

## Metody przewidywania temperaturowych zmian impedancji układu grzejnego na podstawie jego charakterystyki częstotliwościowej

**Streszczenie.** Praca zawiera opis metody pozwalającej przewidywać zmianę wraz z temperaturą impedancji zastępczego układu wzbudnik – wsad niemagnetyczny. Metoda wykorzystuje zależność zmiany impedancji obciążenia od częstotliwości strumienia magnetycznego wnikającego do wsadu oraz od jego temperatury. Zbadano również możliwość wykorzystania algorytmów sztucznych sieci neuronowych do przewidywania zmian impedancji obciążenia układu wzbudnik-wsad magnetyczny.

**Abstract.** The work describes a method to predict the change with temperature impedance equivalent circuit inductor - charge non-magnetic. The method exploits the dependency of the load impedance changes the frequency of the magnetic flux penetrating into the charge and its temperature. Also examined the possibility of using algorithms, artificial neural networks to predict changes in the load impedance of the inductor-magnetic charge. **Method to predict the change with temperature impedance equivalent circuit inductor - charge non-magnetic**

**Słowa kluczowe:** nagrzewanie indukcyjne, impedancja obciążenia, temperatura, sztuczne sieci neuronowe

**Keywords:** induction heating, equivalent load impedance, temperature, artificial neural network.

### Wstęp

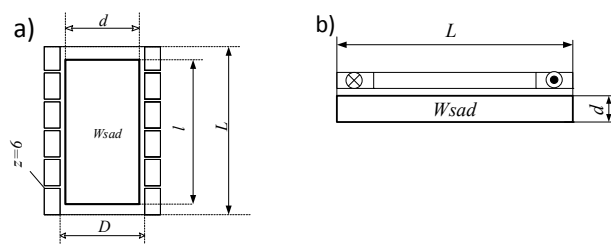
Nagrzewanie indukcyjne wsadów metalowych charakteryzuje się wieloma zaletami, między innymi dużą szybkością oraz możliwością selektywnego nagrzewania wsadu w wybranych obszarach [1]. Wadą tego rodzaju nagrzewania jest silna zależność realizowanego procesu od zmieniających się parametrów obciążenia zależnych od rodzaju nagrzewanego wsadu, warunków zasilania oraz jego temperatury. W układach pracujących bez systemów regulacji temperatury wsadu zmiana jego rezystancji powoduje zmianę mocy czynnej wydzielanej we wsadzie i w konsekwencji ryzyko niedogrzanania czy przegrzania wsadu [2]. Zjawisko to ma szczególne znaczenie w procesie powierzchniowego hartowania wsadu [3]. W ramach prac badawczych wykonywanych w Instytucie Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej dotyczących budowy „inteligentnego generatora dwuczęstotliwościowego” opracowywane są układy energoelektroniczne realizujące szybkie dopasowanie impedancji wyjściowej generatora do zmieniającej się w trakcie nagrzewania impedancji układu wzbudnik-wsad [4], [5]. Dla występujących w praktyce przypadków nagrzewania „szybkiego”, z przyrostami temperatury rzędu kilkuset kelwinów na sekundę, stosowanie automatycznych układów dopasowujących impedancję generatora do impedancji obciążenia staje się mało skuteczne. Wobec tego zachodzi potrzeba przewidywania zmian impedancji obciążenia układu wzbudnik-wsad ( $Z_{obc}$ ) wynikających ze zmian temperatury wsadu tak, aby układ dopasowujący posiadał informację predykcyjną niezbędną do utrzymywania wymaganej mocy dostarczanej do wsadu.

W artykule przedstawiono koncepcję przewidywania zmian  $Z_{obc}$  od temperatury wsadu na podstawie pomierzonych w stanie zimnym zależności  $Z_{obc}$  dla różnych częstotliwości napięcia zasilającego układ wzbudnik-wsad. Wiedza ta pozwoli na odpowiednie zaprogramowanie układu dopasowującego III rzędu oraz możliwość przewidywania zmian  $R_{obc}$  wraz z rosnącą temperaturą wsadu.

### Zastępczy model elektryczny układu wzbudnik-wsad

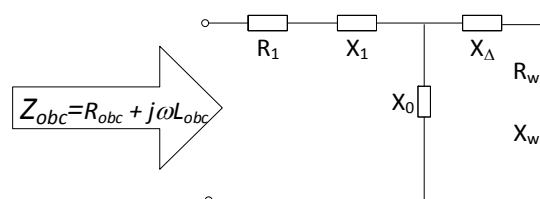
Prowadzoną analizę oparto koncepcyjnie na znanej analitycznej metodzie oporów magnetycznych (MOM) opracowanej dla cylindrycznego układu wzbudnik-wsad, Rys.1a [6]. Sprawdzenie przydatności opracowanej metody

do celów przewidywania zmiany impedancji obciążenia w funkcji temperatury wsadu wykonano zarówno dla układów z Rys.1a, jak również dla konfiguracji „płaskiego” układu wzbudnik-wsad z Rys.1b.



Rys.1. Geometria analizowanych układów wzbudnik-wsad.  $D$  – średnica wewnętrzna wzbudnika,  $d$  – średnica wsadu,  $L$  – długość wzbudnika,  $l$  – długość wsadu,  $z$  – liczba zwojów wzbudnika.

Korzystając z MOM, na rysunku 2 przedstawiono elektryczny schemat zastępczy układu wzbudnik-wsad z Rys.1a.



Rys. 2. Elektryczny schemat zastępczy układu wzbudnik-wsad, dla metody oporów magnetycznych.  $R_1$ ,  $X_1$  - rezystancja i reaktancja wzbudnika,  $X_{\Delta}$  - reaktancja szczeliny między wzbudnikiem a wsadem,  $X_0$  - reaktancja rozproszenia,  $R_w$ ,  $X_w$  - rezystancja i reaktancja wsadu.

Praktyczne wykorzystanie przedstawionego schematu zastępczego do określania zastępczej impedancji obciążenia  $Z_{obc}$  jest determinowane umiejętnością obliczenia wartości elementów składowych. W prezentowanej pracy zastosowano inne podejście polegające na określaniu wartości elementów składowych schematu zastępczego na podstawie znanej wartości impedancji zastępczej (problem odwrotny) Dodatkowo przyjęto, że zaprezentowany schemat zastępczy może być wykorzystywany również dla innych, niż przedstawiona na rysunku 1a, konfiguracja układu wzbudnik-wsad, np. dla

nagrzewnicy płaskiej przedstawionej na rysunku 1b. W każdym z tych układów wszystkie wartości parametrów schematu zastępczego w tym również  $R_w$  i  $X_w$  zależą od częstotliwości pola elektromagnetycznego generowanego przez prąd płynący we wzbudniku, a dodatkowo wartość  $R_w$  zależy od temperatury wsadu.

W pracy zaproponowano metodę optymalizacyjnego wyznaczania wartości elementów elektrycznego schematu zastępczego (rys. 2) w stanie zimnym wsadu, to jest w temperaturze około 20°C.

### Optymalizacyjne wyznaczenie parametrów elektrycznego schematu zastępczego

W celu wyznaczenia parametrów zastępczego schematu na podstawie znajomości zestawu impedancji całkowitej przyjęto założenie, że poszczególne parametry układu zastępczego przedstawionego na rysunku 2 można przybliżyć następującymi zależnościami:

$$(1) \quad R_1 = A_1 \sqrt{\rho_{wzb} \cdot f}$$

$$(2) \quad X_1 = B_1 \sqrt{\rho_{wzb} \cdot f}$$

$$(3) \quad X_{\Delta} = B_2 \cdot f$$

$$(4) \quad R_w = A_2 \sqrt{\rho_{wsad} \cdot f}$$

$$(5) \quad X_w = B_3 \sqrt{\rho_{wsad} \cdot f}$$

$$(6) \quad X_0 = B_4 \cdot f$$

gdzie:  $\rho_{wzb}$ ,  $\rho_{wsad}$  - rezystywność wzbudnika i wsadu w temperaturze 20°C,  $f$  - częstotliwość prądu wzbudnika,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$ ,  $B_4$  - współczynniki wyznaczone w procesie optymalizacji.

Do wyznaczania wartości schematu zastępczego potrzebne są wartości referencyjne  $Z_{obc\_ref}$  wynikające z pomiarów na stanowisku badawczym lub z symulacji procesu nagrzewania wsadu do określonej temperatury, które zostały zastosowane w niniejszej pracy. Wartości  $Z_{obc\_ref}$  dane są wzorem:

$$(7) \quad Z_{obc\_ref} = R_{obc\_ref} + jX_{obc\_ref}$$

Przy czym:

$$(8) \quad R_{obc\_ref} = \frac{P_{ukl}}{I^2}, \quad X_{obc\_ref} = \frac{Q_{ukl}}{I^2}$$

gdzie:  $P_{ukl}$ ,  $Q_{ukl}$  - to odpowiednio moc czynna i bierna wydzielona w układzie wzbudnik - wsad,  $I$  - wartość skuteczna prądu płynącego we wzbudniku.

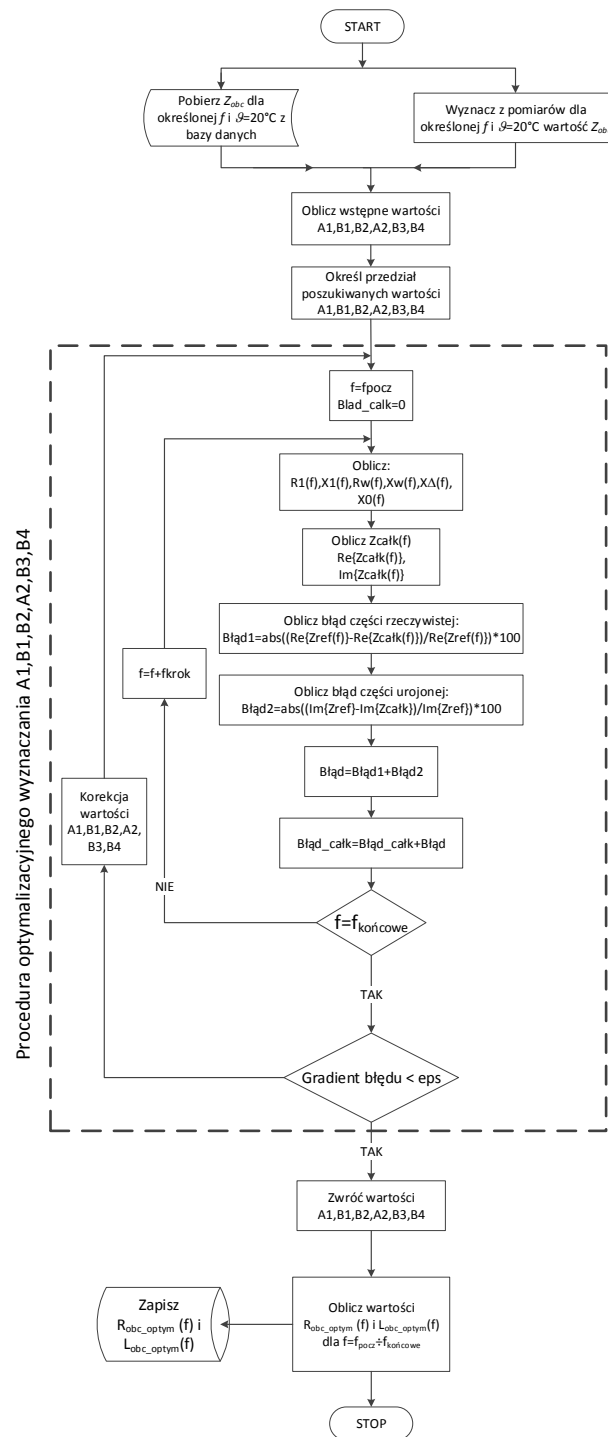
Znając wartości referencyjne impedancji obciążenia  $Z_{obc\_ref}$  oraz stosując poszukiwanie minimum funkcji wielokryterialnej z ograniczeniami można wyznaczyć wartości poszukiwanych współczynników wykorzystując kilka punktów pomiarowych, dla różnych częstotliwości, na przykład z przedziału 10 ÷ 90 kHz.

Do minimalizacji całkowitego błędu wyznaczania wykorzystano funkcję „fmincon” wchodzącą w skład pakietu „Matlab – Optimization”. Jest to funkcja wykorzystywana do optymalizacji wielowymiarowych zagadnień ograniczonymi [2]. Różnice między parametrami schematu zastępczego obliczonych podczas symulacji komputerowych a wartościami schematu zastępczego obliczonego za pomocą wzorów (1-6) zostały policzone wg wzoru 9:

$$(9) \quad Błqd = \left| \frac{Z_{obc\_ref} - Z_{obc\_opt}}{Z_{obc\_ref}} \right| 100\%$$

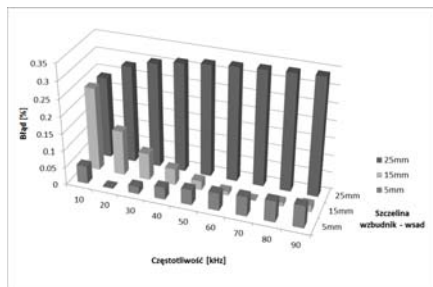
gdzie:  $Z_{obc\_ref}$  - impedancja obciążenia obliczona na podstawie symulacji Metodą Elementu Skończonego,  $Z_{obc\_opt}$  - impedancja obciążenia obliczona na podstawie wzorów (1 ÷ 6).

Sieć działań dla wyznaczania współczynników  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$ ,  $B_4$  pokazana jest na rysunku 3.



Rys. 3. Sieć działań optymalizacyjnego doboru współczynników występujących w równaniach 1-6.

Wyniki błędu wyznaczania impedancji obciążenia dla optymalnych wartości współczynników  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$ ,  $B_4$  wyznaczonych za pomocą sieci działań z rysunku 3 przedstawia rysunek 4. Pokazuje on, że dla stanu zimnego ( $\theta=20^\circ\text{C}$ ), częstotliwości prądu zasilającego wzbudnik w zakresie od 10 do 90 kHz oraz różnych wartości szczeliny między wzbudnikiem a wsadem największy błąd wyznaczania impedancji obciążenia nie przekracza 0,3%, dla walcowego układu wzbudnik-wsad i 5% dla płaskiego układu wzbudnik -wsad, co potwierdza skuteczność wyznaczania parametrów schematu zastępczego układu wzbudnik-wsad.



Rys.4. Wartości błędów wyznaczania impedancji  $Z_{obc}$  dla układu walcowego.

Przedstawiona wyżej procedura pozwala na wyznaczanie elementów składowych zastępczego schematu elektrycznego układu wzbudnik-wsad na podstawie znajomości wektorów rezystancji  $R_{obc}(f)$  i indukcyjności  $L_{obc}(f)$  całkowitych tego schematu w stanie zimnym wsadu, tj. gdy temperatura wsadu jest zbliżona do temperatury otoczenia.

### Przewidywanie zmian wartości impedancji obciążenia generatora wraz z temperaturą

Przedstawiona powyżej metoda określania wartości elementów schematu zastępczego na podstawie impedancji całkowitej może być wykorzystana do wstępnego szacowania względnych zmian impedancji  $Z_{obc}$  wraz z temperaturą. W otrzymanym dla stanu „zimnego” wsadu schemacie zastępczym metody oporów magnetycznych należy w takim przypadku wprowadzać zmiany z temperaturą wartości  $R_w$ ,  $X_w$  (rezystancji i reaktancji wsadu), jedynych, które w tym schemacie zmieniają się wraz z temperaturą wsadu. Przy tego typu podejściu zakłada się izotermiczność całego wsadu (a co najmniej tej jego części która wpływa na postrzegane przez źródło jego parametry elektryczne). W prezentowanej pracy założono, że:

$$(10) \quad R_w = R_{w,20^\circ C} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{wsadu}}{\rho_{wsadu,20^\circ C}}}$$

$$X_w = X_{w,20^\circ C} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{wsadu}}{\rho_{wsadu,20^\circ C}}}$$

gdzie:  $R_{w,20^\circ C}$ ,  $X_{w,20^\circ C}$  - rezystancja i reaktancja wsadu dla temperatury  $20^\circ C$ .

Przyjęto, że zmiany rezystywności wsadu wraz z temperaturą przebiegają zgodnie ze wzorem:

$$(11) \quad \rho_{wsadu} = \rho_{20^\circ C} (1 + \alpha \cdot \Delta \vartheta)$$

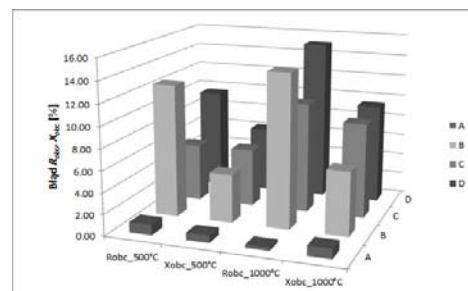
gdzie:  $\rho_{20^\circ C}$  - rezystywność materiału wsadu w temperaturze  $20^\circ C$ ,  $\rho_{20^\circ C} = 0,25 \cdot 10^{-6} \Omega m$ ,  $\alpha$  - współczynnik zmian temperaturowych materiału wsadu,  $\alpha = 4 \cdot 10^{-3} 1/^\circ C$ ,  $\Delta \vartheta$  - przyrost temperatury  $^\circ C$

Celem niniejszego badania było sprawdzenie możliwości przewidywania względnych zmian impedancji obciążenia  $Z_{obc}$  pod wpływem zmian temperatury wsadu. Wartościami referencyjnymi są wartości  $Z_{obc}=f(\vartheta)$  obliczane Metodą Elementu Skończonego. Błędy przewidywania zmian  $R_{obc}$  i  $X_{obc}$  liczone są ze wzorów (12) i (13).

$$(12) \quad \Delta R_{obc} = \left| \frac{\frac{R(\vartheta)_{obc\_ref}}{R(20^\circ C)_{obc\_ref}} - \frac{R(\vartheta)_{obc\_obl}}{R(20^\circ C)_{obc\_obl}}}{\frac{R(\vartheta)_{obc\_ref}}{R(20^\circ C)_{obc\_ref}}} \right| 100\%$$

$$(13) \quad \Delta X_{obc} = \left| \frac{\frac{X(\vartheta)_{obc\_ref}}{X(20^\circ C)_{obc\_ref}} - \frac{X(\vartheta)_{obc\_obl}}{X(20^\circ C)_{obc\_obl}}}{\frac{X(\vartheta)_{obc\_ref}}{X(20^\circ C)_{obc\_ref}}} \right| 100\%$$

gdzie:  $R(\vartheta)_{obc\_ref}$ ,  $X(\vartheta)_{obc\_ref}$  - wartości referencyjne rezystancji i reaktancji obciążenia w temperaturze  $\vartheta$ , liczone MES,  $R(\vartheta)_{obc\_obl}$ ,  $X(\vartheta)_{obc\_obl}$  - wartości rezystancji i reaktancji obciążenia w temperaturze  $\vartheta$ , liczone na podstawie schematu zastępczego otrzymanego metodą optymalizacyjną z wykorzystaniem wzorów (1) ÷ (6) oraz wzorów (10),  $R(20^\circ C)_{obc\_ref}$ ,  $X(20^\circ C)_{obc\_ref}$  - wartość rezystancji i reaktancji obciążenia w temperaturze  $20^\circ C$  liczonej MES,  $R(20^\circ C)_{obc\_obl}$ ,  $X(20^\circ C)_{obc\_obl}$  - wartość rezystancji i reaktancji obciążenia w temperaturze  $20^\circ C$  liczonej na podstawie wzorów (1) ÷ (6) i (10). Obliczenia przeprowadzono dla układów przedstawionych na rysunku 1a i 1b. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Wartości błędu względnego wyznaczania  $R_{obc}$  i  $X_{obc}$  dla temperatury wsadu wynoszącej  $500^\circ C$  i  $1000^\circ C$ . Litery A, B, C oznaczają układ z rysunku 1a z następującymi wymiarami: **A** -  $D=150$  mm,  $d=140$  mm,  $L=l=300$  mm, **B** -  $D=150$  mm,  $d=80$  mm,  $L=l=300$  mm, **C** -  $D=150$  mm,  $d=80$  mm,  $L=300$  mm,  $l=150$  mm. Literą **D** oznaczono układ płaski z rysunku 1b o wymiarach  $L=300$  mm,  $d=40$  mm, szczelina między wzbudnikiem a powierzchnią wsadu 5 mm.

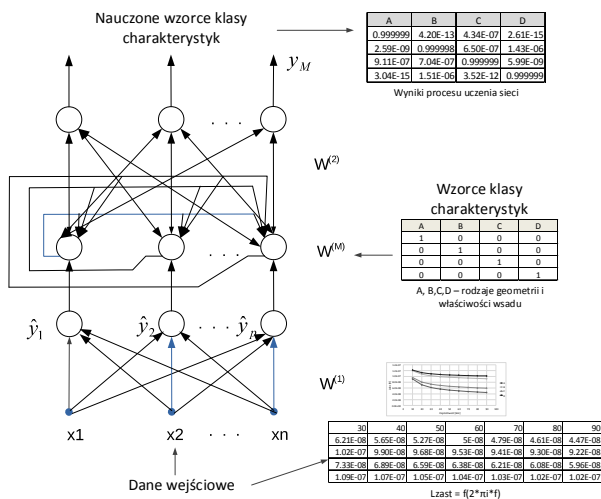
Z przedstawionych na rysunku 5 widać, że średnia dokładność przewidywania zmian impedancji obciążenia wynosi średnio kilkanaście procent. W pracy sprawdzono również wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych jako uniwersalnych aproksymatorów oraz algorytmów skojarzeniowych do przewidywania zmian impedancji obciążenia dla różnych częstotliwości prądu wzbudnika oraz temperatury wsadu w zakresie od 20 do  $800^\circ C$ .

### Wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych do klasyfikacji charakterystyk oraz przewidywania obciążenia układu wzbudnik-wsad

W czasie procesu nagrzewania za pomocą generatora w.c.z. różnych rodzajów wsadów istnieje możliwość pomiaru wartości prądu obciążenia generatora oraz wartości napięcia zasilającego, co umożliwi wyznaczenie przybliżonej mocy generowanej we wsadzie. Dane te można zapisywać w postaci bazy wiedzy o nagrzewaniu różnych rodzajów wsadów. Uzupełnieniem bazy eksperymentalnej mogą być symulacje komputerowe procesu nagrzewania indukcyjnego rzadko spotykanych rodzajów wsadu. Połączone informacje z obu źródeł stanowią wiedzę, która może być wykorzystana w procesie predykcji zmian parametrów elektrycznych układu wzbudnik-wsad.

W praktyce problemem do rozwiązania staje się wybór odpowiedniej spośród wielu zgromadzonych w bazie wiedzy charakterystyk zmian parametrów obciążenia nagrzewanego wsadu. Ponieważ rzadko występuje przypadek, gdy nowo nagrzewany wsad można dokładnie

dopasować do istniejącej charakterystyki, należy na podstawie wstępnych pomiarów wykonanych „na zimno” możliwie dokładnie i szybko ocenić, która charakterystyka nagrzewania zgromadzona w bazie najlepiej opisuje nagrzewany wsad. Na tej podstawie można przewidzieć, czy dla danej mocy dostarczanej da się zrealizować cel nagrzewania. Z algorytmicznego punktu widzenia jest to zagadnienie klasyfikacji, który można rozwiązać za pomocą algorytmu sztucznej sieci neuronowej (SSN) typu Hamminga, która jest pamięcią typu heteroasocjacyjnego polegającego na kojarzeniu dwóch różnych wektorów [7]. Jest to sieć, której warstwa ukryta neuronów objęta jest sprzężeniami zwrotnymi. W rozwiązywanym zagadnieniu kojarzenie wektorów odbywa się poprzez podanie na jej wejście charakterystyki jednoznacznie identyfikujące rodzaj i geometrię nagrzewanego wsadu, na przykład zmiany  $L_{obc}=f(\omega)$ , gdzie  $\omega$  jest pulsacją sygnału wymuszającego. Następnie na wejście sieci wprowadzana jest macierz zakodowanych klas charakterystyk. Zadaniem sieci jest skojarzenie odpowiednich charakterystyk  $L_{obc}=f(\omega)$  z macierzą klas, do których przynależą. Przykładowy proces uczenia sieci przedstawia rysunek 6.

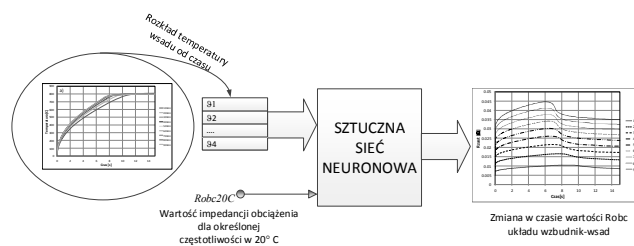


Rys. 6. Przykład uczenia sieci Hamminga wzorców klas charakterystyk  $L_{obc}=f(\omega)$ .

Nauczona sieć Hamminga, realizująca uczenie klas na podstawie podanego wzorca potrafi przyporządkować nieznanemu im wcześniej wektor wejściowy (charakterystykę) do najbliższego zapamiętanego wzorca.

Kolejnym etapem, po procedurze identyfikacji wsadu, jest konieczność przewidzenia zmian rezystancji obciążenia układu wzbudnik-wsad w zależności od temperatury wsadu. Mając do dyspozycji dane pomiarowe z wcześniejszych eksperymentów można zaprojektować system predykcji wykorzystujący inny rodzaj SSN działającej jako uniwersalny aproksymator, bazujący na metodzie wstecznej propagacji błędów. W takim przypadku SSN pozwala na podstawie rozkładu temperatury wsadu w czasie nagrzewania oraz wartości  $R_{obc}$  w temperaturze otoczenia zwrócić zmiany wartości  $R_{obc}$  dla określonej temperatury. Ilustruje to rysunek 7.

Badania wykazały, że system predykcji zmian  $R_{obc}$  wykorzystujący SSN jako struktury odwzorowujące złożone funkcje zmian parametrów sprawdza się w praktyce obliczeniowej wyznaczając zmiany  $R_{obc}$  z błędami nie przekraczającymi 1% (w odniesieniu do danych symulacyjnych). Obecnie system ten jest na etapie wdrożenia go do półprzemysłowego systemu sterowania inteligentnym generatorem w.c.z. do nagrzewania indukcyjnego.



Rys. 7. Działanie SSN jako uniwersalnego aproksymatora charakterystyk obciążenia układu wzbudnik-wsad.

## Podsumowanie

W pracy zaproponowano metodę wyznaczania parametrów impedancji obciążenia układu wzbudnik – wsad w stanie zimnym oraz dwie metody predykcji zmian rezystancji obciążenia od temperatury: metodę bazującą na obliczeniu zmian rezystywności wsadu oraz na odpowiedniej klasyfikacji charakterystyk obciążenia układu wzbudnik-wsad oraz predykcji ich wartości w temperaturach w zakresie 20-1000°C. Weryfikacja przewidywania zmian  $R_{obc}$  układu wzbudnik – wsad wraz z temperaturą została w pracy przeprowadzona z wykorzystaniem modeli numerycznych zjawiska nagrzewania indukcyjnego wsadu. Docelowo, przewiduje się weryfikację algorytmu bazującą na pomiarze wartości napięcia zasilającego oraz prądu płynącego przez wzbudnik przy różnych wartościach temperatury wsadu.

Praca finansowana ze środków NCBiR w ramach projektu Badań Stosowanych nr umowy PBS1/A4/2/2012

**Autorzy** dr inż. Piotr Urbanek, Politechnika Łódzka, Instytut Informatyki Stosowanej, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: [piotr.urbanek@p.lodz.pl](mailto:piotr.urbanek@p.lodz.pl), dr hab. inż. Jerzy Zgraja, Politechnika Łódzka, Instytut Informatyki Stosowanej, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: [jerzy.zgraja@p.lodz.pl](mailto:jerzy.zgraja@p.lodz.pl), dr hab. inż. Jacek Kucharski, Politechnika Łódzka, Instytut Informatyki Stosowanej, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: [jacek.kucharski@p.lodz.pl](mailto:jacek.kucharski@p.lodz.pl), dr inż. Andrzej Fraczyk, Politechnika Łódzka, Instytut Informatyki Stosowanej, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: [andrzej.fraczyk@p.lodz.pl](mailto:andrzej.fraczyk@p.lodz.pl)

## LITERATURA

- [1] Zgraja J., 'Computer simulation of induction hardening of moving flat charge', IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 39, no 3, May 2003, pp. 1523-1526.
- [2] Zgraja J., 'Computer simulation of induction heating process for system powered from series inverter', Przegląd Elektrotechniczny, Nr 2/2014, ISSN 0033-2097, ss. 48-51.
- [3] K. Pantleon, O. Kessler, F. HoVann, P. Mayr, Induction surface hardening of hard coated steels. Surface and Coatings Technology 120-121 (1999) 495-501.
- [4] Kobos W., Zgraja J., 'Pasywne układy LLC i LCCL dopasowania impedancji obciążenia indukcyjnie nagrzewanego wsadu' Przegląd Elektrotechniczny, Nr 2/2014, ISSN 0033-2097, ss. 40-43.
- [5] Kobos W., Zgraja J., Chudzik P., 'Analysis of Dual-Frequency Generators Structures for Induction Heating', International Symposium on Heating by Electromagnetic Sources HES-13, 21-24 May 2013, Padua, Italy, pp.261-268, ISBN 978-88-89884-25-6
- [6] Liwiński W.: Nagrzewnice indukcyjne skrośne. WNT. Warszawa (1968)
- [7] Rutkowski L. Metody i techniki sztucznej inteligencji. PWN. Warszawa 2006.