

## ASPEKTY PRAKTYCZNE IDENTYFIKACJI METODĄ IOLMS

*Metoda IOLMS (Identyfikacja Off-Line Model Strojony) jest metodą deterministyczną identyfikacji, w której zaangażowano technikę komputerową i symulację cyfrową. Metodę tę opracowano do identyfikacji liniowych obiektów dynamicznych typu SISO i MIMO [1, 2]. Okazało się jednak, że nadaje się ona również do identyfikacji systemów nieliniowych [3, 4]. Za pomocą opracowanego dotychczas oprogramowania identyfikuje się obiekty inercyjne i oscylacyjne bez opóźnienia i z opóźnieniem, z całkowaniem i bez całkowania. Metoda IOLMS okazała się bardzo wydajnym narzędziem identyfikacji. Dopasowywanie modelu do wyników pomiarów trwa zaledwie kilka do kilkunastu minut. W pracy przedstawiono zarys metody IOLMS oraz jej możliwości i zakres zastosowania.*

## PRACTICAL ASPECTS OF IOLMS METHOD IDENTIFICATION

*Tuning model method off-line identification (IOLMS) has been invented for dynamic SISO and MIMO linear processes identification as active and deterministic method. In practice the IOLMS method is also right for some cases of nonlinear objects. Computer aided physical experimentation at the plant and intensive simulation optimization of identification model are engaged in this method. Such approach is very efficient and it guarantees very small approximation error. Brief description IOLMS method and its practical features are presented in the paper.*

### 1. WPROWADZENIE

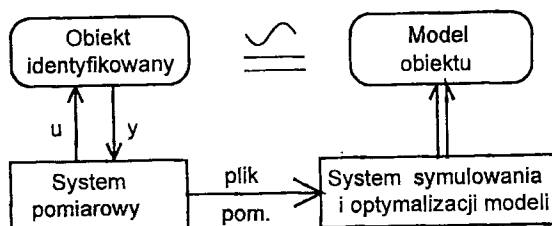
Identyfikacja metodą IOLMS jest prowadzona dwuetapowo: 1) wykonanie jednorazowego doświadczenia na obiekcie identyfikowanym i zarejestrowanie wyników doświadczenia (sygnały we/wy) w formie pliku; 2) dobranie — metodą symulacyjną — modelu identyfikowanego obiektu (w sensie struktury i parametrów) pasującego do wyników doświadczenia.

Doświadczenie jest wspomagane i prowadzone automatycznie przez program pomiarowy. Sygnały pobudzające obiekt mają kształty standardowe. Dopasowywanie odpowiedzi modelu obiektu do rzeczywistej odpowiedzi obiektu zarejestrowanej w pliku odbywa się w procesie symulacji za pomocą programu symulacyjnego opracowanego do identyfikacji.

Strukturę modelu obiektu dobiera operator z katalogu symulatorów umieszczonych w programie symulacyjnym. Do identyfikacji parametrów modelu stosuje się technikę strojenia symulatora. W tym etapie identyfikacji operator jest wykorzystywany jako inteligentny naturalny system ekspertowy. Dzięki temu, dopasowanie modelu przebiega bardzo sprawnie i trwa krótko, a szumy pomiarowe są skutecznie uśredniane przez operatora. Eksperymenty weryfikacyjne metody IOLMS wykazały, że nawet odpowiedzi obiektu obciążone znacznymi szumami wynikającymi z natury pomiarów cyfrowych jak i z niedoskonałości przesyłania sygnałów, nie stanowią przeszkody w identyfikowaniu obiektów.

## 2. SKRÓCONY OPIS SYSTEMU IOLMS

System identyfikacji metodą IOLMS jest systemem dość uniwersalnym, ponieważ może służyć do identyfikowania szerokiej gamy procesów. Składa się z dwóch oddzielnych części: systemu pomiarowego i systemu symulowania modeli obiektu oraz prowadzenia dopasowywania modelu do charakterystyki obiektu zarejestrowanej w pliku pomiarowym (rys.1). Weryfikacja rezultatów identyfikacji jak widać, jest wbudowana w ten system.



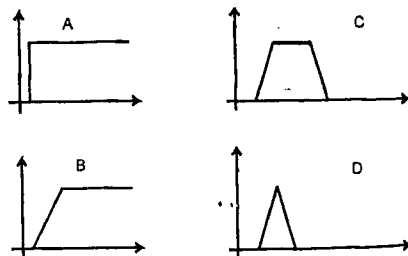
Rys.1. Schemat systemu IOLMS

System *Pomiarowy* składa się z części sprzętowej i części programowej. Część sprzętowa służy do połączenia sygnałowego obiektu z komputerem pomiarowym, a ściślej do wprowadzania wymuszenia na obiekt i do przeprowadzania pomiarów cyfrowych odpowiedzi obiektu oraz rejestrowania wyników eksperymentu na dysku. Część programowa natomiast wspomaga przygotowanie doświadczenia identyfikacyjnego, a po wystartowaniu doświadczenia prowadzi je i nadzoruje przebieg doświadczenia.

Przygotowanie doświadczenia identyfikacyjnego polega na: wybraniu kształtu wymuszenia  $u$  (rys.2), nastawieniu jego parametrów (amplitudy, okresu próbki, horyzontu doświadczenia). Po wykonaniu tych czynności wykonuje się start doświadczenia, które dalej jest prowadzone automatycznie. Plik pomiarowy jest zapisywany na dysku.

*System symulowania i optymalizacji modeli obiektu (SOM)* może się znajdować na komputerze PC używanym do przeprowadzania doświadczeń fizycznych lub na dowolnym innym PC. Oprogramowanie działa zarówno w systemie DOS jak i w Windows.

System SOM jest programem składającym się z zestawu numerycznych modeli obiektów (tabl.1) oraz z interfejsu programowego ułatwiającego operatorowi prowadzenie doświadczeń symulacyjnych. Doświadczenia symulacyjne są prowadzone w celu dobrania takiego modelu obiektu, którego odpowiedź jest najlepiej dopasowana do zarejestrowanej odpowiedzi obiektu. Wymuszenie wprowadzane do modelu obiektu odpowiada wymuszeniu  $u$  pobudzającemu obiekt w czasie eksperymentu pomiarowego. Opis tego wymuszenia znajduje się na początku pliku pomiarowego.



Rys.2. Repertuar wymuszeń  $u(t)$

Tabl.1. Transmitancje modeli obiektów identyfikowanych w systemie IOLMS

G(s)			
$\frac{K \cdot \exp(-s \cdot T_o)}{\prod_{i=1}^3 (s \cdot T_i + 1)}$	$\frac{K_v \cdot \exp(-s \cdot T_o)}{s \cdot \prod_{i=1}^3 (s \cdot T_i + 1)}$	$\frac{K \cdot \exp(-s \cdot T_o)}{T^2 s^2 + 2\zeta Ts + 1}$	$\frac{K_v \cdot \exp(-s \cdot T_o)}{s \cdot (T^2 s^2 + 2\zeta Ts + 1)}$
$\frac{K \cdot \exp(-s \cdot T_o)}{(T^2 s^2 + 2\zeta \cdot Ts + 1) \cdot (s \cdot T_i + 1)}$		$\frac{K_v \cdot \exp(-s \cdot T_o)}{s \cdot (T^2 s^2 + 2\zeta \cdot Ts + 1) \cdot (s \cdot T_i + 1)}$	

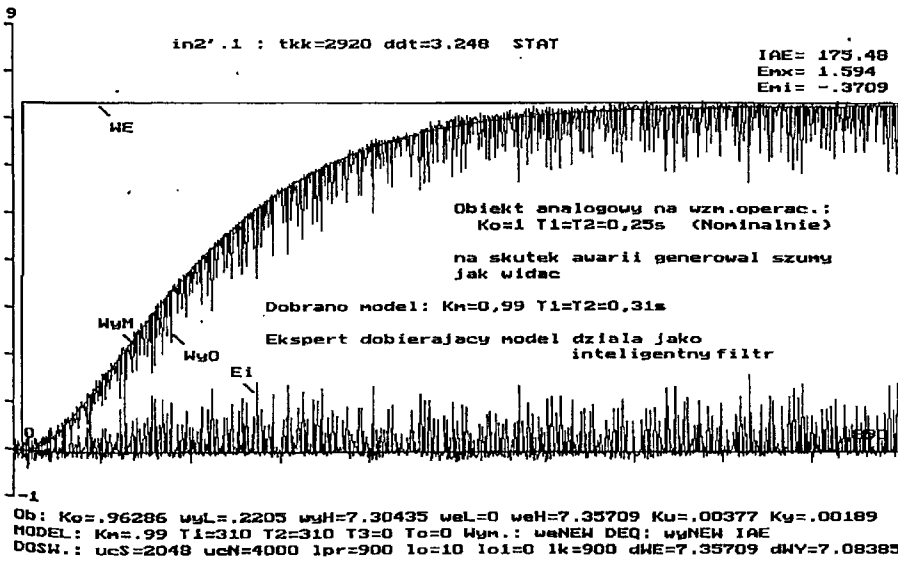
Przy identyfikowaniu obiektów typu MIMO eksperyment fizyczny polega na tym, że wymuszenie  $u$  wprowadza się tylko na jedno wejście i jednocześnie rejestruje się odpowiedzi otrzymywane na wszystkich wyjściach obiektu. Procedurę tę powtarza się kolejno dla wszystkich wejść sterujących obiektu. Transmitancje będące elementami transmitancji macierzowej obiektu wielowymiarowego otrzymuje się w drugim etapie identyfikacji dopasowując modele poszczególnych kanałów obiektu do odpowiedzi zawartych w odpowiadających im plikach pomiarowych.

Czas trwania eksperymentów fizycznych zależy przede wszystkim od skali czasu obiektu, jest tym dłuższy im wolniejszy jest obiekt identyfikowany. Do celów identyfikacji metodą IOLMS wystarcza zarejestrowanie jednego przebiegu  $y(t)$ .

Kryterium optymalizacji stosowane przy dopasowywaniu odpowiedzi modelu obiektu do zarejestrowanej odpowiedzi nie jest przedstawiane formalnie, ponieważ zadaniem operatora w systemie IOLMS jest dobranie modelu bliskiego obiektowi w bardzo złożonej sytuacji:

- Identyfikacja ma służyć zaprojektowaniu systemu sterowania obiektu.
- Z punktu widzenia teorii systemów, model obiektu przeznaczony do sterowania powinien być jak najprostszy, zatem nie ma potrzeby formalizowania kryteriów jego doboru do obiektu, ponieważ to prowadziłoby prawie zawsze do skomplikowania modelu.
- Odpowiedzi  $y(t)$  obiektu zarejestrowane w pliku pomiarowym są obciążone szumami kwantowania i zakłóceń. Szumy są niekiedy bardzo duże (np. przy awarii linii przesyłowej, rys.3), a ich filtrowanie (jakkolwiek możliwe maszynowo) nie jest potrzebne, ponieważ zniekształcałoby przebieg właściwej odpowiedzi obiektu. Przy porównywaniu przebiegu zmierzonego z przebiegiem modelowanym operator wykonuje uśrednianie szumów automatycznie wykorzystując własne zasoby: wzrok, inteligencję i naturalną sieć neuronową.

Takie podejście pozwala na wykorzystanie do celów identyfikacji nawet niezbyt udanych wyników eksperymentu (rys.3). Ma to bardzo duże znaczenie praktyczne ze względu na wysokie koszty deterministycznych eksperymentów fizycznych.



Rys.3. Sygnały obserwowane makroskopowo w drugim etapie identyfikacji

Dotychczasowe doświadczenia z systemem IOLMS wykazały, że znalezienie modelu obiektu typu SISO trwa od kilku do kilkunastu minut.

Czas dopasowywania modelu (CDM) do zarejestrowanej odpowiedzi obiektu nie zależy od skali czasu obiektu identyfikowanego. Współczesne komputery PC działają tak szybko, że symulowanie wymienionych modeli (tabl.1) trwa kilka sekund, zatem CDM zależy od liczby eksperymentów symulacyjnych, które musi wykonać operator optymalizujący model, a ściślej biorąc od czasu potrzebnego operatorowi do namysłu przy podejmowaniu decyzji o zmianie parametrów. CDM jest więc uzależniony od szybkości podejmowania decyzji przez operatora, od jego doświadczenia w dziedzinie dynamiki systemów, symulacji, optymalizacji praktycznej, oraz teorii i techniki sterowania. Program symulacyjny wspomaga operatora w podejmowaniu decyzji przez obliczanie i wyświetlanie wskaźników jakości (bezpośrednich i pośrednich) błędu identyfikacji.

Weryfikacja metody IOLMS była przeprowadzana w taki sposób, że [5]:

- Budowano modele obiektu na wzmacniaczach operacyjnych o zadanych transmitancjach i dokładnie nastawialnych parametrach. Modele takie włączano do systemu pomiarowego.
- Modele analogowe poddawano różnorodnym doświadczeniom identyfikacyjnym (wymuszenia o różnych kształtach i różnych parametrach – amplituda, nachylenie).
- Do odpowiedzi uzyskanych w wyniku doświadczeń dobierano modele o transmitancjach takich samych jak transmitancje obiektów i rejestrowano niedokładność identyfikacji parametrów.

W opisany sposób przebadano ponad 2000 wariantów identyfikacji. Amplitudy wymuszeń nastawiano w granicach (10 – 70) % zakresu proporcjonalności (ZP). Przy małych amplitudach wymuszeń maleje stosunek sygnał/szum (S/N). Niedokładność identyfikacji zależy od stosunku S/N — im większe jest S/N tym wyższa jest dokładność identyfikacji.

Stałe czasowe metodą IOLMS identyfikuje się z niedokładnością (0,25 – 8) % — zależnie od wartości względnej identyfikowanej stałej czasowej. Identyfikacja najmniejszej stałej czasowej jest obciążona największym błędem. Wzmocnienie jest identyfikowane z wyższą dokładnością.

### 3. MOŻLIWOŚCI SYSTEMU IOLMS

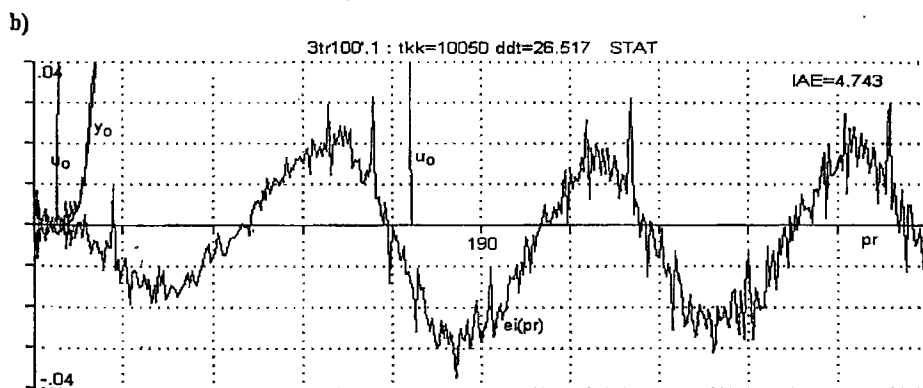
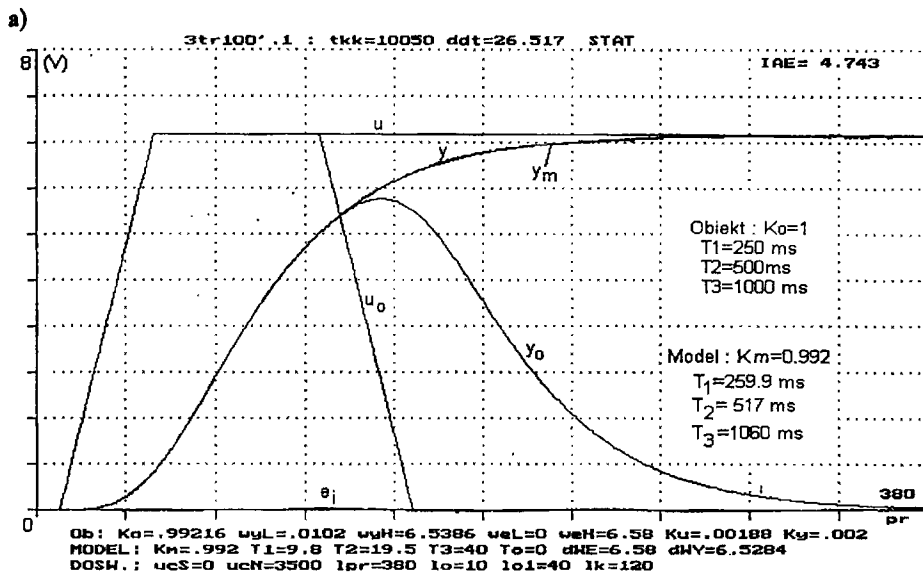
W przykładzie przedstawionym na rys.3 stałe czasowe wyznaczono z błędem ok. 20% — świadczy to o tym, że nawet wyniki pomiarów  $y(t)$  o bardzo złej jakości można wykorzystać w metodzie IOLMS. Poniżej przedstawimy kilka przykładów identyfikacji obiektów przy użyciu wymuszeń o różnych kształtach i w przypadkach niepatologicznych. Przy bezawaryjnie prowadzonych eksperymentach pomiarowych S/N jest znacznie mniejszy i identyfikacja jest znacznie dokładniejsza.

Redukcja rzędu modelu w metodzie IOLMS jest bardzo łatwa, ponieważ z założenia dobiera się model o pożądanym rzędzie.

Na rys.4 i 5 przedstawiono identyfikację trapezowymi sygnałami pobudzającymi  $u(t)$  [5, 6].

W typowej sytuacji identyfikacyjnej sygnał identyfikacyjny  $u_0$  umożliwia dobre dobranie modelu (rys.4). Na tle zarejestrowanej odpowiedzi  $y_0$  nie widać szumów pomiarowych, a uchyb identyfikacji  $e_i$  jest niewidoczny ( $\max(e_i) = 0,4\%$  ZP). Model dopasowano do sygnału wyjściowego  $y$  skonstruowanego na podstawie sygnału zmierzonego  $y_0$ . W oparciu o  $y$  wyznacza się wzmocnienie modelu  $K_m$  i stałe czasowe modelu według metodyki opisanej

rzono pojemności kondensatorów i dobrano rezystory modelu operacyjnego tak, by wzmożenie  $K_o \approx 1$ . Stałe czasowe wynosiły: 0,25, 0,5 i 1 s. W wyniku identyfikacji tego obiektu wyznaczono następujące stałe modelu:  $K_m=0,992$ ,  $T_1=259,9$  ms,  $T_2=517$  ms,  $T_3=1060$  ms.



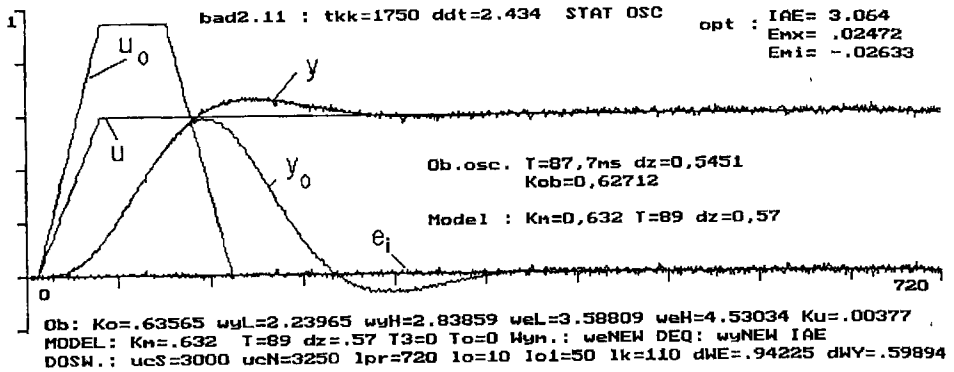
Rys.4. Typowa sytuacja identyfikacji metodą IOLMS, amplituda wymuszenia 81% ZP:

a) wykresy w skali normalnej, b) rzędne w powiększeniu; układ inercyjny 3-rzędny;  $u_o$ ,  $y_o$  — oryginalne wymuszenie i odpowiedź,  $u$ ,  $y$  — sygnały odtworzone,  $e_i$  — uchyb identyfikacji,  $ddt$  — czas kwantowania w ms,  $pr$  — numer próbki sygnału mierzonego

Na rys.5 przedstawiono wykresy obiektu oscylacyjnego zidentyfikowanego słabym impulsem trapezowym (12% ZP), o dwukrotnie krótszym czasie trwania. Przy tak słabym wymuszeniu znacznie zmalał stosunek S/N i szumy są widoczne w normalnej skali wykresu. Pomimo tego, bez wysiłku zidentyfikowano parametry obiektu z małą niedokładnością:  $K_{ob} - 0,78\%$ ;  $T - 1,48\%$ ;  $\zeta - 4,58\%$ .

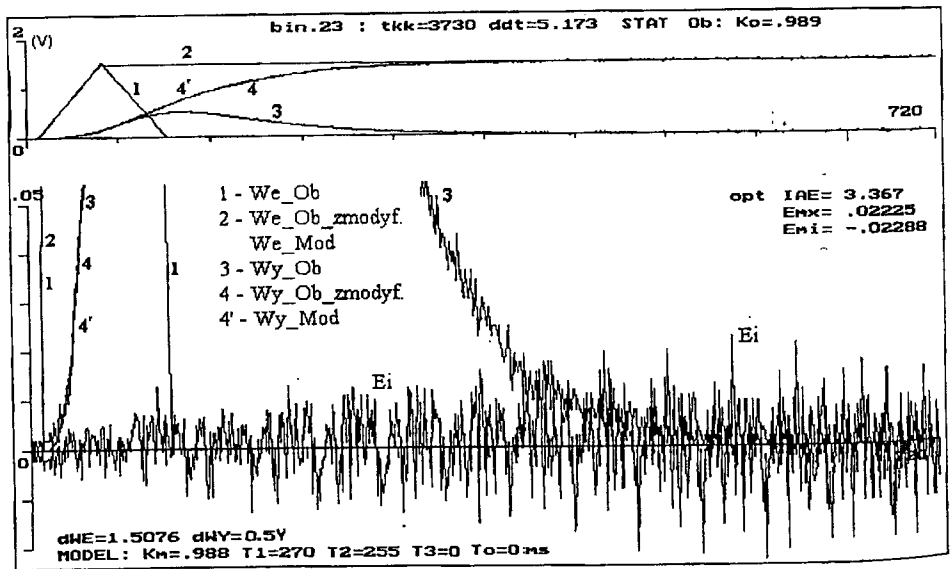
Sygnał zarejestrowany  $y_o$  (rys.5) służy do skonstruowania odpowiedzi obiektu  $y$  odpowiadającej sygnałowi  $u$  (zredukowanemu względem wyjścia). Na podstawie sygnału  $y$  pro-

wadzone jest dopasowywanie modelu.



Rys.5. Obiekt oscylacyjny identyfikowany słabym sygnałem; zwiększony udział szumów;  
 $E_{mx}$ ,  $E_{mi}$  — maksymalna i minimalna wartość uchybu identyfikacji

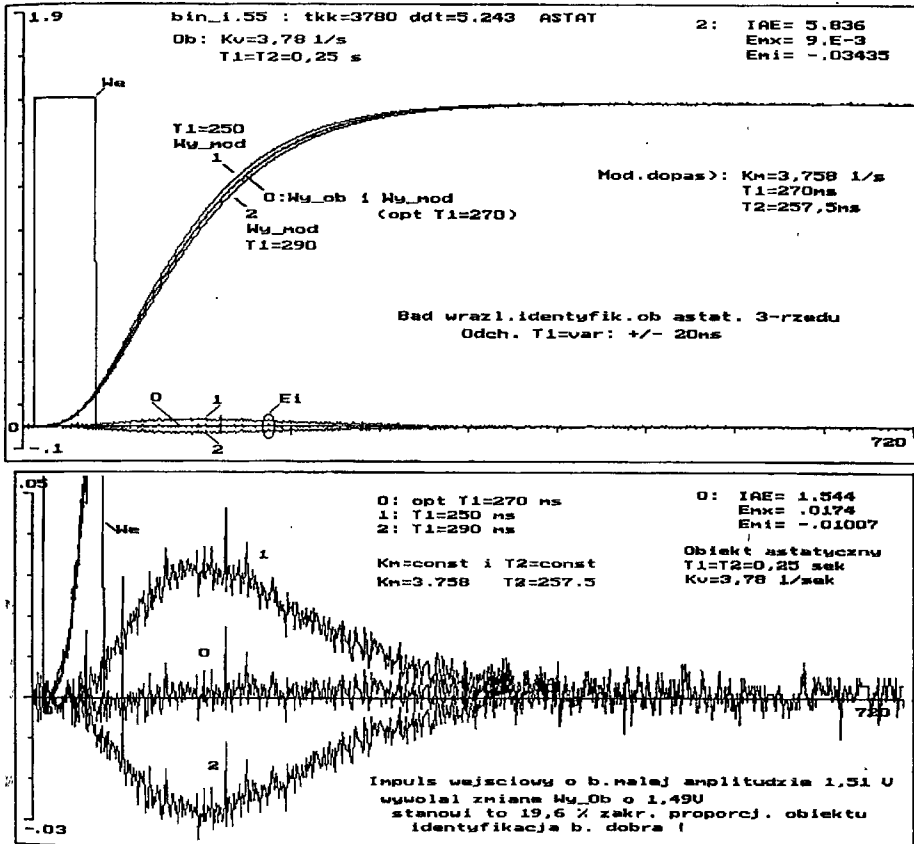
Trójkątne sygnały również nadają się do identyfikowania metodą IOLMS (rys.6). Identyfikacja obiektu inercyjnego 2-rzędu o parametrach:  $K=0,987$ ,  $T1=T2=0,25s$ , za pomocą trójkątnego impulsu wymuszającego 1 o amplitudzie 0,5V (6,6% ZP) dała następujące rezultaty:  $Km=0,989$   $T1=265ms$   $T2=260ms$ .



Rys.6. Pobudzenie obiektu impulsem trójkątnym przy identyfikacji obiektu 2xINER [6]

Dobry system identyfikacji powinna cechować duża wrażliwość wskaźników jakości identyfikacji na zmiany parametrów modelu ( $WPM$ ). Z oczywistych względów zależy ona od kształtu wymuszenia, a ściślej od szerokości widma sygnału pobudzającego obiekt. Szersze widmo implikuje wyższą  $WPM$ . Wrażliwość ta w systemie IOLMS jest wystarczająco duża (rys.7). Trzeba jednak zauważyć, że — ku zaskoczeniu autora — nawet przy sygnale RAMP relatywnie wolno narastającym (ok.10% ZP/s) praktycznie udało się znaleźć parametry ( $T$ ,  $\zeta$ ) szyb-

kiego obiektu oscylacyjnego ( $\zeta_o=0,54561$  i  $T_o=87,7ms$ ) z niedokładnością rzędu 5%.



Rys.7. Ilustracja dobrej (dużej) wrażliwości systemu IOLMS na zmiany parametrów modelu strojonego w okolicach punktu optymalnego [6]

#### 4. UWAGI KOŃCOWE

Z praktycznego punktu widzenia rzeczą istotną jest możliwość wprowadzania wymuszeń pobudzających obiekt identyfikowany o potrzebnym kształcie. Wiele obiektów ma stałoprędkościowe elementy wykonawcze, a więc pobudzanie procesu identyfikowanego impulsem zbliżonym do prostokątnego jest w takim przypadku niemożliwe. Metoda IOLMS nie stwarza tutaj ograniczeń, ponieważ działa równie dobrze przy zastosowaniu impulsów trapezowych, a nawet piłokształtnych. Prędkość narastania i opadania tych impulsów można dobrać dowolnie, a więc dopasować do prędkości siłownika.

Badania przeprowadzone dotychczas wykazały, że metoda (i system IOLMS) ma następujące właściwości istotne z praktycznego punktu widzenia:

- a) jest: ♦ mało wrażliwa na szумы pomiarowe; ♦ dobrze wrażliwa na zmiany parametrów modelu w otoczeniu punktów optymalnych;

- b) umożliwia: ♦ skuteczną i łatwą redukcję modelu identyfikowanego obiektu; ♦ osiągnięcie dużej dokładności dopasowywania modelu do identyfikowanego obiektu (stałe czasowe identyfikuje się z niedokładnością (0,5...5) %, zależnie od kształtu i amplitudy wymuszenia);
- c) nadaje się do: ♦ identyfikowania obiektów typu *Black-Box* za pomocą wszystkich wymienionych w pracy wymuszeń (STEP, RAMP, TRAP SAW) — nawet bardzo słabych, a mimo tego uchyb identyfikacji nie przekracza (0,25...1) %;
- d) jest — jak pokazują prezentowane przypadki — odporna na szумы pomiarowe;
- e) umożliwia: ♦ skuteczne identyfikowanie obiektów typu *Black Box* o wielu wejściach i liczbie wyjść ograniczonej interfejsem pomiarowym;
- f) umożliwia identyfikowanie parametryczne obiektów nieliniowych pod warunkiem, że struktura tych obiektów zostanie wcześniej określona [3, 4].

## LITERATURA

- [1] A. J. Marusak: *Identyfikacja deterministyczna obiektów typu SISO metodą modelu strojonego wspomaganą  $\mu C$  off-line*; Prace Sympozjum SPD-7 „Symulacja Procesów Dynamicznych”, Polana Chochołowska 1992, ss. 239-244.
- [2] A. J. Marusak: *System IOLMS identyfikacji obiektów typu MIMO*; Prace Sympozjum SPD-8, Polana Chochołowska 1994, ss. 315-320. (Praca wykonana w ramach grantu KBN nr 8S505 043 04).
- [3] J. Pułaczewski, A. Marusak, P. Marusak: *Badania regulatorów zaprojektowanych do obiektu nieliniowego zidentyfikowanego metodą IOLMS*; Prace Sympozjum SPD-9, Polana Chochołowska 1996, ss. 167-176.
- [4] J. Gustowski, A. Marusak: *Silnik prądu stałego o ruchu liniowym — model i identyfikacja części elektromagnetycznej*; Prace Konferencji SPD-10, Kościelisko 1998, ss. 154-164.
- [5] A. Marusak: *Komputerowy system identyfikacji obiektów typu SISO metodą IOLMS*. Prace Krajowej Konferencji  $\mu CE-4$  „Mikrokomputery w Edukacji”, OW-PTETiS i Wydz. Elektryczny PW 1993, ss. 121-128.
- [6] A. Marusak: *Badania dokładności identyfikacji metodą IOLMS przy różnych kształtach wymuszeń*. Prace SPD-8, OW-PTETiS i Wydz. Elektryczny PW 1994, ss. 307-314.