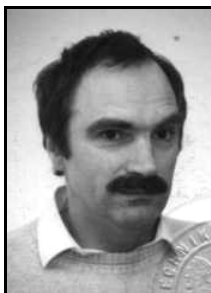


Zbigniew STAROSZCZYK^{1,2}, Piotr FIGOŃ¹¹ POLITECHNIKA WARSZAWSKA, INSTYTUT ELEKTROTECHNIKI TEORETYCZNEJ I SYSTEMÓW INFORMACYJNO – POMIAROWYCH² WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA, INSTYTUT SYSTEMÓW ELEKTRONICZNYCH**Symulacyjne badania porównawcze metod identyfikacji struktur liniowych okresowo zmiennych w czasie****Dr inż. Zbigniew STAROSZCZYK**

Adiunkt w Instytucie Elektrotechniki Teoretycznej i Systemów Informacyjno Pomiarowych. Zajmuje się badaniami właściwości sieci elektroenergetycznej oraz metodami jej identyfikacji i modelowania.



e-mail: stazby@iem.pw.edu.pl

Mgr inż. Piotr FIGOŃ

Absolwent wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej, tytuł magistra uzyskał w Katedrze Wysokich Napięć i Aparatów Elektrycznych 19 grudnia 2005 roku. Aktualnie jest doktorantem w Instytucie Elektrotechniki Teoretycznej i Systemów Informacyjno Pomiarowych. Działalność naukowa związana jest z badaniami sieci elektroenergetycznej.



e-mail: qlopez@wp.pl

Streszczenie

W referacie przedstawiono przykład okresowo zmiennego w czasie obiektu liniowego (LPTV linear periodical time variant) i wyniki jego modelowania z wykorzystaniem modeli uproszczonych, niezmiennych w czasie (LTI) oraz modelu LPTV. Modele wypracowywane są poprzez nieliczne eksperymenty identyfikacyjne, rozwijane poprzez interpolację do dwuwymiarowej macierzy odpowiedzi impulsowych w przypadku korzystania z modelowania LPTV. Pokazano ograniczenie jakości aproksymacji obiektu modelem LTI w stosunku do modelu LPTV. Porównano jakość dwu różnych metod identyfikacji modelu LPTV uzyskując w obydwu przypadkach prawidłowy opis obiektu. Wykazano możliwość praktycznego identyfikowania i modelowania obiektów LPTV z dużą dokładnością.

Słowa kluczowe: model LPTV, filtr SOI, odpowiedź impulsowa, identyfikacja, interpolacja.

Identification and modeling of LPTV systems – referenced experiments**Abstract**

In the paper detailed studies on identification and modeling of LPTV system are presented. The object of investigations is a FIR lowpass filter with periodically tuned cut-off frequency (Fig. 1). The LPTV systems was identified and modeled with the use of a simplified LTI model (Fig. 4), and with the full LPTV system modeling (Fig. 2, 3). For LPTV modeling the interpolations on a few identification experiments data had to be performed to obtain full two-dimensional impulse response required by the model. The quality of model was verified by referencing the system and its model responses for different input signal excitations. There is no essential discrepancy between the model and the object output signals (Fig. 2, 3, 5). The obtained results confirm that there is a practical method of LPTV system identification and modeling with a very good accuracy. The LPTV model is much superior to any of the LTI models which can be used to approximate the time-varying reality with time invariant methods.

Keywords: LPTV model, FIR filter, impulse response, identification, interpolation.

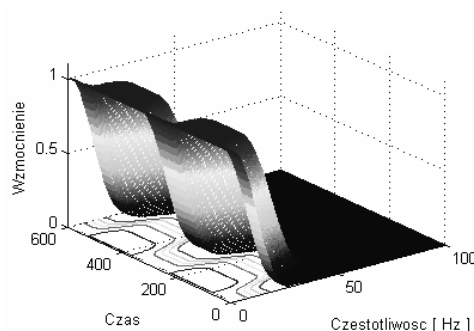
1. Wstęp

Przedmiotem referatu jest prezentacja właściwości i porównanie dwóch metod identyfikacji struktur liniowych okresowo zmiennych w czasie [1, 3]. Struktury takie aktualnie są stosowane w modelowaniu i opisie właściwości sieci elektroenergetycznej [2, 3, 4], a problemy ich identyfikacji stanowią poważne wyzwanie w próbach opisu realnych obiektów elektroenergetycznych przy wykorzystaniu modelu LPTV.

2. Obiekt badań

W referacie przedstawiono wyniki badań jakości identyfikacji symulowanego układu okresowo zmiennego w czasie, który stanowi przestrajany filtr dolnoprasmowy o symetrycznej, skończonej odpowiedzi impulsowej. Filtr ten z uwagi na komputerową, numeryczną realizację jest zdeterminowanym, łatwym do użycia narzędziem przetwarzania sygnałów o jednoznacznie określonych i znanych właściwościach. Sygnały wejściowe i wyjściowe filtru stanowią odniesienie do sygnałów wypracowywanych przez model filtru uzyskany w procesie identyfikacji. Rozbieżność sygnałów wyjściowych filtru i modelu, dla różnych rodzajów pobudzeń świadczy o jakości wypracowanego, poprzez eksperymenty identyfikacyjne, modelu filtru i tym samym o jakości metod jego identyfikacji. Wyniki badań przedstawione są w postaci przebiegów czasowych dla różnych sygnałów pobudzających jak i globalnego wskaźnika liczbowego (wartość skuteczna sygnału błędu odniesiona do wartości skutecznej sygnału wyjściowego)

Obiektem badań jest filtr SOI dwudziestego rzędu, przestrajany okresowo zgodnie z rys. 1.



Rys. 1. Charakterystyki amplitudowe obiektu w funkcji czasu
Fig. 1. Time varying FIR system frequency characteristics

Pasma przepuszczania filtru zmienia się okresowo (co 300 próbek) od 10 do 30 Hz – przestrajanie nie jest liniowe, patrz rys. 1. Symulowana struktura LPTV charakteryzuje się dwoma stanami quasistatycznymi, w których proces przestrajania jest praktycznie zatrzymany (jak to ma miejsce dla próbek 100-200 i 270-330). Filtr pracuje przy częstotliwości próbkowania równej 200 Hz.

3. Metoda identyfikacji

Filtr z rys.1 jest identyfikowany dwoma metodami: pobudzenia impulsowego i szumowego w ośmiu równomiernie rozłożonych

w okresie zmienności chwilach czasowych. Wyniki przedstawione w referacie dotyczą w większości identyfikacji poprzez pobudzenie impulsowe, metoda identyfikacji wykorzystująca pobudzenie szumowe daje wyniki tej samej jakości (rys. 2, 5). Metody identyfikacji i ich podstawy matematyczne zostały przedstawione w [1, 3] i nie są tutaj omawiane.

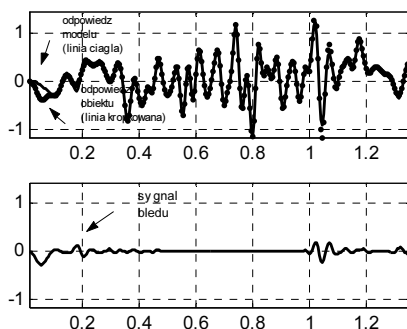
Zasadniczy problem identyfikacji stanowi konieczność przeniesienia wyników identyfikacji chwilowych (węzłowych) na całą oś czasu, co oznacza w prezentowanym przypadku konieczność ok. 40-krotnego zagęszczenia siatki opisu w stosunku do siatki obserwacji filtru. Wykorzystano interpolację liniową i sklejaną – prezentowane w referacie wyniki dotyczą interpolacji liniowej.

Teoretycznie możliwe jest uzyskanie pełnej informacji o strukturze LPTV - należałoby wówczas, dla omawianego filtru, przeprowadzić z praktycznego punktu widzenia abstrakcyjną liczbę aż trzystu eksperymentów identyfikacyjnych. Takie eksperymenty są, szczególnie w warunkach badań systemu elektroenergetycznego, niemożliwe do wykonania, dlatego też konieczne staje się zastosowanie interpolacji w połączeniu z metodami stosowanymi podczas identyfikacji układów niezmiennych w czasie [5]. Przyjęta metoda identyfikacji modelu LPTV polega na badaniu odpowiedzi systemu na pobudzenie impulsowe testujące strukturę LPTV w wybranych momentach jej zmienności czasowej. Metoda ta bazuje na klasycznych technikach identyfikacji systemów LTI a chwilowy eksperyment, poprzez długi (zazwyczaj) odpowiedź impulsową systemu testuje faktycznie zmienność systemu na długich odcinkach czasu. Badana struktura, mimo projektowych odpowiedzi impulsowych o długości $N=20$, charakteryzuje się fizycznymi odpowiedziami o długości dochodzącej do 50 próbek – tak długie odpowiedzi służyły jako węzły interpolacji do wypracowania dwuwymiarowej macierzy odpowiedzi filtru LPTV o rozmiarze 50×300 .

4. Testy jakości identyfikacji

4.1. Metoda pobudzenia impulsowego

O jakości modelu świadczy dokładność z jaką odwzorowuje on własności obiektu. W górnej części rysunku 2 przedstawiono sygnały odpowiedzi obiektu i modelu na pobudzenie szumowe. W dolnej części pokazano sygnał błędu będący różnicą sygnałów odpowiedzi obiektu i modelu. Oba wykresy przedstawione są z użyciem tej samej skali.



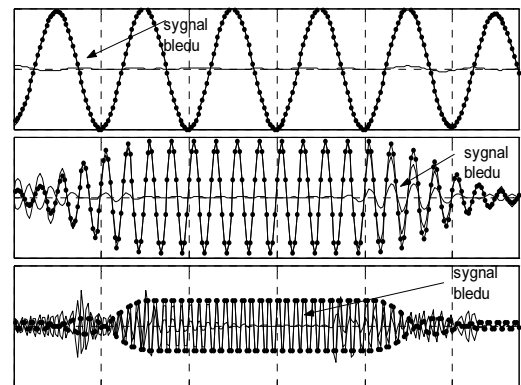
Rys. 2. Odpowiedź na pobudzenie szumowe obiektu i modelu (część górna) oraz sygnał błędu (część dolna)

Fig. 2. LPTV system and its model response to random noise excitation (top), discrepancy signal (bottom)

Na podstawie obserwacji kształtu sygnału błędu widać, że w stanach małej dynamiki zmian struktury LPTV dopasowanie sygnałów można uznać za bardzo dobre (wartość bezwzględna błędu mniejsza od 0.001, czasy 0.5 do 1.0). W przedziałach czasowych, w których parametry obiektu ulegają szybkim zmianom maksymalna chwilowa wartość sygnału błędu jest znacznie więk-

sza, ale nie przekracza 0.3. Za wskaźnik globalnej miary błędu dla całego przebiegu przyjęto stosunek wartości skutecznej sygnału błędu do sygnału wyjściowego za czas obserwacji: dla przebiegów z rys. 2 jego wartość wynosi 0.013. Należy odnotować, że obserwowane niedokładności modelu nie wynikają z jego realizacji, ale z jego identyfikacji, w której wykorzystywane są nieliczne (8) eksperymenty identyfikacyjne. Zagęszczenie eksperymentów identyfikacyjnych pozwala znacząco (praktycznie do zera) zmniejszyć omawiane błędy modelowania struktury LPTV. Liczba możliwych do wykonania eksperymentów wynika wyłącznie z względów praktycznych.

Na rys. 3 pokazano sygnał wyjściowy obiektu i sygnał błędu dla pobudzenia sinusoidalnego o trzech różnych częstotliwościach (5, 20 i 50 Hz) przy częstotliwości próbkowania równej 200 Hz, w stanie ustalonym. Zrezygnowano ze skalowania wykresów.



Rys. 3. Odpowiedź obiektu i modelu na pobudzenie sinusoidalne o częstotliwościach (od góry) 5 Hz, 20 Hz i 50 Hz

Fig. 3. LPTV system and its model response to sinusoidal excitation (5 Hz – top, 20 Hz and 50 Hz – bottom)

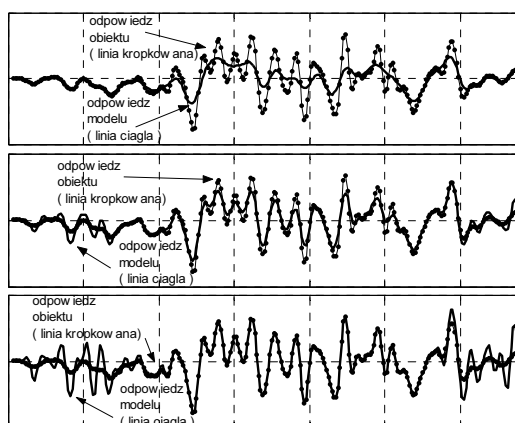
Przy pobudzeniu sygnałem o częstotliwości 5 Hz (część górna rysunku 3) model bardzo dobrze odwzorowuje właściwości obiektu – błąd względny średniokwadratowy ma wartość 0.0007. W przypadku pobudzenia o częstotliwości 20 Hz (część środkowa rysunku 3) zaobserwowano większe różnice w odpowiedziach, szczególnie widoczne w przedziałach czasowych szybkiej zmienności systemu (porównaj rys. 2 i 3). Błąd względny średniokwadratowy zwiększa się do 0.022.

W ostatnim eksperymencie (część dolna rysunku 2) częstotliwość sygnału pobudzającego była równa 50 Hz. W tym przypadku maksymalna wartość chwilowa sygnałów odpowiedzi była nie większa od 0.01 co odpowiada tłumieniu 40 dB. Pomimo że kształty sygnałów odpowiedzi znacząco odbiegają od siebie model dobrze odwzorowuje własności obiektu w paśmie wyższych częstotliwości. Jak łatwo zauważyć stosowanie średniokwadratowej miary błędu dla tego przypadku jest bezzasadne – sygnał wyjściowy i błędny są w zasadzie niskopoziomowymi szumami.

W kolejnym eksperymencie sprawdzono jakość modelowania obiektu LPTV za pomocą trzech modeli niezmiennych w czasie (LTI). Każdy z modeli został otrzymany na podstawie jednego eksperymentu identyfikacyjnego i dostarczał informacji o strukturze zmiennej w czasie tylko w jednej wybranej chwili. Odpowiedzi obiektu oraz każdego z trzech modeli przedstawiono na rysunku 4.

Obliczono względny błąd średniokwadratowy który był równy 0.505 (wykres górny), 0.117 (wykres środkowy), 0.115 (wykres dolny). Dwa modele, dla których odpowiedzi przedstawiono na rysunkach górnym i dolnym charakteryzują się dobrym dopasowaniem w stanach statycznych struktury LPTV i dość dużymi odchyleniami od odpowiedzi obiektu poza nimi. Model drugi natomiast (wykres środkowy) wykazuje odchylenia od odpowiedzi obiektu w całym przedziale czasowym obserwacji. Mimo to wartość błędu średniokwadratowego jest prawie taka sama jak dla

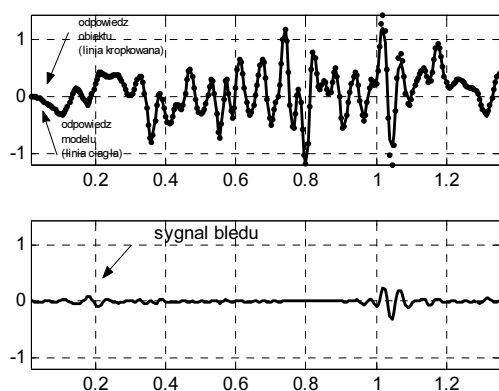
modelu z wykresu dolnego i ponad 4-krotnie mniejsza w porównaniu z modelem z wykresu górnego. Globalnie model ten najlepiej odwzorowuje własności obiektu., jest jednak ponad 10-krotnie gorszy od modelu LPTV, opartego na ośmiu (tylko) eksperymentach identyfikacyjnych.



Rys. 4. Odpowiedzi obiektu oraz trzech modeli LTI na pobudzenie szumowe
Fig. 4. LPTV system and its LTI models response to random excitation

4.2. Metoda pobudzenia szumowego

Do otrzymania modelu obiektu LPTV wykorzystano również metodę pobudzenia szumowego. Metoda pobudzenia impulsowego korzysta z informacji o fizycznej odpowiedzi systemu, aktualnie opisywana metoda oparta jest bezpośrednio o równania opisujące system w określonej chwili czasowej [3]. W celu ich otrzymania obiekt pobudzone zestawem sygnałów szumowych w wyniku czego otrzymano osiem odpowiedzi węzłowych charakteryzujących obiekt w tych samych chwilach czasowych co w przypadku metody pobudzenia impulsowego. Należy zaznaczyć, że tym razem liczba eksperymentów wynika z liczby niewiadomych opisujących system – szukane 20 współczynników lokalnych realizacyjnych odpowiedzi impulsowych uzyskano z 30 eksperymentów, rozwiązując zestaw nadokreślonych równań liniowych. Po przeprowadzeniu interpolacji otrzymano macierz o rozmiarze 20×300 i przeprowadzono weryfikację działania modelu, której wyniki prezentowane są na rysunku 5.



Rys. 5. Odpowiedź na pobudzenie szumowe obiektu i modelu (część górna) oraz sygnał błędny (część dolna) – identyfikacja pobudzeniem szumowym
Fig. 5. LPTV system and its model response to random noise excitation (top), discrepancy signal (bottom) – noised excitation identification method

Oba wykresy zostały przedstawione z zastosowaniem tej samej skali.

Podobnie jak w przypadku metody pobudzenia impulsowego największe wartości błędów występują w przedziałach czasowych w których parametry systemu ulegają szybkim zmianom. W stanach małej dynamiki zmian struktury systemu LPTV wartość bezwzględna błędów była mniejsza od 0.0001. Wartość względna błędów średniokwadratowych była równa 0.0084 i była porównywalna z błędem jakim charakteryzował się wcześniejsza metoda.

5. Wnioski

Otrzymane w wyniku badań symulacyjnych modele LPTV dobrze odwzorowywały własności obiektu. Wypracowane modele dla różnych pobudzeń i metod identyfikacji nie różnią się znacząco (porównaj rys. 2 i 5). Potwierdza to przypuszczenie, że jakość określania parametrów modelu LPTV wynika wyłącznie ze względów praktycznych (ustalona a priori – na osiem, liczba punktów obserwacji struktury LPTV w okresie zmienności).

Model LPTV znacząco lepiej opisuje odpowiedzi na różne postaci sygnałów pobudzających (rys. 2, 3, 4, 5) niż najlepiej dopasowany lokalny model LTI. Prezentowane przebiegi pozwalają ocenić straty wynikające ze stosowania niepoprawnego modelu LTI do opisu zmiennych w czasie struktur na przykładzie konkretnego, przestrajanego filtra dolnoprzepięciowego. Zazwyczaj takie uproszczenie jest powszechnie stosowane w praktyce, i akceptowane bez głębszej refleksji o ile oddaje (nawet z 10-krotnie większymi błędami jak w omawianym przypadku) ogólne właściwości obiektu.

Ceną płaconą za korzystanie z lepszego modelu (LPTV) jest trudność jego identyfikacji, konieczność interpolowania i bardziej złożona realizacja numeryczna modelu. Zasadniczym czynnikiem jest tu trudność identyfikacji – nie stwarza ona jednak problemów teoretycznych, a wyłącznie praktyczne.

6. Literatura

- [1] Mikołajuk K, Staroszczyk Z., Time frequency approach to analysis of time varying dynamic systems, *Przegląd Elektrotechniczny* 10'2003 ISTET'03 Selected Papers, pp. 764-767
- [2] Mikołajuk K, Staroszczyk Z.: Periodical variability in power systems - small signal models, *L'Energia Ellettrica*, suppl. num. 5-6, vol. 81, Sept./Dec. 2004, pp. 97-102
- [3] Z. Staroszczyk, "Power system time variance – LPTV model implementation and identification problems", International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP2004, Lake Placid, New York, USA, Sept. 12-15, 2004, pp. 1-8, conference papers CD edition.
- [4] Staroszczyk Z., Power system source impedance time variant model identification - simulations, EPQU 2005, 8th Int. Conf. Electrical Power Quality and Utilisation, Sept. 21-23, 2005, Cracow, Poland, CD edition, ref. nb 0035
- [5] Staroszczyk Z., A method for real-time, wide band identification of the source impedance in power systems, *IEEE Trans. on Instr. and Measurement*, vol. 54, Feb. 2005, pp. 377-385