

Michał ZIÓŁKO, Marek WOŁOSZYK, Dariusz ŚWISULSKI  
POLITECHNIKA GDAŃSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I AUTOMATYKI,  
ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

## Błędy wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych impedancji uzwojeń magnesów nadprzewodzących

Dr inż. Michał ZIÓŁKO

Michał Ziółko ukończył Wydział Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej w 2002 roku i tam również uzyskał stopień doktora w roku 2009. Obecnie pracuje jako adiunkt w Katedrze Metrologii i Systemów Informatycznych tego Wydziału. Jego zainteresowania zawodowe koncentrują się wokół pomiarów elektroenergetycznych oraz pomiarów wielkości nieelektrycznych metodami elektrycznymi.



e-mail: mziolko@ely.pg.gda.pl

Dr inż. Marek WOŁOSZYK

Marek Wołoszyk ukończył Wydział Elektryczny Politechniki Gdańskiej w 1978 roku i tam również uzyskał stopień doktora nauk technicznych w roku 1988. Obecnie pracuje jako docent w Katedrze Metrologii i Systemów Informatycznych na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. Główny kierunek działalności naukowej związany jest z metodami pomiarów parametrów uzwojeń.



e-mail: mawo@ely.pg.gda.pl

### Streszczenie

W artykule przedstawiono zagadnienia związane z opracowaniem systemu do wyznaczania impedancji uzwojeń magnesów nadprzewodzących w funkcji częstotliwości. Omówiono strukturę sprzętową systemu i oprogramowanie, a także dokonano podstawowej analizy metrologicznej określając na podstawie badań symulacyjnych błędy wyznaczania modułu i argumentu poszukiwanej impedancji. Pokazano również przykładowe wyniki uzyskane przy użyciu omawianego systemu w GSI w Darmstadt.

**Słowa kluczowe:** impedancja uzwojenia, magnes nadprzewodzący, błędy pomiarowe, charakterystyka częstotliwościowa.

### Errors of determining frequency characteristics of superconducting magnet impedance

#### Abstract

The paper shows some of the most notable difficulties connected with constructing a superconducting magnet frequency characteristics test system. The hardware and software of the system is shown and the basic metrological analysis is carried out specifying, based on simulation tests, the module and phase errors of the superconducting magnet measured impedance. The paper shows some of the test results of example superconducting magnets (Fig. 4) obtained with use of the discussed system at GSI Helmholtz Centre for Heavy Ion Research in Darmstadt. As shown in Figs. 5 and 6, for the reference resistance correct value  $R_{ref}$ , the relative error of the coil impedance module  $\delta Z_m$  does not exceed the value of 5% and the absolute error of the phase  $\Delta\varphi_m$  does not exceed  $3^\circ$  at the measurement frequency up to 20 kHz. This results can be accepted as satisfactory. The authors plan to upgrade this system by introducing additional models of the coil under tests and the use of new excitation signals.

**Keywords:** coil impedance, superconducting magnet, measurement errors, frequency characteristics.

## 1. Wprowadzenie

Wykorzystanie magnesów nadprzewodzących pozwala uzyskać bardzo duże energie w akceleratorach kołowych. Od 2008 roku akcelerator Large Hadron Collider (LHC) pracuje w CERN (fr. Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) pod Genewą.

Dr hab. inż. Dariusz ŚWISULSKI

Profesor w Katedrze Metrologii i Systemów Informatycznych na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. Autor lub współautor ponad stu pięćdziesięciu artykułów w czasopiśmie naukowych lub materiałach konferencyjnych oraz ponad dwudziestu wdrożeń w przemyśle. Obszar zainteresowań obejmuje metrologię, systemy pomiarowe, przetwarzanie sygnałów pomiarowych.



e-mail: dswis@ely.pg.gda.pl

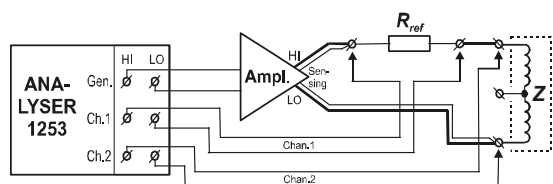
Prace nad budową akceleratorów prowadzone są również w GSI Helmholtz Centre for Heavy Ion Research GmbH w Darmstadt.

Magnesy nadprzewodzące charakteryzują się bardzo małą rezystancją przy znacznej indukcyjności. Dlatego do ich badania nie nadają się tradycyjne metody i przyrządy do pomiaru impedancji [1]. Jednakże nieodzowna jest regularna kontrola parametrów uzwojeń w celu zapewnienia bezawaryjnej pracy całego urządzenia, a przede wszystkim dlatego, aby nie dopuścić do niekontrolowanego wyjścia uzwojenia ze stanu nadprzewodnictwa [2], co mogłoby spowodować groźne skutki.

Autorzy opracowali część sprzętową oraz oprogramowanie specjalizowanego systemu pomiarowego przeznaczonego do wyznaczania parametrów zastępczych uzwojenia magnesu nadprzewodzącego w funkcji częstotliwości. W wykonanym systemie zaproponowano również nowatorski sposób wyznaczania poszukiwanych parametrów magnesu [3] realizowany przy użyciu oprogramowania napisanego w środowisku LabVIEW.

## 2. Struktura systemu pomiarowego i oprogramowanie

System pomiarowy do wyznaczania wartości parametrów uzwojenia zbudowany jest w oparciu o dwukanałowy analizator model 1253 (zawierający w sobie programowany generator sygnałowy) oraz wzmacniacz-zasilacz KEPCO model BOP 100-4M-4886. Podstawowym zadaniem tego systemu jest wyznaczanie impedancji uzwojenia (oraz jej składowych) w funkcji częstotliwości. Umożliwia on także wyznaczanie impedancji względem ziemi odpowiadającej stanowi zwarcia doziemnego. Schemat podstawowego układu pracy systemu pokazano na rys. 1.

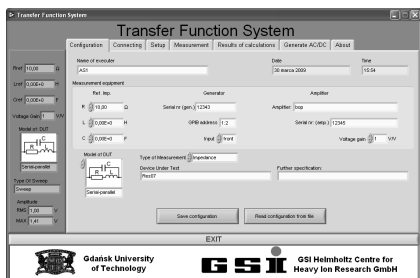


Rys. 1. Układ do wyznaczania impedancji uzwojenia w funkcji częstotliwości  
Fig. 1. The system for testing the coil impedance frequency function

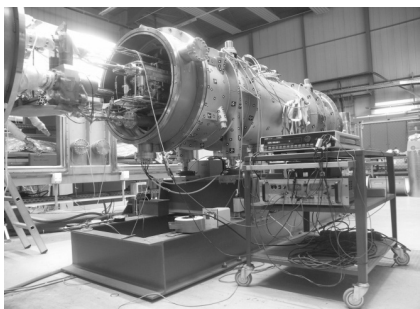
Komputer PC kontrolujący cały system steruje generatorem, z którego sygnał dostarczany jest na wejście wzmacniacza-zasilacza KEPCO. Wzmocniony sygnał z wyjścia wzmacniacza podawany jest na szeregowe połączenie rezystancji wzorcowej  $R_{ref}$  i obiektu badanego. Spadki napięcia na rezystancji referencyjnej oraz na uzwojeniu badanym dostarczane są na wejścia dwóch kanałów analizatora model 1253. Komputer PC sterujący pracą generatora archiwizuje jednocześnie wyniki z obu kanałów analizatora. Wyniki te przekazywane są w postaci składowych ortogonalnych wyznaczanych względem sygnału generatora.

Ze względu na ograniczoną rozdzielczość analizatora należy również zadbać o zachowanie właściwych relacji pomiędzy impedancją badaną, a rezystancją referencyjną. Jeżeli obiekt badany charakteryzuje się dużą składową indukcyjną, jego impedancja bardzo silnie rośnie ze wzrostem częstotliwości. Wzrost impedancji powoduje jednoczesny spadek wartości prądu płynącego przez obiekt badany oraz przez  $R_{ref}$ , co z kolei oznacza małą wartość napięcia mierzonego na zaciskach tej rezystancji. W skrajnych przypadkach wartość spadku napięcia na  $R_{ref}$  może być wielokrotnie mniejsza od najmniejszego zakresu pomiarowego analizatora, co powoduje niewielką rozdzielczość pomiaru tego napięcia. Impedancja jest wyznaczana na podstawie stosunków napięć na badanym obiekcie oraz na rezystancji referencyjnej, a więc błędy związane z ograniczoną rozdzielczością analizatora mogą w znacznym stopniu przekładać się na dokładność wyznaczenia mierzonej impedancji.

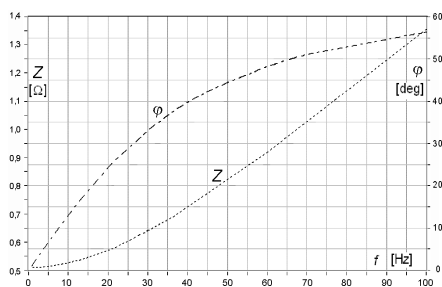
Oprogramowanie systemu zostało przygotowane w środowisku LabVIEW firmy National Instruments. Po uruchomieniu programu użytkownik ma do dyspozycji siedem zakładek. Trzy z nich: „Configuration”, „Connecting” i „Setup” umożliwiają wprowadzenie informacji o obiekcie, układzie i parametrach testu. Kolejne dwie: „Measurement” i „Results” służą do wykonania testu i wyznaczenia wyników. Z zakładki „Generate AC/DC” ustawia się parametry pracy generatora, a zakładka „About” zawiera informacje o programie. Na rysunku 2 pokazano wygląd pierwszej zakładki, zawierającej informacje o badanym magnesie, użytym sprzęcie oraz przyjętym schemacie zastępczym uzwojenia.



Rys. 2. Panel programu z zakładką Configuration  
Fig. 2. The Configuration tab



Rys. 3. Magnes nadprzewodzący poddawany badaniom w GSI w Darmstadt  
Fig. 3. A superconducting magnet being tested at GSI, Darmstadt



Rys. 4. Charakterystyka częstotliwościowa modułu i argumentu impedancji uzwojenia badanego magnesu  
Fig. 4. The frequency function of the module and phase of the tested coil impedance

Przedstawiony system wykorzystywany jest w GSI Helmholtz Centre for Heavy Ion Research do badania uzwojeń magnesów nadprzewodzących akceleratora cząstek elementarnych. Na rysunku 3 pokazano magnes poddawany badaniom - po prawej stronie widoczna jest aparatura pomiarowa. Na rysunku 4 przedstawiono przykładowe charakterystyki modułu i argumentu impedancji uzwojenia wyznaczone w omawianym systemie.

### 3. Analiza metrologiczna

Obwód badany przedstawiony na rysunku 1 jest zasilany ze wzmacniacza KEPCO napięciem sinusoidalnym o wartości  $E$ . Dla przedstawionego obwodu moduł i argument napięcia na badanej impedancji  $Z$  opisywanej szeregowym modelem zastępczym o rezystancji  $R$  oraz indukcyjności  $L$  wyrażają zależności:

$$U_Z = \frac{E\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}{\sqrt{(R + R_{ref})^2 + (\omega L)^2}} \quad (1)$$

$$\varphi_Z = \arctg\left(\frac{\omega L}{R}\right) - \arctg\left(\frac{\omega L}{R + R_{ref}}\right)$$

Z kolei moduł i argument napięcia na rezystancji referencyjnej  $R_{ref}$  opisują wzory:

$$U_{ref} = \frac{ER_{ref}}{\sqrt{(R + R_{ref})^2 + (\omega L)^2}} \quad (2)$$

$$\varphi_{ref} = -\arctg\left(\frac{\omega L}{R + R_{ref}}\right)$$

Cyfrowy analizator 1253 jest wyposażony w dwa niezależne wejścia napięciowe z automatycznie nastawianym zakresem i wspólnym analizatorem [4]. Do jednego z wejść podłączone jest napięcie  $U_Z$  występujące na badanej impedancji  $Z$  natomiast do drugiego napięcie  $U_{ref}$  uzyskane z rezystancji referencyjnej  $R_{ref}$ . W metodach cyfrowych wartość fazy szukanej impedancji  $Z_m$  jest zazwyczaj wyznaczana w oparciu o zmierzone składowe ortogonalne obydwu napięć  $U_{Zs}$ ,  $U_{Zc}$  oraz  $U_{refS}$ ,  $U_{refC}$  [5]. Wartości składowych cosinusoidalnej oraz sinusoidalnej są wyznaczane w tej metodzie na podstawie zebranych  $N$  próbek z wykorzystaniem dyskretnej transformaty Fouriera dla częstotliwości podstawowej sygnału ( $k=1$ ), z zależności [5]:

$$A_C = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cos\left(n \frac{2\pi}{N}\right) \quad (3)$$

$$A_S = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \sin\left(n \frac{2\pi}{N}\right)$$

Na podstawie wartości składowych napięć  $U_{Zs}$ ,  $U_{Zc}$  oraz  $U_{refS}$ ,  $U_{refC}$  wyznaczany jest moduł oraz argument mierzonej impedancji według wzorów:

$$Z_m = R_{ref} \frac{U_Z}{U_{ref}} = R_{ref} \frac{\sqrt{U_{Zs}^2 + U_{Zc}^2}}{\sqrt{U_{refS}^2 + U_{refC}^2}} \quad (4)$$

$$\varphi_m = \arctg\left(\frac{U_{Zs}U_{refC} - U_{Zc}U_{refS}}{U_{Zc}U_{refC} + U_{Zs}U_{refS}}\right)$$

Składowe napięć  $U_{Zs}$ ,  $U_{Zc}$  oraz  $U_{refS}$ ,  $U_{refC}$  są wyznaczane w analizatorze 1253 z błędami bezwzględными  $\Delta U_{Zs}$ ,  $\Delta U_{Zc}$  oraz  $\Delta U_{refS}$ ,  $\Delta U_{refC}$ , co prowadzi do błędów przy wyznaczeniu modułu  $Z_m$  oraz argumentu  $\varphi_m$  szukanej impedancji. Względny błąd pomiaru modułu impedancji mierzonej  $\delta Z_m$  oraz bezwzględny błąd pomiaru argumentu tej impedancji  $\Delta \varphi_m$  opisują zależności:

$$\delta Z_m = \frac{\Delta Z_m}{Z} = \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial Z_m}{\partial U_{ZS}} \Delta U_{ZS}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_m}{\partial U_{ZC}} \Delta U_{ZC}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_m}{\partial U_{refS}} \Delta U_{refS}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_m}{\partial U_{refC}} \Delta U_{refC}\right)^2}}{Z} \quad (5)$$

$$\Delta \varphi_m = \sqrt{\left(\frac{\partial \varphi_m}{\partial U_{ZS}} \Delta U_{ZS}\right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi_m}{\partial U_{ZC}} \Delta U_{ZC}\right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi_m}{\partial U_{refS}} \Delta U_{refS}\right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi_m}{\partial U_{refC}} \Delta U_{refC}\right)^2}$$

#### 4. Badania

Błędy bezwzględne pomiaru składowych napięć  $\Delta U_{ZS}$ ,  $\Delta U_{ZC}$  oraz  $\Delta U_{refS}$ ,  $\Delta U_{refC}$  wynikające z rozdzielczości zależnej od automatycznie ustawionego zakresu są określone w nocie katalogowej analizatora [4]. Posiada on dwa niezależne kanały, w których mierzone są składowe ortogonalne napięcia  $U_{ZS}$ ,  $U_{ZC}$  oraz  $U_{refS}$ ,  $U_{refC}$ . Podczas pomiarów zauważono, że w każdym kanale zakres jest automatycznie dostosowywany do większej ze składowych napięć, a wyświetlane wartości składowych tych napięć zmieniały się w sposób przypadkowy w zakresie co najmniej o rząd wielkości większym od rozdzielczości określonej w nocie katalogowej. W przypadku znacznych różnic między wartościami poszczególnych składowych danego napięcia, błąd może mieć dużą wartość dla mniejszej ze składowych.

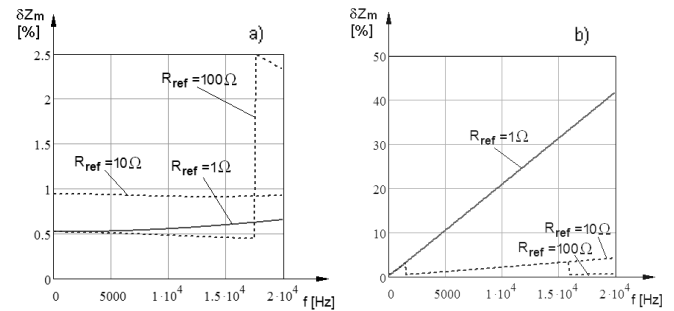
W badaniach błędów pomiaru modułu impedancji mierzonej  $\delta Z_m$  oraz jej argumentu  $\Delta \varphi_m$  przyjęto, że błędy bezwzględne pomiaru składowych poszczególnych napięć są sobie równe  $\Delta U_{ZS} = \Delta U_{ZC}$  oraz  $\Delta U_{refS} = \Delta U_{refC}$ . Uwzględniono również zmianę rozdzielczości związaną z automatyczną zmianą zakresu. Z uwagi na brak jednoznacznego opisu dotyczącego błędów pomiaru poszczególnych składowych napięć, na podstawie obserwacji podczas pomiarów założono, że są one 100-krotnie większe od rozdzielczości określonej w nocie katalogowej [4].

Układ pomiarowy służy do określenia zależności impedancji uzwojenia magnesu nadprzewodzącego w funkcji częstotliwości w trybie serwisowym (tzn. w temperaturze pokojowej). W tym stanie parametry impedancji uzwojeń mogą mieścić się w zakresie:  $R = 10 \Omega \dots 1 \text{ k}\Omega$ , oraz  $L = 0,1 \text{ mH} \dots 1 \text{ H}$ . W badaniach uwzględniono dwie impedancje o skrajnych parametrach:  $R = 10 \Omega$  i  $L = 0,1 \text{ mH}$  oraz  $R = 1 \text{ k}\Omega$  i  $L = 1 \text{ H}$ . Ze względu na czułość pomiaru, napięcia na badanej impedancji  $U_Z$  oraz na rezystancji referencyjnej  $U_{ref}$  nie mogą być zbyt małe, wobec czego należało zadbać o dobór odpowiedniej rezystancji referencyjnej  $R_{ref}$ . W badaniach przyjęto:  $R_{ref} = 1 \Omega$ ,  $10 \Omega$  i  $100 \Omega$ . Częstotliwość pomiarowa zmienia się w zakresie do 20 kHz. Przedstawione badania miały charakter symulacyjny i z tego względu pominięto błędy przypadkowe. Przeprowadzono je z wykorzystaniem programu Mathcad przyjmując, że błędy symulacji są pomijalnie małe.

Na rysunkach 5 i 6 pokazano błędy względne  $\delta Z_m$  wyznaczania modułu oraz błędy bezwzględne  $\Delta \varphi_m$  wyznaczania argumentu impedancji uzwojenia w funkcji częstotliwości.

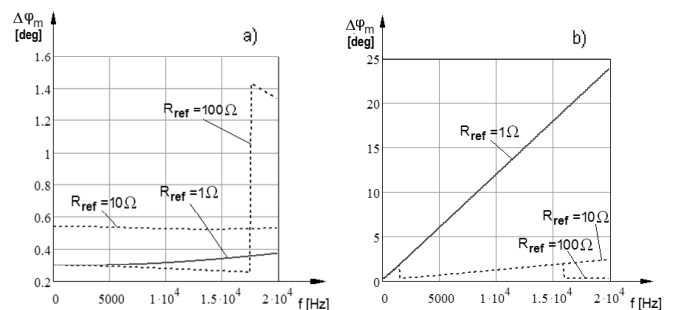
Jak widać z rysunków, dla uzwojenia o parametrach  $R = 10 \Omega$  i  $L = 0,1 \text{ mH}$ , mimo założenia, że składowe są mierzone z błędami znacznie większymi od określonych w nocie katalogowej [4], błędy modułu impedancji mierzonej  $\delta Z_m$  oraz jej argumentu  $\Delta \varphi_m$  nie osiągają znacznych wartości dla żadnej z rezystancji referencyjnej. Do częstotliwości  $f \approx 17 \text{ kHz}$  dla  $R_{ref} = 10 \Omega$  błąd modułu impedancji  $\delta Z_m$  nie przekracza 1%, natomiast błąd argumentu  $\Delta \varphi_m$  nie przekracza  $0,6^\circ$ . Powyżej częstotliwości  $f \approx 17 \text{ kHz}$  dla  $R_{ref} = 100 \Omega$  błędy  $\delta Z_m$  oraz  $\Delta \varphi_m$  rosną skokowo do około 2,5% i  $1,4^\circ$  ze względu na automatyczną zmianę zakresu.

Dla uzwojenia o parametrach  $R = 1 \text{ k}\Omega$  i  $L = 1 \text{ H}$ , rezystancja referencyjna  $R_{ref} = 1 \Omega$ , ze względu na czułość pomiaru jest zdecydowanie za mała. W takim wypadku dla częstotliwości  $f \approx 20 \text{ kHz}$  błędy  $\delta Z_m$  oraz  $\Delta \varphi_m$  mogą osiągnąć nawet  $\delta Z_m \approx 41\%$  i  $\Delta \varphi_m \approx 24^\circ$ .



Rys. 5. Błąd względny  $\delta Z_m(f)$  przy  $R_{ref} = 1, 10, 100 \Omega$  dla: a)  $R = 10 \Omega$  i  $L = 0,1 \text{ mH}$ ; b)  $R = 1 \text{ k}\Omega$  i  $L = 1 \text{ H}$

Fig. 5. Relative error  $\delta Z_m(f)$  for  $R_{ref} = 1, 10, 100 \Omega$ : a)  $R = 10 \Omega$  and  $L = 0,1 \text{ mH}$ ; b)  $R = 1 \text{ k}\Omega$  and  $L = 1 \text{ H}$



Rys. 6. Błąd bezwzględny  $\Delta \varphi_m(f)$  przy  $R_{ref} = 1, 10, 100 \Omega$  dla: a)  $R = 10 \Omega$  i  $L = 0,1 \text{ mH}$ ; b)  $R = 1 \text{ k}\Omega$  i  $L = 1 \text{ H}$

Fig. 6. Absolute error  $\Delta \varphi_m(f)$  for  $R_{ref} = 1, 10, 100 \Omega$ : a)  $R = 10 \Omega$  and  $L = 0,1 \text{ mH}$ ; b)  $R = 1 \text{ k}\Omega$  and  $L = 1 \text{ H}$

#### 5. Wnioski

Opracowany system pomiarowy wykorzystywany jest do badania uzwojeń magnesów nadprzewodzących akceleratora kołowego w GSI Helmholtz Centre for Heavy Ion Research w Darmstadt w Niemczech.

Pierwsze pomiary dały zachęcające wyniki jednakże autorzy widzą celowość dalszego rozwoju systemu poprzez wprowadzenie innych modeli zastępczych badanych uzwojeń, a także zastosowanie innych sygnałów wymuszających.

#### 6. Literatura

- [1] Jaccard Y., Theron R., Jeanneret B., Meyer R., Leemann C., Martinoli P.: AC impedance measurements of two dimensional superconductors. IEEE Transactions on Applied Superconductivity. March, 1993. Volume 3, Issue 1, s. 1640–1642.
- [2] Surdacki P.: Computation of superconducting winding quench performance depending on resistive disturbance location. 12th Conference on the Computation of Electromagnetic Fields. Sapporo, Japan, October 25-28, 1999, s. 82-83.
- [3] Świsulski D., Wołoszyk M., Stafiniak A., Wołoszyn M., Ziółko M., Rafiński L.: Testing of the Superconducting Magnets Characteristics. Electronics and Electrical Engineering, Kaunas (Litwa), No 7 (103), 2010, s. 39-42.
- [4] Nota katalogowa firmy Solartron Analytical: 1250 Series Frequency Response Analyzers. 1998.
- [5] Piotrowicz J.: Pomiar impedancji z wykorzystaniem algorytmu adaptacyjnego. Transactions on computer applications in electrical engineering: XIV Conference ZKwE '09, Poznan, April 20-22, 2009.