

Zbigniew Hilary Żurek, Politechnika Śląska, Katowice
Dariusz Baron, EthosEnergy Poland S.A., Lubliniec

DIAGNOSTYKA STOPNIA DEGRADACJI ZMĘCZENIOWEJ STALI METODĄ SPEKTROSKOPII IMPEDANCJI I REZONANSU

DIAGNOSTICS OF STEEL FATIGUE DEGRADATION CONDITION USING IMPEDANCE SPECTROSCOPY AND RESONANCE METHOD

Streszczenie: W artykule przedstawiono podstawy teoretyczne defektoskopii magneto-indukcyjnej w nowym obszarze badań struktury oraz degradacji zmęczeniowej elementów ze stali ferro i paramagnetycznych. Wysoką rozdzielczość pomiarów w identyfikowaniu stanu elementów metalowych uzyskano poprzez analizę parametrów elektrycznych i magnetycznych w funkcji częstotliwości pracy sondy. Zaproponowano nisko-kosztowe rozwiązania praktyczne w postaci urządzeń i metod pomiarowych.

Abstract: This article presents theoretical foundations of magneto-inductive (eddy-current) detection in a new area of testing the structure and fatigue degradation of ferro and paramagnetic steel elements. High measuring resolution in identification of metal elements condition has been shown by analysis of electric and magnetic parameters as a function of probe operation frequency. It also presents low-cost practical solutions in the form of measuring methods and equipment.

Słowa kluczowe: przetworniki indukcyjne, mostki RLC, pomiary składowych impedancji, spektroskopia impedancji, diagnostyka rezonansowa, badania nieniszczące, NDT

Keywords: inductive converters, RLC bridges, impedance components measurements, impedance spectroscopy, resonance diagnostic, non-destructive testing, NDT

Wstęp

Z punktu bezpieczeństwa eksploatacji, działań diagnostycznych i zapobiegawczych, niezbędna jest wiedza o zmianach parametrów fizycznych zachodzących pod wpływem eksploatacyjnych obciążeń zmęczeniowych w materiale elementu [1,2,3]. Eksploatacyjne obciążenia zmęczeniowe definiowane są według krzywej Wöhlera[4]. Pomiary parametrów magnetycznych i elektrycznych są jedną z możliwości poznania tych zmian. Zmiany te zachodzą pod wpływem obciążeń cyklicznie zmiennych prowadzących do zmęczenia materiału i jego zniszczenia [5, 6, 7, 8, 11]. Zagadnienie to zarówno na poziomie laboratoryjnym, jak i przemysłowym jest ważne. Pomimo współistnienia wielu czułych metod do określania procesu degradacji materiału (kamera rentgenowska lub neutronowa), metody magnetyczne są metodami przyszłościowymi. Nad metodami tymi pracuje wiele światowych laboratoriów naukowych, zarówno przemysłowych, jak i uczelnianych. Katastroficzny charakter zniszczenia zmęczeniowego wynika z kumulacji i rozprzestrzeniania się mikropęknięć rozwijających się do osiągnięcia parametrów krytycznych [4, 10] ze względu na wzrost obciążeń dynamicznych konstrukcji. Ma on miejsce (według najnowszych badań) w końco-

wym okresie czasu życia elementu, który dla większości materiałów nie przekracza 5%. Istnienie pęknięć lub zmiany ich wymiaru wykrywane klasycznymi urządzeniami defektoskopowymi przestało być wystarczające. W nieniszczących metodach pomiaru zmian parametrów magnetycznych i elektrycznych, w warunkach znacznego rozwoju technik pomiaru pola magnetycznego (przetworniki MR, GMR, Halla) następuje powrót do pomiarów przetwornikami indukcyjnymi. Przetworniki te mają właściwości (pomijając temperaturę pracy), których do tej pory nie zastąpiono. Świadczy o tym niezabicie ich zastosowanie w kosmosie. Jeśli chodzi o podstawowe teoretyczne równania opisujące próbkę materiału w cewce zasilanej prądem przemiennym, zdefiniowano nowy kierunek (parametr) diagnostyki magnetycznej jak rezonans i spektroskopia impedancji dla ferro i paramagnetyków. Parametr ten umożliwia umiejscowienie rozwoju uszkodzenia w czasie, nie dysponując pełnym czasowym monitoringiem rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych i odnośnych zmian parametrów fizycznych. Dotychczasowe badania i wyniki pomiarów parametrów elektrycznych i magnetycznych w całym przedziale czasu eksploatacji

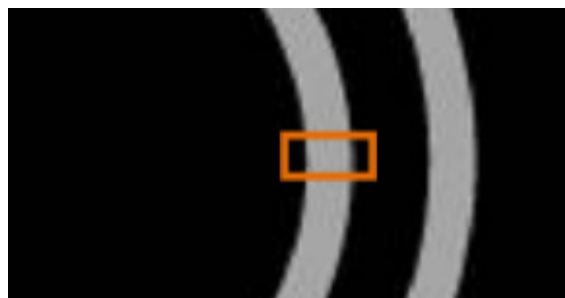
były obarczone problemem powtarzania się wartości mierzonych w kolejnych przedziałach czasowych. Specyfika nieliniowości zmian parametrów fizycznych od procesu eksploatacji jest główną przyczyną tego problemu [15].

1. Zjawiska zmęczeniowe w stali w obrazie zmian parametrów magnetycznych

Naprężenia zmęczeniowe [4, 14] to odkształcenia zmieniające się w czasie od typowych obciążeń występujących w różnych układach mechanicznych. Zmieniające się parametry fizyczne materiału [12, 13, 15] w procesie obciążeń zmęczeniowych, jak np. granica plastyczności, wytrzymałość na rozciąganie, sprężystość, współczynniki tłumienia fali ultradźwiękowej, własności cieplne, magnetyczne i elektryczne, są następstwem tychże obciążeń. Wszystkie wymienione zmiany parametrów fizycznych próbowano łączyć z procesem zmęczenia materiału w celu konstruowania urządzeń wykrywających ten proces. Najwięcej rozwiązań konstrukcyjnych powstawało w związku z potwierdzonymi istotnymi zmianami tłumienia fali ultradźwiękowej w materiale (np. kołpaków wirników generatorów) przed eksploatacją i po niej. Korelacja zmian parametrów fizycznych z procesem degradacji zmęczeniowej jest łatwiejsza od badań metalograficznych, mniej uciążliwa i nieniszcząca [16, 17, 18] oraz znacznie tańsza od metod rentgenograficznych czy neutronowych. Problem stanowi znaczne zróżnicowanie kierunku ewolucji zmęczeniowej parametrów fizycznych materiału.

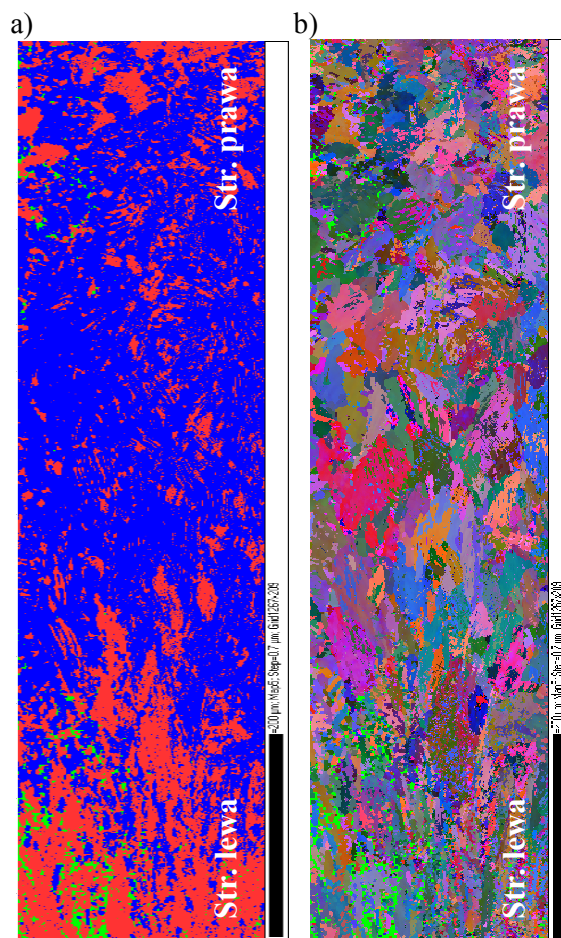
1.1. Udział przemian fazowych

Przemiany fazowe są jednym z najbardziej czytelnych zjawisk zmian parametrów fizycznych materiału. Związki odkształceń plastycznych ze zmianą struktury i jednoczesną zmianą parametrów fizycznych materiału są szczególnie wyraźne na przykładzie austenitycznej stali nierdzewnej chromowo-niklowej (gatunek: AISI - 304, DIN - 1.4301, PN - 0H18N9). Pomiar wykonano na wycinku rurki (chłodzenie silnika elektrycznego produkcji KOMEL). W wyniku odkształcenia, w ściance rurki (rys. 1) o grubości 1 mm wystąpiły zmiany fazowe (mechaniczne i termiczne zaburzenie stabilności austenitu) uzależnione od stopnia odkształcenia plastycznego. Na rysunku 2 pokazano mapę struktury fazowej wycinka rurki zlokalizowanego w strefie odkształconej, zgodnie z zaznaczeniem na rysunku 1.



Rys. 1. Lokalizacja wycinka rurki poddanego badaniu struktury fazowej i kątów Eulera

Kolor niebieski (rys. 2a) to struktura ściennie centrowana (FCC), czyli austenit, czerwony to ferryt. Strefy najbardziej odkształcone (na lewo ściskane, na prawo rozciągane) wykazują znaczną utratę stabilności austenitu, który podlega przemianom fazowym w ferryt. W środkowej części (najmniej odkształconej) pozostaje przewaga austenitu. Na obrazie kątów Eulera (rys. 2b) widać teksturę i strefy najbardziej rozdrobione w wyniku deformacji plastycznej – tj. obszary skrajne po lewej i prawej stronie ścianki rurki.



Rys. 2. Rozkład fazy austenitu i ferrytu (a), oraz kątów Eulera (b) dla wycinka na rys. 1

Przykład ten wskazuje na bezpośrednie związki odkształcenia plastycznego ze zmianą magnesowania i przenikalności magnetycznej nie-trwałego austenitu. Dodatkowo badanie kątów Eulera to jeden ze sposobów (niszczących) uwidoczniania zakresów obszarów deformacji struktury (obszarów degradacji zmęczeniowej). Kolor zielony na mapach fazowych to miejsca nieindeksowane przez system pomiarowy.

1.2. Udział degradacji struktury

W niektórych gatunkach stali można wskazać przebiegi narastania zmian zmęczeniowych związane z defektami liniowymi lub punktowymi. Najprostsze z nich to linie poślizgu i składające się z nich pasma poślizgu. Dobry przykład dla ilustracji tego zagadnienia stanowi austenityczna stal chromowo-manganowa G18H18 (ASTM A289 class C, X8CrMnN1818), której parametry fizyczne zostały tak dobrane składem chemicznym i procesem obróbki, aby parametry elektryczne i magnetyczne (paramagnetyczne) nie ulegały zmianie podczas pracy, z uwagi na obecność silnego zmiennego pola elektrycznego i magnetycznego. Stal chromowo-manganowa G18H18 jest stalą stabilną parametrycznie. Obserwujemy w niej rozwój i przemieszczanie zmęczeniowe linii pasm poślizgu (rys. 3) [8, 17, 18, 19] w stosunku do struktury początkowej, nadanej materiałowi elementu podczas obróbki plastycznej w procesie produkcji.

W miarę wzrostu liczby cykli obciążeń zwiększa się liczba pasm poślizgu i zmienia się kierunek ich ułożenia w stosunku do obrazu powstałego w procesie obróbki kucia i walcowania, w wyniku czego zmieniają się parametry fizyczne materiału.

a)



b)

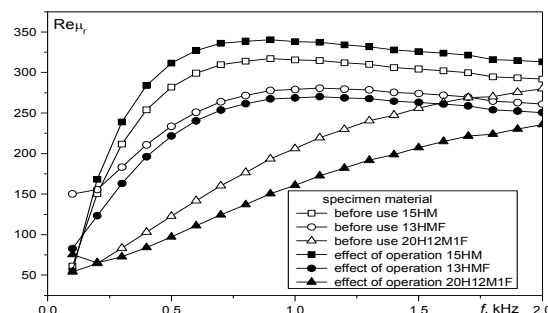


Rys. 3. Wybrane przykłady struktury stali G18H18 (ASTM A289 - class C). Struktura wejściowa (a) i po wpływie obciążenia zmęczeniowego (b)

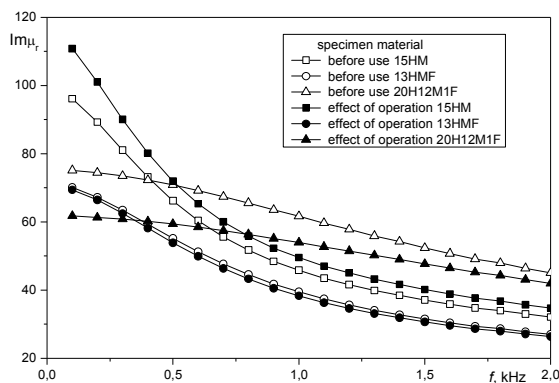
Wzrost pasm poślizgu zmienia głównie przewodność elektryczną, a także niestabilną czasowo część relaksacyjną zmian przenikalności magnetycznej. Z innych efektów procesu degradacji można wskazać wzrost tłumienia fali ultradźwiękowej (efekt wykorzystywany w energetyce).

2. Wpływ eksploatacji na zmiany parametrów magnetycznych stali (energetyka ciepła)

Charakter obciążenia materiału wpływa na ilościowy i jakościowy obraz zmian parametrów magnetycznych. Porównano stale wejściowe i po eksploatacji w energetyce „węglowej” [18, 19, 20]. Już w pierwszych porównaniach stali 13HMF, 15HM oraz 20H12M1F (rys. 4, 5) obserwujemy istotne zmiany przenikalności magnetycznej pomiędzy stanem początkowym i po eksploatacji. Należy dodać, że energetyka dysponowała i udostępniła do badań materiał magazynowy (z budowy instalacji), co jest rzadkością w tego typu porównaniach.



Rys. 4. Przebiegi zmian przenikalności magnetycznej czynnej w funkcji gatunku materiału i częstotliwości pola magnetycznego

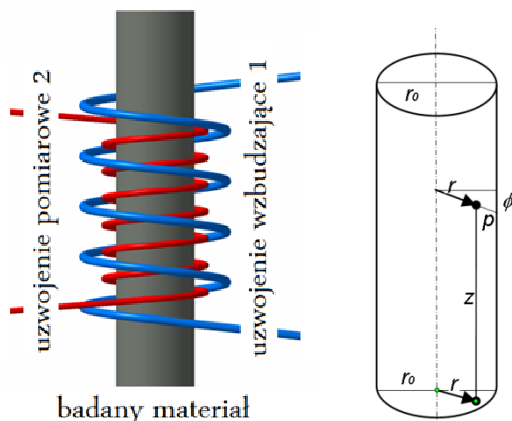


Rys. 5. Przebiegi zmian przenikalności magnetycznej urojonej w funkcji gatunku materiału i częstotliwości pola magnetycznego

Znaczące zmiany parametru przenikalności magnetycznej czynnej i biernej związane z eksploatacją zaobserwowano dla stali 15HM oraz 20H12M1F. W stali 13HMF nie wykryto istotnych eksploatacyjnych zmian paramentów magnetycznych, co wskazuje na fakt znacznego zróżnicowania reakcji materiału, potwierdzony wielokrotnie.

3. Głębokość wnikania pola magnetycznego i prądów wirowych w próbkę walcową

W próbce (rys. 6) poddanej działaniu zmiennego pola magnetycznego rozkład pola magnetycznego i prądów wirowych zmienia się wraz z głębokością [5, 6, 9, 17-19].



Rys. 6. Próbkę cylindryczną w podłużnym polu magnetycznym uzwojenia wzbudzającego

Teoretycznym punktem wyjścia do obliczeń rozkładu pola magnetycznego w próbce cylindrycznej są równania Maxwella:

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\mu_r \mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \quad (1.1)$$

$$\text{rot } \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{j} = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \gamma \vec{E}, \quad (1.2)$$

W materiałach przewodzących można pominąć wpływ prądów dielektrycznych, zatem równania (1.1) i (1.2) można zapisać:

$$\text{rot } \vec{E} = -\mu_r \mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \quad (1.3)$$

$$\text{rot } \vec{H} = \gamma \vec{E}. \quad (1.4)$$

We wnętrzu jednorodnej próbki, gdzie nie występują swobodne ładunki elektryczne, druga para równań Maxwella ma postać:

$$\text{div } \vec{E} = 0, \quad \text{div } \vec{H} = 0. \quad (1.5)$$

Po obliczeniu rotacji obu stron równania (1.4) otrzymujemy:

$$\text{rot rot } \vec{H} = \text{rot}(\gamma \vec{E}) = \gamma \text{rot } \vec{E}. \quad (1.6)$$

Z analizy wektorowej mamy:

$$\begin{aligned} \text{rot rot } \vec{H} &= \text{grad div } \vec{H} - \text{div grad } \vec{H} = \\ &= \text{grad div } \vec{H} - \Delta \vec{H}. \end{aligned} \quad (1.7)$$

Z porównania wzorów (1.6) i (1.7) otrzymamy związek:

$$\Delta \vec{H} = -\gamma \text{rot } \vec{E}. \quad (1.8)$$

gdzie $\Delta = \text{div grad}$ jest operatorem Laplace'a.

Wyznaczony rozkład natężenia pola wewnątrz próbki opisany jest zależnością:

$$\begin{aligned} \vec{H}(r, t) &= \vec{H}_0 \frac{J_0(kr)}{J_0(kr_0)} e^{i\omega t} = \\ &= \vec{H}_0(t) \frac{J_0(kr)}{J_0(kr_0)}. \end{aligned} \quad (1.9)$$

gdzie J_0 jest funkcją Bessela pierwszego rzędu rzędu 0. Parametr k jest liczbą urojoną zależną od częstotliwości pola wzbudzającego. Wynika z tego, że $J_0(kr_0)$ jest również funkcją zmiennej zespolonej, której moduł i argument przy stałej wartości k są zależne od r . Amplituda i faza natężenia pola magnetycznego są zatem funkcją odległości r od osi próbki. Dla bardzo małych częstotliwości ($kr \ll 1$), funkcje $J_0(kr) \approx 1$ i $J_0(kr_0) \approx 1$, więc otrzymujemy:

$$\vec{H}(r) = \vec{H}_0 \quad (1.10)$$

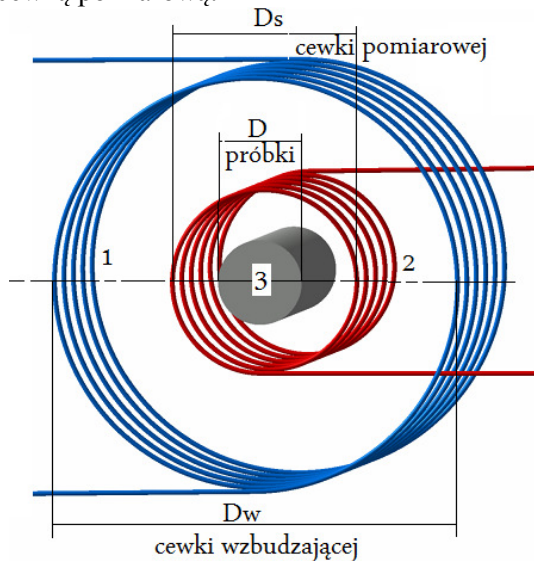
czyli przy niskich częstotliwościach natężenie pola magnetycznego w całym przekroju próbki i na jej powierzchni jest jednakowe i równe natężeniu pola magnetycznego cewki pustej.

Na podstawie zmian przenikalności magnetycznej możemy analizować procesy mechaniczne i termiczne, zachodzące podczas eksploatacji w materiale elementu. Najprostszym pośrednim sposobem badania zmian przenikalności ma-

gnetycznej materiału jest pomiar zmian impedancji cewki otwartej (w NDT nazywanej przelotową), w której umieszczamy badaną próbkę.

4. Unormowane składowe impedancji

W kontroli próbki prętowej metodą indukcyjną częste zastosowanie znajduje cewka z dwoma uzwojeniami [5, 6], przedstawiona na rysunku 7. Często cewka magnesująca jest również cewką pomiarową.



Rys. 7. Zasada pomiaru [5, 6]

Natężenie pola magnetycznego \vec{H}_0 wytwarzane przez cewkę wzbudzającą o średnicy D_w jest stałe na przenikalności zewnętrznej rdzenia próbki $B_\theta = \mu \mu_0 H_\theta$. Natężenie pola magnetycznego w rdzeniu maleje w kierunku osi próbki wskutek oddziaływania prądów wirowych. Wraz ze zmianą natężenia pola zmienia się indukcja magnetyczna $\vec{B}(r)$ wewnątrz próbki.

$$\vec{B}(r) = \mu_r \mu_0 \vec{H}(r). \quad (1.11)$$

Zmienność natężenia pola magnetycznego w rdzeniu uwzględniamy poprzez dodatkową przenikalność magnetyczną względną zespoloną $\underline{\mu}_{sk}$

$$\vec{H}(r) = \underline{\mu}_{sk} \vec{H}_0 \quad (1.12)$$

$$\vec{B}_0 = const = \mu_r \mu_0 \underline{\mu}_{sk} \vec{H}_0. \quad (1.13)$$

Bazując na równaniu (1.9) wylicza się:

$$\underline{\mu}_{sk} = \frac{2 J_1(kr_0)}{kr_0 J_0(kr_0)}, \quad (1.14)$$

gdzie J_1 jest funkcją Bessela pierwszego rzędu. Przenikalność skuteczna $\underline{\mu}_{sk}$ za-

leży zatem od średnicy rdzenia próbki $D=2r_0$, przewodności elektrycznej właściwej γ i przenikalności magnetycznej względnej μ_r materiału próbki oraz od częstotliwości f pola wzbudzającego.

Napięcie indukowane w uzwojeniu wzbudzającym zmienia się po włożeniu próbki tak samo jak impedancja uzwojenia wzbudzającego.

Ponieważ $\underline{E}_0 = iE_0$ oraz $\underline{Z}_0 = i\omega L_0$, więc:

$$\frac{\underline{E}}{E_0} = \frac{\underline{Z}}{\omega L_0} = i(1 - \eta + \eta \mu_r \underline{\mu}_{sk}), \quad (1.15)$$

z czego wynikają następujące zależności dla unormowanych składowych impedancji [5, 6]:

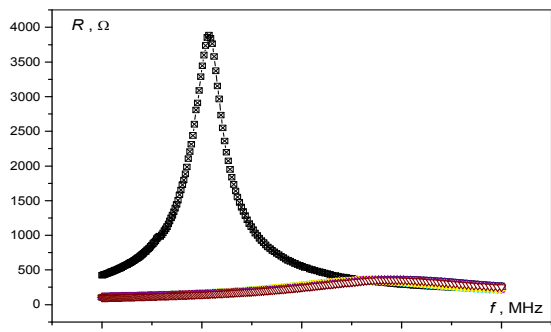
$$\frac{\text{Re } E}{E_0} = \frac{R}{\omega L_0} = \eta \mu_r (-\text{Im } \underline{\mu}_{sk}), \quad (1.16)$$

$$\frac{\text{Im } E}{E_0} = \frac{\omega L}{\omega L_0} = 1 - \eta + \eta \mu_r (\text{Re } \underline{\mu}_{sk}). \quad (1.17)$$

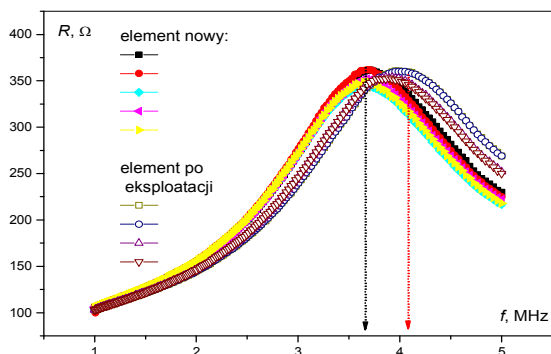
W badaniach nieniszczących, aby pominąć kolejne straty sygnału od sprzężenia pracujemy z obwodem, w którym cewka zasilająca jest jednocześnie pomiarową.

5. Diagnostowanie metodą spektroskopii impedancji i rezonansu cewki pomiarowej

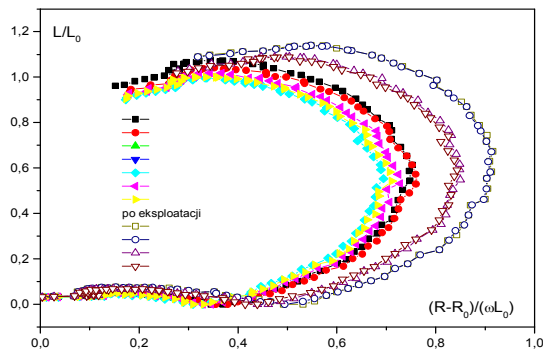
Ocena zmian parametrów fizycznych metali i ich stopów jest często wykorzystywana w diagnostyce technicznej w zakresie wykrywania rozwoju zmian degradacyjnych w tych materiałach. Przykładem takiego diagnostowania może być ocena stanu degradacji zmęczeniowej paramagnetycznej stali kołpaka wirnika generatora. Stabilność paramagnetycznej stali G18H18 (ASTM A289 class C) ulega zmianie wraz z postępem czasu eksploatacji. Wzrost pasm poślizgu zmniejsza przewodność elektryczną właściwą materiału, a tym samym zmienia impedancję cewki pomiarowej i jej parametry rezonansowe. Zmiany przenikalności magnetycznej są mniej znaczące. Na rysunku 8 pokazano krzywe rezonansowe dla cewki pustej i cewki przyłożonej do powierzchni zewnętrznej kołpaka. Na rysunku 9 przedstawiono szczegół z rysunku 8 przedstawiający zmianę rezonansu cewki dla materiału nowego i po eksploatacji.



Rys. 8. Parametry rezonansowe cewki pomiarowej pustej (z lewej) i z materiałem badanym



Rys. 9. Zmiana parametrów rezonansu cewki z materiałem magazynowym (nowym) i po eksploatacji

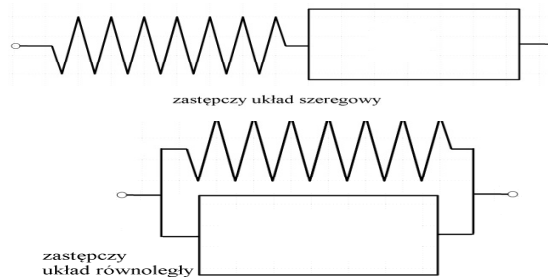


Rys. 10. Zmiana przebiegu unormowanych składowych impedancji w wyniku eksploatacji w wyższych zakresach częstotliwości powyżej 3MHz

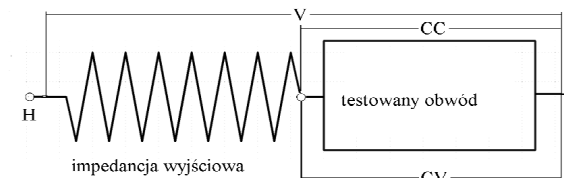
6. Uproszczona metodyka badań

Mostki pomiarowe RLC są produkowane w wielu grupach i klasach. Z punktu widzenia niniejszego opracowania skupiono się na dwóch grupach mostków RLC. W pierwszej uwzględniono mostki profesjonalne o szerokim zakresie regulacji częstotliwości, napięcia zasilania i prądu pomiarowego z automatyką pomiaru i zapisów. W drugiej grupie znajdują się mostki z jednym poziomem napięcia i prądu testowania oraz ograniczonym zakresem częstotliwości pomiaru, najczęściej w przedziale 100 Hz,

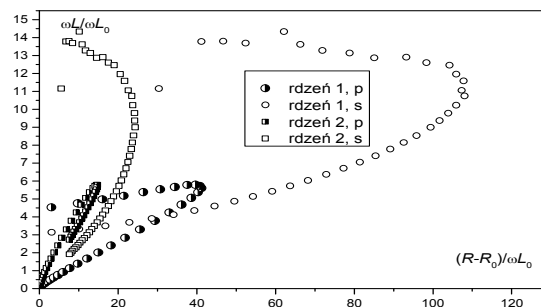
120 Hz, 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz. Podstawowe układy pracy pokazano na rysunku 11. Układy zastępcze równoległe mają zastosowanie do pomiarów elementów o dużej impedancji, a szeregowe - o małej impedancji w celu ograniczenia strat mocy i błędów. Cewki do pomiarów diagnostycznych mają impedancję w zakresie od 0,5 Ω do 5 Ω, dlatego stosujemy pomiar szeregowy parametrów L_s , R_s . Przykład obwodu pomiarowego pokazano na rysunku 11. Zastosowanie cewek pomiarowych w niewłaściwej konfiguracji szeregowej czy równoległej mostka, a także zmiana konfiguracji mostka podczas pracy może prowadzić do znacznych błędów [17-19]. Taki przypadek ilustruje wynik pomiaru cewką próbek ferromagnetycznych podłączonych w zastępczy układ pomiarowy szeregowy (R_s , L_s) lub równoległy (R_p , L_p). Wyniki pomiarów pokazano na rysunku 13.



Rys. 11. Podstawowe zastępcze szeregowe i równoległe układy pracy mostka RLC



Rys. 12. Rozkład sygnałów pomiarowych przy gniazdkach rozwartych V przy stałym poziomie napięcia CV i przy stałej wartości prądu CC



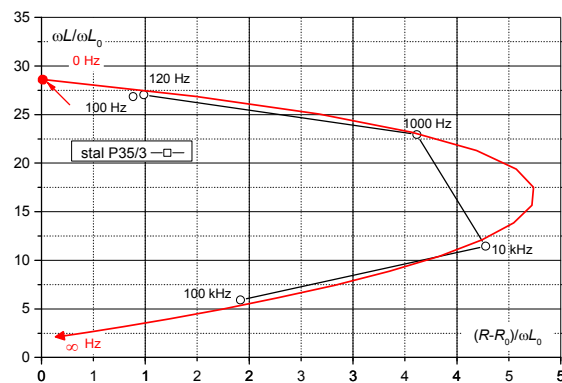
Rys. 13. Porównanie wyników pomiaru unormowanych składowych impedancji dwóch rdzeni ferromagnetycznych w układzie szeregowym - s i równoległym - p

Przebiegi zamieszczone na rysunku 13 są znacznie zróżnicowane ze względu na parametry cewek i sposób realizacji pomiaru – szeregowy lub równoległy.

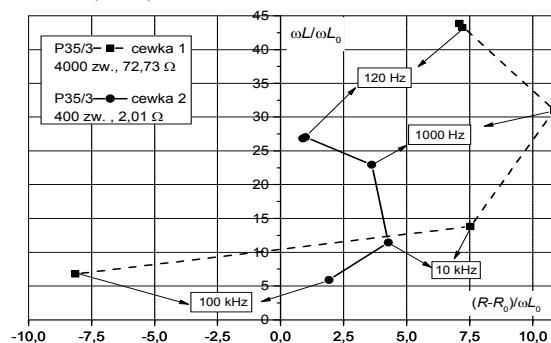
6.1. Pomiary mostkiem RLC

W mostkach RLC o uproszczonej konstrukcji jest ustalona liczba zakresów częstotliwości od czterech do pięciu, jeden zakres prądu oraz jeden zakres napięcia. Przełączanie zakresów pomiarowych w obwód szeregowy lub równoległy, zmiana parametru mierzonego i zakresu częstotliwości odbywa się ręcznie. W celu wykazania wysokiego stopnia czułości i rozdzielczości pomiarowej podstawowego miernika RLC wykonano pomiary porównawcze dla różnych parametrów cewek. Materiałem mierzonym była stal węglowa stosowana w transporcie do budowy zestawów kołowych. Na rysunku 14 przedstawiono wynik pomiaru zmian unormowanych składowych impedancji przeprowadzonego miernikiem RLC mającym jedynie 5 zakresów częstotliwości. Odpowiedni dobór liczby zwojów i rezystancji cewki zbliża pomiar do 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. Na rysunku 14 pokazano wyniki dla zakresów częstotliwości miernika RLC: 100 Hz, 120 Hz, 1 kHz, 10 kHz i 100 kHz. Zbieżność pomiaru mostkiem RLC (5 punktów) 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 15 zamieszczono wyniki pomiaru próbek ze stali węglowej tym samym mostkiem, w tej samej konfiguracji, lecz przy zastosowaniu dwóch różnych cewek pomiarowych różniących się liczbą zwojów, wartością rezystancji i impedancji. W obu przypadkach, w zastosowanych zakresach częstotliwości pomiarowej obserwuje się zmienione przebiegi krzywych od wpływu udziału rezystancji cewki. Wysoka rezystancja zmienia głównie wartości koordynat punktów unormowanych składowych impedancji. W zastosowaniach porównawczych strukturoskopowych obie cewki są użyteczne, ze wskazaniem na cewkę o podwyższonej rezystancji uzwojenia.



Rys. 14. Porównanie przebiegu pomierzonego z teoretycznym



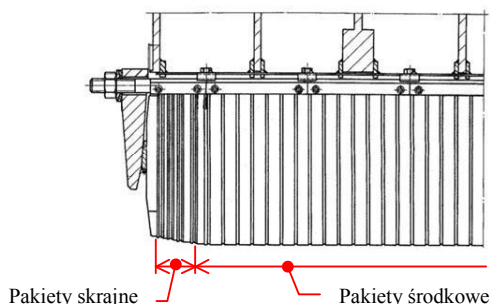
Rys. 15. Porównanie pomiarów próbki stalowej dla dwóch konstrukcji cewek pomiarowych

Zbyt wysoka rezystancja cewki uniemożliwia pomiar. Wartość rezystancji powinna być dobrana ze względu na parametry elektryczne i magnetyczne materiału oraz częstotliwość graniczną. Zakres parametrów cewek podany na rysunku 15 jest właściwy dla stali ferromagnetycznych.

7. Badania stanu blach krzemowych rdzenia stojana generatora

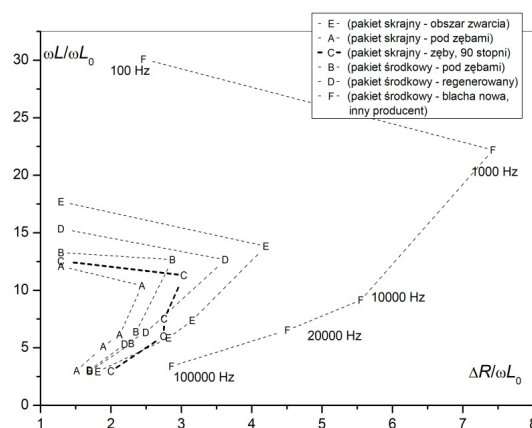
Przydatność prezentowanej metody diagnostycznej potwierdzono w badaniach parametrycznych zmian blach rdzenia stojana turbogeneratora [21-25]. Pakiety skrajne blach rdzenia stojana generatora należą do elementów strefy skrajnej generatora, na które oddziałuje pole magnetyczne rozproszenia wytwarzane przez 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. Najbardziej niekorzystne efekty tego zjawiska występują w warunkach pracy generatora z niedowzbudzeniem, przy obciążeniu pojemnościowym i prądzie twornika zbl-

żonym do znamionowego. W generatorach dużych mocy stosowanych jest wiele metod ograniczających skutki tego zjawiska, jednak pomimo tego przegrzewanie się pakietów skrajnych jest przyczyną licznych awarii i uszkodzeń generatorów. Na rysunku 16 pokazano przykładowy widok pakietów skrajnych rdzenia stojana, z których pobierano próbki. Poniżej zamieszczono schemat lokalizacji pakietów w stojanie [1, 18, 21, 23].



Rys. 16. Widok pakietów skrajnych rdzenia stojana generatora i schemat ich lokalizacji

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. Z przeprowadzonych pomiarów parametrów Z , R , L cewki pomiarowej wyznaczono unormowane składowe impedancje (czynne i urojone) dla częstotliwości 100 Hz, 1000 Hz, 10 000 Hz, 20 000 Hz i 100 000 Hz (rys. 17). Krzywe unormowanych składowych impedancji wyznaczone w pięciu podzakresach częstotliwości charakteryzują względne zmiany parametrów przenikalności magnetycznej względnej i przewodności elektrycznej właściwej materiału. Istotne zmiany parametryczne po okresie eksploatacji wykazują próbki blachy pakietu skrajnego pobrane z miejsca zwarcia „E” oraz próbki blachy po regeneracji „D”.

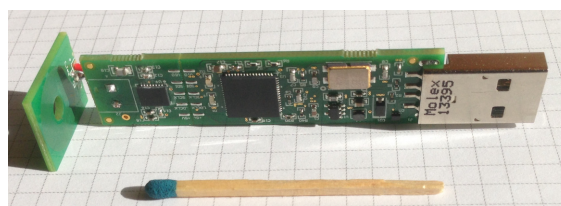


Rys. 17. Wykresy unormowanych składowych impedancji blach elektrotechnicznych dla wybranych częstotliwości

Pomiary potwierdziły zajście istotnych zmian parametrów fizycznych w blachach pakietów skrajnych eksploatowanych w trudniejszych warunkach obciążeń cieplnych w porównaniu do blach pakietów środkowych rdzenia stojana.

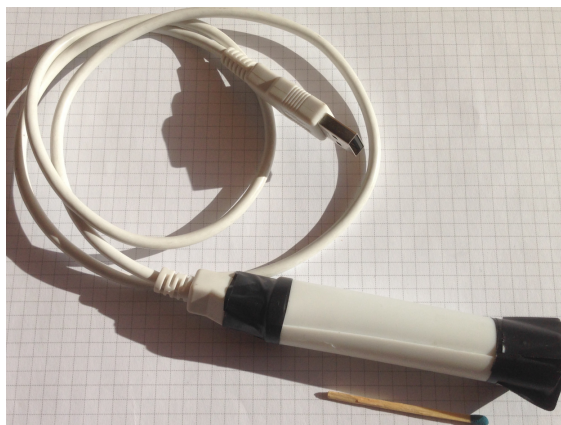
8. Przetwornik pomiarowy na bazie modułu Texas Instruments

Znakomite usprawnienie badań umożliwia zastosowanie modułu pomiarowego Texas Instruments pokazanego na rysunku 18. Moduł ten wraz z ogólną metodyką opisaną przez Dariusza Barona (EthosEnergy Poland S.A., dawniej TurboCare Poland S.A.) w przygotowywanej pracy doktorskiej, umożliwił wykonanie testera (sondy detekcyjnej) eksploatacyjnej degradacji zmęczeniowej materiału, o gabarycie zbliżonym do wymiaru pisaka (rys. 18, 19).



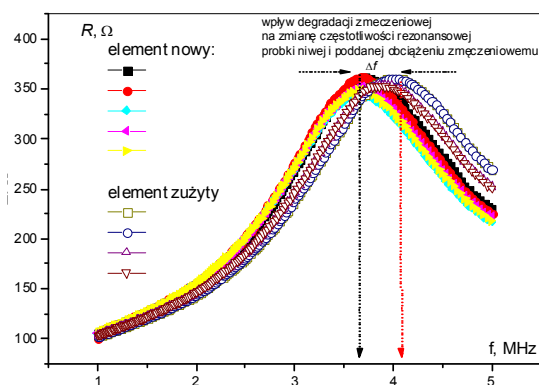
Rys. 18. Moduł pomiarowy z modyfikowaną cewką

Urządzenie (rys. 19) posiada możliwości pomiarowe zbliżone do mostka RLC. Prototypowa sonda została zastosowana do badań nieniszczących kołpaków wirników turbogeneratorów. Możliwości pomiarowe procesu eksploatacyjnej degradacji kołpaka wiążą się głównie ze zmianą przewodności elektrycznej właściwej.



Rys. 19. Prototyp sondy detekcyjnej

Wyniki pełnozakresowego pomiaru zmian parametrów materiału powierzchni kołpaka wykonanego precyzyjnym mostkiem pomiarowym HIOKI pokazano na rysunku 20. Zakres częstotliwości podyktowany był konstrukcją cewki sondy detekcyjnej.



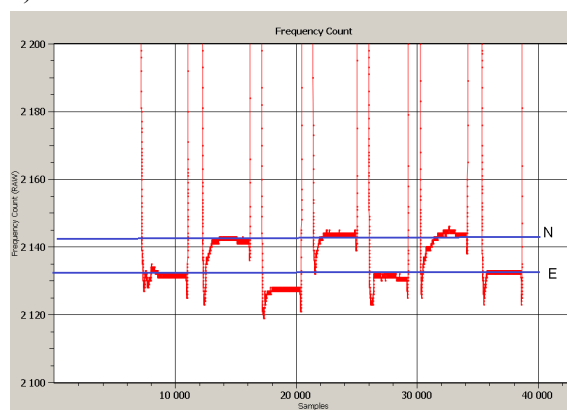
Rys. 20. Zmiany impedancji i rezonansu badanych próbek materiału kołpaka

Widoczne zmiany impedancji i pasm rezonansowych są jednym z wyznaczników oceny stanu wyeksploatowania materiału kołpaka.

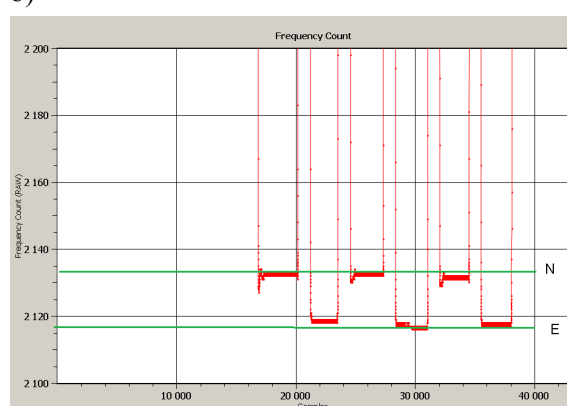
Pomiar wykonany sondą detekcyjną (rys.19) przedstawia zmiany amplitudy składowej R impedancji cewki Z, jak pokazano na rysunku 20. Na rysunku 21 podano wynik pomiaru częstotliwości rezonansowej układu pomiarowego sondy detekcyjnej w miejscu kontaktu z powierzchnią kołpaka.

Prezentowana sonda umożliwia badanie degradacji zmęczeniowej stali (wszystkich gatunków, zarówno ferromagnetycznych jak i paramagnetycznych) i jest prostą i taną metodą badawczą stopnia wyeksploatowania ich struktury materiałowej. Posiada uniwersalne możliwości, które mogą być szeroko wykorzystywane w przemyśle. Posiada wszelkie zalety, by mogła być powszechnie stosowana w praktyce.

a)



b)



Rys. 21. Pomiar zmian rezonansu sondy detekcyjnej dla serii pomiarów (a) - powierzchni zewnętrznej kołpaka (b) - powierzchni czołowej równoległej do osi N - kołpak nowy, E - kołpak eksploatowany

9. Literatura

- [1]. Baron D., Żurek Z.H.: Spektroskopia impedancji – metoda oceny stopnia wyeksploatowania kołpaków wirników generatorów. Przegląd Elektrotechniczny, nr 3/2014, s. 255-259.
- [2]. Bozorth R.: Ferromagnetism. The Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE Magnetism Society, Sponsor, Inc., New York 1936, An IEEE Press Classic Reissue, Magnetic Society, 1993, 2001.
- [3]. Brailsford F.: Materiały magnetyczne. PWN, Warszawa 1964.
- [4]. Dietrich L., Rutecka A., Kowalewski Z.: Mechanical characterization – Fatigue and Creep of A356+TiB₂ based MMC. IPPT Report 2009 for INASMET w San Sebastian, Hiszpania.
- [5]. Förster F.: Theoretische und experimentelle Ergebnisse des magnetischen Streuflusverfahrens. Materialprüfung, 23, 1981, pp. 371-378.
- [6]. Heptner H., Stroppe H.: Magnetische und Magnetoinduktive Werkstoffprüfung, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1969 1972.

- [7]. Janeczek T.: Diagnostyka eksploatacyjna kolejowych zestawów kołowych metodą magnetyczną. Politechnika Śląska, Wydział Transportu, Katowice 2009 (rozprawa doktorska).
- [8]. Kocańda S.: Zmęczeniowe niszczenie metali. WNT, Warszawa 1978.
- [9]. Krakowski M.: Elektrotechnika teoretyczna. PWN, Warszawa 1983.
- [10]. Kurzydłowski K.J.: Metody monitorowania degradacji struktury materiałów. Badania mechanicznych właściwości materiałów i konstrukcji. Wykłady, Zakopane 10-13 grudnia 2003, IPPT, Warszawa 2003.
- [11]. Markuszewicz M., Mierzejewski A.: Materiały magnetyczne. Wydawnictwo Górniczo-Hutnicze, Katowice 1954.
- [12]. Rasek J.: Materiały amorficzne i ich właściwości. W kręgu krystalografii i nauki o materiałach. Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice 2002, s. 207-245.
- [13]. Sikora R.: Elektromagnetyczne metody testowania materii. Instytut Naukowo-Badawczy Z Turrek, Warszawa 2003.
- [14]. Socha G.: Experimental investigation of fatigue cracks nucleation, growth and coalescence in structural steel. *Int. J. Fatigue*, 25, 2003, pp. 139-147.
- [15]. Starke P., Walther F., Eifler D.: PHYBAL - A new method for lifetime prediction based on strain, temperature and electrical measurements. *International Journal of Fatigue* 28 (9), 2006, pp. 1028-1036.
- [16]. Żurek Z.H.: Badanie stanu ferromagnetyków w polu magnetycznym dla diagnostyki technicznej, ELEKTRYKA. Prace Naukowe 1(6), Politechnika Radomska, Radom 2003, VI Konferencja Systemy TRANSCOMP, Zakopane, 4-6.12.2003.
- [17]. Żurek Z.H.: Wprowadzenie do elektromagnetycznej diagnostyki degradacji stali. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012.
- [18]. Żurek Z.H., Duka P.: Obwody RLC w diagnostyce i eksploatacji maszyn. Adres wydawniczy: Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2014, PL ISBN 978-83-788-253-2
- [19]. Żurek Z.H., Duka P.: RLC circuits for material testing and NDT. Adres wydawniczy: Katowice 2015, KOMEL, PL ISBN 978-83-931-909-8-
- [20]. Żurek Z.H., Janeczek T., Maciejewski J.: Steel Magnetic Parameters as Material Fatigue Diagnostics Criterion. *NDT.net*, Issue 2009-03, pp. 251-257.
- [21]. Żurek Z.H., Baron D.: Measurement of changes of magnetic permeability and electric conductivity values in generator rotor retaining rings, *Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław 2012, pp. 183-188.
- [22]. Żurek Z.H., Baron D.: Pomiar zmian wartości przenikalności magnetycznej i przewodności elektrycznej właściwej kołpaków generatorów. XLVIII Sympozjum SME, Książ 2012.
- [23]. Żurek Z.H., Baron D.: Niestabilność eksploatacyjna parametrów magnetycznych i elektrycznych blach rdzenia stojana generatora TWW-200-2A. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2014 R. 90 nr 1, s. 221-223
- [24]. Żurek Z.H., Baron D.: Diagnostyka maszyn w transporcie i energetyce metodą spektroskopii impedancji. *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe* 2013 nr 100, cz. 1, s. 195-198.
- [25]. Żurek Z.H., Kurzydłowski J. K., Kukła D., Baron D. Material edge conditions of electromagnetic silicon steel sheets. *Przegląd Elektrotechniczny* 2013 R. 89 nr 2b, s. 112-115

Autorzy

dr hab. inż. Zbigniew Hilary Żurek
Profesor Politechniki Śląskiej
Politechnika Śląska, Wydział Transportu,
Katedra Budowy Pojazdów
e-mail: zbigniew.zurek@polsl.pl

mgr inż. Dariusz Baron
EthosEnergy Poland S.A., Lubliniec
e-mail: dariusz.baron@turbocare.pl