

# **XV Krajowa Konferencja Automatyki**

## **Tom I**



**Redaktorzy:  
Zdzisław Bubnicki  
Roman Kulikowski  
Janusz Kacprzyk**

# XV Krajowa Konferencja Automatyki Tom I



Redaktorzy:  
Zdzisław BUBNICKI  
Roman KULIKOWSKI  
Janusz KACPRZYK

**ORGANIZATOR**

Komitet Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk  
Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk

**WSPÓŁORGANIZATORZY**

Politechnika Warszawska

Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów

Polskie Stowarzyszenie Pomiarów, Automatyki i Robotyki

## **ORGANIZATOR**

Komitet Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk  
Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk

## **WSPÓLORGANIZATORZY**

Politechnika Warszawska  
Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów  
Polskie Stowarzyszenie Pomiarów, Automatyki i Robotyki

## **KOMITET PROGRAMOWY**

Przewodniczący  
Zastępca Przewodniczącego

Zdzisław BUBNICKI  
Roman KULIKOWSKI

## **CZŁONKOWIE**

Stanisław BAŃKA  
Mikołaj BUSŁOWICZ  
Ryszard GESSING  
Jakub GUTENBAUM  
Stanisław KACZANOWSKI  
Janusz KACPRZYK  
Józef KORBICZ  
Krzysztof KOZŁOWSKI  
Krzysztof KUŹMIŃSKI  
Krzysztof MALINOWSKI  
Antoni NIEDERLIŃSKI  
Tadeusz PUCHAŁKA  
Stanisław SKOCZOWSKI  
Jerzy ŚWIĄTEK  
Ryszard TADEUSIEWICZ  
Krzysztof TCHOŃ  
Jan WĘGLARZ

Michał BIAŁKO  
Władysław FINDEISEN  
Henryk GÓRECKI  
Jerzy JÓZEFczyk  
Tadeusz KACZOREK  
Jerzy KLAMKA  
Zbigniew KOWALSKI  
Juliusz L. KULIKOWSKI  
Kazimierz MALANOWSKI  
Wojciech MITKOWSKI  
Władysław PEŁCZEWSKI  
Leszek RUTKOWSKI  
Roman SŁOWIŃSKI  
Andrzej ŚWIERNIAK  
Piotr TATJIEWSKI  
Leszek TRYBUS  
Andrzej P. WIERZBICKI

## **KOMITET ORGANIZACYJNY**

Przewodniczący  
Zastępcy Przewodniczącego

Roman KULIKOWSKI  
Janusz KACPRZYK  
Stanisław KACZANOWSKI  
Tadeusz KACZOREK  
Krzysztof MALINOWSKI  
Roman OSTROWSKI  
Tadeusz PUCHAŁKA  
Dariusz WAGNER  
Jan STUDZIŃSKI  
Jan W. OWSIŃSKI

Członkowie

Sekretarze naukowci

**ISBN 83-89475-00-6**

Copyright © Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk  
All rights reserved

Druk: ARGRAF, Warszawa

# IDENTYFIKACJA I ROZPOZNAWANIE

# IDENTYFIKACJA MODELI WIENERA Z WYKORZYSTANIEM WIELOSINUSOIDALNYCH LOSOWYCH SYGNAŁÓW POBUDZAJĄCYCH<sup>†</sup>

Jarosław FIGWER

Politechnika Śląska, Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki  
ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice, e-mail: jfigwer@ia.polsl.gliwice.pl

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono nową metodę identyfikacji modeli Wienera, w której jako pobudzenie stosowany jest wielosinusoidalny losowy sygnał pobudzający. Jej idea jest dekompozycja problemu identyfikacji modeli Wienera na niezależne problemy identyfikacji modeli dynamicznej części liniowej wraz ze statyczną nieliniowością oraz zakłócenia spowodzonego na wyjście. Omówiono własności zaproponowanej metody identyfikacji. Przedstawione rozważania zilustrowano przykładami.

**Słowa kluczowe:** Identyfikacja modeli nieliniowych, cyfrowe przetwarzanie sygnałów, projektowanie doświadczeń identyfikacyjnych, wielosinusoidalne sygnały pobudzające.

## 1. WPROWADZENIE

W ostatnich dwóch dziesięcioleciach, szybki rozwój elektroniki, ciągłe zwiększanie mocy obliczeniowej mikroprocesorowych systemów przetwarzania informacji i sterowania oraz konieczność sterowanie obiektami, w których nieliniowość ma istotny wpływ na jakość pracy układu sterowania [4, 6, 15, 16, 18] (np. sterowanie dla dużych odchyłek wokół punktu pracy) przyczyniły się do zwiększenia zainteresowania metodami identyfikacji dynamicznych modeli nieliniowych. Opracowano metody identyfikacji tych modeli wykorzystujące przetwarzanie sygnałów w dziedzinie czasu jak i częstotliwości [5, 17]. Szczególne miejsce w tych zainteresowaniach zajmuje identyfikacja prostych modeli, w których nieliniowość obiektu modelowana jest w postaci statycznej nieliniowości dołączanej szeregowo do dynamicznego elementu liniowego na wejście [2, 20] (model Hammersteina), wyjście [3, 13, 21] (model Wienera) lub wejście i wyjście [1, 7] (model Hammersteina-Wienera).

W artykule przedstawiono nowe podejście do problemu identyfikacji modeli Wienera. Zaproponowano metodę identyfikacji, która wykorzystuje jako pobudzenie wielosinusoidalny losowy sygnał pobudzający [10]. Własności tego pobudzenia oraz w odpowiedni sposób zaprojektowane doświadczenie identyfikacyjne pozwalają na dokonanie dekompozycji problemu identyfikacji

modelu Wienera na niezależne problemy identyfikacji modeli dynamicznej części liniowej wraz ze statyczną nieliniowością oraz zakłócenia spowodzonego na wyjście. By zidentyfikować model dynamicznej części liniowej statyczna nieliniowość interpretowana jest jako zakłócenie losowe o szczególnych własnościach. Ta interpretacja pozwala na estymację parametrów modelu dynamicznej części liniowej metodami klasycznymi [14]. Cechą charakterystyczną zaproponowanej metody identyfikacji modeli Wienera, która odróżnia ją od innych metod prezentowanych w literaturze [3, 17, 19], jest możliwość łatwej detekcji oraz identyfikacji nieliniowości.

Organizacja artykułu jest następująca: (1) Sformułowano problem identyfikacji modeli Wienera; (2) Zdefiniowano wielosinusoidalny losowy sygnał pobudzający oraz przedyskutowano jego własności z punktu widzenia identyfikacji modeli nieliniowych; (3) Omówiono sposób przeprowadzania doświadczenia identyfikacyjnego oraz wstępnego przetwarzania danych; (4) Przedstawiono metodę identyfikacji modeli Wienera oraz omówiono jej własności; (5) Zamieszczono przykład symulacyjny ilustrujący własności zaproponowanej metody identyfikacji.

## 2. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU IDENTYFIKACJI

W prowadzonych rozważaniach o obiekcie identyfikacji zakłada się, że jest asymptotycznie stabilnym obiektem o jednym wejściu i jednym wyjściu, który opisany jest następującym nieliniowym równaniem będącym modelem Wienera:

$$y(i) = f(y_1(i)) + v(i), \quad (1)$$

gdzie:  $i$  oznacza kolejne chwile czasowe,  $f(\cdot)$  jest pewną nieliniową funkcją przyjmującą wartości ze zbioru liczb rzeczywistych ( $f(y_1(i)) < \infty$  dla  $i = 0, 1, \dots, \infty$ ),  $y(i)$  jest sygnałem wyjściowym obiektu,  $y_1(i)$  jest niemierzalnym sygnałem wyjściowym dynamicznej części liniowej, a  $v(i)$  jest spowodzonym na wyjście

<sup>†</sup>Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w roku 2005.

zakłóceniem losowym o zerowej wartości oczekiwanej i skończonym czasie skorelowania  $\tau_0$ . Dynamiczna część liniowa obiektu opisana jest następującym równaniem różnicowym:

$$y_l(i) = z^{-d} \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} u(i), \quad (2)$$

gdzie:  $d$  jest dyskretnym czasem opóźnienia,  $z^{-1}$  jest operatorem opóźnienia o jeden okres próbkowania,  $u(i)$  jest sygnałem wejściowym, a  $A(z^{-1})$  i  $B(z^{-1})$  są wielomianami stopni  $dA$  i  $dB$  o postaci:

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_{dA} z^{-dA}, \quad (3)$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_{dB} z^{-dB}. \quad (4)$$

W dalszych rozważaniach, otrzymany w wyniku nieliniowego przekształcenia sygnału  $y_l(i)$ , sygnał  $f(y_l(i))$  nazywany będzie niezakłóconym sygnałem wyjściowym z obiektu i będzie oznaczany jako  $y_n(i)$  ( $y_n(i) = f(y_l(i))$ ). Dodatkowo, zakłada się, że sygnał wejściowy  $u(i)$  jest nieskorelowany z zakłóceniem  $v(i)$ .

Celem identyfikacji jest wyznaczenie:

- struktury  $(d, dA, dB)$  modelu liniowej części dynamicznej oraz ocen wektora parametrów  $[a_1, a_2, \dots, a_{dA}, b_0, b_1, \dots, b_{dB}]^T$ ,
- ocen nieliniowej funkcji  $f(\cdot)$  oraz
- modelu zakłócenia  $v(i)$

na podstawie ciągów próbek sygnałów wejściowego  $u(i)$  i wyjściowego  $y(i)$  zebranych w trakcie odpowiednio zaprojektowanych doświadczeń identyfikacyjnych przeprowadzanych z wykorzystaniem wielosinusoidalnych losowych sygnałów pobudzających [8, 9, 12].

Cechą charakterystyczną modeli Wienera jest pewna niejednoznaczność polegająca na niemożności rozróżnienia charakterystyk statycznych szeregowo połączonych elementów – dynamicznej części liniowej obiektu (wzmocnienie) i statycznej nieliniowości ( $f(\cdot)$ ). By usunąć tę niejednoznaczność i móc porównywać wyniki identyfikacji z parametrami obiektu wprowadzono dodatkowe założenie, że wariancja sygnału wyjściowego  $y_l(i)$  dynamicznej części liniowej jest równa 1.

### 3. WIELOSINUSOIDALNY LOSOWY SYGNAŁ POBUDZAJĄCY

$N$ -elementowy ( $N$  parzyste) wielosinusoidalny losowy sygnał pobudzający jest zdefiniowany w dziedzinie czasu jako suma harmonicznym sinusoid wraz ze składową stałą [10]:

$$u(i) = \sum_{n=0}^{N/2} A_n \sin(\Omega n i + \varphi_n), \quad (5)$$

gdzie:  $\Omega = \frac{2\pi}{N}$  oznacza względną częstotliwość podstawową,  $i = 0, 1, \dots, N-1$  oznacza kolejne chwile czasowe,  $\varphi_n$  oznacza fazę a  $A_n$  amplitudę  $n$ -tej składowej sinusoidalnej. Faza  $\varphi_0$  jest deterministyczna ( $\varphi_0 = \frac{\pi}{2}$ ), a pozostałe fazy  $\varphi_n$  są niezależnymi zmiennymi losowymi:

- o rozkładzie jednostajnym na odcinku  $[0, 2\pi)$  dla  $n = 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1$ ,
- o rozkładzie Bernoulliego określonym na zbiorze dwóch zdarzeń elementarnych  $\{\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}\}$  z prawdopodobieństwem 0.5 dla  $n = \frac{N}{2}$ .

Własności widmowe wielosinusoidalnego losowego sygnału pobudzającego są kształtowane poprzez odpowiedni wybór amplitud  $A_n$  ( $n = 0, 1, \dots, \frac{N}{2}$ ) poszczególnych składowych sinusoidalnych. Niech  $\Phi_{ww}(\omega T)$  ( $\Phi_{ww}(\omega T) < \infty$ ) będzie funkcją częstości względnej  $\omega T$  ( $\omega T \in [0, 2\pi)$ ,  $T$  jest okresem próbkowania) odpowiadającą funkcji gęstości widmowej mocy pewnego stacjonarnego w szerszym sensie procesu losowego  $w(i)$ . Wybór amplitud w taki sposób, że

- $A_n = 2 \sqrt{\frac{\Phi_{ww}(\Omega n)}{NT}}$  dla  $n = 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1$ ,
- $A_n = 2 \sqrt{\frac{\Phi_{ww}(\Omega n)}{NT}}$  dla  $n = 0$  oraz  $n = \frac{N}{2}$

powoduje, że periodogram, liczony za okres  $N$  wielosinusoidalnego losowego sygnału pobudzającego, jest równy gęstości widmowej  $\Phi_{ww}(\omega T)$  dla  $N$  równoodległych częstości z zakresu  $[0, 2\pi)$ . Własność ta, jest narzędziem umożliwiającym efektywną syntezę wielosinusoidalnych aproksymacji optymalnych sygnałów pobudzających [11]. Wielosinusoidalne losowe sygnały pobudzające są procesami niegaussowskimi, które gdy  $N$  wzrasta do nieskończoności stają się asymptotycznie gaussowskie.

Rozpatrzmy własności  $n$ -tych ( $n = 1, 2, \dots, \frac{N}{2}$ ) składowej sinusoidalnych

$$u_r^n(i) = A_{r,n} \sin(\Omega n i + \varphi_{r,n}) \quad (6)$$

dwóch  $N$ -elementowych wielosinusoidalnych losowych sygnałów pobudzających  $u_r(i)$  ( $r = 1, 2$ ) o własnościach widmowych zdefiniowanych przez funkcje  $\Phi_{ww}^1(\omega T)$ ,  $\Phi_{ww}^2(\omega T)$ . Biorąc pod uwagę uśrednianie po zbiorze realizacji można stwierdzić, że

dla każdego  $N$  składowe te są nieskorelowane, czyli ich funkcja korelacji wzajemnej:

$$E\{u_1^n(i)u_2^n(i-\tau)\} = 0 \quad (7)$$

dla  $\tau = 0, 1, \dots, \infty$ . Natomiast biorąc pod uwagę uśrednianie w dziedzinie czasu, dla pojedynczych realizacji, funkcja korelacji wzajemnej tych składowych sinusoidalnych dana jest zależnością:

$$R_{u_1^n u_2^n}(\tau) = A_{1,n} A_{2,n} \cos(\Omega n \tau + \varphi_{1,n} - \varphi_{2,n}). \quad (8)$$

Posiada ona tę własność, że dla każdego  $N$ :

$$E\{R_{u_1^n u_2^n}(\tau)\} = E\{u_1^n(i)u_2^n(i-\tau)\} = 0. \quad (9)$$

Dodatkowo asymptotycznie, gdy  $N \rightarrow \infty$ , dla dowolnych realizacji wielosinusoidalnych losowych sygnałów pobudzających  $u_r(i)$  ( $r = 1, 2$ ) zachodzi:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} R_{u_1^n u_2^n}(\tau) = 0 \quad a.s. \quad (10)$$

Przedstawione powyższej własności są podstawą zaproponowanej metody identyfikacji modeli Wienera.

#### 4. DOŚWIADCZENIE IDENTYFIKACYJNE

Doświadczenie identyfikacyjne jest przeprowadzane w sposób klasyczny dla pobudzeń wielosinusoidalnych [8, 9, 12]. W trakcie jego trwania obiekt pobudzany jest cyklicznie powtarzanym  $N$ -elementowym wielosinusoidalnym losowym sygnałem pobudzającym  $u(i)$ . Zbieranie próbek sygnału  $y(i)$  rozpoczyna się po zaniku przebiegów przejściowych związanych z rozładowaniem warunków początkowych. Po  $m$  powtórzeniach wielosinusoidalnego losowego sygnału pobudzającego zebranych zostaje  $mN$  próbek

$$\{y(0), y(1), \dots, y(mN-1)\} \quad (11)$$

sygnału  $y(i)$ . Konsekwencją tak przeprowadzanego doświadczenia identyfikacyjnego jest okresowość niezakłóconego sygnału wyjściowego z obiektu  $y_n(i)$ . Jego okres jest identyczny z okresem  $N$  wielosinusoidalnego losowego sygnału pobudzającego.

Niech  $\bar{y}(i)$  oznacza wartość średnią sygnału wyjściowego  $y(i)$  wyznaczoną dla chwil czasowych  $i = 0, 1, \dots, N-1$  na podstawie zebranych  $mN$  kolejnych wartości  $y(i)$ :

$$\bar{y}(i) = \frac{1}{m} \sum_{s=0}^{m-1} y(i+sN). \quad (12)$$

Powyższe wartości średnie  $\bar{y}(i)$ , będące wynikiem wstępnego przetworzenia danych pomiarowych, wraz z wartościami sygnału pobudzającego  $u(i)$  dla chwil

czasowych  $i = 0, 1, \dots, N-1$  są danymi startowymi dla procedury identyfikacji modeli Wienera.

#### 5. PROCEDURA IDENTYFIKACJI

Z własności zakłócenia  $v(i)$  ( $E\{v(i)\} = 0$ ) oraz okresowości niezakłóconego sygnału wyjściowego z obiektu  $y_n(i)$  wynika, że  $\bar{y}(i)$  ( $i = 0, 1, \dots, N-1$ ) jest nieobciążonym i zgodnym estymatorem jednego okresu niezakłóconego sygnału wyjściowego  $y_n(i)$  obiektu odpowiadającego jednemu okresowi cyklicznie powtarzanego  $N$ -elementowego wielosinusoidalnego losowego sygnału pobudzającego  $u(i)$ . Wariancja wyznaczonych ocen  $\bar{y}(i)$  zanika wraz ze wzrostem liczby przetwarzanych segmentów danych  $m$  jak  $\frac{1}{m}$  (gdy  $N > \tau_0$ ).

Wartości średnie  $\bar{y}(i)$  pozwalają wyznaczyć oceny  $\hat{v}(i)$  oddziaływujących na obiekt zakłóceń dla każdego  $N$ -elementowego segmentu danych  $s$  ( $s = 0, 1, \dots, m-1$ ) jako:

$$\hat{v}(i+sN) = y(i+sN) - \bar{y}(i), \quad (13)$$

gdzie  $i = 0, 1, \dots, N-1$ . Wyznaczone oceny  $\hat{v}(i)$  ( $i = 0, 1, \dots, mN-1$ ) mogą być użyte do identyfikacji modelu zakłócenia sprowadzonego na wyjście obiektu. Problem ten został przedyskutowany w [8, 9].

Z własności wielosinusoidalnego losowego sygnału pobudzającego  $u(i)$  oraz zależności (1) wynika, że dla celów identyfikacji modelu dynamicznej części liniowej można przyjąć, że niezakłócony sygnał wyjściowy  $y_n(i)$  może być przedstawiony w następującej postaci:

$$\begin{aligned} y_n(i) &= y_l(i) + v_1(i) + a = \\ &= z^{-d} \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} u(i) + v_1(i) + a, \end{aligned} \quad (14)$$

gdzie  $a$  jest pewną stałą, a  $v_1(i)$  jest zakłóceniem losowym o zerowej wartości oczekiwanej, które jest nieskorelowane z sygnałem pobudzającym  $u(i)$ . Przyjęcie takiego modelu uzasadnione jest następującym spostrzeżeniem: po zaniku warunków początkowych, w stanie drań ustalonych, sygnał  $y_l(i)$  będący niemierzalnym sygnałem wyjściowym dynamicznej części liniowej jest pewnym wielosinusoidalnym sygnałem losowym. W wyniku przekształcenia tego sygnału przez nieliniową funkcję  $f(\cdot)$  może pojawić się pewna składowa stała oraz dla każdej częstości względnej  $\Omega_n$  ( $n = 1, 2, \dots, \frac{N}{2}$ ) oprócz składowej sinusoidalnej wynikającej z pobudzenia obiektu składową  $A_n \sin(\Omega_n i + \varphi_n)$ , mającą fazę losową  $\varphi_n$ , mogą pojawić się inne składowe sinusoidalne o fazach zawierają-

cych składowe losowe  $\varphi_i$  ( $i=1,2,\dots,\frac{N}{2}$  takie, że  $t \neq n$ ), które wraz z  $\varphi_n$  są niezależnymi zmiennymi losowymi. Składowe te są reprezentowane w modelu (13) poprzez zakłócenie  $v_1(i)$ . Zgodnie z własnością (7), zakłócenie  $v_1(i)$  jest nieskorelowane z pobudzeniem  $u(i)$ .

Korzystając z tej interpretacji modelu Wienera oceny parametrów modelu dynamicznej części liniowej można wyznaczyć na podstawie  $N$ -elementowych wartości średnich  $\bar{y}(i)$  sygnału wyjściowego oraz pobudzenia  $u(i)$  korzystając z metody identyfikacji modeli obiektów dynamicznych wykorzystującej do estymacji parametrów metodę zmiennej instrumentalnej [14]. Dokładność otrzymanych ocen parametrów modelu dynamicznej części liniowej można zgodnie z zależnościami (7) oraz (10) zwiększać poprzez wydłużanie okresu  $N$  wielosinusoidalnego losowego sygnału pobudzającego lub (i) uśrednienie ocen otrzymanych w wyniku identyfikacji parametrów dla różnych realizacji  $N$ -elementowego wielosinusoidalnego losowego sygnału pobudzającego.

W kolejnym kroku, bazując na wyznaczonych ocenach parametrów modelu dynamicznej części liniowej można wyliczyć oceny wyjść  $\hat{y}_i(i)$  tej części dla chwil czasowych  $i=0,1,\dots,N-1$ . Wartości te wraz z ocenami  $\bar{y}(i)$  ( $i=0,1,\dots,N-1$ ) mogą posłużyć do identyfikacji modelu nieliniowej funkcji  $f(\cdot)$ . Wykres zależności  $\bar{y}(i)$  w funkcji  $\hat{y}_i(i)$  jest dobrym narzędziem, które można wykorzystać do detekcji istnienia nieliniowości występującej w modelu Wienera.

## 6. PRZYKŁAD

Do doświadczeń symulacyjnych wybrano obiekt, którego transmitancja dynamicznej części liniowej dana jest równaniem różnicowym o postaci:

$$y_i(i) = z^{-1} \frac{0.337}{1.000 - 1.500z^{-1} + 0.700z^{-2}} u(i), \quad (15)$$

Jako nieliniową funkcję  $f(\cdot)$  występującą w modelu (1) przyjęto w kolejnych doświadczeniach następujące zależności:

- $f_1(y_i(i)) = y_i(i) + 2y_i^2(i) + 0.5y_i^3(i)$ ,
- $f_2(y_i(i)) = \begin{cases} 0.5\pi & ; \quad y_i(i) \geq 1 \\ \arcsin(y_i(i)) & ; \quad -1 < y_i(i) < 1, \\ -0.5\pi & ; \quad y_i(i) \leq -1 \end{cases}$ ,
- $f_3(y_i(i)) = \begin{cases} 1 & ; \quad y_i(i) \geq 0 \\ -1 & ; \quad y_i(i) < 0 \end{cases}$ .

W trakcie doświadczeń symulacyjnych założono, że na obiekt nie oddziałuje zewnętrzne zakłócenie ( $v(i) = 0$ ). Dla celów identyfikacji obiekt pobudzany był  $N$ -elementowym ( $N=128, 512$  lub  $4096$ ) wielosinusoidalnym

idealnym losowym sygnałem pobudzającym o własnościach widmowych zdefiniowanych przez funkcję  $\Phi_{ww}(\omega T) = 1$  ( $\omega T \in [0, 2\pi)$ ). Dla każdej wybranej wartości  $N$  wygenerowano 100 różnych realizacji wielosinusoidalnego losowego sygnału pobudzającego i dla każdej z nich przeprowadzono symulacyjnie doświadczenie identyfikacyjne przyjmując  $m=1$ . Wyniki identyfikacji parametrów modelu części liniowej, w postaci wartości średnich i odchyłeń standardowych otrzymanych ocen parametrów modelu uzyskanych za pomocą metody zmiennej instrumentalnej, przedstawiono w tabelach 1, 2 i 3. W trakcie identyfikacji założono znajomość struktury modelu i jej zgodność ze strukturą obiektu.

Tabela 1. Oceny parametrów dynamicznej części liniowej obiektu  $-N=128$ .

Parametr	Oceny parametrów		
	$f_1(\cdot)$	$f_2(\cdot)$	$f_3(\cdot)$
0.337	0.342 (0.056)	0.339 (0.014)	0.345 (0.048)
-1.500	-1.473 (0.106)	-1.499 (0.024)	-1.485 (0.080)
0.700	0.655 (0.110)	0.699 (0.023)	0.691 (0.078)

Tabela 2. Oceny parametrów dynamicznej części liniowej obiektu  $-N=512$ .

Parametr	Oceny parametrów		
	$f_1(\cdot)$	$f_2(\cdot)$	$f_3(\cdot)$
0.337	0.337 (0.025)	0.337 (0.006)	0.335 (0.016)
-1.500	-1.492 (0.046)	-1.499 (0.011)	-1.501 (0.027)
0.700	0.681 (0.045)	0.699 (0.010)	0.701 (0.026)

Tabela 3. Oceny parametrów dynamicznej części liniowej obiektu  $-N=4096$ .

Parametr	Oceny parametrów		
	$f_1(\cdot)$	$f_2(\cdot)$	$f_3(\cdot)$
0.337	0.336 (0.010)	0.336 (0.002)	0.337 (0.005)
-1.500	-1.499 (0.017)	-1.500 (0.003)	-1.499 (0.009)
0.700	0.694 (0.016)	0.700 (0.003)	0.699 (0.009)

Dla wszystkich doświadczeń identyfikacyjnych, w których nieliniowość obiektu była modelowana z wykorzystaniem funkcji  $f_1(\cdot)$ , na podstawie wartości średnich sygnału wyjściowego  $\bar{y}(i)$  ( $i=0,1,\dots,N-1$ ) oraz odpowiadających im ocen wyjść modelu dynamicznej części liniowej  $\hat{y}_i(i)$ , dokonano identyfikacji modelu funkcji  $f(\cdot)$  w postaci wielomianu stopnia 3 (wraz z wyrazem wolnym). Wartości średnie otrzymanych ocen parametrów wielomianu wraz z odchyleniami standardowymi zamieszczono tabeli 4.

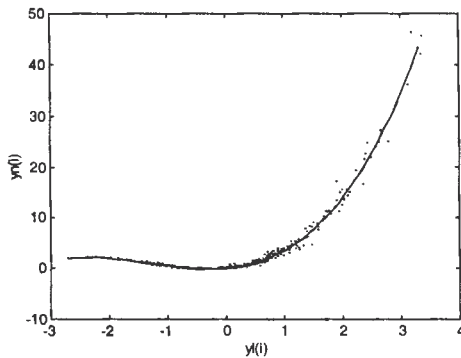
Tabela 4. Oceny parametrów funkcji  $f_1(\cdot)$ .

Parametr	Oceny parametrów		
	$N = 128$	$N = 512$	$N = 4096$
0.000	0.190 (0.229)	0.060 (0.063)	0.009 (0.011)
1.000	1.096 (0.338)	1.052 (0.100)	1.006 (0.014)
2.000	1.746 (0.056)	1.924 (0.025)	1.995 (0.010)
0.500	0.374 (0.170)	0.459 (0.050)	0.497 (0.007)

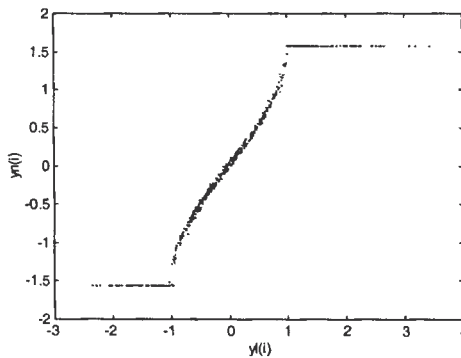
Przykładowe wykresy wartości średnich sygnału wyjściowego  $\bar{y}(i)$  ( $i=0,1,\dots,N-1$ ) w funkcji ocen  $\hat{y}_i(i)$



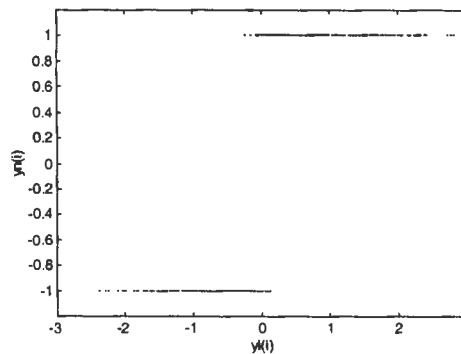
wyjscie modelu dynamicznej czesci liniowej dla pojedynczych realizacji wielosinusoidalnego losowego sygnalu pobudzajacego ( $N=512$ ) oraz kazdej z wybranych do doswiadczen funkcji  $f(\cdot)$  przedstawiono na rys. 1, 2 oraz 3. Zamieszczone wykresy sa pewnymi ocenami wystepujacych w modelu Wienera nieliniowosci. Dodatkowo, dla nieliniowosci modelowanej funkcja  $f_1(\cdot)$  (rys. 1) wrysowano linia ciagla ocene tej funkcji wyznaczona na podstawie zidentyfikowanego modelu w postaci wielomianu stopnia 3. Nalezzy zwrócic uwage na to, ze w przeprowadzanych doswiadczeniach identyfikacyjnych zachodzi rownosc  $\bar{y}(i) = y_n(i)$  (dla  $i = 0, 1, \dots, N-1$ ), gdzy przyjeto  $v(i) = 0$  oraz  $m=1$ .



Rys. 1. Wykres  $\bar{y}(i)$  w funkcji  $\hat{y}_i(i)$  ( $i = 0, 1, \dots, N-1$ ) – funkcja  $f_1(\cdot)$ ,  $N=512$ .



Rys. 2. Wykres  $\bar{y}(i)$  w funkcji  $\hat{y}_i(i)$  ( $i = 0, 1, \dots, N-1$ ) – funkcja  $f_2(\cdot)$ ,  $N=512$ .



Rys. 3 Wykres  $\bar{y}(i)$  w funkcji  $\hat{y}_i(i)$  ( $i = 0, 1, \dots, N-1$ ) – funkcja  $f_3(\cdot)$ ,  $N=512$ .

Zamieszczone wyniki doswiadczen identyfikacyjnych wykazaly duza efektywnosc zaproponowanej metody identyfikacji modeli Wienera zarowno w przypadku identyfikacji modelu jego dynamicznej czesci liniowej jak i statycznej nieliniowosci dolaczonej na jej wyjsciu. Nalezzy podkreślić, że otrzymano bardzo dokładne wyniki identyfikacji już dla stosunkowo małej liczby danych ( $N=128$ ), a ich dokładność wzrasta wraz ze wzrostem liczby przetwarzanych danych.

## 7. POSUMOWANIE

W pracy przedstawiono nową metodę identyfikacji modeli Wienera z wykorzystaniem wielosinusoidalnego losowego sygnalu pobudzajacego. Idea przedstawionej metody jest dekompozycja problemu identyfikacji modelu Wienera na niezależne problemy identyfikacji modeli dynamicznej czesci liniowej wraz ze statyczna nieliniowoscia oraz zakłócenia sprowadzonego na wyjście.

### WIENER MODEL IDENTIFICATION WITH MULTISINE RANDOM EXCITATION SIGNALS

**Abstract:** In the paper, a new Wiener model identification method based on multisine random excitation signals is proposed. This excitation used in a specially designed identification experiment allows to decompose Wiener model identification problem into independent linear dynamic part, static nonlinearity and separate disturbance-channel identification problems. Properties of the proposed identification method are discussed and illustrated by a simulation example.

### Literatura

- [1] Bai E.W. (2002) A blind approach to the Hammerstein- Wiener model identification. *Automatica*, 38, 967-979.
- [2] Bai E.W. (2002) Identification of linear systems with hard input nonlinearities of known structure. *Automatica*, 38, 853-860.
- [3] Bai E.W. (2003) Frequency domain identification of Wiener models. *Automatica*, 39, 1521-1530.
- [4] Barker H. A., Tan A. H., Gogfrey K. R. (2003) Wiener models of direction-dependent dynamic systems. *Automatica*, 39, 127-133.
- [5] Bendat J.S. (1998) *Nonlinear Systems Techniques and Applications*. John Wiley & Sons, New York.
- [6] Bloemen H.H.J., Chou C.T., van den Boom T.J.J., Verdult V., Verhaegen M., Backx T.C. (2001) Wiener model identification and predictive control for dual composition control of a distillation column. *Journal of Process Control*, 601-620.
- [7] Crama P., Schoukens J. (2004) Hammerstein-Wiener system estimator initialization. *Automatica*, 40, 1543-1550.
- [8] Figwer J. (1996) Multisine Excitation for Process Identification. *Archives of Control Sciences*, 5(XLI), 279-295.

- [9] Figwer J. (1998) Two-Input System Identification Using Bivariate Multisine Excitation, *Proceedings of the Fifth International Symposium on Methods and Models in Automation and Robotics, Międzyzdroje*, 2, 571-576.
- [10] Figwer J. (1999) Random Process Synthesis and Simulation. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Automatyka*, Z. 126, Gliwice.
- [11] Figwer J. (1999) Synteza optymalnych sygnałów pobudzających do identyfikacji charakterystyk amplitudowo-fazowych, *Materiały XIII Krajowej Konferencji Automatyki, Opole*, 229-232.
- [12] Figwer J., Niederliński A., Kasprzyk J. (1993) A New Approach to the Identification of Linear Discrete-Time MISO Systems. *Archives of Control Sciences*, 2, 223-239.
- [13] Grębliński W. (1992) Nonparametric identification of Wiener systems. *IEEE Transactions on Information Theory*, 38, 1487-1493.
- [14] Niederliński A., Kasprzyk J., Figwer J. (1997) *MULTI-EDIP Analizator wielowymiarowych sygnałów i obiektów*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- [15] Pearson R. K. (1995) Nonlinear input/output modeling. *Journal of Process Control*, 5, 197-211.
- [16] Pearson R. K., Pottman M. (2000) Gray-box identification of block-oriented nonlinear models. *Journal of Process Control*, 10, 301-315.
- [17] Pintelon R., Schoukens J. (2001) *System Identification. A Frequency Domain Approach*. IEEE Press, New York.
- [18] Quaglioni V., Prevdi F., Contro R. Bittanti S. (2002) A discrete-time nonlinear Wiener model for the relaxation of soft biological tissues. *Medical Engineering & Physics*, 24, 9-19.
- [19] Schoukens J., Pintelon R., Dobrowiecki T. Rolain Y. (2005) Identification of linear systems with nonlinear distortions. *Automatica*, 42, 491-504.
- [20] Vörös J. (1997) Parameter Identification of Discontinuous Hammerstein Systems. *Automatica*, 33, 1141-1146.
- [21] Vörös J. (2001) Parameter identification of Wiener systems with discontinuous nonlinearities. *Systems & Control Letters*, 44, 363-372.



**Instytut Badań Systemowych  
Polskiej Akademii Nauk**

ISBN 83-89475-02-2