

# Badania wstępne wpływu obciążeń rozciągających na parametry obwodu RLC

Preliminary studies on impact of tensile loads on the parameters of the RLC circuit

## Streszczenie

Dla większości sygnałów diagnostycznych występuje problem występowania tych samych wartości mierzonego sygnału w różnych fazach eksploatacji obiektu. Metoda MPTLC jest propozycją sposobu rozwiązyującego ten problem. Opis postępu degradacji przy pomocy parametrów obwodu RLC w przestrzeni trójwymiarowej, wyklucza nakładanie tych samych wartości sygnału mierzonego dla różnych stanów. Przeprowadzone badania potwierdziły wpływ naprężeń na parametry obwodu RLC w którym rdzeniem uzwojenia pomiarowego jest obciążana próbka, jednakże zagadnienie powtarzalności wyników badań wymaga dalszych prac weryfikujących wpływ stanu początkowego próbek oraz parametrów uzwojenia na otrzymane wyniki pomiarów.

**Słowa kluczowe:** metoda MPTLC, obwody RLC, nieniszczące badania magnetyczne

## Abstract

For most diagnostic signals there is a problem of obtaining the same measured values for different states of operation of the investigated object. The MPTLC method is a proposal of a solution of this problem. Description of the progress of the degradation of the object with the RLC circuit parameters in 3D space prevents the repetition of the same measured signal values for the different states. Carried out studies proved the impact of stress on the parameters of RLC circuit in which the measuring winding core was sample under load, however, the problem of reproducibility of test results requires further work for verifying the impact of the initial state of samples and winding parameters on the results of measurements.

**Keywords:** MPTLC method, RLC circuits, non-destructive magnetic testing

## Wstęp i cel badań

Diagnostyka elementów wykonanych z materiałów ferromagnetycznych, ze względu na ich właściwości fizyczne uzasadnia wykorzystanie metod magnetycznych lub magnetoindukcyjnych. W Instytucie Maszyn i Urządzeń Energetycznych od kilkunastu lat prowadzone są badania związane z tą tematyką [1,2]. Stan wytężenia i stan zaawansowania różnorodnych procesów zużycia wpływają m.in. na parametry elektromagnetyczne tworzyw, dając w ten sposób możliwość identyfikacji tych stanów na podstawie pomiarów wielkości magnetycznych i elektrycznych. Dla większości sygnałów diagnostycznych istnieje problem występowania tych samych wartości sygnału mierzonego dla różnych, często krańcowo odmiennych stanów, dlatego diagnozowanie każdego elementu stalowego (o innym składzie chemicznym) powinno być poprzedzone badaniami wstępnymi. Badania wstępne mają na celu określenie podstawowych charakterystyk magnetoelastycznych określających związek naprężeń z „homogeniczną” wartością przenikalności magnetycznej. O możliwości stosowania badań magnetycznych decyduje czułość magnetoelastyczna  $d$  stali. Zmiany

magnetyzacji  $J$  lub indukcji magnetycznej  $B$  od naprężeń  $\sigma$  są równoważne zmianom odkształceń magnetostrykcyjnych  $\lambda = \Delta l / l$  od zmian natężenia pola magnetycznego  $H$ . Związki te definiują „czułość piezomagnetyczną”  $d$  materiału. Zależnie od znaku magnetostrykcji, kierunek działania sił może zmniejszać lub zwiększać magnetyzację. Odwracalne zmiany magnetoelastyczne występują w ograniczonym zakresie we wszystkich materiałach spolaryzowanych magnetycznie, wykazujących magnetostrykcję. Złożone przeliczenia termodynamiczne sprowadzają się do wykazania tożsamości prostej:  $d \equiv \lambda$ . Czułość magnetoelastyczna zależy głównie od składu chemicznego. Wpływ zanieczyszczeń jest istotny. Dla żelaza technicznego o zanieczyszczeniach w przedziale od 0,3 do 0,4% współczynnik magnetostrykcji wzrasta ( $5,31 \cdot 10^{-6}$ ). Pierwiastki stopowe krzemu i węgla istotnie wpływają na współczynnik magnetostrykcji. Dla zawartości krzemu od 2 do 8% dla osi krystalograficznych współczynnik magnetostrykcji zmienia się od  $27 \cdot 10^{-6}$  do  $-9 \cdot 10^{-6}$ . Obróbka cieplna, obróbka plastyczna, temperatura materiału także zmienia wartość współczynnika magnetostrykcji. Kolejnym

Mgr inż. Krzysztof Fryczowski, dr hab. inż. Maciej Roskosz, dr hab. inż. Zbigniew H. Żurek – Politechnika Śląska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: krzysztof.fryczowski@polsl.pl

istotnym zagadnieniem badań magnetycznych jest nieliniowość mierzonych parametrów elektrycznych i magnetycznych w funkcji postępu czasu eksploatacji. Także i tutaj istnieje problem występowania tych samych wartości diagnostycznych w różnych fazach eksploatacji. Jeden ze sposobów rozwiązania tego problemu proponują Żurek i Duka [3] opisując metodykę badań MPTLC (*Multi Parameter Time Live Calculation*). Polega ona na pomiarze indukcyjności  $L$  i rezystancji  $R$  w układzie szeregowym uzwojenia pomiarowego nawiniętego wokół badanej próbki dla kilku częstotliwości testowych. Opis postępu degradacji w przestrzeni trójwymiarowej  $L/L_0, (R-R_0)/\omega L_0, f$ , wyklucza występowanie (nakładanie) tych samych wartości sygnału mierzzonego dla różnych, często krańcowo odmiennych stanów. W niniejszym artykule zaprezentowano wyniki badań z wykorzystaniem metody MPTLC, mających na celu weryfikację założeń i sprawdzenie przydatności tej metody do oceny poziomu naprężeń czynnych w pręcie ze stali wysokostopowej o złożonej czułości magnetosprężystej.

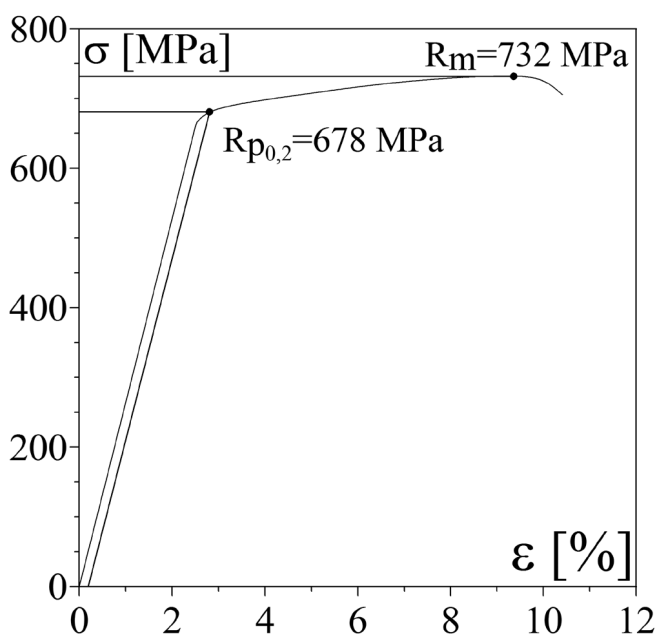
## Szczegóły badań

Badane tworzywo to rdzeń elektrody otulonej BÖHLER FOX NIBAS 70/20. Skład chemiczny badanego tworzywa przedstawiono w tabelicy I.

Tablica I. Skład chemiczny badanego tworzywa [4]  
Table I. The chemical composition of the tested material [4]

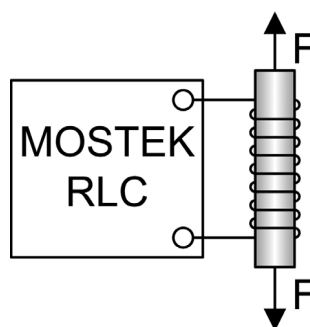
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Ti	Nb	Co	Fe
0,04	0,4	5	19	$\geq 67$	$\leq 1,5$	$\leq 0,5$	2	$\leq 0,08$	3

W celu wyznaczenia własności mechanicznych przeprowadzono statyczną próbę rozciągania stosując się do wytycznych zawartych w [5]. Wykres rozciągania został przedstawiony na rysunku 1.



Rys. 1. Wykres statycznej próby rozciągania badanego tworzywa  
Fig. 1. Stress-strain curve of the tested material

Do pomiarów indukcyjności i rezystancji został wykorzystany mostek do pomiaru impedancji CEM DT-9935. Pozwala na wykonywanie pomiarów rezystancji, indukcyjności i pojemności dla 5 częstotliwości testowych 0,1; 0,12; 1; 10; 100 kHz. Schemat pomiarowy przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat ideowy wykonywania pomiarów  
Fig. 2. Schematic diagram of measurement

Właściwe badania przeprowadzono na próbkach walcowych o średnicy 4 mm i długości 140 mm. Uzwojenie zostało nawinięte na karkasie o średnicy otworu wewnętrznego równej średnicy próbki. Parametry uzwojenia pomiarowego: ilość zwojów  $n=1500$ , grubość drutu nawojowego  $dd=0,28$  mm, długość cewki  $l=15$  mm.

Próbka z nałożonym uzwojeniem była mocowana w szczękach maszyny wytrzymałościowej. Po rozpoczęciu obciążania, próbka znajdowała się cały czas pod obciążeniem - zwiększano tylko siłę tak, by naprężenie rosło o 50 MPa w stosunku do stanu poprzedniego. W przypadku próbki wybranej do analizy dało to 16 stanów pośrednich naprężenia od 0 do 750 MPa.

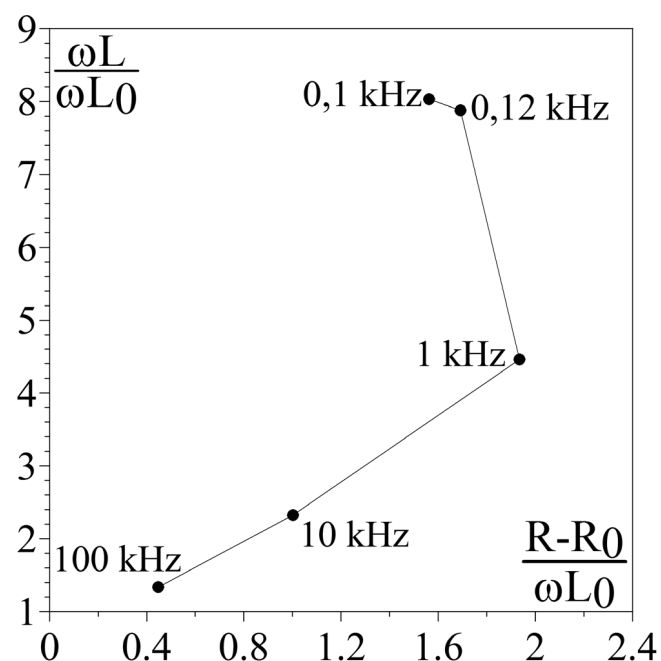
W metodzie MPTLC stan materiału jest opisywany za pomocą trzech parametrów [1]:

- znormalizowana składowa impedancji  $\omega L/\omega L_0$ ,
- znormalizowana składowa impedancji  $(R-R_0)/\omega L_0$ ,
- częstotliwość napięcia testowego  $f$ .

gdzie:

- $\omega = 2\pi f$  - częstość kątowna,
- $L_0$  - indukcyjność cewki bez rdzenia,
- $L$  - indukcyjność cewki z rdzeniem,
- $R_0$  - rezystancja cewki bez rdzenia,
- $R$  - rezystancja cewki z rdzeniem.

Jako wynik otrzymujemy przebieg znormalizowanych składowych impedancji dla wybranych częstotliwości testowych. Przykładowy przebieg dla 5 wybranych częstotliwości testowych napięcia został przedstawiony na rysunku 3.



Rys. 3. Przykładowy przebieg znormalizowanych składowych impedancji  
Fig. 3. An example of the curve of normalized components of the impedance

## Wyniki badań i ich analiza

### Bezpośrednie wyniki badań

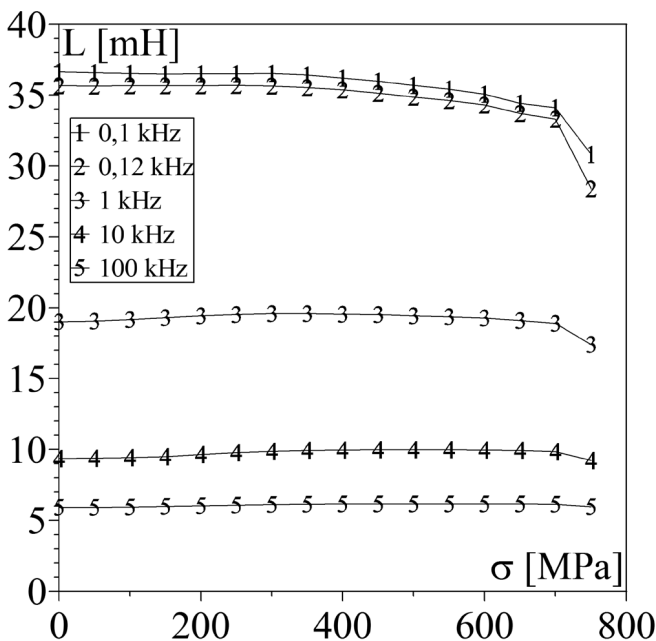
W tabelicy II pokazano wartości indukcyjności  $L_0$  i rezystancji  $R_0$  cewki bez rdzenia.

**Tabelica II.** Wartości indukcyjności  $L_0$  i rezystancji  $R_0$  cewki bez rdzenia

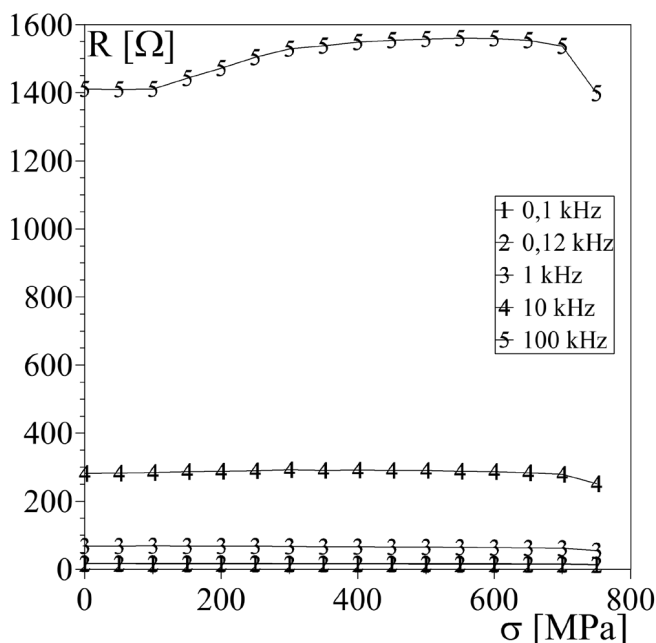
**Table II.** The inductance  $L_0$  and resistance  $R_0$  values of the coil without core

f [kHz]	0,1	0,12	1	10	100
$L_0$ [mH]	4,246	4,226	4,237	4,237	4,592
$R_0$ [ $\Omega$ ]	10,46	10,46	10,487	12,498	245,8

Rozkład zmierzonych wartości indukcyjności  $L$  i rezystancji  $R$  jednej z próbek w funkcji naprężenia  $\sigma$  przedstawiono odpowiednio na rysunkach 4 i 5.



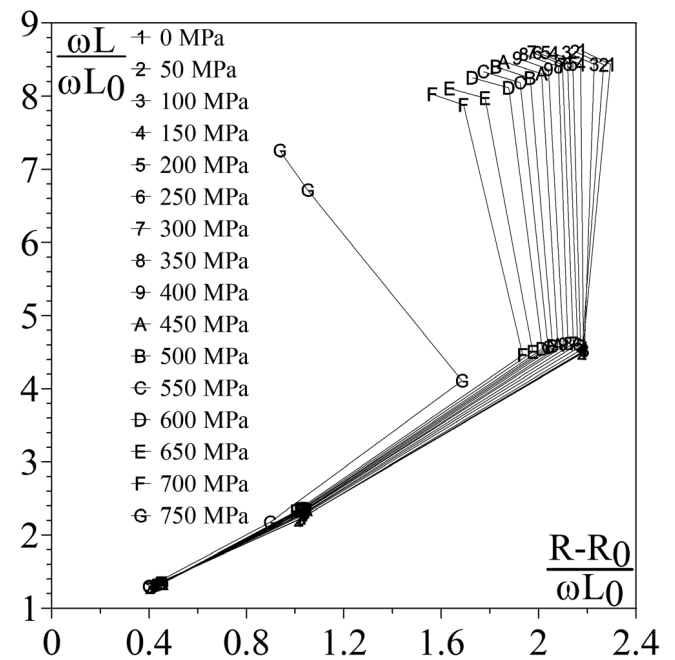
**Rys. 4.** Zmiana indukcyjności  $L$  cewki z próbką w funkcji naprężenia  
**Fig. 4.** Inductance  $L$  value changes as a function of stress



**Rys. 5.** Zmiana rezystancji  $R$  cewki z próbką w funkcji naprężenia  
**Fig. 5.** Resistance  $R$  value changes as a function of stress

### Znormalizowane składowe impedancji

Dla każdego stanu naprężenia opracowano krzywą znormalizowanych składowych impedancji a przykładowy zbiorczy wykres otrzymany dla jednej próbki przedstawiono na rysunku 6



**Rys. 6.** Wykres znormalizowanych składowych impedancji  
**Fig. 6.** Curve of normalized components of the impedance

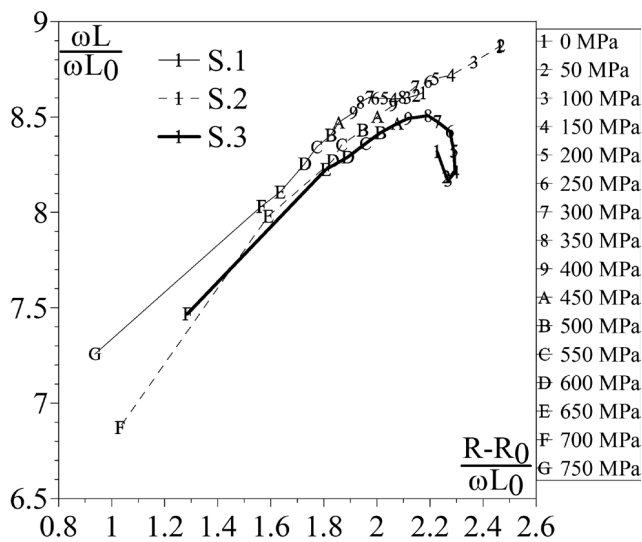
Stwierdzono, że dla najniższych mierzonych częstotliwości 0,1 i 0,12 kHz obserwuje się największe różnice pomiędzy pośrednimi stanami naprężeń. W przypadku obydwu tych częstotliwości do naprężenia 350 MPa (symbol 8) obserwuje się spadek wartości składowej  $(R-R_0)/\omega L_0$ . Dalszy wzrost naprężenia powoduje również spadek składowej  $\omega L/\omega L_0$ . W przypadku częstotliwości 1 kHz do naprężenia 200 MPa wyraźny jest wzrost głównie składowej  $\omega L/\omega L_0$ . Dla wyższych wartości naprężenia obserwuje się spadek obu składowych. Dla częstotliwości 10 i 100 kHz zmiany w wartościach są na tyle małe, że nie można zaobserwować żadnych wyraźnych tendencji zmian do wartości 700 MPa. Krzywa 750 MPa znacząco różni się przebiegiem od stanów wcześniejszych, co również jest dobrze widoczne dla częstotliwości wyższych – 1 i 10 kHz.

### Analiza powtarzalności otrzymywanych wyników

W celu analizy powtarzalności otrzymanych wyników na rysunkach od 7 do 11 dla poszczególnych częstotliwości testowych przedstawiono rozkłady znormalizowanych składowych impedancji dla trzech badanych próbek.

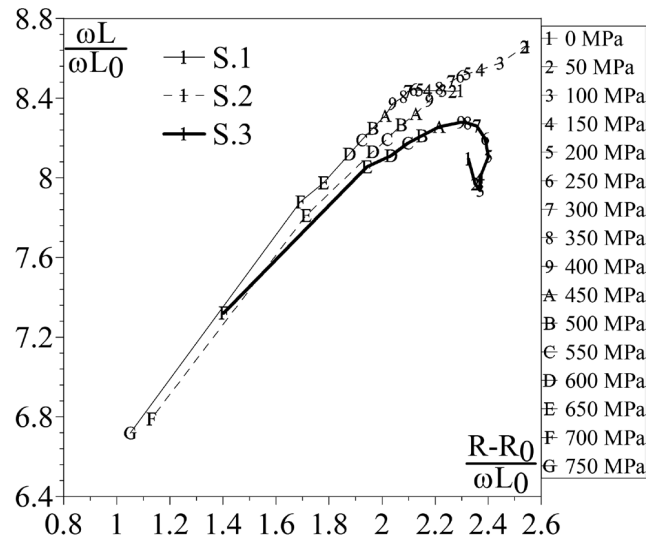
Powtarzalność otrzymanych wyników uzyskano tylko w ograniczonym zakresie naprężeń i tylko w przypadku próbki S.1 i S.2. Żaden z wyników dla próbki S.3 nie pokrywa się z wynikami otrzymanymi dla próbek S.1 i S.2. W przypadku próbek S.1 i S.2 największą powtarzalność wyników pomiarów otrzymano dla częstotliwości testowej 1 kHz (rys. 9) w zakresie naprężeń 450 - 600 MPa. Dla częstotliwości 0,1 kHz (rys. 7) zaobserwowano zbieżność tylko składowej  $\omega L/\omega L_0$  dla naprężenia 550 i 600 MPa. Dla częstotliwości 0,12 kHz (rys. 8) zaobserwowano zbieżność tylko składowej  $\omega L/\omega L_0$  dla zakresu naprężeń 450 - 600 MPa. W pozostałym zakresie naprężeń występują rozbieżności obu składowych.

Występowanie początkowych różnic można tłumaczyć występowaniem różnych naprężeń reszkowych w próbkach, które nie były wyżarzane. Mogło to mieć też wpływ na wyniki pomiarów w całym cyklu obciążania próbki.



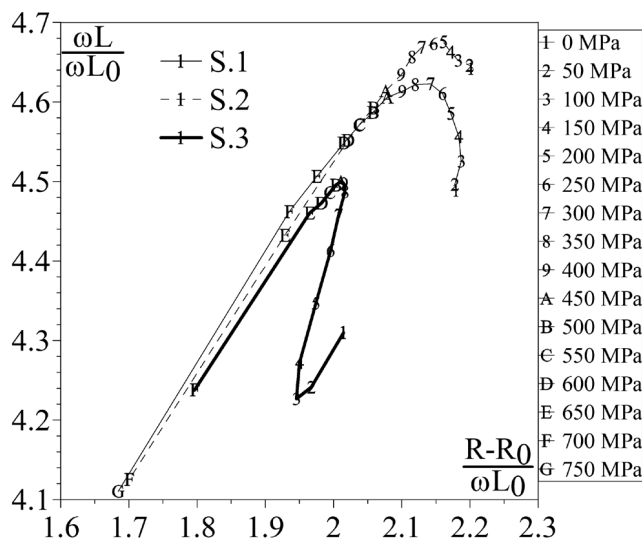
Rys. 7. Rozkład znormalizowany składowych impedancji dla  $f=0,1$  kHz

Fig. 7. Distribution of normalized components of impedance for  $f=0,1$  kHz



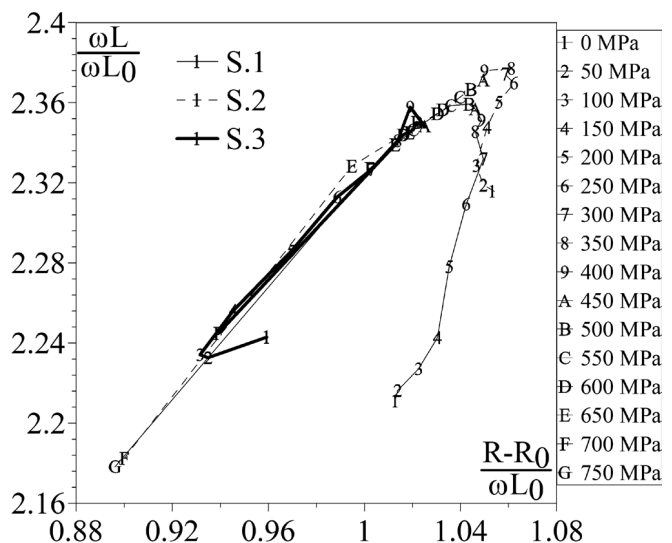
Rys. 8. Rozkład znormalizowany składowych impedancji dla  $f=0,12$  kHz

Fig. 8. Distribution of normalized components of impedance for  $f=0,12$  kHz



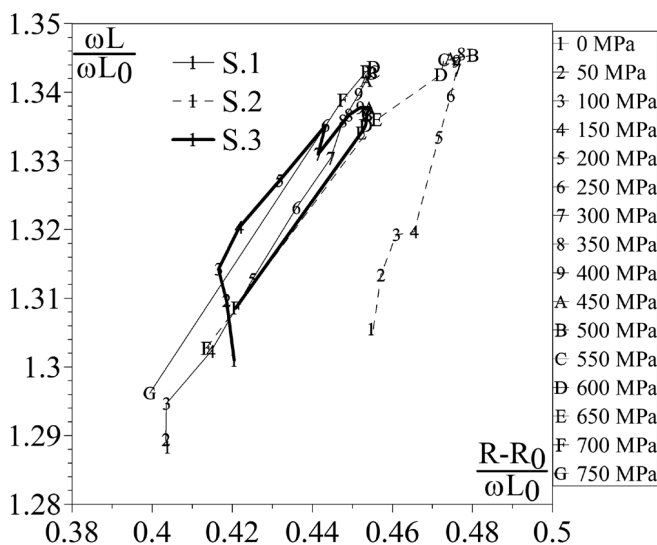
Rys. 9. Rozkład znormalizowany składowych impedancji dla  $f=1$  kHz

Fig. 9. Distribution of normalized components of impedance for  $f=1$  kHz



Rys. 10. Rozkład znormalizowany składowych impedancji dla  $f=10$  kHz

Fig. 10. Distribution of normalized components of impedance for  $f=10$  kHz



Rys. 11. Rozkład znormalizowany składowych impedancji dla  $f=100$  kHz

Fig. 11. Distribution of normalized components of impedance for  $f=100$  kHz

## Wnioski

Stwierdzono, że istnieje wpływ naprężeń na parametry obwodu RLC w którym rdzeniem uzwojenia pomiarowego jest obciążana próbka. Identyfikację stanu naprężeń można prowadzić analizując wszystkie mierzone częstotliwości lub skupiając się na jednej lub dwóch wykazujące największe zmiany znormalizowanych składowych impedancji. Zagadnienie powtarzalności wyników badań wymaga dalszych prac, w których przeprowadzone zostaną badania wpływu stanu początkowego próbek oraz parametrów uzwojenia na otrzymane wyniki pomiarów.

## Podziękowanie

Przedstawione w artykule wyniki zostały uzyskane w badaniach współfinansowanych przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach umowy SP/E/1/67484/10 – Strategiczny Program Badawczy – Zaawansowane technologie pozyskiwania energii: Opracowanie technologii dla wysokosprawnych „zero-emisyjnych” bloków węglowych zintegrowanych z wychwytem CO<sub>2</sub> ze spalin.

## Literatura

- [1] Roskosz M., Fryczowski K.: Porównanie szumu Barkhausena i własnego magnetycznego pola rozproszenia w odkształconych plastycznie próbkach ze stali S235 i P265GH, Przegląd Spawalnictwa, vol. 13, s. 35-40, 2012.
- [2] Roskosz M., Fryczowski K.: Możliwości wykorzystania zmian własności magnetycznych do oceny stanu wyęteżenia stali kotłowych na przykładzie stali P265GH, Energetyka vol. 8, s. 430-435, 2012.
- [3] Żurek Z. H., Duka P.: Obwody RLC w diagnostyce i eksploatacji maszyn, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2014.
- [4] Katalog produktów – Welding Guide firmy BÖHLER Welding, www.bohler-uddeholm.cz/media/Prirucka\_Bohler\_AJ.pdf.
- [5] Norma PN-EN ISO 6892-1:2010 Metale - Próba rozciągania - Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej.



## JACEK SŁANIA PLANY SPAWANIA – TEORIA I PRAKTYKA Wydanie II

1 egzemplarz książki: 90 zł (w tym 5% VAT)

W celu zamówienia książki należy wypełnić formularz i przesłać w formie skanu lub listu wraz z potwierdzeniem zapłaty na adres:

**REDAKCJA – Przegląd Spawalnictwa AW SIMP**  
ul. Świętokrzyska 14a, 00-050 Warszawa  
tel.: 22 827 25 42 | e-mail: redakcja@pspaw.pl

**Wpłaty należy dokonać na rachunek bankowy:**  
Bank BPH S.A. Oddział w Warszawie  
45 1060 0076 0000 3200 0043 1836

**Zamawiam książkę *Plany spawania – teoria i praktyka*  
w Redakcji Przegląd Spawalnictwa w liczbie ..... egz.**

Imię i nazwisko

Firma

Adres

NIP

Kontakt do osoby zamawiającej (e-mail):

Oświadczam, że jestem podatnikiem VAT i upoważniam firmę do wystawienia faktury bez podpisu

Podpis