

Spektroskopia impedancji i zastosowania przemysłowe

Zbigniew Hilary Żurek

Wprowadzenie

Najbardziej odpowiednim wprowadzeniem do tematu artykułu jest cytat Prof. dr hab. inż. Lecha Dietricha (IPPT PAN) ze słowa wstępnego do książki *Obwody RLC w diagnostyce i eksploatacji maszyn* [9, 10]:

Pojęcie zmęczenia materiałów wprowadzono do słownictwa mechaniki w 1809 roku po pierwszym opisanym w literaturze fachowej przypadku zidentyfikowania zmęczeniowego pęknięcia szyny kolejowej przez Richarda Trevithicka.

W roku 1863 Wöhler zaproponował procedurę wyznaczania charakterystyki zmęczeniowej materiałów konstrukcyjnych. Procedura ta została wprowadzona do norm krajowych niemal wszystkich krajów świata i z niewielkimi zmianami obowiązuje do dnia dzisiejszego.

Monitorowanie i ocena rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych jest dziedziną eksplorowaną dopiero od niedawna, a główna trudność wynika z korelacji lokalnego charakteru rozwoju zmęczenia wokół początkowych pęknięć i defektów strukturalnych z pomiarami globalnych zmian właściwości fizycznych czy mechanicznych w całej objętości pomiarowej.

Podstawowym problemem jest wybór właściwego parametru wskazującego na rozwój uszkodzeń zmęczeniowych (angielski termin *fatigue damage indicator parameter*).

Poszukiwania takiego parametru są ciągle sprawą otwartą zarówno w zakresie właściwości mechanicznych, jak i w zakresie właściwości magnetycznych i elektrycznych

Zaproponowana wielopunktowa procedura oceny krzywej trwałości materiału przez zdefiniowanie poziomu nasycenia magnetycznego i częstotliwości prądu wzbudzenia o parametrach lub w zakresie dobranym dla materiału testowanego (f_{lu} , f_g/f , oraz składowych impedancji cewki testującej, jak jej geometria, budowa,

w tym uzwojenie w stosunku do parametrów) wraz z materiałem testowanym.

Zdefiniowano w ten sposób nowy parametr diagnostyki magnetycznej wskazujący na rozwój uszkodzeń zmęczeniowych”.

W niniejszym opracowaniu przedstawiono metodykę badań defektoskopowych opartą na unormowanych składowych impedancji i pojęciu przenikalności skutecznej, zdefiniowanym historycznie przez Forstera i jego współpracowników [15, 16].

W zakresie zastosowania w obszarze NDT i SHM występuje w publikacjach autora pod nazwą „spektroskopia impedancji”.

1. Proces degradacji stali i badania nieniszczące.

Diagnostyka maszyny i jej podzespołów

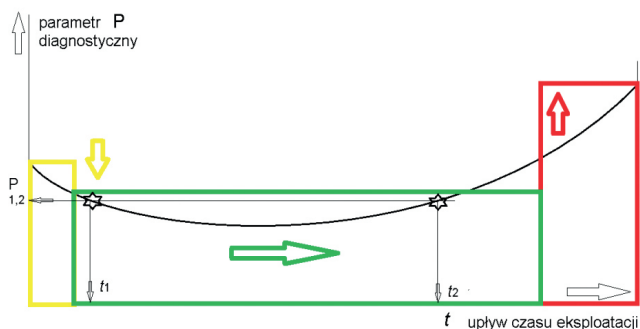
Diagnostyka metodyką spektroskopii impedancji prowadzona jest na podstawie oceny zmienności zakresu parametrów magnetycznych początkowych, głównie przenikalności magnetycznej, dla której dobierana jest częstotliwość testowania. Częstotliwość testowania natomiast obejmuje obraz decydujących w procesie eksploatacji zmian składowych impedancji. Taka metodyka powinna być poprzedzona wyznaczeniem wzorca korelacji przebiegu zmian parametrów mechanicznych z parametrami magnetycznymi i elektrycznymi niezależnie dla każdej badanej stali. Największy problem stosowania diagnostyki stanu elementu w polu magnetycznym wynika z nieliniowości korelacji zjawisk mechanicznych i fizycznych materiału [1–11].

Ta nieliniowość dotyczy wszystkich procesów degradacji eksploatacyjnej i także geometrii odkształcenia.

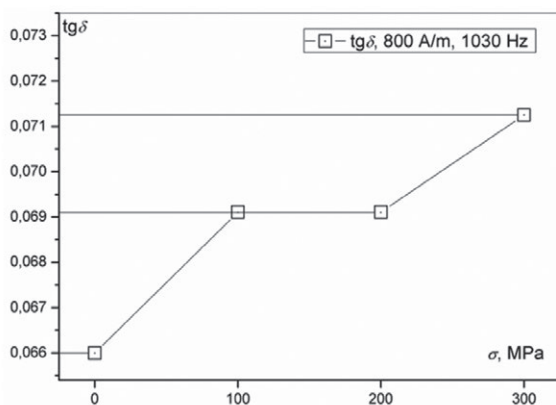
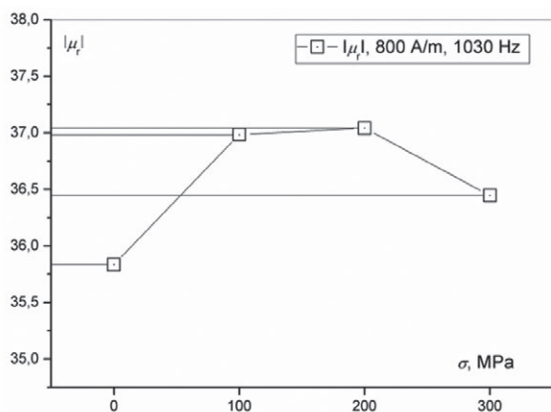
W diagnozie wibroakustycznej (drżania i hałas maszyn w okresie użytkowania) także spotykamy charakterystyczną nieliniowość w poszczególnych okresach czasu użytkowania, jak pokazano na rysunku 1.

Przedstawiona na rysunku nieliniowość jest co najwyżej uogólnioną analogią procesu zmęczenia, obejmuje procesy degradacyjne parametrów fizycznych, szczególnie elektryczne i magnetyczne, w przeważającej grupie stali. Charakter nieliniowości jest także znany w diagnostyce wibroakustycznej opisującej czas życia podzespołu lub maszyny pod hasłem *life time calculation*.

Obowiązujące w diagnostyce maszyn prawidłowości opisujące przebieg zmian parametrów eksploatacyjnych wynikają z procesów resztkowych przetwarzania energii. Procesy resztkowe ujawniają się w postaci poziomu emitowanego hałasu, temperatury pracującego podzespołu czy procesu tribologicznego współpracujących elementów. Nieliniowy trend zmian



Rys. 1. Wibroakustyczne przedziały czasu życia maszyny: proces docierania – rozruchu, właściwa eksploatacja, okres końcowy życia maszyny do jej zniszczenia



Rys. 2. Ilustracja nieliniowych zmian magnesowania materiału pod obciążeniem wahadłowym

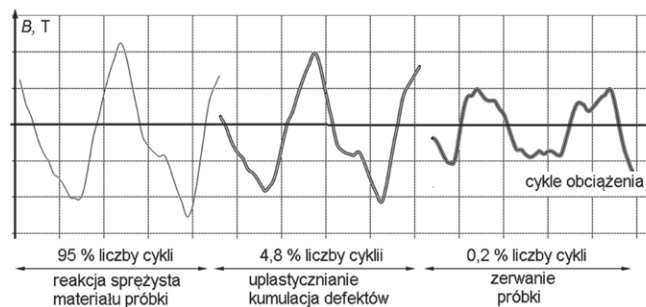
parametrów fizycznych występuje także w analizie eksploatacyjnej magnetycznej i elektrycznej.

Krzywa życia próbek o kształcie klepsydry ze stali węglowej (ferromagnetyk) testowanych na maszynie wytrzymałościowej z zachowaniem stałej liczby cykli przedstawiono za pomocą zmian modułu przenikalności magnetycznej i tangensa kąta strat (rys. 2).

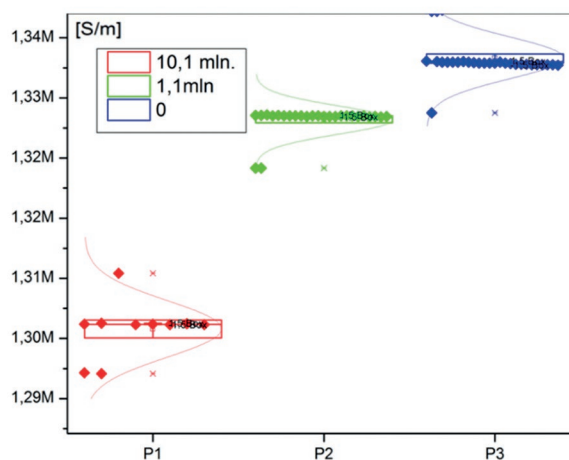
Podobną nieliniowość obserwuje się podczas monitoringu magnetycznego procesu obciążania próbek klepsydrycznych aż do ich zerwania. Przykład obrazujący zmiany magnesowania próbki klepsydrycznej ze stali (ferromagnetycznej) stosowanej na obręcze kolejowych zestawów kołowych w funkcji zmian obciążenia mechanicznego cyklem symetrycznym sinusoidalnym pokazano na rysunku 3.

Nieliniowość zmian występuje także w parametrach elektrycznych materiału austenitycznego (przewodności elektrycznej (rys. 4.) [9, 10, 11].

Badania magnetyczne stosujemy także w ocenie stopnia wypracowania elementu stali paramagnetycznych (austenitycznych). W stalach paramagnetycznych austenitycznych chromowych lub niklowych dochodzi często do przemian strukturalnych, powodowanych temperaturą lub obciążeniami mechanicznymi. Stopowe dodatki stabilizujące proces przemian strukturalnych mogą znacznie spowolnić przemiany



Rys. 3. Ilustracja nieliniowych zmian magnesowania materiału pod obciążeniem wahadłowym



Rys. 4. Pomiar metodą techniczną półautomatyczną próbki austenitycznej wykazuje zmiany nieliniowe przewodności elektrycznej od obciążenia mechanicznego i liczby cykli [10, 11]

w austenicie. Parametry magnetyczne zależą od: składu chemicznego, struktury realnej, temperatury i obróbki cieplnej [5, 6, 7, 19]. Na przykład skład chemiczny w stopach Fe-Cr-Ni silnie wpływa na ich skład fazowy (rys. 5). Na rysunku 5 podano oznaczenia dla austenitu – A, martenzytu – M i ferrytu – F.

W praktyce najczęściej przyjmuje się następujące zależności:

- równoważnik chromu

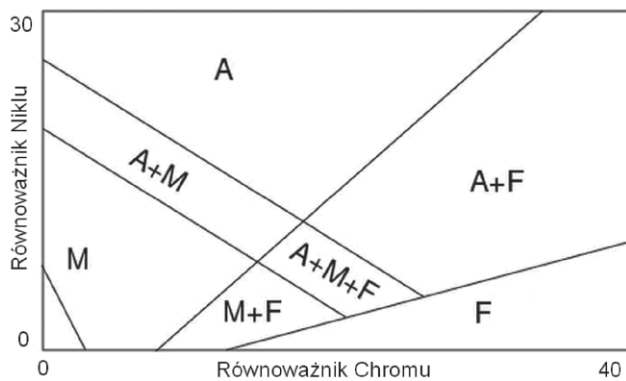
(1)

$$Cr_E = 1 \times \%Cr + 1 \times \%Mo + 1,5 \times \%Si + 0,5 \times Nb + \dots (\%Ti, W, Ta, Al)$$

- równoważnik niklu

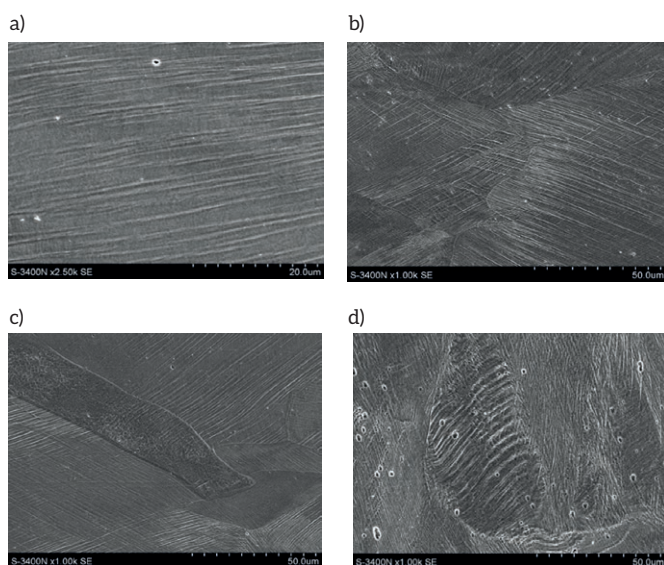
$$Ni_E = 1 \times \%Ni + 30 \times \%C + 1,5 \times \%Si + 0,5 \times \%Mn + \dots (\%Co, N) \quad (2)$$

Wykresy do wyznaczania składu fazowego stopów austenitu zostały opracowane także przez spawalników i są znane pod nazwą WRC 1992 (*Welding Research Council constitution diagram*). W wykresie WRC zmodyfikowano wzór de Longa, rozbudowując wzór (2) o zmienione udziały niklu i azotu



reklama

Rys. 5. Skład fazowy (Schaefflera) stopów Fe-Cr-Ni



Rys. 6. Struktury stali A298 class C powodowane wzrostem cykli obciążeń zmęczeniowych od zero do tętniących od struktury wyjściowej – a), po kolejne cykle obciążeń zderzeniowych – 1,0 mln cykli – b, c, d), 20 mln cykli 30 mln cykli

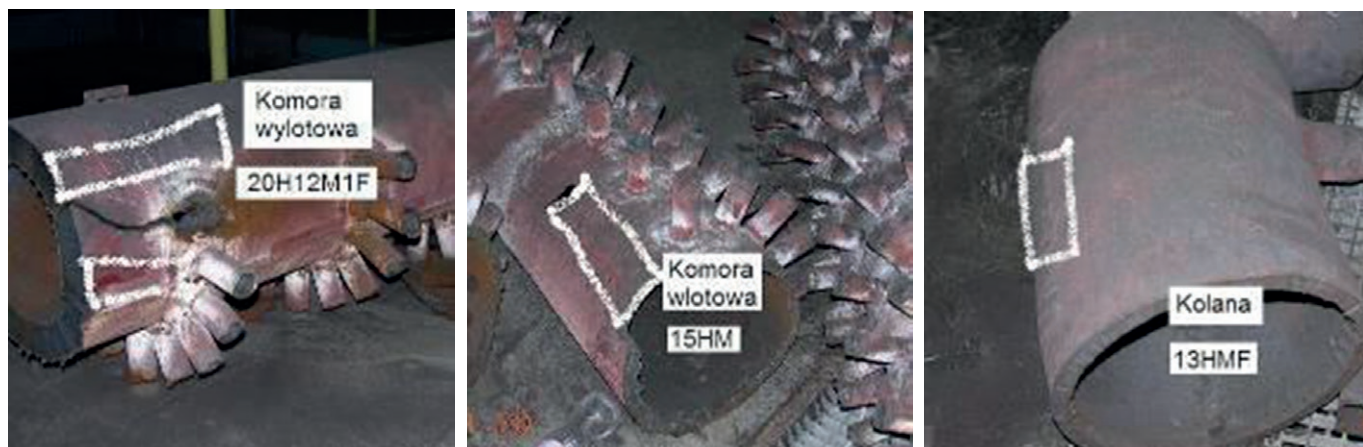
w wymiarze 0,3x (%). Modyfikacje przeprowadzone przez de Longa i WRC precyzują wpływ azotu na właściwości ferrytowe austenitu.

Za przykład można posłużyć się stalą A298. Wyraźne zmiany ziaren (rys. 6) nie wskazują bezpośrednio na zmiany parametrów elektrycznych i magnetycznych.

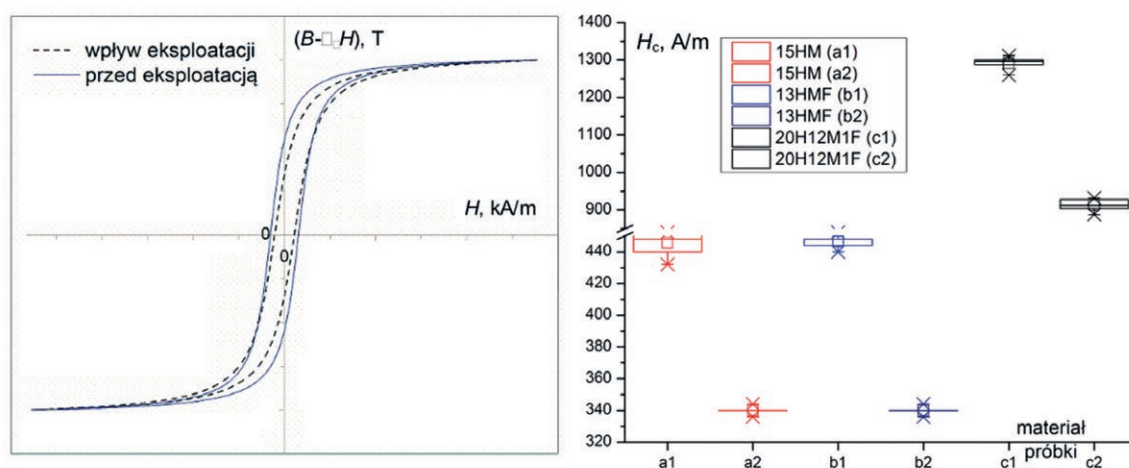
Poza obrazami zmiany ilości liczby linii poślizgu otrzymanymi w zastosowanym powiększeniu mikroskopu elektronowego brak widocznych struktur, które świadczyłyby o zmianie przenikalności materiału, a zmiana taka występuje.

Możliwość porównania parametrów początkowych (wejściowych) materiału z materiałem eksploatowanym w okresie kilku lub kilkunastu lat zdarza się niezwykle rzadko. Przedstawiony przykład odnosi się do starszej generacji materiałów, dla których dostępne były zapasy magazynowe (w jednej z elektrowni). Na fotografiach zamieszczonych na rysunku 7 pokazano elementy instalacji wycofanej z eksploatacji po 159 200 godzinach pracy w procesie rewitalizacji kotła K-3 w jednej z elektrowni

reklama



Rys. 7. Fragmenty instalacji energetycznych z zaznaczonymi miejscami pobrania materiału do badań



Rys. 8. Porównanie wyników pomiarów natężenia koercji. Indeks 1 przed, a indeks 2 po eksploatacji

w 2007 roku. Elementy stalowe (nowe) w realizacji tej instalacji zachowały się w magazynach elektrowni. Fotografie ilustrują kolejno fragmenty: komory wlotowej przegrzewacza II stopnia pary wtórnie przegrzanej (M-2), komory wylotowej pary z III stopnia przegrzewacza pary świeżej, kolana rurociągu pary wtórnie przegrzanej (RB). Kolano instalacji pokazane na rysunku jest ważnym elementem instalacji z punktu widzenia badań. W elemencie tym mogło dochodzić do dodatkowych koncentracji naprężeń mechanicznych, szczególnie na zewnętrznych powierzchniach łuków kolan rurociągów.

Zakres zmian parametrów magnetycznych jest ściśle powiązany z materiałem, jego składem chemicznym i charakterem obciążeń eksploatacyjnych, dlatego tak ważna jest znajomość parametrów początkowych.

Jeden ze sposobów badania eksploatacyjnej zmienności własności magnetycznych zostanie przetestowany dla stali stosowanych w energetyce [5, 6]. Wpływ charakteru obciążeń eksploatacyjnych na parametry magnetyczne materiału jest zróżnicowany i wymaga niezależnych badań strukturalnych.

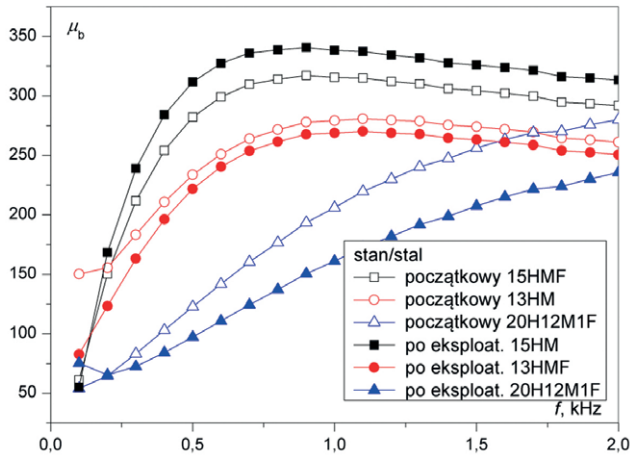
Charakter obciążenia materiału wpływa na ilościowy i jakościowy obraz zmian parametrów magnetycznych. Zakresy

zmienności parametrów magnetycznych materiału ferromagnetycznego decydują o wyborze techniki pomiarowej dla przyszłego badania diagnostycznego. Dla stali energetycznych (rys. 8) przebadano materiały wejściowe, zgromadzone w magazynach z materiałami instalacji eksploatowanych, wykonanymi ze stali 13HMF, 15HM oraz 20H12M1F [pępiki]. Pierwsze porównania (rys. 6) dotyczyły zmian natężenia koercji materiału w stanach początkowym i po eksploatacji (a1 → a2, b1 → b2, c1 → c2).

Zmiany parametru H_c związane z eksploatacją są na tyle znaczące, że umożliwiają wstępną klasyfikację stanu materiału, co nie jest możliwe w przypadku większości metod defektoskopowych. Wraz ze zmianami eksploatacyjnymi zachodzą zmiany w materiale i jego strukturze [6, 8, 9].

Pomiar przenikalności magnetycznej przy zastosowaniu metody indukcyjnej przeprowadzono w polu magnetycznym o wartości do 100 A/m. Wyniki pomiarów zamieszczono na rysunku 9. Oznaczenia zamieszczone na rysunkach odpowiadają: $\mu_b = \mu_R$ oraz $\mu_{cz} = \mu_L$.

Wysoka temperatura pracy, procesy stygnięcia i ponownego uruchamiania urządzeń są przyczyną tych zmian.



Rys. 9. Przebiegi zmian przenikalności biernej w funkcji gatunku materiału i częstotliwości pola magnetycznego

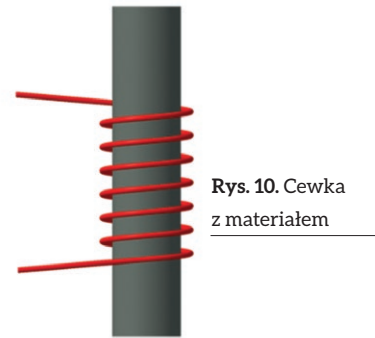
2. Koncepcja uogólnionej nieniszczącej metodyki badań materiału spektroskopii impedancji

Rozpatrując tylko jedną szczególną wartość częstotliwości pracy z szerokiego zakresu badawczego jednej ze stosowanych sond indukcyjnych, obserwujemy, że zmiana parametrów materiału opisywana jest trzema zależnościami: składową $\omega L/\omega L_0$, składową $\Delta R/\omega L_0$ oraz częstotliwością i jest ściśle powiązana z częstotliwością charakterystyczną o wąskim zakresie dla najlepszej skuteczności detekcji zmian w materiale.

Jest to obszar trójwymiarowy, który korelowany z czasem postępu zmian degradacyjnych nie powoduje nałożenia się wartości bieżącej pomiaru z wartością uzyskaną we wcześniejszej historii obciążenia. Z rozważań teoretycznych wynika, że prawdopodobieństwo uzyskania jednakowych wyników pomiaru z kilku okresów obserwacji jest znikome. Otrzymujemy zatem narzędzie diagnostyczne, które można skorelować z czasem lub historią obciążenia, nazwane przez autorów [9, 10] Spektroskopia impedancji jest także wielopunktową oceną krzywej życia materiału. Metodyka ta eliminuje wszystkie dotychczasowe wady badań parametrów fizycznych (*Mult Point Time Live Calculation*), w tym szczególnie magnetycznych i elektrycznych i stała się podstawą wystąpienia autora na Światowym Kongresie Badań Nieniszczących w Monachium 2016 (jako jedyny członek komitetu organizacyjnego w sekcji Transport i Lotnictwo). Należy zaznaczyć że krajową sekcję zainicjował profesor Lech Dietrich (IPPT PAN) na polu diagnostyki odkształceń w procesie degradacji zmęczeniowej, która była podstawą kontynuowania badań na polu pomiarów elektrycznych i magnetycznych, wspartą analizą matematyczną projektowania zagadnień modelowych pomiaru.

3. Przykładowe symulacje w programie MATHEMATICA

Dla lepszego poznania zagadnienia posłużymy się programem MATHEMATICA. Pole magnetyczne wzbudzone we wnętrzu pręta walcowego od pola magnetycznego zewnętrznego jest zależne od częstotliwości przepływającego prądu oraz konstrukcji zwojnicy, tzn. stopnia wypełnienia jej przekroju



Rys. 10. Cewka z materiałem

materiałem oraz parametrów materiałowych magnetycznych i elektrycznych. Stopień wypełnienia przekroju cewki materiałem jest najczęściej opisywany współczynnikiem η (rys. 10 i wzór 3) [8, 9, 19, 15, 16]:

$$\eta = \left(\frac{D_p}{D_s} \right)^2 \quad (3)$$

Pozostałe wiodące zależności podano we wzorach 4–6.

Zapisując spadki napięcia, dla cewki pustej i dla cewki z rdzeniem przez ε_0 i ε , otrzymujemy:

$$\varepsilon_0 = \underline{I} \underline{Z}_0 = \underline{I} i \omega L_0 \quad (4)$$

$$\varepsilon = \underline{I} \underline{Z} = \underline{I} (R + i \omega L) \quad (5)$$

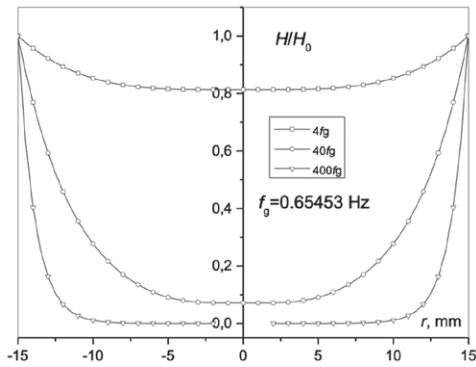
Spadek napięcia cewki wypełnionej materiałem jest ściśle związany ze współczynnikiem wypełnienia cewki materiałem η :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 (\mu_r - \eta + \eta \mu_{sk}) \quad (6)$$

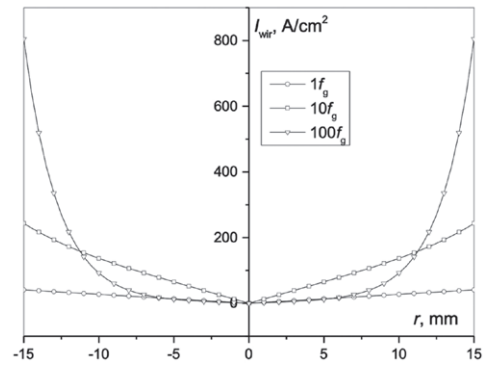
Oddziaływanie współczynnika η na parametry cewki z próbką jest tak istotne, jak przenikalność magnetyczna próbki w cewce. Porównanie parametrów impedancji cewki pustej do cewki z próbkami przed i po obciążeniach zmęczeniowych (unormowane składowe impedancji), jest wiarygodnym sposobem pomiarowym stopnia degradacji materiału. Często błąd pomiaru składowych impedancji wiąże się z brakiem uwzględnienia współczynnika η . W badaniach systematycznych tworzących bazy charakteryzujące materiał magnetyczny pomiary diagnostyczne należy prowadzić za pomocą ujednoliconej konstrukcji cewki dobranej ze względu na parametry fizyczne materiału i częstotliwość graniczną f_{ig} (przykład 1).

Przykład 1

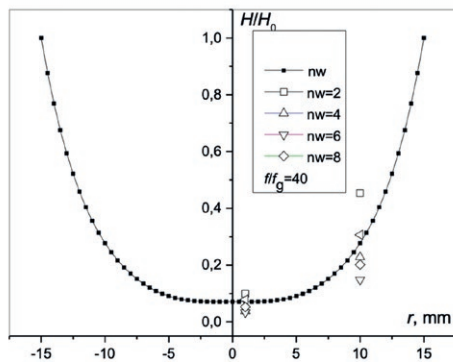
1. Rozkład pola magnetycznego w próbce walcowej ferromagnetycznej dla różnych częstotliwości napięcia zasilającego, jak pokazano na rys. 11–15.
2. Analiza błędów popełnianych w obliczeniach rozkładu pola w próbce na skutek uwzględnienia tylko ograniczonej ilości wyrazów szeregu funkcji Bessela. Kluczowe fragmenty kodu zapisanego w programie MATHEMATICA dołączono do pierwszego wydania monografii jako dodatek na CD [8, 9, 10].



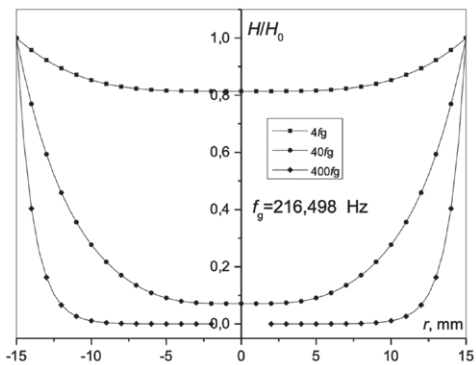
Rys. 11. Rozkład pola magnetycznego w próbce walcowej ferromagnetycznej dla różnych krotności f_g częstotliwości napięcia zasilającego



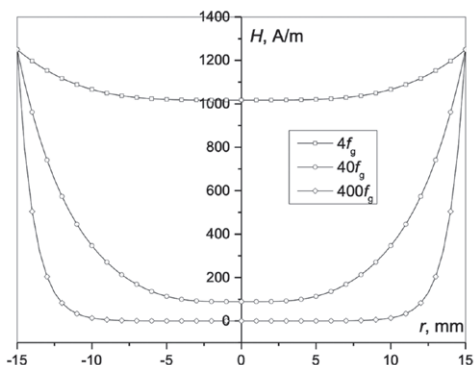
Rys. 15. Rozkład gęstości prądów wirowych w próbce walcowej dla różnych krotności f_g



Rys. 12. Rozkład pola magnetycznego w próbce walcowej ferromagnetycznej i wartości stosunku natężenia pola magnetycznego w odległości 1 mm i 10 mm w zależności od potęgi n_w rozwinięcia szeregu Bessela od 2 do 8 (dla n_w - szereg nieskończony)



Rys. 13. Rozkład pola magnetycznego w próbce walcowej niemagnetycznej (Cu) dla różnych krotności f_g częstotliwości napięcia zasilającego



Rys. 14. Rozkład pola magnetycznego w próbce walcowej dla różnych krotności f_g częstotliwości napięcia zasilającego

Inny sposób prezentacji w skali H/H_0 od r pokazano na rysunku 7.5, jako zależność H od r .

Z pojęcia głębokości wnikania pola magnetycznego przechodzimy do symulacji pomiaru.

4. Pojęcie przenikalności skutecznej

Pojęcie przenikalności skutecznej unormowanych składowych impedancji i unormowanych składowych napięcia pomiarowego wprowadził Förster [15, 16]. Było ono naturalną konsekwencją stosowanych indukcyjnych przetworników pomiarowych i zapisem zmian impedancji cewki pomiarowej Z w postaci zespolonej. Za pomocą pomiaru zmian składowych impedancji dowiadywano się pośrednio o zmianach parametrów elektrycznych i magnetycznych, a nawet o przyczynach błędów pomiaru. Metody badań ograniczone były jedynie do wykrywania pęknięć, sortowania materiału wyrobów hutniczych lub efektu obróbki termicznej czy plastycznej.

4.1. Badanie materiałów paramagnetycznych

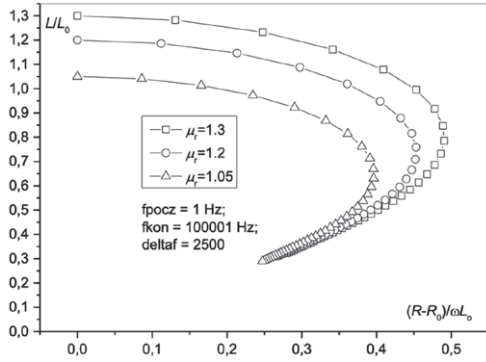
Przedmiotem badań analitycznych jest próbka prętowa o przekroju okrągłym. Zakres zmian przenikalności statycznej materiału ograniczony zostanie do przedziału wartości od $\mu_r = 1,005$ do $\mu_r = 1,30$. Wartość przenikalności stali chromowo-manganowych jest zbliżona do granicy dolnej, natomiast stali chromowo-niklowych, do wartości granicy górnej. Przewodność elektryczna właściwa stali paramagnetycznych przyjęta została z zakresu 1,28 do 1,37 (106 S/m). Jest to przewodność wyznaczona dla temperatury 20 stopni Celsjusza. Często w literaturze przewodność jest opisywana poprzez kilka symboli, a najczęściej przez γ lub σ (rys 16–17).

Rysunki 18 i 19 uwidaczniają zakresy częstotliwości, które są optymalne do wykrywania zmian przewodności i przenikalności materiału. Rys. 20 przedstawia wykorzystanie funkcji manipulatora [9, 10].

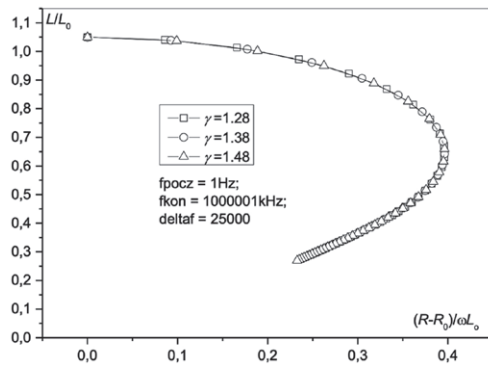
Przedstawiony przebieg obejmuje ściśle dobrane zakresy częstotliwości $f_{p, k}$ i krotności Δf .

5. Pomiary mostkiem o uproszczonej konstrukcji. Stal w transporcie szynowym

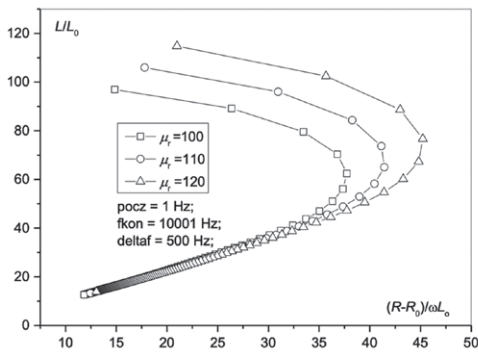
W mostkach RLC uproszczonej konstrukcji ustalona jest liczba zakresów częstotliwości od czterech do pięciu, jeden



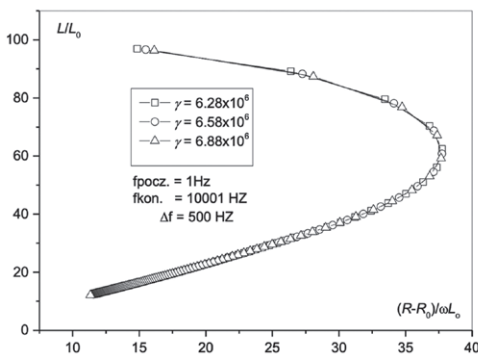
Rys. 16. Przebiegi unormowanych składowych impedancji przy stałej wartości $g = 6.28 \times 10^6 \text{ 1}/(\Omega\text{m})$



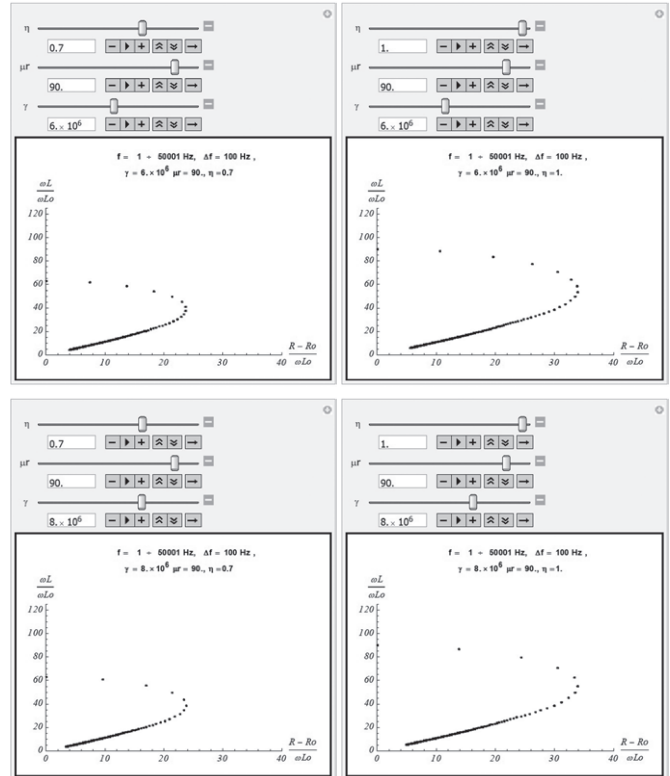
Rys. 17. Przebiegi unormowanych składowych impedancji przy stałej wartości $\mu_r = 1.05$



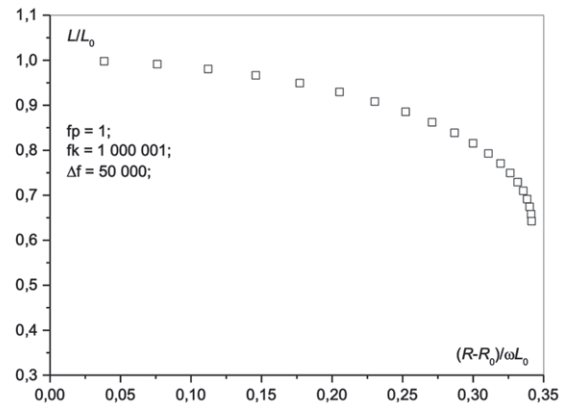
Rys. 18. Przebieg unormowanych składowych impedancji w funkcji zmian przenikalności magnetycznej materiału dla $g = 6.28 \times 10^6 \text{ 1}/(\Omega\text{m})$



Rys. 19. Przebieg unormowanych składowych impedancji w funkcji zmian przewodności elektrycznej materiału przy stałej wartości $\mu_r = 100$



Rys. 20. Obrazy ekranu dla funkcji Manipulator

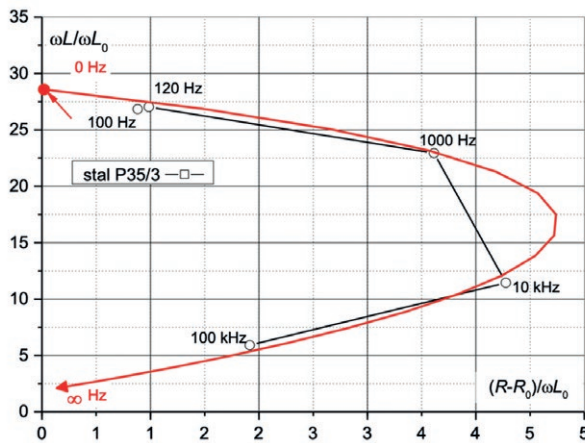


Rys. 21. Przebieg unormowanych składowych impedancji

zakres prądu oraz jeden zakres napięcia. Przełączanie zakresów pomiarowych w obwód szeregowy lub równoległy, zmiana parametru mierzony, zakres częstotliwości odbywa się ręcznie. W celu wykazania wysokiego stopnia czułości i rozdzielczości pomiarowej podstawowego miernika RLC wykonano pomiary porównawcze dla różnych parametrów cewek [8, 9]. Materiałem mierzonym jest stal węglowa stosowana w transporcie do budowy zestawów kołowych. Na rysunku 9.4 przedstawiono wynik pomiaru zmian składowych impedancji przeprowadzonego miernikiem RLC mającym jedynie 5 zakresów częstotliwości. Odpowiedni dobór ilości zwojów i rezystancji cewki zbliża pomiar do przebiegu teoretycznego.



Rys. 22. Podstawowej klasy miernik RLC

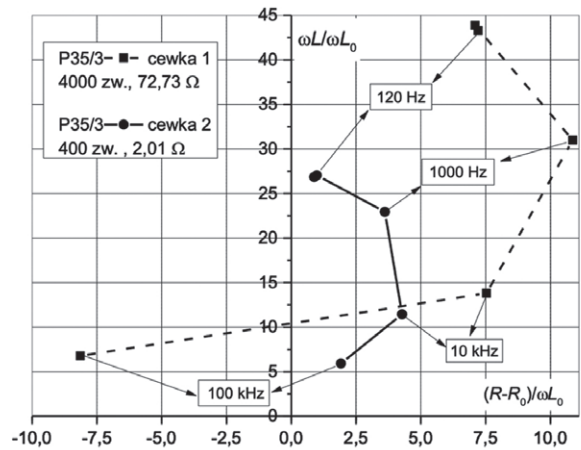


Rys. 23. Przykład pomiaru cewki z rdzeniem na tle przebiegu teoretycznego

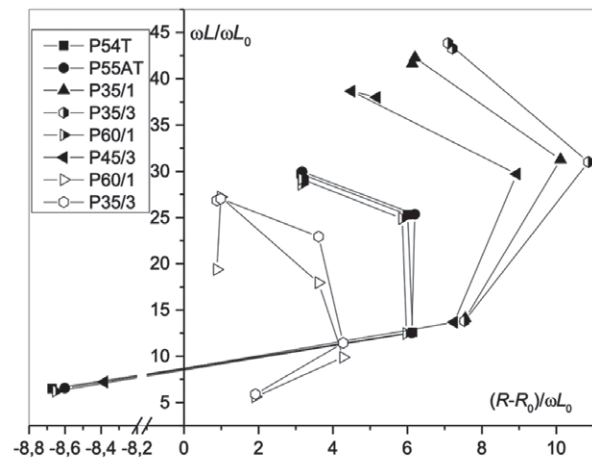
Brak pełnego zakresu częstotliwości badań nie stoi na przeszkodzie, aby dokładnie zdefiniować parametry materiału w procesie eksploatacji, tzn. jego stan początkowy i końcowy. Pokazano na wykresie 24 wyniki dla zakresów częstotliwości miernika RLC (100 Hz, 120 Hz, 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz). Zbieżność pomiaru z przebiegiem teoretycznym uzyskano dzięki użyciu cewki pomiarowej o niskiej rezystancji uzwojenia. Cechą charakterystyczną przebiegu teoretycznego jest zbliżanie się wyników pomiaru do zera układu współrzędnych wraz z przyrostem częstotliwości pracy od zera do nieskończoności.

Na rysunku 25 zamieszczono wyniki pomiaru próbek ze stali węglowej [9, 10], tym samym mostkiem, w tej samej konfiguracji, lecz przy zastosowaniu dwóch różnych cewek pomiarowych różniących się i liczbą zwojów, wartością rezystancji i jej impedancji.

W obu przypadkach zastosowane zakresy częstotliwości pomiarowej, dla której wykonano pomiar, zmieniają przebiegi krzywych na niekorzyść cewki o wysokiej wartości rezystancji. Wysoka rezystancja zmienia przebieg krzywej łączącej punkty pomiaru i wartości koordynat punktów w zakresie znormalizowanych składowych impedancji. W zastosowaniach porównawczych strukturoskopowych obie cewki są użyteczne ze wskazaniem na cewkę o podwyższonej rezystancji uzwojenia. Zbyt wysoka rezystancja cewki uniemożliwia pomiar. Wartość rezystancji powinna być dobrana ze względu na parametry elektryczne i magnetyczne materiału i częstotliwość graniczną.



Rys. 24. Porównanie wyników pomiaru próbki stalowej dla różnych cewek pomiarowych



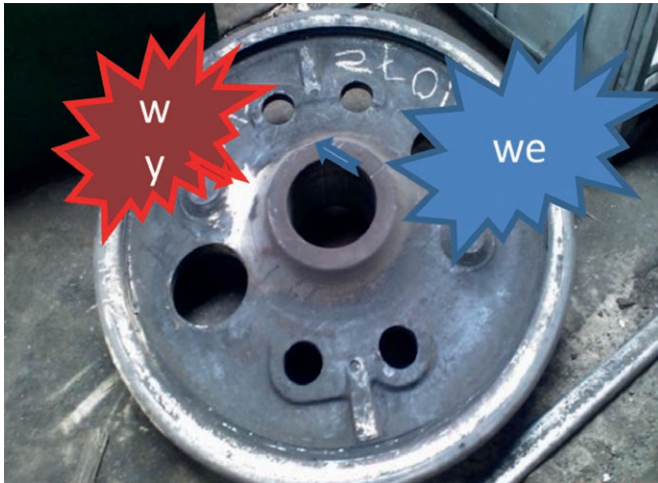
Rys. 25. Zestawienie unormowanych składowych impedancji stali (tabela 10) dla częstotliwości pomiarowej 100 Hz, 120 Hz, 1 kHz, 10 kHz i 100 kHz

Zakres parametrów cewek podany na rysunku 9.5 jest właściwy dla stali ferromagnetycznych.

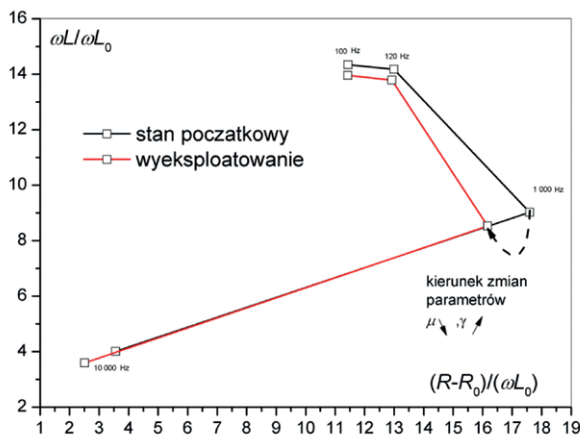
Zakres pomiarowy zastosowanego mostka RLC wynika z minimalnej podatności magnetycznej badanego paramagnetyku (katalogowo $\chi < 0,05$) oraz wysokiej eksploatacyjnej stabilności jego parametrów elektrycznych i magnetycznych (6).

Uproszczoną metodykę (mostkiem o 4 zakresach pomiarowych) zastosowano ponownie do stali stosowanych w transporcie i do badania próbek tarczy koła napędowego lokomotywy [5, 7, 8, 17, 18] pokazanego na rysunku 9.17. Sondą stykową badano także strefy koła o maksymalnym i minimalnym narażeniu na degradację mechaniczną. Badane koło złomowano po trzydziestu latach eksploatacji.

Cewkę sondy pomiarowej zasilano napięciem o czterech częstotliwościach w dostępnych nastawach mostka. Wynik pomiaru zilustrowano na rysunku 9.18. Pomiar wykazał istotne zmiany składowych przenikalności skutecznej stref słabo



Rys. 26. Testowane koło napędne lokomotywy



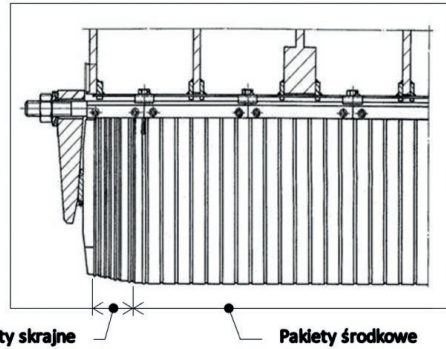
Rys. 27. Wyniki pomiaru zmian składowych przenikalności skutecznej tarczy koła

wyższych (we) w stosunku do stref wysoko wyłożonych (wy) koła po resursie. Przeliczone wyniki pomiaru parametrów Z, R, L cewki pomiarowej sondy, zarejestrowane mostkiem RLC, przedstawiono na rysunku 9.18.

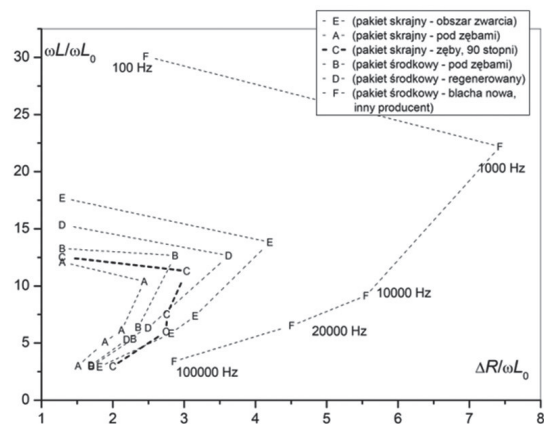
Widoczne zmiany parametrów materiału pokazane na wykresie są wywołane eksploatacją tarczy koła zestawu kołowego w okresie 30 lat. Pomiar ten jest powtarzalny dla próbek, jak odpowiednich miejsc powierzchni tarczy koła.

6. Badania stanu elementów maszyn i urządzeń w energetyce

Przydatność diagnostyki badań potwierdzono badaniami zmian parametrycznych blach stojana turbogeneratora. Pakiety skrajne blach rdzenia stojana generatora należą do elementów strefy skrajnej generatora, na które oddziałuje pole magnetyczne rozproszenia wytwarzane przez prądy płynące w połączeniach czołowych uzwojeń stojana i wirnika, wirujące synchronicznie względem stojana. Intensywność dodatkowego nagrzewania się pakietów skrajnych jest zależna od charakteru obciążenia generatora, od którego zależy kształt drogi strumienia rozproszenia.



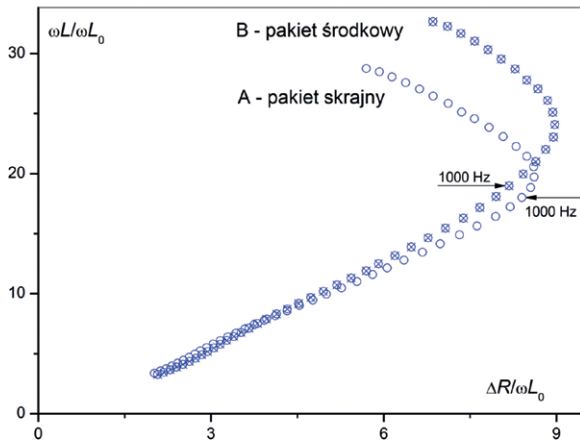
Rys. 28. Widok na pakiety skrajne stojana generatora i schemat lokalizacji



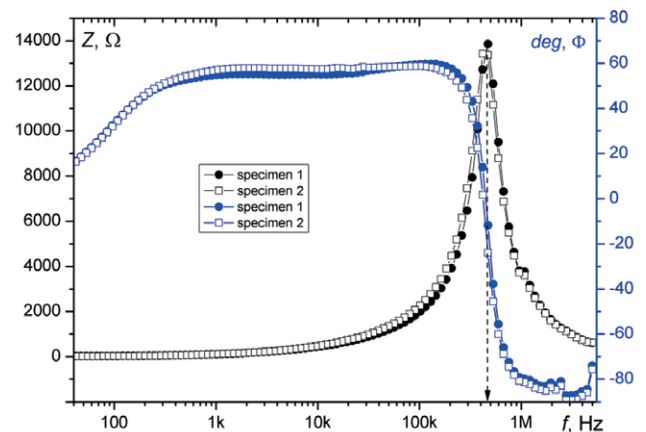
Rys. 29. Wyniki pomiaru zmian składowych przenikalności skutecznej blach elektrotechnicznych dla wybranych częstotliwości

Najbardziej niekorzystne efekty tego zjawiska mają miejsce w warunkach pracy generatora z niedowzbudzeniem, przy obciążeniu pojemnościowym i prądzie twornika zbliżonym do znamionowego. W generatorach dużej mocy stosowanych jest szereg metod ograniczających skutki tego zjawiska, jednak pomimo tego przegrzewanie się pakietów skrajnych jest przyczyną wielu awarii i uszkodzeń generatorów. Na rysunku 28 pokazano przykładowy widok pakietów skrajnych [8, 10, 19].

Pomiary prowadzono mostkiem RLC „Agilent 4263B”. Cewkę sondy pomiarowej zasilano napięciem (100 mV) o częstotliwości od 100 Hz do 100 000 Hz w dostępnych nastawach mostka.



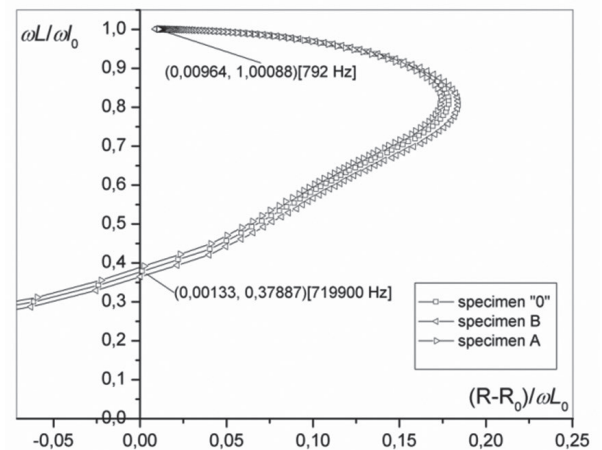
Rys. 30. Wyniki pomiaru zmian składowych przenikalności skutecznej blach elektrotechnicznych w pełnym zakresie częstotliwości od 100 Hz do 100 000 Hz



Rys. 32. Przebiegi zarejestrowane dla materiału nowego i po 12 mln cykli obciążeniowych



Rys. 31. Kołpaki wirników generatorów (paramagnetyki)



Rys. 33. Przebieg pełny (u góry) zarejestrowany mostkiem RLC w zakresie do 1 MHz, szczegółowy wykres (u dołu) dla częstotliwości 61100 Hz

Z przeprowadzonych pomiarów parametrów Z, R, L cewki pomiarowej wyznaczono składowe czynne i urojone przenikalności skutecznej dla częstotliwości 100, 1000, 10 000, 20 000 i 100 000 Hz (rys. 29).

Przybliżone krzywe wyznaczone z pięciu punktów pomiaru (rys. 29) dla $f = 100, 1000, 10\,000, 20\,000$ i $100\,000$ Hz charakteryzują względne zmiany parametrów przenikalności materiału i przewodności właściwej. Istotne zmiany parametryczne po okresie eksploatacji wykazują próbki blachy pakietu skrajnego pobrane z miejsca zwarcia „E” oraz próbki blachy poddanej regeneracji „D”.

Dla dwóch próbek, wybranych ze względu na lokalizację i procesy degradacyjne wpływające na zmiany parametrów, przeprowadzono pełnozakresowe pomiary profesjonalnym mostkiem RLC „HIOKI 3532-50” w pełnym zakresie częstotliwości od 100 Hz do 100 000 Hz [20]. Pełny przebieg składowych czynnych i urojonych przenikalności skutecznej przedstawiono na rysunku 30.

Również istotnym zagadnieniem jest przebieg procesów degradacyjnych w kołpakach [9, 10, 19] paramagnetycznych ze stali chromowo-manganowej. Na rysunku 31 pokazano przykłady kołpaków wirników generatorów przygotowanych do ponownego montażu po przeglądzie.

Pomiar materiału wejściowego próbek z materiału kołpaka po cyklach obciążeń zmęczeniowych (rys. 32.) przedstawiony pod względem zmian impedancji i kąta fazy wykazuje zbieżność przebiegów. Na kolejnym rysunku (rys. 7) obserwujemy zmiany metodyki prezentowania wyników ze względu na zmiany składowych przenikalności skutecznej.

Wyniki pomiaru zmian impedancji i kąta fazowego materiału ferromagnetycznego

Ocena zmian składowej czynnej i składowej urojonej dla próbek po 12 mln cykli (A) i 25 mln (B) cykli umożliwia zakwalifikowanie stopnia degradacji badanego materiału. Na wykresie (rys. 33) widoczna jest zmiana parametrów eksploatacyjnych dla stali kołpaka.

Zakres pomiarowy zastosowanego mostka RLC wynika z minimalnej podatności magnetycznej badanego paramagnetyku (podatność χ katalogowa $< 0,05$) oraz wysokiej eksploatacyjnej stabilności jego parametrów elektrycznych i magnetycznych (6).

Literatura

- [1] RASEK J.: *Kinetyka zjawisk wydzielania i rozpuszczania w roztworach stałych $\alpha\text{Fe-N/C}$* . Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice 1983.
- [2] RASEK J., STOKŁOSA Z.: *Badania właściwości materiałów metodami magnetycznymi. Badania mechanicznych właściwości materiałów i konstrukcji*. Seminarium Szkoleniowe, IPPT PAN, Zakopane, 15–17 grudnia 2004.
- [3] RASEK J., STOKŁOSA Z.: *Badania właściwości materiałów metodami magnetycznymi. Badania mechanicznych właściwości materiałów i konstrukcji*. Seminarium Szkoleniowe, IPPT PAN, Zakopane, 15–17 grudnia 2004.
- [4] ŻUREK ZBIGNIEW H.: *Diagnostyka magnetyczna. Perspektywy zastosowania pomiarów magnetycznych w badaniu zmęczenia materiału – Wykład. Badania mechanicznych właściwości materiałów i konstrukcji – Wykłady*. Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa 2003, Seminarium szkoleniowe, Zakopane 10–13 grudnia 2003.
- [5] ŻUREK ZBIGNIEW H.: *Metoda diagnostyki stanu stalowych (paramagnetycznych i ferromagnetycznych) elementów maszyn elektrycznych na przykładzie bandaży i kap wirników generatorów NN 510 2385 38 (raport)*.
- [6] ŻUREK ZBIGNIEW H.: *Opracowanie metody magnetycznej do wczesnej detekcji procesów zmęczeniowych w stalach niskostopowych niskowęglowych NN 507 0807 33 (raport)*.
- [7] ŻUREK ZBIGNIEW H.: *Badania stanu ferromagnetycznych elementów maszyn w polu magnetycznym*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, „ELEKTRYKA” z. 196, MONOGRAFIA, str. 1–150, Gliwice 2005.
- [8] ŻUREK ZBIGNIEW H.: *Wprowadzenie do elektromagnetycznej diagnostyki degradacji stali*. Wyd. Politechniki Śląskiej, s. 155, MONOGRAFIA, nr 423, Gliwice 2012.
- [9] ŻUREK ZBIGNIEW H., DUKA P.: *Obwody RLC w diagnostyce i eksploatacji maszyn*. Wyd. Politechniki Śląskiej, s. 144, Gliwice 2014.
- [10] ŻUREK ZBIGNIEW H., DUKA P.: *RLC CIRCUITS FOR MATERIAL TESTING, INSTITUTE OF ELECTRICAL DRIVES & MACHINES KOMEL, MONOGRAPH, 2015*.
- [11] ŻUREK ZBIGNIEW H., KURZYDŁOWSKI K.J., KUKLA D., BARON D.: *Material Edge Conditions of Electromagnetic Silicon Steel Sheets*. „Przegląd Elektrotechniczny” nr 2b/2013, s. 112–115.
- [12] ŻUREK ZBIGNIEW H., BARON D.: *Pomiar zmian wartości przenikalności magnetycznej i przewodności elektrycznej właściwej kołpaków generatorów*. XXI Seminarium Naukowo-Techniczne KOMEL PEMINE – Ryto 2012.
- [13] ŻUREK ZBIGNIEW H., BARON D.: *Spektroskopia impedancji – uniwersalny parametr diagnostyki elementów maszyn i urządzeń*, XLIX Sympozjum SME – Gdynia/Gdańsk 2013.
- [14] ŻUREK ZBIGNIEW H., JANECZEK T., MACIEJEWSKI J.: *Parametry magnetyczne stali jako kryterium diagnostyki zmęczeniowej*. PAK, „Pomiary, Kontrola, Automatyka”, 9/2008.
- [15] FÖRSTER F.: *Theoretische und experimentelle Ergebnisse des magnetischen Streuflusverfahrens*. „Materialprüfung”, 23, 1981, s. 371–378.
- [16] HEPTNER H., STROPPE H.: *Magnetyczne i indukcyjne badania metali*. Wydawnictwo Śląsk, 1972.
- [17] Doktorat. Rok: 2008. JANECZEK T., Politechnika Śląska, Wydział Transportu. Tytuł oryginału: *Diagnostyka eksploatacyjna kolejowych zestawów kołowych metodą magnetyczną*. PROMOTOR: Żurek Zbigniew H.
- [18] Doktorat. Rok: 2011. SZUDYGA M. Politechnika Śląska, Wydział Transportu. Tytuł oryginału: *Diagnozowanie metodą magnetyczną procesów zmęczeniowych stali stosowanej do kół i obręczy zestawów kołowych*. PROMOTOR: Żurek Zbigniew H.
- [19] Doktorat. Rok: 2016. BARON D., EthosEnergy Poland SA. Obrona – Politechnika Opolska Wydział Elektryczny. Tytuł oryginału: *Badanie stanu technicznego kołpaków generatorów metodą spektroskopii impedancji*. PROMOTOR: Żurek Zbigniew H.
- [20] Doktorat. Rok: 2021. JASIŃSKI T., EthosEnergy Poland SA. Obrona – Politechnika Śląska Wydział Mechaniczny Technologiczny. Tytuł oryginału: *Diagnostyka stopnia wypracowania łopatek części wysokoprężnej wirnika turbiny 13K225 metodą magneto-indukcyjną*. PROMOTOR: Żurek Zbigniew H.

 Dr hab. Inż. Zbigniew Hilary Żurek, profesor

reklama



ROBOTYKA.PL

centrum polskiej robotyki