

Katarzyna RUTCZYŃSKA-WDOWIAK, Tadeusz STEFAŃSKI  
POLITECHNIKA ŚWIĘTOKRZYSKA, KATEDRA SYSTEMÓW STEROWANIA I ZARZĄDZANIA

## Dwuetałowa procedura minimalizacji wskaźnika jakości w identyfikacji modelu matematycznego silnika indukcyjnego

Dr inż. Katarzyna RUTCZYŃSKA-WDOWIAK

Jest adiunktem na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Świętokrzyskiej. Przedmiotem jej zainteresowań jest problematyka zastosowania algorytmów genetycznych i strategii ewolucyjnych w identyfikacji obiektów dynamicznych oraz optymalizacji, wykorzystując do obliczeń własne oprogramowanie (Delphi, C++, Turbo Pascal).



e-mail: k.ruczynska@tu.kielce.pl

Dr hab. inż. Tadeusz STEFAŃSKI

Pracuje na stanowisku profesora nadzwyczajnego w Katedrze Systemów Sterowania i Zarządzania na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach. Realizuje badania naukowe z zakresu metod identyfikacji i teorii sterowania.



e-mail: t.stefanski@tu.kielce.pl

### Streszczenie

W pracy przedstawiono dwuetałową procedurę identyfikacji modelu matematycznego silnika indukcyjnego. Parametry modelu matematycznego silnika wyznaczono w dwóch etapach: w pierwszym etapie z zastosowaniem algorytmu genetycznego (AG), natomiast w drugim – metody Boxa, przy czym wyniki identyfikacji otrzymane w etapie I stanowią będą warunki początkowe dla etapu II. Połączenie tego typu umożliwia wykorzystanie zalet obu metod, czyli z jednej strony skuteczności AG w przeszukiwaniu znacznych przestrzeni, a z drugiej dobrej zbieżności metody klasycznej w otoczeniu punktu ekstremum.

**Słowa kluczowe:** identyfikacja parametryczna, silnik indukcyjny, algorytmy genetyczne, metoda Boxa.

### Two-stage procedure of minimization of performance index for identification of induction motor mathematical model

#### Abstract

This paper presents the problem of parametric identification of induction motor mathematical model with the use of two-stage procedure of minimization of performance index, based on genetic algorithm (GA) with steady state (first stage of identification process) and classical Box's method (second stage of identification process). The results of genetic search are the start conditions for classical method. Such approach allows to use global capabilities of GA and good convergence of the classical method in surroundings of the global extremum point. This procedure with regard to convergence and accuracy for the parametric identification problem and the time of numerical calculations was analysed.

**Keywords:** parametric identification, induction motor, genetic algorithms, Box's method.

### 1. Wprowadzenie

Identyfikacja parametryczna modelu matematycznego silnika indukcyjnego jest istotnym etapem syntezy zaawansowanych metod sterowania prędkością silnika indukcyjnego. W procesie identyfikacji wyznacza się – w zależności od przyjętego podejścia i zastosowanej metody – wszystkie lub tylko wybrane parametry modelu matematycznego silnika, które w największym stopniu wpływają na wskaźniki jakości [1, 2]. W tym celu najczęściej są stosowane powszechnie znane klasyczne metody identyfikacji [1, 2, 3, 4], znacznie rzadziej nowoczesne metody komputerowe, wśród nich algorytmy genetyczne [5, 6, 7].

Niewątpliwą zaletą algorytmów genetycznych jest zapewnienie z dużym prawdopodobieństwem zlokalizowania minimum globalnego wskaźnika jakości identyfikacji, nawet dla znacznej przestrzeni poszukiwań oraz liczby wyznaczanych parametrów [7]. Natomiast stosowanie w takich przypadkach klasycznych metod numerycznych może okazać się ograniczone, głównie z uwagi na możliwość wyznaczenia ekstremum lokalnego, zamiast globalnego [6, 7].

Istnieją jednak cechy, które świadczą na niekorzyść algorytmów genetycznych, a mianowicie: ogromne zapotrzebowanie na moc obliczeniową oraz czasochłonność trwania obliczeń. W niektórych przypadkach dotyczących problemów identyfikacji, w zależności od stosowanego algorytmu genetycznego i jego parametrów, proces może trwać kilkanaście minut, a nawet kilka godzin (np. dla dużych populacji i przestrzeni poszukiwań) [6, 7].

Z uwagi na powyższe w niniejszej pracy omówiono identyfikację parametryczną modelu matematycznego silnika indukcyjnego w warunkach off-line, przy zastosowaniu dwuetałowej procedury minimalizacji wskaźnika jakości, w którym wyniki wytypowane w pierwszym etapie identyfikacji przez algorytm genetyczny stanowią warunki początkowe dla etapu drugiego, realizowanego przy użyciu metody Boxa. Tego typu połączenie zostało zastosowane w celu poprawy efektywności końcowej procesu poszukiwań genetycznych, zapewniając skrócenie czasu procesu identyfikacji.

### 2. Model matematyczny silnika indukcyjnego

Model matematyczny silnika indukcyjnego sformułowany w wirującym układzie współrzędnych  $d$ - $q$ , zorientowanym zgodnym z wektorem  $v_s$  napięcia stojana, ma następującą postać [8]:

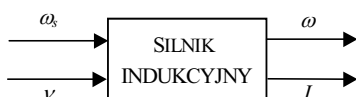
$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \phi_d(t) &= \phi_q(t) \omega_s(t) - R_s I_d(t) + v(t) \\ \frac{d}{dt} \phi_q(t) &= -\phi_d(t) \omega_s(t) - R_s I_q(t) \\ \frac{d}{dt} I_d(t) &= a_1 \phi_d(t) + a_3 \phi_q(t) \omega_e(t) - a_2 I_d(t) + I_q(t) \omega_s(t) - I_q(t) \omega_e(t) + a_3 v(t) \\ \frac{d}{dt} I_q(t) &= -a_3 \phi_d(t) \omega_e(t) + a_1 \phi_q(t) - I_d(t) \omega_s(t) + I_d(t) \omega_e(t) - a_2 I_q(t) \\ \frac{d}{dt} \omega_e(t) &= \frac{3p^2}{2J} (\phi_d(t) I_q(t) - \phi_q(t) I_d(t)) - \frac{p}{J} M_o(t), \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie:

$$a_1 = \frac{R_r}{\sigma L_s L_r}, \quad a_2 = \frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{R_r}{\sigma L_r}, \quad a_3 = \frac{1}{\sigma L_s}, \quad \sigma = \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_s L_r} \quad (2)$$

przy czym:  $I_d$ ,  $I_q$  i  $\phi_d$ ,  $\phi_q$  – składowe wektora prądu i strumienia stojana,  $\omega_s$  – pulsacja synchroniczna stojana,  $\omega_e = p\omega$  – elektryczna prędkość kątowa,  $R_s$  i  $L_s$  – rezystancja i indukcyjność stojana,  $R_r$  i  $L_r$  – rezystancja i indukcyjność wirnika,  $L_m$  – indukcyjność główna,  $p$  – liczba par biegunów,  $J$  – moment bezwładności,  $M_o$  – moment obciążenia,  $v$  – moduł wektora napięcia stojana,  $\sigma$  – wypadkowy współczynnik rozproszenia [1, 7].

Na rysunku 1 przedstawiono schemat obiektu identyfikacji z określeniem sygnałów wejściowych i wyjściowych, w układzie współrzędnych wirującym zgodnie z wektorem napięcia stojana. Taki wybór sygnałów wejściowych ułatwia praktyczną realizację układów pomiarowych, ponieważ nie jest wymagana duża częstotliwość próbkowania mierzonych sygnałów (sygnały te nie są przebiegami harmonicznymi), a zniekształcenia fazowe w torach pomiarowych napięcia i prądu nie mają istotnego wpływu na wyniki procesu identyfikacji [1, 6].



Rys. 1. Schemat obiektu identyfikacji  
Fig. 1. The schema of identification object

### 3. Dwuetałowa procedura identyfikacji z zastosowaniem algorytmu genetycznego oraz metody Boxa

Wartości parametrów modelu matematycznego silnika indukcyjnego:  $L_m$ ,  $L_s$ ,  $L_r$ ,  $R_r$ ,  $R_s$ ,  $J$  wyznaczono na podstawie minimalizacji błędu średniokwadratowego amplitudy prądu stojana  $I$  oraz prędkości kątowej  $\omega$  określonego zależnością [1, 6, 7]

$$Q = \frac{1}{N} \left( K \sum_{i=1}^N (I(i) - \hat{I}(i))^2 + \sum_{i=1}^N (\omega(i) - \hat{\omega}(i))^2 \right), \quad (3)$$

gdzie:  $N$  – liczba pomiarów,  $\hat{\phantom{x}}$  – rozwiązanie modelu matematycznego silnika,  $K$  – współczynnik wagowy, wyznaczony eksperymentalnie [1], w celu zachowania kompromisu pomiędzy wartością sumy kwadratów błędu prędkości kątowej  $\omega$  i błędu prądu stojana  $I$  [1, 7]. Uwzględnienie w minimalizowanym wskaźniku więcej niż jednej wielkości wyjściowej umożliwia jednocześnie wyznaczenie wartości poszukiwanych parametrów oraz zmniejszenie błędów identyfikacji [1].

W publikacji [6] porównywano skuteczność i efektywność wybranego algorytmu genetycznego (AG) oraz klasycznej metody optymalizacji statycznej Nelder-Meada, w problemie identyfikacji parametrycznej modelu matematycznego silnika indukcyjnego. Wykazano, że zasadniczą wadą metody klasycznej jest zatrzymywanie się na minimach lokalnych wskaźnika jakości identyfikacji oraz niestabilność rozwiązań modelu matematycznego, natomiast do wad algorytmów genetycznych można zaliczyć czasochłonność obliczeń. Kontynuację ww. rozważań przedstawiono w tabelach 1 oraz 2, z tym, że dla zapewnienia lepszej zbieżności i dokładności analizowanego procesu, zamiast klasycznej metody optymalizacji statycznej Nelder-Meada, która jest metodą bez ograniczeń, zastosowano klasyczną metodę Boxa z ograniczeniami.

Identyfikacji modelu matematycznego silnika dokonano na podstawie danych pomiarowych odpowiedzi czasowych amplitudy prądów fazowych stojana oraz prędkości kątowej, zarejestrowanych podczas rozruchu silnika. W procesie identyfikacji wyznaczano parametry modelu matematycznego silnika (1)–(2), tj.:  $L_m$ ,  $L_s$ ,  $L_r$ ,  $R_r$ ,  $R_s$  oraz  $J$ . Schemat identyfikowanego obiektu został przedstawiony na rysunku 1. Wartości parametrów zostały określone w oparciu o minimalizację wskaźnika jakości identyfikacji  $Q$ , zgodnie z zależnością (3).

Tabela 1 przedstawia wyniki symulacji procesu identyfikacji przeprowadzonej na podstawie przetwarzania danych uzyskanych z rozwiązania modelu matematycznego silnika, dla zadanych wartości parametrów, tj.:  $L_m=0,222$  H,  $L_r=0,251$  H,  $L_s=0,234$  H,  $R_s=2,95$   $\Omega$ ,  $R_r=2,47$   $\Omega$  oraz  $J=0,04$  kgm<sup>2</sup>, zaczerpniętych z wyników identyfikacji eksperymentalnej przedstawionych w pracy [1]. W symulacji oczekiwano otrzymanie ww. wartości parametrów

modelu matematycznego silnika indukcyjnego dla wartości wskaźnika jakości  $Q$  bliskiej zeru.

Tab. 1. Wyniki symulacji procesu identyfikacji z zastosowaniem AG oraz metody Boxa  
Tab. 1. The results of simulation of identification process with the use of GA and Box's method

Metoda	AG	Metoda Boxa	
Wartości identyfikowanych parametrów	$J$	0,0415	0,0378
	$R_s$	3,0285	3,0475
	$R_r$	2,4696	2,3310
	$L_s$	0,2249	0,2316
	$L_r$	0,2473	0,2494
	$L_m$	0,2226	0,2304
Wskaźnik jakości $Q$	0,4449	0,4225	
Czas procesu [s]	1260	698	

Algorytm genetyczny stosunkowo szybko osiąga otoczenie minimum wskaźnika jakości identyfikacji  $Q$ , jednakże uzyskanie dokładnej wartości tego minimum wymaga dużego nakładu obliczeń, przez co proces identyfikacji jest procesem czasochłonnym. Dlatego też, aby szybciej otrzymać wartość minimum wskaźnika jakości zastosowano klasyczną metodę Boxa.

W tabeli 2 zestawiono wyniki identyfikacji parametrycznej modelu matematycznego silnika indukcyjnego na podstawie przetwarzania danych pomiarowych z obiektu rzeczywistego (identyfikacja eksperymentalna), z zastosowaniem algorytmu genetycznego oraz metody Boxa. Algorytm genetyczny również i w tym przypadku prawidłowo zlokalizował minimum wskaźnika jakości  $Q$ , ale czas oczekiwania na wyniki identyfikacji był zdecydowanie dłuższy niż przy zastosowaniu klasycznej metody Boxa.

Tab. 2. Porównanie wyników identyfikacji eksperymentalnej przy użyciu AG oraz metody Boxa  
Tab. 2. The comparison of results of experimental identification with the use of GA and Box's method

Metoda	AG	Metoda Boxa	
Wartości identyfikowanych parametrów	$J$	0,0378	0,0431
	$R_s$	3,8797	3,7519
	$R_r$	2,0016	1,8149
	$L_s$	0,1869	0,1925
	$L_r$	0,1723	0,1985
	$L_m$	0,1719	0,1896
Wskaźnik jakości $Q$	41,9563	42,3001	
Czas procesu [s]	1380	745	

W celu zapewnienia efektywności procedury identyfikacji modelu matematycznego silnika indukcyjnego można zastosować

podejście polegające na połączeniu wspomagającym dwóch wybranych metod, w tym przypadku metody genetycznej oraz klasycznej (określenie wspomagające zgodne z [9]). Algorytm genetyczny (I etap procedury identyfikacji) jest stosowany do znalezienia punktu, który jest na tyle bliski minimum globalnemu wskaźnika, aby metoda tradycyjna (II etap procedury identyfikacji) szybko osiągnęła poszukiwane minimum globalne. Przy czym wyniki identyfikacji otrzymane w I etapie stanowią warunki początkowe dla etapu II. Przy takim podejściu czas procesu identyfikacji modelu matematycznego silnika indukcyjnego jest znacznie krótszy, niż w przypadku zastosowania wyłącznie algorytmu genetycznego.

W pierwszym etapie procedury identyfikacji modelu matematycznego silnika indukcyjnego zastosowano algorytm genetyczny z częściową wymianą populacji, oparty na reprezentacji zmienno-pozycyjnej osobników, krzyżowaniu arytmetycznym oraz mutacji równomiernej. Przyjęto stałe tempo krzyżowania i mutacji odpowiednio (prawdopodobieństwo krzyżowania  $p_k=1$  oraz mutacji  $p_m=0,06$ ). Bardzo wysoka wartość  $p_k$  wynika z faktu, że do operacji krzyżowania zostaje wytypowana tylko jedna para rodzicielska [7, 10, 11]. W pracy [7] wykazano, że dla wymienionych wartości  $p_k$  i  $p_m$  algorytm genetyczny zapewnia uzyskanie najlepszej zbieżności i dokładności analizowanego procesu identyfikacji.

W tabeli 3 pokazano wyniki symulacji procesu identyfikacji z zastosowaniem dwuetapowej procedury minimalizacji wskaźnika jakości. Wyniki otrzymane w etapie I przy pomocy algorytmu genetycznego stanowią warunki początkowe (startowe) dla metody Boxa.

Tab. 3. Wyniki symulacji procesu identyfikacji przy użyciu dwuetapowej procedury minimalizacji wskaźnika jakości

Tab. 3. The results of simulation of the identification process with the use of two-stage procedure of minimization of performance index

Etap		Etap I	Etap II
[Przestrzeń poszukiwań AG] – Etap I [Warunki startowe dla metody Boxa] – Etap II Wartości identyfikowanych parametrów	$J$	[0,01; 0,08] 0,041	[0,041] 0,039
	$R_s$	[0,01; 5,9] 2,676	[2,676] 2,924
	$R_r$	[0,01; 4,9] 2,444	[2,444] 2,000
	$L_s$	[0,01; 0,47] 0,241	[0,241] 0,230
	$L_r$	[0,01; 0,5] 0,260	[0,260] 0,209
	$L_m$	[0,01; 0,44] 0,230	[0,230] 0,210
	Wskaźnik jakości $Q$	1,948	0,207
Czas procesu [s]	410	552	

Wykorzystany w etapie I algorytm genetyczny wyznaczył obszar, w którym należy poszukiwać minimum globalnego przyjętego wskaźnika jakości, natomiast współrzędne tego punktu wyznaczono za pomocą metody Boxa (etap II), przy założeniu, że wartości parametrów otrzymane w etapie I, traktuje się jako warunki początkowe dla etapu II. Można zauważyć, że przy takim podejściu proces identyfikacji parametrycznej trwa znacz-

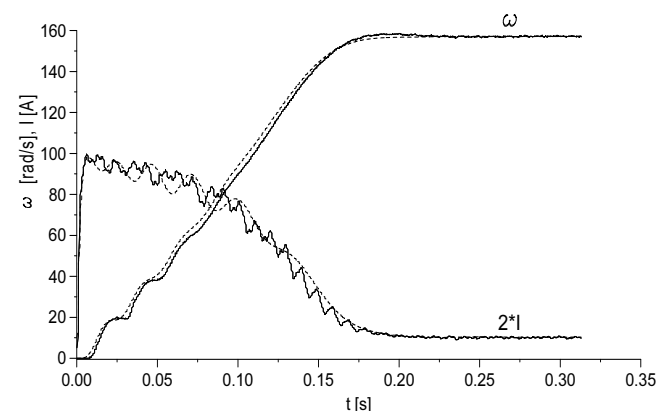
nie krócej, niż w przypadku zastosowania algorytmu genetycznego. Tego rodzaju połączenie zostało więc zastosowane w celu poprawy efektywności końcowej procesu poszukiwań genetycznych.

W tabeli 4 przedstawiono wyniki analizy procesu identyfikacji parametrycznej modelu matematycznego silnika indukcyjnego w oparciu o dane uzyskane z obiektu rzeczywistego, przy użyciu dwuetapowej procedury minimalizacji wskaźnika jakości. Algorytm genetyczny w dość krótkim czasie zlokalizował otoczenie punktu minimum globalnego wskaźnika  $Q$ , natomiast algorytm Boxa wyznaczył poszukiwane współrzędne ww. punktu. Uzyskano dobrą zgodność przebiegów prędkości kątowej  $\omega$  i prądu stojana  $I$  silnika oraz jego modelu matematycznego, co pokazano na rysunku 2.

Tab. 4. Identyfikacja eksperymentalna przy użyciu dwuetapowej procedury minimalizacji wskaźnika jakości

Tab. 4. The experimental identification with the use of two-stage procedure of minimization of performance index

Etap		Etap I	Etap II
[Przestrzeń poszukiwań AG] – Etap I [Warunki startowe dla metody Boxa] – Etap II Wartości identyfikowanych parametrów	$J$	[0,01; 0,08] 0,046	[0,046] 0,043
	$R_s$	[0,01; 5,9] 2,436	[2,436] 3,753
	$R_r$	[0,01; 4,9] 2,387	[2,387] 1,651
	$L_s$	[0,01; 0,47] 0,216	[0,216] 0,193
	$L_r$	[0,01; 0,5] 0,191	[0,191] 0,181
	$L_m$	[0,01; 0,44] 0,195	[0,195] 0,181
Wskaźnik jakości $Q$		59,982	41,300
Czas procesu [s]		479	608



Rys. 2. Odpowiedzi czasowe silnika (linia ciągła) i modelu matematycznego (linia przerywana)

Fig. 2. Time responses of induction motor (solid line) and mathematical model (dashed line)

#### 4. Podsumowanie

W pracy przedstawiono rezultaty zastosowania dwuetapowej procedury minimalizacji wskaźnika jakości w problemie identyfikacji parametrycznej modelu matematycznego silnika indukcyjnego. Stosując AG w etapie I procedury identyfikacji wyznaczono współrzędne punktu minimum globalnego wskaźnika jakości z mniejszą dokładnością, natomiast klasyczna metoda optymalizacji (etap II procedury identyfikacji), umożliwiła dokładniejsze wyznaczenie współrzędnych tego punktu. Takie podejście zostało zastosowane dla poprawienia efektywności końcowej AG.

Biorąc pod uwagę czas potrzebny na realizację badań można stwierdzić, że w przypadku dużych przestrzeni poszukiwań proces identyfikacji z zastosowaniem algorytmu genetycznego jest bardzo czasochłonny i wymagający znacznego nakładu obliczeniowego. Dlatego ważne okazało się połączenie metody genetycznej i klasycznej, które jak wykazano w badaniach, zapewniło wyznaczenie współrzędnych punktu ekstremum globalnego, w stosunkowo krótkim czasie.

#### 5. Literatura

- [1] T. Stefański: Synteza adaptacyjnych algorytmów sterowania momentem falownikowego napędu samochodu elektrycznego z silnikiem indukcyjnym. Rozprawa hab. Z. N. Politechniki Świętokrzyskiej, seria Monografie, studia, rozprawy nr 4, Kielce 1995.
- [2] H. In-Joong, L. Sang-Hoon: An Online Identification Method for Both Stator and Rotor Resistances of Induction Motors without Rotational Transducers. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 47, No. 4, 2000, pp. 842-853.
- [3] K. Mańczak, Zb. Nahorski: Komputerowa identyfikacja obiektów dynamicznych. PWN, Warszawa 1983.
- [4] T. Söderström, P. Stoica: Identyfikacja systemów. PWN, Warszawa 1997.
- [5] P. Vas: Artificial-Intelligence-Based Electrical Machines and Drives. Oxford University Press, New York 1999.
- [6] K. Rutczyńska-Wdowiak, T. Stefański: Identyfikacja modelu matematycznego silnika indukcyjnego przy pobudzeniu napięciem stojana. Materiały XIV Krajowej Konferencji Automatyki kka 2002, tom I, str. 389-394, Zielona Góra 2002.
- [7] K. Rutczyńska-Wdowiak: Modyfikacje algorytmu genetycznego w problemie identyfikacji modelu matematycznego silnika indukcyjnego. PAK, Vol. 53, nr 8 2007.
- [8] Wł. Pelczewski, M. Krynke: Metoda zmiennych stanu w analizie dynamiki układów napędowych. WNT, Warszawa 1984.
- [9] D. Rutkowska, M. Piliński, L. Rutkowski: Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte. PWN, Warszawa 1997.
- [10] Zb. Michalewicz: Algorytmy genetyczne + struktury danych = programy ewolucyjne. WNT, Warszawa 1999.
- [11] Zb. Michalewicz, Fogel D. B.: How to Solve It: Modern Heuristics. Springer Verlag, 2000.
- [12] A. E. Eiben, R. Hinterding, Zb. Michalewicz: Parameter Control in Evolutionary Algorithms. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 3, No. 2, 1999, pp. 124-141.
- [13] K. Szabat, T. Orłowska-Kowalska: Identyfikacja parametrów napędu prądu stałego za pomocą algorytmów genetycznych. Materiały V Krajowej Konferencji Naukowej SENE 2001, tom II, str. 597-604, Łódź 2001.

Artykuł recenzowany

## INFORMACJE

### Studia Podyplomowe

Wydział Elektryczny Politechniki Śląskiej w Gliwicach, Instytut Metrologii, Elektroniki i Automatyki ogłasza nabór na Dwusemestralne Zaoczne Studia Podyplomowe

#### Organizacja i Akredytacja Laboratoriów

Studia prowadzone są na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach, w systemie zaocznym w każdą sobotę lub w co drugi weekend (do wyboru) przez dwa semestry. Zajęcia prowadzone są przez nauczycieli akademickich ze stopniem co najmniej doktora oraz przez zaproszonych Gości o uznanym dorobku i autorytecie. Studia obejmują 200 godzin dydaktycznych. Rozpoczęcie Studiów nastąpi po skompletowaniu odpowiedniej liczby kandydatów na dany rodzaj studiów.

#### Organizator studiów:

Instytut Metrologii, Elektroniki i Automatyki Politechniki Śląskiej, 44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10, tel. 032 237 12 41, fax: 032 237 20 34, e-mail: re2@polsl.pl lub agnieszka.skorkowska@polsl.pl, http://imeia.elekt.polsl.pl

#### Kierownik studiów:

Prof. dr hab. inż. Tadeusz SKUBIS