeneratorze, czy też obecnością związków agresywnych (np. jonów chlorkowych i fosforanowych) były bezpośrednią przyczyną najpoważniejszych awarii turbogeneratorów (z nagłym rozerwaniem kołpaka) i w rezultacie zniszczenia całego turbogeneratora. Awarii bloków energetycznych w elektrowniach spowodowanych rozerwaniem kołpaka więcej odnotowano w energetyce amerykańskiej z uwagi na wyższą prędkość obrotową wirników turbogeneratorowych (3600 obr/min, 60 Hz) w stosunku do turbogeneratorów pracujących np. w Europie (3000 obr/min, 50 Hz).

Ogólnostatystyczne statystyki podają, że kołpaki należą do głównych elementów odpowiedzialnych za najpoważniejsze eksploatacyjne awarie bloków energetycznych. Średnio statystycznie, w okresie od lat 40-tych do lat 90-tych ubiegłego wieku, rocznie na świecie dochodziło do jednej takiej awarii. Obecnie liczba awarii spowodowanych uszkodzeniem kołpaka nieco spadła dzięki zastosowaniu na kołpaki nowego gatunku stali G18H18, o zwiększonej odporności na korozję naprężeniową.

Kołpaki wirników są elementami strategicznymi z punktu widzenia bezpieczeństwa eksploatacji nie tylko turbogeneratora, ale również bloków energetycznych w elektrowni, dlatego tak ogromne znaczenie ma odpowiednio prowadzona diagnostyka ich stanu technicznego.

### Diagnostyka kołpaków

Celem zachowania niezawodności eksploatacyjnej i bezpieczeństwa pracy, kołpaki wirników turbogeneratorów należy poddawać okresowym badaniom ich stanu technicznego metodami nieniszczącymi [1, 11, 12], aby umożliwić wykrycie wszelkiego rodzaju uszkodzeń i zmian w materiale na jak najwcześniejszym etapie ich rozwoju. Prowadzone badania kołpaków mogą mieć charakter powierzchniowy lub objętościowy (tab.1).

Większość powszechnie stosowanych w praktyce metod badań służy wykrywaniu już istniejących defektów geometrycznych, tj. pęknięć, pustek, nieciągłości i innych wad materiałowych. Niewiele natomiast metod badań służy wykrywaniu zmian na poziomie struktury materiałowej. Metodą dającą dobry obraz stanu struktury materiałowej kołpaka, a tym samym stopnia jego degradacji zmęczeniowej (czyli wyeksploatowania) jest metoda spektroskopii impedancji.

Tabela 1. Powszechnie stosowane metody badań nieniszczących kołpaków wirników turbogeneratorów

Metody badań kołpaków		Rodzaj wykrywanych defektów
Podstawowe	wizualne	geometryczne, powierzchniowe
	penetracyjne	geometryczne, powierzchniowe
	ultradźwiękowe	geometryczne, objętościowe
Dodatkowe	metalograficzne (zglady)	geometryczne, powierzchniowe
	tlumienie fali ultradźwiękowej	strukturalne, objętościowe
	spektroskopia impedancji	strukturalne, objętościowe

W trakcie prowadzenia remontów i przeglądów technicznych turbogeneratorów, kołpaki są poddawane badaniom według ogólnie przyjętych zasad i wymagań producentów turbogeneratorów.

Celem badań jest możliwie najwcześniejsze wykrycie wszelkich defektów i wad materiałowych, które stanowią podstawę podjęcia decyzji co do dalszej eksploatacji, naprawy lub złomowania kołpaka. W przeciwnym wypadku, defekty kołpaka w połączeniu z wysokimi naprężeniami eksploatacyjnymi mogą stać się bezpośrednią przyczyną poważnej awarii turbogeneratorskiej.

W tabeli 2 przedstawiono w skrócie zestawienie zalecanych w kraju i za granicą okresów pomiędzy przeglądami technicznymi kołpaków w czasie eksploatacji.

Tabela 2. Wymagane okresy pomiędzy przeglądami technicznymi kołpaków w okresie eksploatacji [1, 11]

Wymagania krajowe [1] (według R.I.E.G.S. - 2009r.)	Wymagania zagraniczne [11] (według Elektrosiły - 2010r.)
Jeśli nie było wcześniej naprawy kołpaków	• turbogenerator 200 MW – co 6 lat
• stal G18H3 – co 4 lata	• turbogenerator 500 MW – co 6 lat
• stal G18H18 – co 6-8 lat jednak nie rzadziej jak po 30-40 tys. godz. pracy	• turbogenerator 1000 MW – co 4,5 roku

Obecnie daje się wyraźnie zauważyć pewną nieprawidłową tendencję do wydłużania dopuszczalnych okresów pracy maszyn bez konieczności dokonywania ich przeglądów technicznych (nawet do kilkunastu lat). Naciski zleceńodawców (użytkowników) na producentów i firmy remontowe ukierunkowane na wydłużanie okresów przeglądowych mogą stanowić poważne zagrożenie dla bezpieczeństwa eksploatacji turbogeneratorów. Podejście takie, rzekomo ekonomiczne (koszty postojów i przeglądów), znacznie zwiększa ryzyko wystąpienia poważnej awarii. W takich warunkach badania stanu technicznego kołpaków nabierają nowej, wyższej rangi i znaczenia dla bezpieczeństwa pracy bloków energetycznych, a tym samym bezpieczeństwa całej branży energetycznej.

### Wymagania materiałowe – wybrane parametry elektryczne i magnetyczne

Kołpak wirnika jako element turbogeneratorskiej maszyny o najwyższym znaczeniu z punktu widzenia bezpieczeństwa eksploatacji, musi spełniać bardzo ostre wymagania materiałowe. Z uwagi na szczególny charakter i środowisko pracy, stali kołpaka stawiane są specjalne wymagania materiałowe, wytrzymałościowe, antykorozyjne i magnetyczne. Od stali kołpaka wymagane są m.in. wysoka granica plastyczności, odpowiednia rozszerzalność cieplna, wysoka odporność na korozję, wysoka odporność zmęczeniowa, odpowiednie właściwości formowania oraz niemagnesowalność.

Od ponad dwudziestu lat kołpaki wykonywane są z paramagnetycznej stali austenitycznej chromowomanganowej w gatunku G18H18 (18%Mn, 18%Cr). Ten nowy, specjalistyczny gatunek stali austenitycznej, o zwiększonych (w stosunku do stali stosowanej wcześniej) zawartościach chromu (ok. 18%) i azotu (min. 0,5%), został opracowany na początku lat 80-tych specjalnie na kołpaki wirników turbogeneratorów. Uzyskano w nim znacznie zwiększoną odporność na korozję naprężeniową w stosunku do stali stosowanej wcześniej.

W przeszłości na kołpaki stosowano paramagnetyczną stal austenityczną w gatunku G18H3 (18%Mn, 3÷4%Cr), którą w latach 80-tych wycofano z produkcji z uwagi na jej podatność na korozję naprężeniową. Od wielu lat, starsze turbogeneratory pracujące z kołpakami z tego nieprodukowanego już materiału (tj. G18H3) są sukcesywnie wyposażane w kołpaki z materiału nowego typu (tj. G18H18) przy okazji prowadzenia przeglądów, remontów i modernizacji turbogeneratorów. Pomimo prowadzenia tej sukcesywnej wymiany, kołpaki ze stali G18H3 ciągle jeszcze są wykorzystywane w energetyce.

W tabeli 3 przedstawiono podstawowe parametry magnetyczne i elektryczne stali G18H18 i G18H3 (dane katalogowe materiału fabrycznie nowego, tzn. niezdegradowanego zmęczeniowo).

Tabela 3. Parametry magnetyczne i elektryczne stali G18H18 i G18H3 w temp. 20°C – katalog producenta [10]

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

W praktyce obowiązuje również wymóg eksploatacyjny  $\mu_r \leq 1,05$ . Jak wynika z tabeli 3, wartości przewodności elektrycznej właściwej (rezystywności) stali zależą od jej własności mechanicznych oraz zastosowanej obróbki cieplnej.

### Stabilność parametrów fizycznych stali kołpaków

Paramagnetyczna stal austenityczna chromowomanganowa G18H18 stosowana na kołpaki charakteryzuje się bardzo wysoką stabilnością parametrów elektrycznych i magnetycznych, niezbędną z uwagi na pracę w silnym zmiennym polu magnetycznym.

O parametrach magnetycznych stali decydują m.in. jej skład chemiczny, struktura, temperatura i zastosowana obróbka cieplna. Od składu chemicznego przede wszystkim zależy, czy stal jest austenityczna, austenityczno-ferrytyczna, czy też austenityczno-martenzytyczna. Od zawartości tych mikrostruktur w dużym stopniu zależy stabilność austenitu.

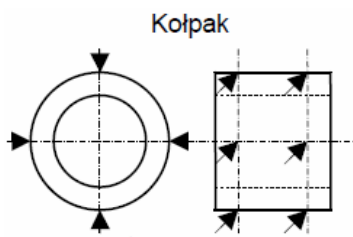
Wyniki analiz zawartości poszczególnych mikrostruktur w stali G18H18 przeprowadzonych przy pomocy historycznych wykresów Schaeffler'a, De Long'a i WRC-1992, jak również parametrów określanych równowagą martenzytu MNA i magnetyzacją nasycenia ferrytu potwierdzają, że stal G18H18 jest stalą stabilną austenitycznie. Stal ta posiada strukturę austenityczną z możliwą niewielką zawartością ferrytu, która stanowi główną przyczynę występowania jej nieznacznej podatności magnetycznej. Pomimo swojej wysokiej stabilności austenitycznej, wykazuje pewną drobną niestabilność, którą zdecydowano się wykorzystać w celach diagnostyki

degradacji jej struktury materiałowej zachodzącej w wyniku eksploatacyjnych procesów zmęczeniowych.

Proponowana metoda spektroskopii impedancji związana jest z wykorzystaniem zjawisk powiązanych ze stabilnością parametrów fizycznych stali w diagnostyce zmęczenia struktur materiałowych. W zasadzie badana jest ich niestabilność, czasem nieznaczna, wynikająca z pojawienia się fazy ferrytycznej lub martenzytycznej wskutek eksploatacyjnego zmęczenia materiału (powodowanego np. temperaturą, odkształceniami plastycznymi lub sprężystymi).

#### Wpływ zmian struktury materiału na parametry fizyczne

W celu wstępnego określenia wpływu eksploatacyjnego procesu zmęczeniowego (skutkującego zmianami w strukturze materiałowej) na parametry fizyczne, przeprowadzono nieniszczące badania tłumienia fali ultradźwiękowej [4] w materiale ośmiu dostępnych kołpaków wycofanych z eksploatacji, wykonanych ze stali G18H18 i G18H3 oraz kołpaka fabrycznie nowego ze stali G18H18. Kołpaki wycofane z eksploatacji pochodziły z czterech różnych turbogeneratorów o mocach w zakresie od 50 do 250MW. Dwa kołpaki były wykonane ze stali G18H18, natomiast pozostałych sześć - z produkowanego w przeszłości materiału G18H3. Pomiary tłumienia wykonano w 8 punktach pomiarowych zlokalizowanych zgodnie z rysunkiem 4.



Rys.4. Rozmieszczenie punktów pomiarowych na kołpaku

Przyjęte w praktyce wartości charakterystyczne tłumienia materiału kołpaka [4-8]:

- < 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 4 zamieszczono wartości średnie wyników pomiarów współczynnika tłumienia dla poszczególnych kołpaków wycofanych z eksploatacji oraz dla materiału nowego.

Tabela 4. 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

Wyniki pomiarów potwierdziły znacznie wyższą wartość tłumienia fali ultradźwiękowej w materiale kołpaków wycofanych z eksploatacji w stosunku do materiału nowego, czyli zajście zmian zmęczeniowych w ich strukturze materiałowej w wyniku procesu eksploatacyjnego. Wyniki odzwierciedlają stan wyeksploatowania.

Dalsze badania potwierdziły, że parametrami fizycznymi czułymi na procesy zmęczeniowe są również parametry elektryczne i magnetyczne materiału.

#### Badania zmian parametrów fizycznych materiału

W wyniku złożonych eksploatacyjnych procesów obciążeń zmęczeniowych, przede wszystkim mechanicznych, cieplnych i erozyjnych, w stalach zarówno ferromagnetycznych jak i paramagnetycznych zachodzą zmiany degradacyjne na poziomie ich struktury materiałowej. W rezultacie zmianom ulegają parametry fizyczne stali, m.in. elektryczne i magnetyczne. Intensywność tych zmian jest zależna od wielu czynników, m.in. od składu chemicznego stali, procesów produkcji, obróbek mechanicznych i cieplnych, struktury materiałowej, itp. Zmiany zachodzące w wielu gatunkach stali można wykorzystać do oceny stopnia ich degradacji zmęczeniowej i prognozowania czasu niezawodnej eksploatacji.



Rys.5. Przykładowe przebiegi zmian wartości parametrów fizycznych powodowanych eksploatacyjnym zużyciem się materiału

W typowych przebiegach eksploatacyjnych zmian parametrów fizycznych większości gatunków stali można wyodrębnić trzy charakterystyczne etapy. Na rysunku 5 zaznaczono charakterystyczne w mechanice zmęczeniowej zjawisko umacniania lub osłabiania materiału w początkowym okresie eksploatacji, następnie fazę stabilizacji jego parametrów fizycznych (eksploatacja właściwa) i odwrócenie kierunku zmian w eksploatacji zaawansowanej. W końcowym etapie eksploatacji, w wyniku procesów degradacji materiału można zauważyć gwałtowną zmianę poziomu jego parametrów fizycznych, która poprzedza powstanie nieciągłości geometrycznych (tj. pęknięć). Zmiana ta może świadczyć o wyeksploatowaniu materiału i być sygnałem poprzedzającym uszkodzenie, a nawet całkowite zniszczenie elementu lub maszyny.

Z uwagi na nieliniowość przebiegów zmian parametrów fizycznych i możliwość osiągania przez parametry tego samego poziomu wartości w różnych, czasowo odległych okresach eksploatacji, ocena stanu wyeksploatowania większości stali oparta na badaniu zmian tylko jednego parametru fizycznego, przy nieznanej historii obciążeń zmęczeniowych i braku wzorca zmian danego parametru, nie jest wiarygodna i może prowadzić do błędnych wniosków. W badaniach postępu degradacji zmęczeniowej stali metodą jednoparametryczną, wyrwykowy pomiar zmian parametru nie wystarcza. Diagnostyka stanu technicznego stali oparta na kontroli tylko jednego parametru wymagałaby ciągłego monitorowania jego zmian w czasie lub w funkcji historii obciążeń. W związku z powyższym, diagnostyka postępu degradacji zmęczeniowej materiału wymaga prowadzenia badań zmian dwóch lub więcej parametrów.

Prezentowana metoda spektroskopii impedancji wykrywa zmiany dwóch parametrów fizycznych materiału,

mianowicie przewodności elektrycznej właściwej i przenikalności magnetycznej względnej. Celem poznania zakresu zmian tych parametrów (powodowanych procesami zmęczeniowymi) w stali kołpaków, przeprowadzono szereg badań i pomiarów, których wyniki zaprezentowano w części dalszej.

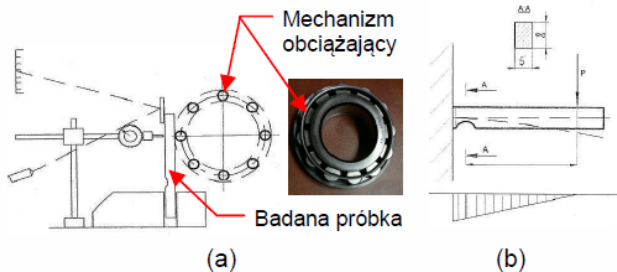
### Metodyka badań zmęczeniowych

W celu zbadania zakresu zmienności parametrów fizycznych stali G18H18 w zależności od stopnia zaawansowania procesu zmęczeniowego, przeprowadzono badania [25] z wykorzystaniem wysoko cyklicznych obciążeń zmęczeniowych (z cyklem odzerowo tętniącym). Do badań przygotowano próbki płaskie G18H18 o wymiarach 5mm x 10mm x 100mm, cięte elektroerozyjnie, z przewężeniem zmęczeniowym w części środkowej (rys. 6). Próbki pobrano z materiału odkuwki kołpaka fabrycznie nowego (kierunek pobierania próbek był zgodny z kierunkiem głównych naprężeń mechanicznych w kołpaku).



Rys.6. Próbki płaskie do badań zmęczeniowych

Próbki poddane zostały działaniu mechanicznych wysoko cyklicznych obciążeń zmęczeniowych w urządzeniu obciążającym, którego zasadę działania przedstawiono na rysunku 7 (cykl odzerowo tętniący). Na rysunku 8 przedstawiono rozkład naprężeń w części przewężenia zmęczeniowego próbki, tj. w strefie maksymalnych obciążeń próbki

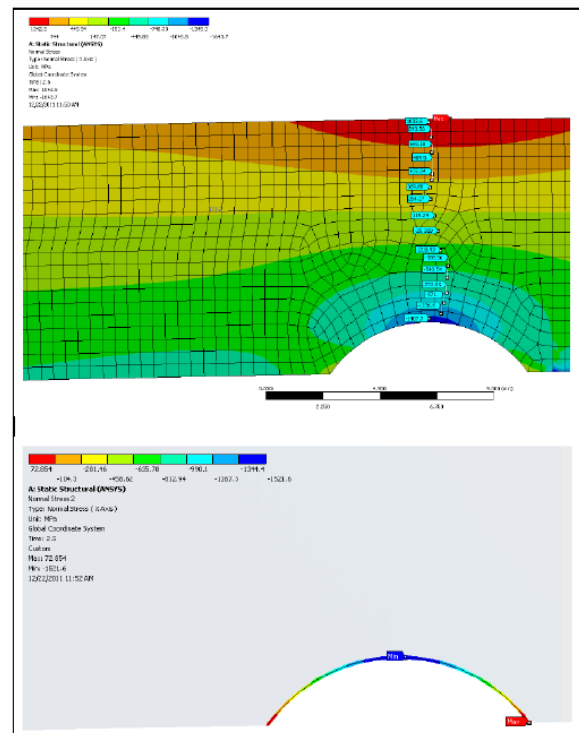


Rys.7. Zasada działania mechanizmu do obciążeń zmęczeniowych (a) i wykres momentu gnącego (b)

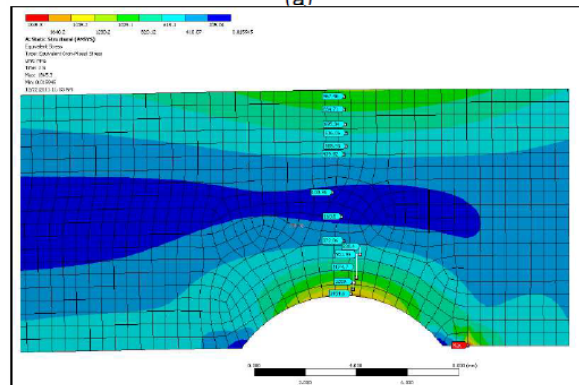
Zależność naprężeń od ugięcia próbki (rys. 8.c) umożliwiła prowadzenie badań przy różnych zadawanych obciążeniach. W badaniach zmęczeniowych próbki obciążano momentem gnącym wywołującym naprężenia na poziomie maksymalnych naprężeń eksploatacyjnych dla stali G18H18 (strzałka ugięcia 0,7 mm). Po osiągnięciu założonych ilości cykli obciążeń zmęczeniowych, próbki poddawane były pomiarom zmian ich wybranych parametrów fizycznych.

### Pomiar zmian parametrów elektrycznych

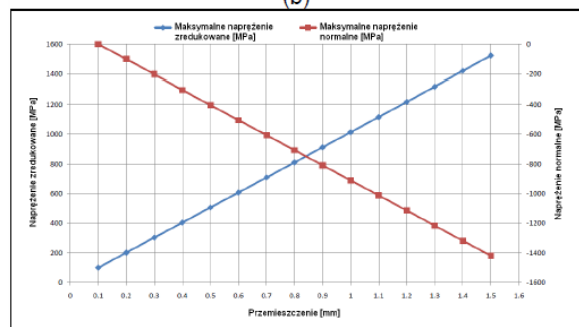
W celu wstępnego wyznaczenia zakresów zmian parametrów elektrycznych stali G18H18 powodowanych procesami zmęczeniowymi, po seriach wysoko cyklicznych mechanicznych obciążeń zmęczeniowych, próbki poddawano laboratoryjnym badaniom zmian ich parametrów elektrycznych [3, 20].



(a)



(b)

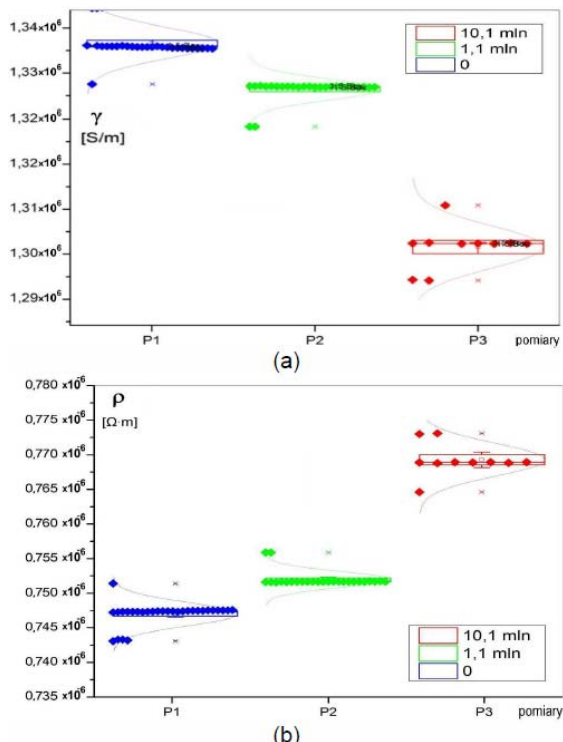


(c)

Rys.8. Symulacja rozkładu naprężeń w przewężeniu próbki poddanej cyklem zmęczeniowym (a) naprężenia normalne dla strzałki ugięcia  $f=1,5\text{mm}$  (b) naprężenia zredukowane dla strzałki ugięcia  $f=1,5\text{mm}$  (c) naprężenia normalne i zredukowane

Na rysunku 9 przedstawiono wyniki pomiarów przewodności elektrycznej właściwej  $\gamma$  i rezystywności  $\rho$  próbek materiału G18H18 nowego (tj. przed rozpoczęciem obciążeń zmęczeniowych) oraz po seriach 1.100.000 i 10.100.000 cykli. Wyniki pomiarów próbek wykazały kilkuprocentową (2,5% po 10,1mln cykli) zmianę wartości ich parametrów elektrycznych po seriach obciążeń zmęczeniowych. W badanym zakresie cykli obciążeń wzrost liczby cykli przełożył się na spadek przewodności

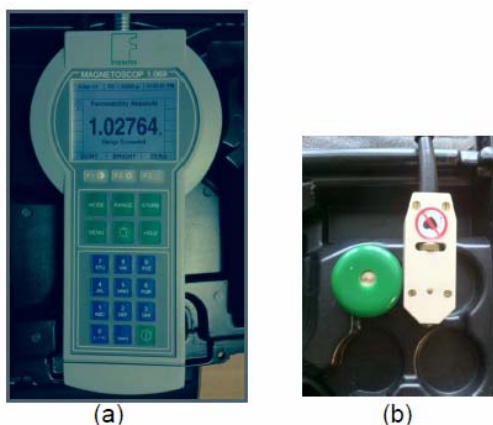
elektrycznej właściwej (tj. wzrost rezystywności). Zmierzone zmiany są istotne dla oceny stanu technicznego badanej stali kołpaków i odzwierciedlają poziom jej degradacji zmęczeniowej



Rys.9. Zakresy ekwiwalentnych zmian przewodności elektrycznej właściwej (a) i rezystywności (b) próbek materiału G18H18 w trzech stanach obciążenia zmęczeniowego

### Pomiar zmian parametrów magnetycznych

W celu wstępnego określenia zakresu zmian parametrów magnetycznych stali G18H18 powodowanych eksploatacyjnymi procesami zmęczeniowymi przeprowadzono poligonowe (na obiektach rzeczywistych) pomiary zmian wartości wybranych parametrów magnetycznych [3, 20] w materiale ośmiu kołpaków wycofanych z eksploatacji (wcześniej poddanych pomiarom tłumienia fali ultradźwiękowej) i porównano je z parametrami zmierzonymi w materiale fabrycznie nowym G18H18. Pomiary przeprowadzono magnetoskopem Förster'a 1.069 (rys. 10) w tych samych punktach pomiarowych, w których mierzono współczynniki tłumienia fali ultradźwiękowej (wg rys. 4). Zastosowany magnetoskop umożliwia prowadzenie specjalistycznych pomiarów przenikalności magnetycznej względnej z bardzo wysoką rozdzielczością (do 0,00001).



Rys.10. Magnetoskop Förster'a 1.069 (a) z sondą pomiarową (b)

W tabeli 5 przedstawiono wyniki pomiarów przenikalności magnetycznej względnej  $\mu_r$  i podatności magnetycznej  $\kappa$  stali badanych kołpaków. Czcionką pogrubioną zaznaczono wyniki pomiarów stali G18H18 wycofanej z eksploatacji i fabrycznie nowej, które można wzajemnie porównywać. Pozostałe badane kołpaki były wykonane ze stali stosowanej w przeszłości, tj. G18H3. Z uwagi na brak stali G18H3 w stanie początkowym (od lat 80-tych nie jest już produkowana), nie można odnieść się do materiału nowego.

Tabela 5. Wyniki pomiarów przenikalności magnetycznej względnej  $\mu_r$  i podatności magnetycznej  $\kappa$  stali badanych kołpaków

Nr kołpaka (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 $\kappa$ [-]	0,00275	0,00270	0,00270	0,00270	0,00265	0,00275	0,00355	0,00375	0,00320
Wartości wymagane (dla porównania): - materiał nowy $\mu_r \leq 1,004$ (katalog producenta) - wymóg eksploatacyjny $\mu_r \leq 1,05$									

Wyniki pomiarów wykazały zmianę wartości podatności magnetycznej stali G18H18 kołpaków wycofanych z eksploatacji w stosunku do stali fabrycznie nowej o ok. 11÷17%. Eksploatacyjny proces degradacji zmęczeniowej przełożył się na wzrost przenikalności magnetycznej względnej (tj. wzrost podatności magnetycznej). Zmierzony zakres zmian jest istotny dla badań procesu wyeksploatowania materiału, odzwierciedla poziom jego zdegradowania zmęczeniowego. Wyniki powyższych pomiarów mają charakter orientacyjny, gdyż nie są znane dokładne wartości parametrów magnetycznych badanych kołpaków w ich stanie początkowym (tj. przed oddaniem ich do eksploatacji).

Wstępnie wyznaczone zakresy zmian wartości parametrów elektrycznych i magnetycznych dla stali G18H18, powodowanych degradacją zmęczeniową, potwierdzają możliwość wykorzystania metod detekcji magneto-indukcyjnych jako narzędzia diagnostycznego do oceny stopnia wyeksploatowania stali kołpaków turbo-generatorowych i prognozowania ich dalszej eksploatacji.

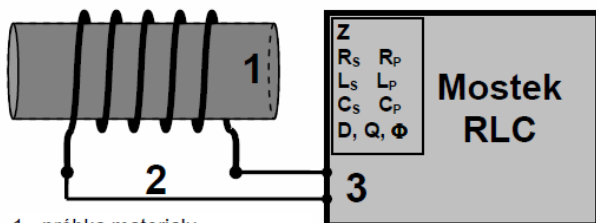
### Metoda spektroskopii impedancji - zasady ogólne

Prezentowana metodyka badawcza [3, 16, 20, 22] umożliwia dokonywanie oceny stanu technicznego (tj. stopnia wyeksploatowania) wysokostabilnej paramagnetycznej stali austenicznej chromowo-manganowej G18H18 kołpaków wirników turbo-generatorów, w cyklach przeglądów eksploatacyjnych. Metoda spektroskopii impedancji wykorzystuje zmienność parametrów fizycznych materiału powodowaną procesami zmęczeniowymi. Podstawę metody stanowi fakt, że materiał zmienia swoje parametry elektryczne i magnetyczne (tj. przewodność elektryczną właściwą i przenikalność magnetyczną względną) w procesie eksploatacyjnym. Badanie zmienności tych parametrów metodą spektroskopii impedancji cewki pomiarowej umożliwia prowadzenie oceny stopnia degradacji zmęczeniowej materiału i prognozowanie jego dalszej eksploatacji.

Metoda spektroskopii impedancji polega na analizie zmian wartości unormowanych składowych rzeczywistej i urojonej impedancji (tj.  $R/\omega L_0$  i  $\omega L/\omega L_0$ ) cewki pomiarowej na

plaszczyźnie zespolonej (zależnych od przenikalności magnetycznej skutecznej - pojęcie wprowadzone przez Förstera), wyznaczonych z pomiarów składowych impedancji (tj. rezystancji i indukcyjności) cewki pomiarowej z materiałem próbki oraz pustej (wypełnionej tylko powietrzem), w jednej lub kilku charakterystycznych dla materiału częstotliwościach. W przypadku badania materiałów paramagnetycznych ( $\mu_r \approx 1$ ) przy całkowitym wypełnieniu cewki pomiarowej materiałem próbki ( $\eta = 1$ ) można przyjąć, że wykres unormowanych składowych impedancji cewki pomiarowej pokrywa się z wykresem przenikalności magnetycznej skutecznej ( $\mu_{sk}$ ) próbki.

Na rysunku 11 przedstawiono schemat laboratoryjnego stanowiska pomiarowego oraz widok cewki pomiarowej z próbką badanego materiału stanowiącą jej rdzeń. Metoda spektroskopii impedancji cewki pomiarowej, w zależności od rodzaju zastosowanej cewki, umożliwia badanie zarówno próbek materiałowych, jak również powierzchni obiektów.



- 1 - próbka materiału
- 2 - cewka pomiarowa
- 3 - mostek RLC

(a)



(b)

Rys.11. Zasada pomiaru metodą spektroskopii impedancji (a) i cewka sondy pomiarowej wysunięta z obszaru przewężenia zmęczeniowego badanej próbki (b)

W badaniach metodą spektroskopii impedancji wykorzystujemy teoretyczne związki opracowane przez Förstera i jego następców [9, 13] dla celów defektoskopii, pomiędzy unormowanymi składowymi impedancjami a przenikalnością magnetyczną skuteczną, mianowicie:

$$(1) \quad \frac{R}{\omega L_0} = \eta \mu_r (-\text{Im} \mu_{sk})$$

$$(2) \quad \frac{\omega L}{\omega L_0} = 1 - \eta + \eta \mu_r (\text{Re} \mu_{sk})$$

gdzie:  $R/\omega L_0$ ,  $\omega L/\omega L_0$  - unormowane składowe impedancji,  $R$  - rezystancja cewki z próbką,  $L$  - indukcyjność cewki z próbką,  $L_0$  - indukcyjność cewki pustej (wypełnionej powietrzem),  $\omega$  - pulsacja,  $\mu_{sk}$  - przenikalność magnetyczna skuteczna,  $\mu_r$  - przenikalność magnetyczna względna,  $\eta$  - współczynnik wypełnienia cewki pomiarowej.

W rozważaniach teoretycznych zakładana jest cewka o pomijalnej rezystancji uzwojenia ( $R_0=0$ ). Przenikalność magnetyczna skuteczna określona jest zależnością:

$$(3) \quad \mu_{sk} = \frac{2 J_1(kr_0)}{kr_0 J_0(kr_0)}$$

gdzie:  $J_1(kr_0)$  - funkcja Bessela pierwszego rodzaju rzędu 1,  $J_0(kr_0)$  - funkcja Bessela pierwszego rodzaju rzędu 0,  $r_0$  - promień próbki,  $k$  - parametr, liczba urojona określona zależnością:

$$(4) \quad k^2 = -i\omega\gamma\mu_r\mu_0$$

gdzie:  $\gamma$  - przewodność elektryczna właściwa,  $\mu_0$  - przenikalność magnetyczna bezwzględna próżni

O poziomie wartości unormowanych składowych impedancji decyduje współczynnik wypełnienia cewki pomiarowej  $\eta$  materiałem próbki (określający, jaka część powierzchni przekroju poprzecznego cewki jest zajęta przez próbkę):

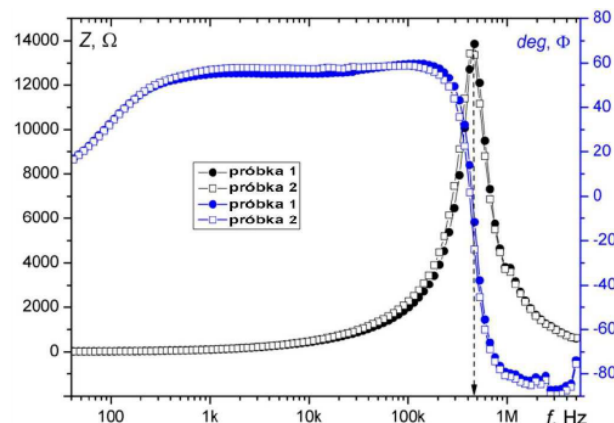
$$(5) \quad \eta = \left( \frac{D_p}{D_s} \right)^2$$

gdzie:  $D_p$  - średnica próbki,  $D_s$  - średnica cewki pomiarowej. W praktyce stopień wypełnienia cewek pomiarowych może być różny, od wartości bliskich 100 procent dla próbek laboratoryjnych dopasowanych do cewki pomiarowej, do kilkunastu procent w przypadku sond stykowych, zbliżeniowych (np. cewek płaskich).

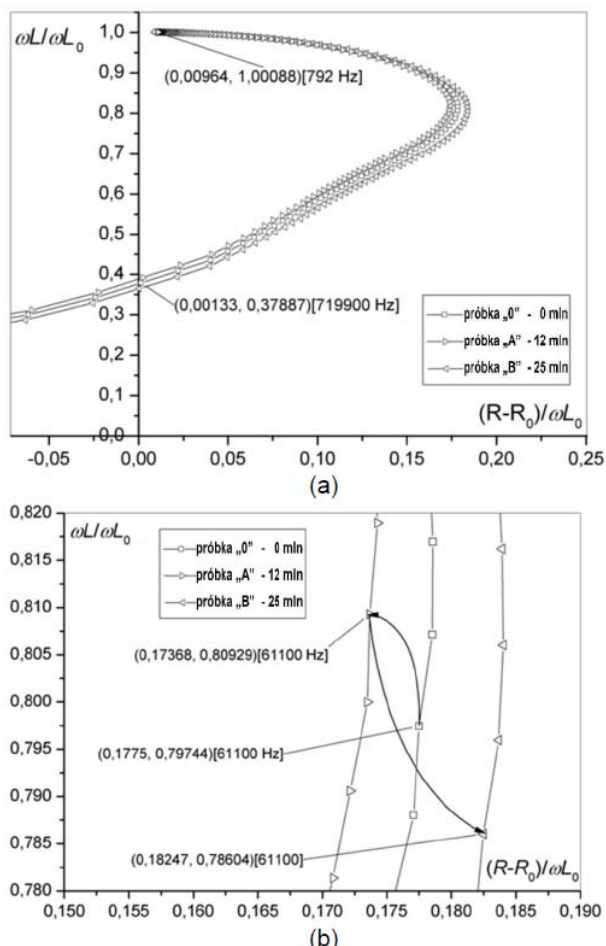
### Pomiary względnych zmian parametrów próbek

Wstępne pomiary zmian parametrów cewki pomiarowej z próbkami stali G18H18 (rys. 11.b) przeprowadzono profesjonalnym mostkiem pomiarowym RLC w pełnym dostępnym zakresie częstotliwości pomiarowej, tj. od 42 Hz do 5 MHz. Zastosowanie mostka RLC o szerokim zakresie pomiarowym wynika m.in. z wymiarów gabarytowych badanych próbek, wartości ich parametrów  $\mu_r$  i  $\gamma$  oraz ich wysokiej eksploatacyjnej stabilności.

Na rysunku 12 przedstawiono wyniki pomiarów zmian parametrów cewki pomiarowej z próbką materiału G18H18 nowego (tj. niezdegradowanego zmęczeniowo) oraz po 12 milionach cykli obciążeń zmęczeniowych, zaprezentowane w układzie zmian impedancji i kąta przesunięcia fazowego w funkcji częstotliwości. Jak można zaobserwować, wyniki przedstawione w takim układzie wykazują zbieżność swoich przebiegów.



Rys.12. Wykresy zmian impedancji i kąta przesunięcia fazowego w funkcji częstotliwości, dla cewki pomiarowej z materiałem G18H18 nowym (próbka 1) i po 12 milionach cykli obciążeń zmęczeniowych (próbka 2)



Rys.13. Wykresy zmian unormowanych składowych impedancji dla cewki pomiarowej z próbką stali G18H18 nowej („0”) oraz po 12 milionach („A”) i 25 milionach („B”) cyklów obciążeń zmęczeniowych (a) - przebieg pełny w zakresie częstotliwości do 1 MHz (b) - szczególnie wykresu dla wybranej częstotliwości 61100 Hz

Na rysunku 13 przedstawiono inną metodykę prezentowania wyników, w oparciu o wyznaczone zmiany wartości na wykresach unormowanych składowych impedancji cewki pomiarowej, powstałych z odpowiednio przetworzonych wykresów zmian indukcyjności i rezystancji cewki z badanym materiałem oraz pustej (wypełnionej powietrzem) w funkcji częstotliwości. Przebiegi zmian unormowanych składowych impedancji wyznaczono dla cewki pomiarowej z próbkami materiału G18H18 nowego („0”) oraz po 12 milionach („A”) i 25 milionach („B”) cyklów obciążeń zmęczeniowych.

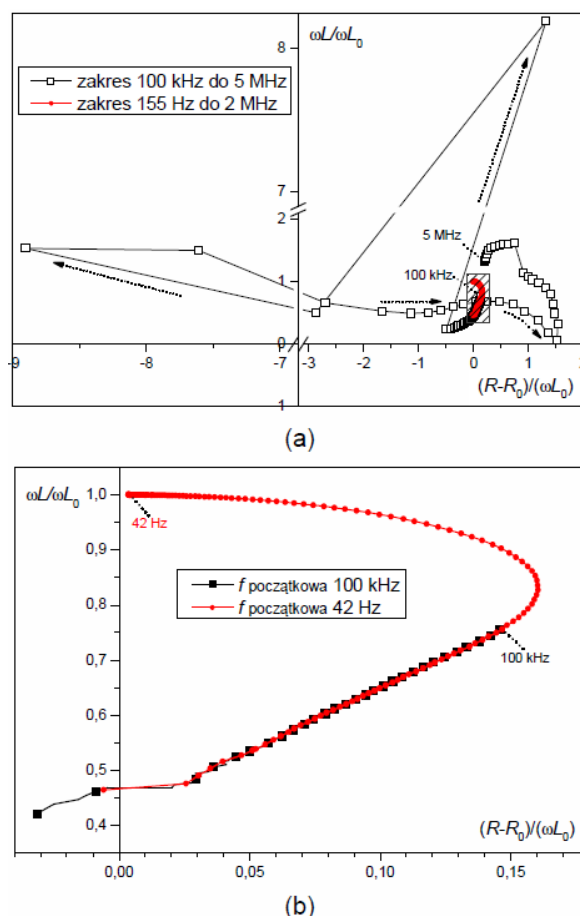
Oryginalność prezentowanej metodyki polega na śledzeniu zmian wartości unormowanych składowych rzeczywistej i urojonej impedancji (tj.  $R/\omega L_0$ ,  $\omega L/\omega L_0$ ) układu pomiarowego cewka-materiał, w jednej lub kilku charakterystycznych dla materiału częstotliwościach. Na rysunku 13 przedstawiono sposób analizy postępu procesu degradacji zmęczeniowej materiału. Zmiana lokalizacji punktów pomiarowych na wykresie unormowanych składowych impedancji w określonych częstotliwościach wynika ze zmian wartości parametrów elektrycznych i magnetycznych materiału powodowanych procesami zmęczeniowymi. Znacząc wpływ poszczególnych parametrów na zmiany wartości unormowanych składowych impedancji, z wykresów można odczytać względne zmiany przenikalności magnetycznej względnej  $\mu_r$  i przewodności elektrycznej właściwej  $\gamma$  w danych częstotliwościach, jakie zaszły w badanych materiałach w wyniku działania

obciążeń zmęczeniowych. Pomiarzy prowadzone tą metodą są powtarzalne. Na rysunku 13.b widoczna jest klasyczna w mechanice zmęczenia, charakterystyczna dla określonego materiału i sposobu obciążania, faza umacniania/osłabiania materiału w początkowym okresie eksploatacji.

Jak wykazały dalsze badania, istnieją częstotliwości pomiarowe, przy których badania wysokostabilnych elektrycznie i magnetycznie stali paramagnetycznych przynoszą lepsze rezultaty diagnostyczne niż badania w obszarze krzywej teoretycznej. W części dalszej przedstawiono wyniki pomiarów w zakresie częstotliwości wyższych (rzędu kilku MHz), wykorzystywanych w badaniach rezonansu układu pomiarowego cewka z materiałem - mostek RLC.

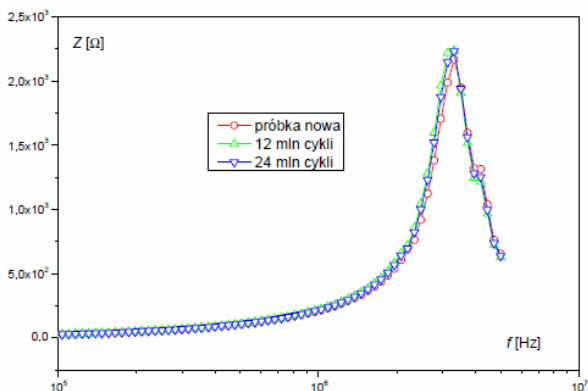
Serię kolejnych pomiarów próbek stali G18H18, charakteryzujących zmiany zmęczeniowe parametrów elektrycznych i magnetycznych, prowadzono w zakresach częstotliwości wyższych. Na rysunku 14.a przedstawiono wyniki pomiarów w zakresie częstotliwości od 100 kHz do 5 MHz. Krzywa zaznaczona kolorem czerwonym w obszarze kreskowanym obrazuje funkcję unormowanych składowych impedancji w zakresie teoretycznym. Przebieg wykresu w obszarze teoretycznym przedstawiono na rysunku 14.b. Dalszy wzrost częstotliwości zmienia kierunek fazy.

Punkty pomiarowe leżące poza zakresem krzywej teoretycznej, wyznaczone przy częstotliwościach wyższych (do 5 MHz włącznie) okazują się pomocne w badaniu materiałów paramagnetycznych, ponieważ w obrębie częstotliwości rezonansowej znacznie wzrasta czułość pomiarowa. W celu ograniczenia czasu pomiarów, częstotliwości próbkowania były dobierane automatycznie.

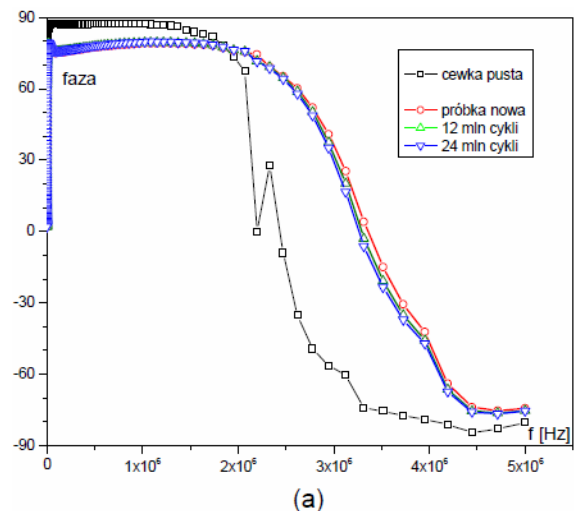


Rys.14. Przebieg unormowanych składowych impedancji cewki pomiarowej z materiałem G18H18, wyznaczony z pomiarów (a) - dla częstotliwości w zakresie od 100 kHz do 5 MHz (b) - w przedziale krzywej teoretycznej

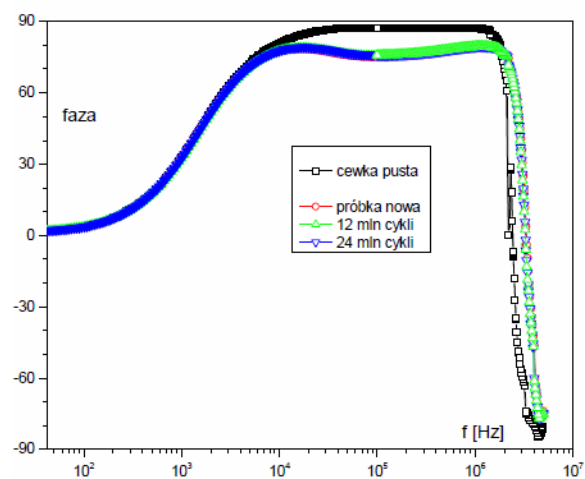




Rys.15. Przebiegi zmian impedancji układu pomiarowego cewka - badany materiał G18H18 w funkcji częstotliwości, dla próbek o różnym obciążeniu zmęczeniowym, w zakresie częstotliwości do 5 MHz



(a)



(b)

Rys.16. Wykres zmian kąta przesunięcia fazowego układu pomiarowego cewka - badany materiał G18H18 w funkcji częstotliwości, dla próbek o różnym obciążeniu zmęczeniowym, w zakresie częstotliwości do 5 MHz, (a) - w skali liniowej, (b) - w skali logarytmicznej

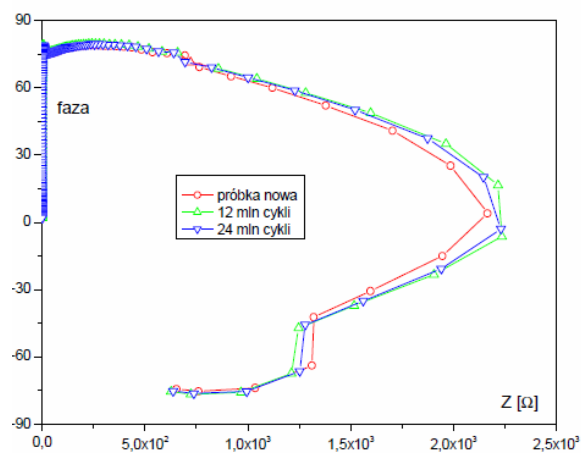
Na rysunku 15 przedstawiono przebiegi zmian impedancji układu pomiarowego cewka - badany materiał G18H18 dla trzech grup próbek (tj. nowych, po 12 milionach i 24 milionach cykli obciążenia zmęczeniowego), w zakresie częstotliwości od 100 kHz do 5 MHz.

Jak można zaobserwować, przebiegi te nakładają się wzajemnie na siebie i ich analiza jest praktycznie

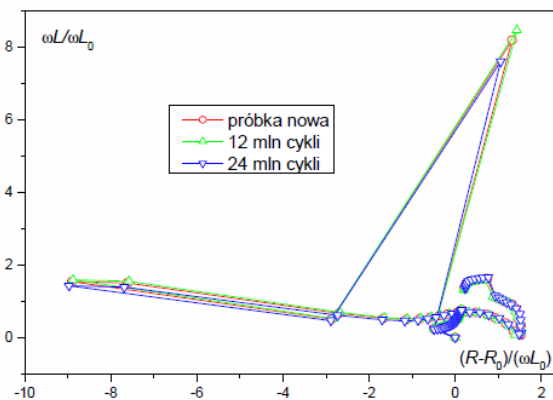
niemożliwa. Przebiegi zmian wartości mierzonych parametrów trzech grup próbek nie wykazują istotnych różnic w zakresie częstotliwości pomiarowej do ok. 1 MHz. Wyraźne zróżnicowanie obserwowane jest dopiero przed rezonansem układu pomiarowego.

Istnieje metodyka badania stali paramagnetycznych, która umożliwia wyznaczenie miejsc o istotnej rozdzielczości pomiarowej. Dobry obraz łącznych zmian parametrów cewki pomiarowej z rdzeniem dają wyniki pomiaru zmian kąta przesunięcia fazowego w funkcji częstotliwości pokazane na rysunkach 16.a i 16.b, w całym zakresie pomiarowym mostka RLC, tj. do 5 MHz. Wykresy te uwidaczniają zmiany pomiędzy obciążanymi materiałami, różni się tylko typem przyjętej skali.

Z wyników pomiarów, które posłużyły do wykreślenia przebiegów zmian impedancji i kąta przesunięcia fazowego w funkcji częstotliwości (rys. 15 i 16) uzyskano przebiegi zależności zmian kąta przesunięcia fazowego i impedancji w zakresie częstotliwości pomiarowej do 5 MHz (rys. 17).



Rys.17. Wykres zmian kąta przesunięcia fazowego i impedancji układu pomiarowego cewka - badany materiał G18H18 dla próbek o różnym obciążeniu zmęczeniowym, w zakresie częstotliwości do 5 MHz



Rys.18. Wykres zmian unormowanych składowych impedancji układu pomiarowego cewka - badany materiał G18H18 dla próbek o różnym obciążeniu zmęczeniowym, w zakresie częstotliwości od 100 kHz do 5 MHz

Na wykresie tym są już widoczne strefy o zwiększonej rozdzielczości pomiarowej. Największą rozdzielczość pomiarową uzyskano w obszarze częstotliwości rezonansowych, przy zmianie kierunku fazy.

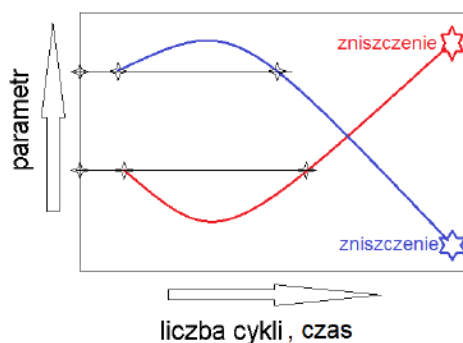
Najsukuteczniejszą formą prezentowania wyników są wykresy unormowanych składowych impedancji. Na rysunku 18 przedstawiono przebiegi unormowanych składowych impedancji dla trzech grup badanych próbek o

różnym obciążeniu zmęczeniowym, w zakresie częstotliwości od 100 kHz do 5 MHz. Przebiegi te odwzorowują zmiany parametrów materiału po kolejnych cyklach obciążeń zmęczeniowych. Jak można zaobserwować, ta forma prezentowania zmian parametrów badanych materiałów umożliwia dobór odpowiedniego zakresu pomiarowego częstotliwości, optymalnego pod względem czułości detekcji (o największej rozdzielczości pomiarowej).

Największą rozdzielczość pomiarową uzyskano w obszarze częstotliwości rezonansowych układu pomiarowego (tj. cewka - badany materiał G18H18) z mostkiem RLC.

Zmiany wartości unormowanych składowych impedancji w określonych częstotliwościach pomiarowych są wynikiem zmian wartości parametrów magnetycznych i elektrycznych materiału, tj. przenikalności magnetycznej względnej i przewodności elektrycznej właściwej, powodowanych zachodzącymi w materiale procesami degradacji zmęczeniowej. Pomiar dotyczy łącznych zmian układu pomiarowego cewka-materiał.

Analiza zmian lokalizacji unormowanych składowych impedancji punktów pomiarowych w jednej lub kilku charakterystycznych dla materiału częstotliwościach umożliwia dokonanie oceny stopnia degradacji zmęczeniowej badanego materiału. Z wykresu na rysunku 18 można odczytać względne zmiany przenikalności magnetycznej względnej i przewodności elektrycznej właściwej w określonych częstotliwościach, jakie zaszły w badanych materiałach w wyniku działania obciążeń zmęczeniowych. Przestrzenny sposób analizy postępu degradacji zmęczeniowej materiału eliminuje wady układu pomiarowego dla jednego parametru. Na rysunku 19 zilustrowano zjawisko nakładania się wartości parametrów mierzonych w początkowym i zaawansowanym (końcowym) okresie eksploatacji, mogące wynikać z klasycznej w mechanice zmęczenia, charakterystycznej dla większości stali i sposobów obciążania, fazy umacniania/osłabiania materiału.

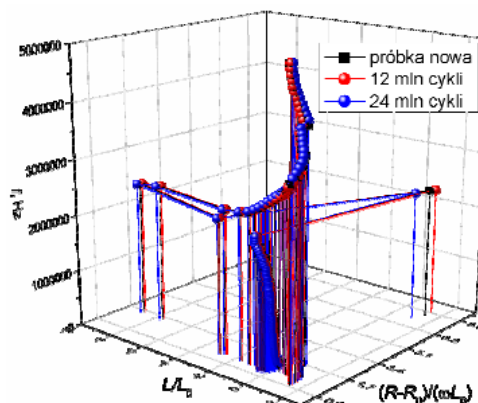


Rys. 19. Ilustracja nakładania się wartości parametrów fizycznych w różnych etapach eksploatacji

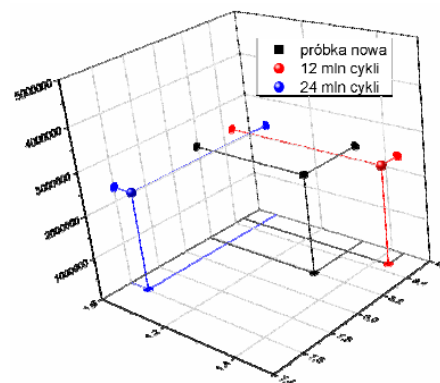
Z uwagi na występowanie zjawisk umacniania/osłabiania materiału, diagnozowanie postępu degradacji zmęczeniowej materiału w oparciu o zmianę wartości tylko jednego parametru fizycznego jest niewystarczające i może prowadzić do błędnych wniosków. Aby jednoznacznie ocenić postęp degradacji materiału, diagnostykę należy prowadzić na podstawie badań zmian dwóch lub więcej parametrów, z uwagi na możliwe różne przebiegi tych zmian z upływem czasu eksploatacji.

Opracowana metoda spektroskopii impedancji umożliwia równocześnie badanie względnych zmian wartości dwóch parametrów, tj. przenikalności magnetycznej względnej i przewodności elektrycznej właściwej w przestrzeni 3D. Metoda spektroskopii impedancji wyeliminowała trudności diagnostyczne wynikające z faktu osiągnięcia przez

badany materiał, w czasowo odległych okresach eksploatacji, tych samych poziomów wartości parametrów fizycznych, co zaprezentowano na rysunkach 20 i 21.



Rys. 20. Porównanie 3D przebiegów unormowanych składowych impedancji dla próbek o różnym obciążeniu zmęczeniowym, w zakresie częstotliwości do 5 MHz



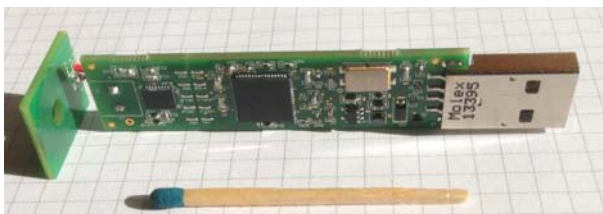
Rys. 21. Porównanie 3D unormowanych składowych impedancji punktów pomiarowych dla próbek o różnym obciążeniu zmęczeniowym, w jednej charakterystycznej częstotliwości

Pokazane na rysunku 21 rozmieszczenie punktów pomiarowych dla trzech grup próbek jest dowodem świadczącym za zasadnością przyjętej metodyki do oceny postępu degradacji zmęczeniowej materiału w czasie, bez obawy pokrywania się wartości parametrów mierzonych. Prawdopodobieństwo takiego zdarzenia jest bardzo małe. W metodach opartych na badaniach jednego parametru, prawdopodobieństwo nakładania się wartości tego parametru w różnych przedziałach czasu eksploatacji praktycznie eliminowało znaczenie tych badań. Istotnym dokonaniem w opracowanej metodzie spektroskopii impedancji jest możliwość doboru częstotliwości badawczej pod kątem czułości i rozdzielczości pomiarowej.

### Wyniki badań poligonowych

Do badań poligonowych (na obiektach rzeczywistych) procesu eksploatacyjnej degradacji zmęczeniowej stali zbudowany został prototypowy tester (sonda detekcyjna) opracowany na bazie modułu pomiarowego serii LDC1000 (Inductance to Digital Converter) firmy Texas Instruments (rys. 22). Moduł ten ma szerokie możliwości pomiarowe, jest stosowany m.in. w przemyśle, technice motoryzacyjnej [26].

Prototypowy tester pokazany na rysunku 23, o gabarytach zbliżonych do długopisu, umożliwia szybkie i sprawne prowadzenie badań eksploatacyjnej degradacji zmęczeniowej materiału.



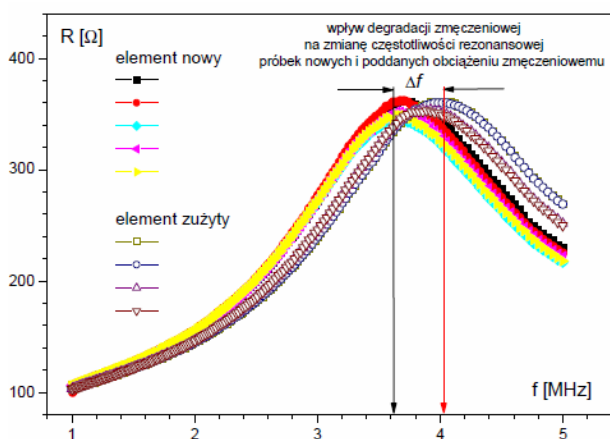
Rys.22. Moduł pomiarowy serii LDC1000 firmy Texas Instruments, ze zmodyfikowaną cewką pomiarową



Rys.23. Prototypowy tester (sonda detekcyjna) eksploatacyjnej degradacji zmęczeniowej materiału

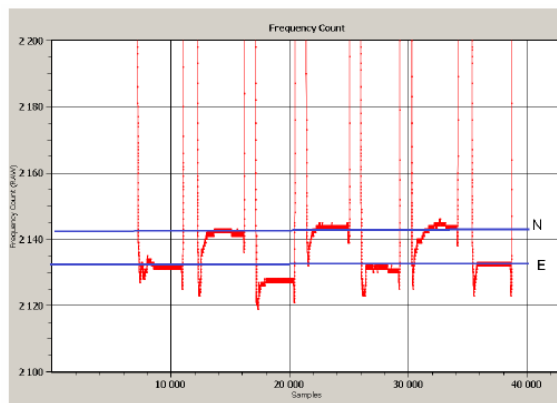
Zbudowane urządzenie (rys. 23) o możliwościach pomiarowych zbliżonych do mostka RLC zostało zastosowane do badań nieniszczących kołpaków wirników turbogeneratorów.

Wyniki pomiaru zmian impedancji cewki pomiarowej, (a pośrednio parametrów materiału powierzchni kołpaka nowego i po eksploatacji), wykonanego precyzyjnym mostkiem pomiarowym, zamieszczono na rysunku 24. Zakres częstotliwości pomiarowej wynikał z konstrukcji cewki sondy detekcyjnej. Widoczne zmiany impedancji i pasm rezonansowych są jednym z wyznaczników eksploatacyjnej degradacji zmęczeniowej materiału kołpaków, umożliwiającą prowadzenie oceny stanu ich wyeksploatowania.

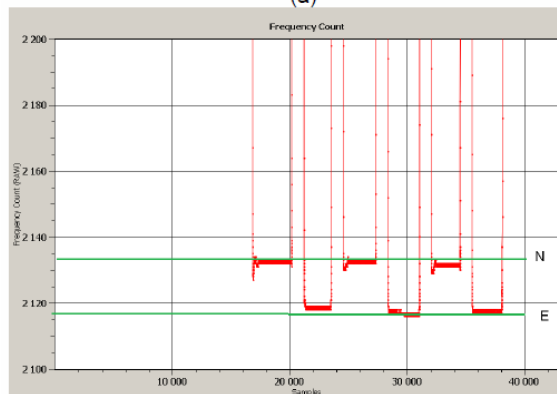


Rys.24. Przebiegi zmian impedancji cewki pomiarowej z materiałem kołpaka nowym i po eksploatacji, z zaznaczonym przemieszczeniem pasma rezonansu

Wyniki pomiaru zmian częstotliwości rezonansowej układu pomiarowego sondy detekcyjnej (rys. 23) w miejscach kontaktu z powierzchnią kołpaka przedstawiono na rysunku 25.



(a)



(b)

Rys.25. Pomiar zmian częstotliwości rezonansu sondy detekcyjnej dla serii pomiarów, (a) - powierzchni zewnętrznej kołpaka, (b) - powierzchni czołowej kołpaka, N - kołpak nowy, E - kołpak eksploatowany

Wartości zmian indukcyjności cewki, jej rezystancji oraz wartości rezonansu równoległego można przeliczać stosując odpowiednie zależności [26]. Prezentowana sonda detekcyjna umożliwia badanie degradacji zmęczeniowej stali (wszystkich gatunków, zarówno ferromagnetycznych jak i paramagnetycznych), jest prostym i tanim urządzeniem badawczym stopnia wyeksploatowania ich struktury materiałowej. Cechuje się powtarzalnością wyników pomiarów. Posiada uniwersalne możliwości, które mogą być szeroko wykorzystywane w przemyśle. Ma wszelkie zalety, by mogła być powszechnie stosowana w praktyce. Dysponując odpowiednim wzorcem odniesienia (tj. przebiegu eksploatacyjnych zmian parametrów) dla badanej stali, można dokonać oceny stopnia zaawansowania procesu zmęczeniowego w materiale i oszacować czas jego dalszej niezawodnej eksploatacji.

### Podsumowanie

Obecnie ocena stanu technicznego kołpaków wirników turbogeneratorów oparta jest na podstawowych badaniach nieniszczących, tj. penetracyjnych, ultradźwiękowych i gdy zachodzi potrzeba – metalograficznych. Większość stosowanych powszechnie metod służy detekcji nieciągłości geometrycznych (np. pęknięć) już istniejących.

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, również cechujących się wysoką eksploatacyjną stabilnością swoich parametrów fizycznych. Metoda wykrywa względne zmiany

przewodności elektrycznej właściwej i przenikalności magnetycznej względnej wynikające z postępującego procesu degradacji zmęczeniowej materiału, poprzedzające powstanie pęknięć. Ma możliwość wskazania z wyprzedzeniem miejsc potencjalnie zagrożonych awarią już na etapie pojawienia się zmian w strukturze materiału. Przedstawiona metodyka doskonale nadaje się do wykrywania zmian eksploatacyjnej degradacji zmęczeniowej w wysokostabilnej magnetycznie i elektrycznie paramagnetycznej stali austenitycznej stosowanej na kołpaki, umożliwiając jednocześnie prowadzenie ich prognozy eksploatacyjnej.

Istotnymi zaletami metody spektroskopii impedancji są prostota, niskie koszty oraz wysoka powtarzalność pomiarów. Do prowadzenia badań wystarcza średniej klasy mostek RLC. Koszty badań są wielokrotnie niższe od innych nowoczesnych metod badawczych. Metoda umożliwia badanie zarówno próbek materiału jak i obiektów. Może być cennym uzupełnieniem powszechnie stosowanych, głównych metod diagnostycznych.

#### LITERATURA

- [1] Adamek J., Borecki H., Cholewa S., Drozdowski J., Dzioba W., Matulka W., Niedźwiedz A., Rogoziński S., Słowiński B., Szydłowski M., Śliwiński S.: Ramowa Instrukcja Eksploatacji Generatorów Synchronicznych, Wydawca Energopomiar-Elektryka, Gliwice 2009
- [2] Adamek J.: Typowe uszkodzenia kołpaków wirników turbogeneratorów, X Konferencja Remontowa Energetyki – Szczyrk 1997, Materiały konferencyjne, str. 54-64
- [3] Baron D., Żurek Z. H.: Spektroskopia impedancji – metoda oceny stopnia wyeksploatowania kołpaków wirników generatorów, Przegląd Elektrotechniczny nr 3/2014, str. 255-259
- [4] Brunne K., Błaszczak M.: Raport z badań i pomiarów diagnostycznych nr 144.7019/2012, Pomiary współczynnika tłumienia fali ultradźwiękowej kołpaków wirników generatorów, ProNovum Sp. z o.o., 2012
- [5] Dobosiewicz J., Adamek J.: Ocena stanu kołpaków wirników turbogeneratorów: XIV Konferencja Energetyki – Książ 2005, Materiały konferencyjne, str. 39-46
- [6] Dobosiewicz J., Adamek J.: Ocena stanu kołpaków wirników turbogeneratorów, Energetyka, nr 3/2006, str. 184-187
- [7] Dobosiewicz J.: Ocena stanu kołpaków wirników generatorów, Energetyka, nr 6-1990, str. 202-205
- [8] Dobosiewicz J., Rauszer A.: Uszkodzenia korozyjne kołpaków generatorów w turbozespołach parowych, Energetyka, nr 8-1991, str. 290-292 (14-16)
- [9] Heptner H., Stroppe H.: Magnetyczne i indukcyjne badania metali (w oryginale: Magnetische und magnetinduktive Werkstoffprüfung), Wydawnictwo Śląsk, 1972
- [10] Katalog danych technicznych producenta stali nierdzewnej i węglowej: VSG - Vereinigte Schmiedewerke GmbH, Niemcy
- [11] Katalog danych technicznych producenta turbogeneratorów i hydrogeneratorów: Elektrosiła, Petersburg, Rosja
- [12] Katalog danych technicznych i instrukcje techniczne firmy EthosEnergy Poland S.A. w Lublińcu (dawniej TurboCare Poland S.A., Energoserwis S.A.)
- [13] Żurek Z. H., Duka P.: „Obwody RLC w diagnostyce i eksploatacji maszyn” Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2014
- [14] Żurek Z. H.: „Wprowadzenie do elektromagnetycznej diagnostyki degradacji stali” – monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012
- [15] Żurek Z. H., Baron D.: Mostki pomiarowe RLC i moduły serii LDC1000 w diagnostyce stanu stali elektrotechnicznej słabymi polami magnetycznymi, XIX Konferencja Energetyki – Artamów 2015, Materiały konferencyjne
- [16] Żurek Z. H., Baron D.: Diagnostyka stopnia degradacji zmęczeniowej stali metodą spektroskopii impedancji i rezonansu, XXIV Seminarium Naukowo-Techniczne KOMEL PEMINE - Rytro 2015, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 2/2015 (106), str. 153-162
- [17] Żurek Z. H., Baron D.: Niestabilność eksploatacyjna parametrów magnetycznych i elektrycznych blach rdzenia stojana generatora TWW-200-2A, Przegląd Elektrotechniczny nr 1/2014, str. 221-223
- [18] Żurek Z. H., Baron D.: P.402532 z dn. 24.01.2013, Sposób wykrywania degradacji zmęczeniowych w wysokostabilnych stalach paramagnetycznych chromowo manganowych metodą indukcyjną
- [19] Żurek Z. H., Kurzydłowski K. J., Kukła D., Baron D.: Material Edge Conditions of Electromagnetic Silicon Steel Sheets, Przegląd Elektrotechniczny nr 2b/2013, str.112-115
- [20] Żurek Z. H., Baron D.: Spektroskopia impedancji – metoda oceny stanu technicznego kołpaków wirników generatorów, XVIII Konferencja Energetyki – Gniew 2013, Materiały konferencyjne, str. 130-138
- [21] Żurek Z. H., Baron D.: Badanie stabilności eksploatacyjnej parametrów magnetycznych i elektrycznych blach rdzenia stojana generatora typu TWW-200-2A, XVIII Konferencja Energetyki – Gniew 2013, Materiały konferencyjne, str. 284-289
- [22] Żurek Z. H., Baron D.: Diagnostyka maszyn w transporcie i energetyce metodą spektroskopii impedancji, XLIX Sympozjum SME - Gdynia/Gdańsk 2013, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 100/2013 cz. I, str. 195-198
- [23] Żurek Z. H., Baron D.: Pomiar zmian wartości przenikalności magnetycznej i przewodności elektrycznej właściwej kołpaków generatorów, XLVIII Sympozjum SME - Książ 2012, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, seria Studia i Materiały, Tom 2 - Wrocław 2012, str. 9-14
- [24] Żurek Z. H., Kukła D., Baron D.: Materiałowe warunki brzegowe blach elektrotechnicznych krzemowych, XLVIII Sympozjum SME - Książ 2012, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, seria Studia i Materiały, Tom 2 - Wrocław 2012, str. 3-8
- [25] Żurek Z. H., Baron D.: Pomiar zmian wartości przenikalności magnetycznej i przewodności elektrycznej właściwej kołpaków generatorów, XXI Seminarium Naukowo-Techniczne KOMEL PEMINE - Rytro 2012, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 3/2012 (96), str. 179-182
- [26] [www.ti.com/product/LDC1000/technicaldocuments](http://www.ti.com/product/LDC1000/technicaldocuments)

Autor: mgr inż. Dariusz Baron, EthosEnergy Poland S.A., E-mail: [dariusz.baron@turbocare.pl](mailto:dariusz.baron@turbocare.pl)