

Radosław KŁOSIŃSKI, Mirosław KOZIOL
 UNIwersYTET ZIELONOGÓRSKI, INSTYTUT METROLOGII ELEKTRYCZNEJ

Odtwarzanie okresowych sygnałów wejściowych metodą syntezy odwrotnych operatorów cykloparametrycznych układu przetwarzania

Dr inż. Radosław KŁOSIŃSKI

Studia wyższe ukończył w 1988 roku na Wydziale Elektrycznym Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Zielonej Górze. W 1994 roku uzyskał stopień doktora nauk technicznych w zakresie elektrotechniki na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Obszar zainteresowań obejmuje elektrotechnikę teoretyczną w powiązaniu z cyfrowym przetwarzaniem sygnałów, w szczególności: opis, symulacja oraz identyfikacja układów nieliniowych i liniowych o okresowo zmiennych parametrach.

e-mail: R.Klosinski@ime.uz.zgora.pl



Mgr inż. Mirosław KOZIOL

Uzyskał tytuł mgr inż. w dziedzinie elektrotechniki w roku 1998 na Wydziale Elektrycznym Politechniki Zielonogórskiej w Zielonej Górze. Od roku 1998 pracuje jako asystent w Instytucie Metrologii Elektrycznej początkowo na Politechnice Zielonogórskiej, a obecnie na Uniwersytecie Zielonogórskim. W obszarze jego zainteresowań znajdują się zagadnienia z dziedziny cyfrowego przetwarzania sygnałów oraz oprogramowania systemów mikroprocesorowych.

e-mail: M.Koziol@ime.uz.zgora.pl



Streszczenie

Praca dotyczy odtwarzania sygnałów wejściowych układu przetwarzania na podstawie sygnałów wyjściowych. Przedstawiono oryginalną metodę, opartą na modelowaniu nieliniowego układu w okresowym stanie ustalonym za pomocą zestawu operatorów cykloparametrycznych. Operatory syntezowane są na podstawie pakietu par zmierzonych sygnałów wejścia i wyjścia. Przytoczono wyniki eksperymentu polegającego na syntezy operatorów odwrotnych, a następnie odtwarzaniu sygnałów wejściowych rzeczywistego nieliniowego transformatora prądowego. Uzyskane wyniki potwierdzają częściową skuteczność metody.

Reconstruction of periodic input signals by synthesis of inverse circular parametric operator of processing system

Abstract

This paper concerns the system input signal reconstruction. The original method is applied. A periodical steady state of a non-linear system is circumscribed using a set of circular parametric operators. In the discrete time domain the circular parametric operators takes form of a real coefficient matrix. These operators are determined using an identification algorithm based on pairs of input and output test signals. The non-linear system operation depends on input signal shape and amplitude, thus each operator is determined for the other basic harmonic amplitude. An example of obtained operator is shown in fig. 1. Some results of real current transformer input signal reconstruction are presented in fig. 3. and 4. The described method is effective in some situations. The further investigations are necessary in aim of improvement of exactitude.

1. Wprowadzenie

Współczesne pomiary realizowane są w oparciu o cyfrową reprezentację sygnałów uzyskiwaną za pomocą przetworników analogowo-cyfrowych. Zakres napięć wejściowych przetworników zazwyczaj nie przekracza $\pm 10V$, co w przypadku pomiaru wyższych napięć lub pośrednio prądów, wymaga stosowania tzw. obwodów wejściowych. W wielu zastosowaniach rolę tę pełnią transformatory prądowe. Ich konstrukcja i materiały są tak dobrane, aby zapewnić przetwarzanie sygnałów przy jak najmniejszych zniekształceniach. Jednak w przypadku stosowania takich transformatorów w precyzyjnym sprzęcie pomiarowym, uzyskiwane rezultaty mogą być niezadowolające. Znaczące błędy pojawiają się również w razie przekroczenia znamionowych wartości prądu w uzwojeniach. Głównymi źródłami błędów są: nieliniowa charakterystyka magnesowania rdzenia (nasycenie), prądy wirowe i histereza oraz zjawiska pasożytnicze. Aby poprawić dokładność przetwarzania wprowadza się korekcję, mającą na celu odtworzenie kształtu prądu pierwotnego na podstawie zmierzonego przebiegu prądu wtórnego.

Korekcja może odbywać się w części analogowej i cyfrowej urządzenia pomiarowego. Można jednak zauważyć, że stosowanie analogowych metod kompensacji zniekształceń, których przykładem może być [1] oraz [2], zostały raczej zarzucone na rzecz metod cyfrowych.

Jedną ze spotykanych metod korekcji cyfrowej jest przyjęcie rozbudowanego liniowego modelu transformatora. Na podstawie identyfikacji parametrów modelu można wyznaczyć charakterystyki częstotliwościowe transformatora, które są podstawą do syntezy odwrotnych cyfrowych filtrów korekcyjnych [3]. Dodatkowo można uwzględnić charakterystyki filtra antyaliasingowego oraz, wynikające z próbkowania, ewentualne przesunięcia czasowe między poszczególnymi kanałami [4].

Podobne podejście do odtwarzania kształtu prądu pierwotnego transformatora prądowego, jednak uwzględniające zjawisko nasycania się rdzenia oraz występowanie histerezy, zastosowano w [5], gdzie opracowano model nieliniowy układu korekcyjnego. W artykule zaprezentowano jednak tylko korekcję sygnałów o kształcie sinusoidalnym.

Dość często, przy korekcji zniekształceń, pod uwagę brane jest tylko nasycenie się rdzenia. Wystąpienie nasycenia wykrywane jest np. przy zastosowaniu transformaty falkowej [6]. Fragmenty zniekształcone są odrzucane, a algorytm korekcyjny wyznacza przebieg prądu pierwotnego na podstawie nieznieskształconych fragmentów prądu wtórnego.

Inna metoda, przedstawiona w [7], realizuje korekcję w dziedzinie widmowej, wymaga więc stosowania dyskretnego przekształcenia Fouriera. Zakłada się liniowy, czasowo niezależny model transformatora. Korekcji widma prądu wtórnego dokonuje się na podstawie charakterystyk częstotliwościowych błędów amplitudy i fazy, wyznaczonych na podstawie wcześniejszych pomiarów.

Biorąc pod uwagę trudność matematycznego modelowania transformatora prądowego, do korekcji kształtu prądu stosowane są również sztuczne sieci neuronowe [8]. Ich zastosowanie nie wymaga znajomości parametrów modelu. Warunkiem osiągnięcia dobrych wyników jest właściwy dobór zestawu wzorcowych sygnałów uczących.

Podobne, choć obliczeniowo mniej skomplikowane podejście, przedstawione jest w niniejszej pracy. Zaproponowana jest oryginalna metoda korekcji zniekształceń, oparta na modelowaniu nieliniowego układu przetwarzania za pomocą pakietu operatorów cykloparametrycznych, przeznaczonych do opisu okresowego stanu ustalonego układów liniowych o okresowo zmiennych parametrach. Okresowa zmienność parametrów układu nieliniowego, w okresowym stanie ustalonym, pozwala na wykorzystanie podobnego opisu matematycznego. Ze względu na zależność parametrów układu nieliniowego również od amplitudy wymuszenia, istnieje potrzeba użycia więcej niż jednego operatora.

2. Układy liniowe o okresowo zmiennych parametrach

W dziedzinie czasu dyskretnego związek między próbkami sygnałów wymuszenia i odpowiedzi układu o jednym wejściu i jednym wyjściu, liniowego, zależnego od czasu (SISO LTV – single input, single output, linear, time-varying) opisany jest za pomocą równania różnicowego o zmiennych współczynnikach:

$$\sum_{i=0}^q A_i(n)y(n-i) = \sum_{i=0}^q B_i(n)x(n-i), \quad (1)$$

gdzie: $x(n)$, $y(n)$ - próbki sygnałów wymuszenia i odpowiedzi.

Rozwiązanie równania różnicowego (1) można wyznaczyć za pomocą operatora danego w postaci sumy:

$$y(n) = Hx(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} h(n,m)x(m), \quad (2)$$

gdzie: $h(n,m)$ - odpowiedź na impuls Kronecker'a $\delta(n-m)$.

Kształt dyskretnej odpowiedzi impulsowej układu LTV zależy od momentu podania impulsu m , więc odpowiedź impulsowa w tym przypadku jest funkcją dwóch zmiennych.

Jak wykazano we wcześniejszych pracach, np. [9, 10], układy o okresowo zmiennych parametrach (LPTV) mogą osiągnąć okresowy stan ustalony, pod warunkiem istnienia wspólnego okresu zmian parametrów i sygnału wymuszającego. Wymagane jest próbkowanie synchroniczne, tzn. wspólny okres zmienności sygnałów i parametrów musi być całkowitą wielokrotnością odstępów próbkowania. N -okresową odpowiedź układu o N -okresowo zmiennych parametrach na N -okresowe wymuszenie można wyznaczyć posługując się operatorem cykloparametrycznym danym w postaci macierzy o stałych współczynnikach [11]:

$$\begin{bmatrix} y(0) \\ y(1) \\ \dots \\ y(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{h}_{0,0} & \tilde{h}_{0,1} & \dots & \tilde{h}_{0,N-1} \\ \tilde{h}_{1,0} & \tilde{h}_{1,1} & \dots & \tilde{h}_{1,N-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{h}_{N-1,0} & \tilde{h}_{N-1,1} & \dots & \tilde{h}_{N-1,N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(0) \\ x(1) \\ \dots \\ x(N-1) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

lub krócej:

$$\mathbf{y} = \tilde{\mathbf{H}}\mathbf{x}, \quad (4)$$

gdzie: $\tilde{\mathbf{H}}$ - operator cykloparametryczny układu, \mathbf{x} , \mathbf{y} - wektory próbek jednego okresu sygnałów wymuszenia i odpowiedzi, $\tilde{h}_{n,m} = \tilde{h}(n,m)$ - próbki cyklicznej odpowiedzi impulsowej:

$$\tilde{h}(n,m) = \sum_{p=0}^{\infty} h(n,m-pN). \quad (5)$$

Operatory cykloparametryczne stanowią matematyczny model zjawisk typowych dla układów LTV oraz nieliniowych, takich jak generowanie i mieszanie harmonicznych.

Operatory opisujące rzeczywiste układy (analogowe lub cyfrowe) o okresowo zmiennych parametrach mogą być wyznaczane na drodze pomiarowej na podstawie par sygnałów wymuszenia i odpowiedzi układu. Podstawą identyfikacji jest równanie macierze wynikające z zależności (4):

$$\tilde{\mathbf{H}}\mathbf{X} = \mathbf{Y}, \quad (6)$$

gdzie: \mathbf{X} , \mathbf{Y} - macierze $N \times K$ sygnałów, odpowiednio wymuszenia i odpowiedzi układu, każda kolumna to wektor N próbek jednego sygnału.

W przypadku, gdy $N < K$ równanie macierzowe (6) może mieć nieskończenie wiele rozwiązań, wśród których należy wybrać jedno, najbardziej optymalne. Między innymi w pracach [9, 10] zaproponowano oryginalny algorytm identyfikacji operatora cykloparametrycznego oparty na kryterium jak najmniejszej zmienności parametrów układu. Opisano tam również jego właściwości.

3. Modelowanie układów nieliniowych za pomocą operatorów cykloparametrycznych

Cechą charakterystyczną układów nieliniowych jest, bezpośrednia lub pośrednia, zależność ich parametrów od sygnałów

wymuszających. Parametry układu nieliniowego w okresowym stanie ustalonym (o ile może taki osiągnąć) zmieniają się również okresowo, synchronicznie z wymuszeniem. Takie podobieństwo do zachowania układów liniowych o okresowo zmiennych parametrach, daje możliwość wykorzystania operatorów cykloparametrycznych do opisu okresowego stanu ustalonego układów nieliniowych.

W przeciwieństwie do układów LPTV, z powodu zależności parametrów układu od kształtu i amplitudy sygnału wymuszenia, do modelowania okresowego stanu ustalonego układów nieliniowych potrzeba nieskończenie wielu operatorów. Inny przebieg sygnału wymuszenia oznacza inny sposób zmian parametrów układu nieliniowego, a więc inny operator. W praktyce, w przybliżony sposób, można modelować zachowanie układu nieliniowego za pomocą skończonego zbioru operatorów liniowych, czasowo zależnych. Jest to podejście analogiczne do aproksymacji krzywej skończonym zbiorem odcinków prostej.

Założenie, że niewielkie zaburzenie sygnału wymuszającego przez nałożenie sygnału testującego o małej amplitudzie, zmienia zachowanie układu nieliniowego w nieznaczny, pomijalny sposób, pozwala na identyfikację operatora cykloparametrycznego. Aby w wyniku syntezy uzyskać operator odwrotny, zamienia się rolami sygnały wymuszenia i odpowiedzi.

Zastępowanie układu nieliniowego, czasowo niezależnego, układem liniowym o zmiennych parametrach (czasowo zależnym) wymaga właściwego zsynchronizowania zmienności parametrów układu liniowego ze zmiennością sygnałów. Dla nieliniowego układu czasowo niezależnego synchronizacja taka jest naturalna.

4. Metoda odtwarzania sygnałów wejściowych oparta na syntezie odwrotnych operatorów układu

Zakłada się, że układ zniekształcający jest nieliniowy, czasowo niezależny. Sygnały reprezentowane są za pomocą próbek zebranych synchronicznie. Zakłada się, że okresowe sygnały stanowiące przedmiot korekcji mają dominującą podstawową harmoniczną. Pozwala to na uzależnienie doboru odwrotnego operatora cykloparametrycznego od amplitudy podstawowej harmonicznej (APH) oraz determinuje sposób doboru sygnałów do syntezy operatorów odwrotnych.

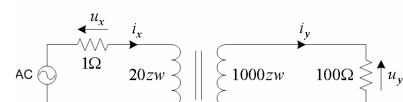
Zakres dopuszczalnych wartości APH sygnału dzieli się na kilka przedziałów. Każdemu przedziałowi przyporządkowany zostaje jeden operator cykloparametryczny. Do syntezy każdego takiego operatora odwrotnego wykorzystywany jest algorytm identyfikacji, dla którego danymi jest pakiet par sygnałów wymuszenie-odpowiedź o określonej wartości APH.

Problem synchronizacji zmienności parametrów układu ze zmiennością sygnałów rozwiązano przesuwając w czasie sygnały brane do identyfikacji oraz sygnały korygowane w taki sposób, aby faza początkowa podstawowej harmonicznej była jak najbliższa zeru.

Na wstępie odtwarzania sygnału, dla korygowanego sygnału wyjściowego wyznacza się amplitudę i fazę początkową podstawowej harmonicznej. To pozwala wybrać właściwy operator oraz odpowiednio przesunąć sygnał w celu synchronizacji ze zmianami parametrów. Odtworzony sygnał wejściowy uzyskiwany jest jako wynik działania właściwego operatora na sygnał wyjściowy.

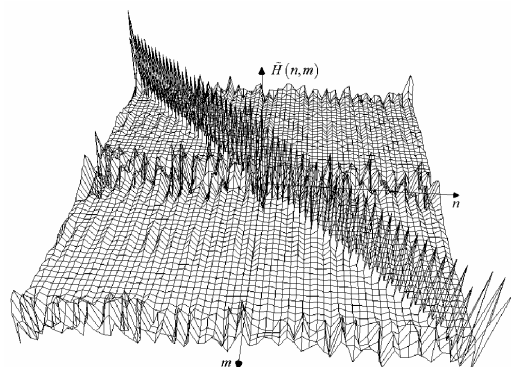
5. Eksperyment

Omawianą metodę zastosowano do rekonstrukcji sygnałów wejściowych transformatora prądowego z rdzeniem ferromagnetycznym, rys. 1.



Rys. 1. Schemat badanego układu
Fig. 1. Schema of the tested system

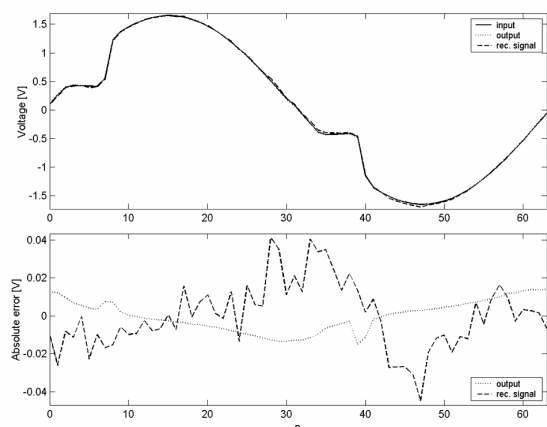
Ze względu na nieznaną wartość parametrów pasożytniczych zastosowanych boczników, uznano je za część układu korygowanego. Jako sygnał wejściowy przyjęto napięcie U_x , a jako sygnał wyjściowy napięcie U_y . Pomiarów dokonywano kartą akwizycji wyposażoną w 16 bitowy przetwornik A/C pobierając 64 próbki na okres. Przyjęto reprezentację układu za pomocą siedmiu operatorów wyznaczonych dla APH sygnału wejściowego o wartościach: 1,0; 1,5; 2,0; 2,2; 2,4; 2,5 oraz 2,6 woltów. Przykład uzyskanego operatora cykloparametrycznego, dla nieliniowego obszaru pracy układu, pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Przykład uzyskanego operatora cykloparametrycznego
Fig. 2. Example of an obtained circular parametric operator

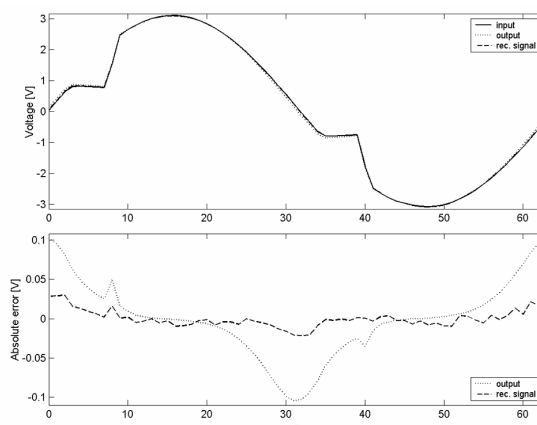
Każdy pakiet sygnałów wymuszających do identyfikacji składał się z 63 sygnałów. Wszystkie sygnały zawierały podstawową harmoniczną o odpowiedniej amplitudzie z nałożoną jedną harmoniczną o numerach od 2 do 32, każda harmoniczna w dwóch wersjach, z fazą początkową równą 0 oraz 90 stopni (jeden sygnał bez dodatkowej harmonicznej). Korekcji poddawane były sygnały okształcone uzyskiwane na drodze numerycznej syntezy i odpowiednio wzmacniane. Zrekonstruowane sygnały oraz sygnały wyjściowe przeskalowane do poziomu wejścia odnoszono do zadawanych sygnałów wejściowych.

W zakresie liniowej pracy układu, dla mniejszej amplitudy wymuszenia, sygnały zrekonstruowane obciążone są większym błędem niż sygnały wyjściowe przeskalowane, rys. 3. Inaczej jest dla większej wartości APH, w zakresie nieliniowej pracy układu. Sygnały zrekonstruowane są bliższe sygnałom oryginalnym niż przeskalowane sygnały wyjściowe, rys. 4.



Rys. 3. Wyniki rekonstrukcji sygnału oraz błędy bezwzględne w przypadku mniejszej wartości APH. Oznaczenia: input – sygnał wejściowy zadany, output – sygnał wyjściowy przeskalowany, rec.signal – sygnał uzyskany w wyniku rekonstrukcji, n – numer próbki

Fig. 3. Results of input signal reconstruction and absolute error characteristics obtained for lower fundamental harmonic amplitude. Notation: input – input signal, output – output signal, rec.signal – the reconstructed signal, n – sample number



Rys. 4. Wyniki rekonstrukcji sygnału oraz błędy bezwzględne w przypadku większej wartości APH. Oznaczenia jak na rys. 3

Fig. 4. Results of input signal reconstruction and absolute error characteristics obtained for higher fundamental harmonic amplitude. Notation, see fig. 3

6. Podsumowanie

W pracy przedstawiono oryginalną metodę rekonstrukcji sygnałów wejściowych układu przetwarzania metodą syntezy odwrotnych operatorów cykloparametrycznych.

Zaprezentowano wyniki wykorzystania metody do korekcji rzeczywistego układu, które pokazały jej częściową skuteczność.

Zaproponowana metoda wymaga dalszych badań mających na celu poprawę dokładności. Najważniejsze wydaje się wypracowanie właściwej strategii doboru sygnałów do syntezy operatorów.

7. Literatura

- [1] P. Daponte: Electronically compensated current transformer modeling. Measurement, vol. 15, no. 4, July 1995, pp 213-222.
- [2] Q. Xu, A. Refsum, R. Warson: Application of external compensation to current transformers. IEE Proc.-Sci. Meas. Technol., vol. 143, no. 2, March 1996, pp. 147-150.
- [3] L. Kadar, P. Hacksel, J. Wikston, The Effect of Current and Voltage Transformers Accuracy on Harmonic Measurements in Electronic Arc Furnaces. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 33, no. 3, May/June 1997, pp. 780-783.
- [4] B. Boulet, L. Kadar, J. Wikston, Real-Time Compensation of Instrument Transformer Dynamics Using Frequency-Domain Interpolation Techniques. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Ottawa, Canada, May 19-21, 1997, pp. 285-290.
- [5] S. Bittani, A. Cuzzola, F. Lorito, G. Poncia: Compensation of Nonlinearities in a Current Transformer for the Reconstruction of the Primary Current. IEEE Transaction on Control Systems Technology, vol. 9, no. 4, July 2001, pp. 565-573.
- [6] F. Li, Y. Li, R.K. Aggarwal: Combined wavelet transform and regression technique for secondary current compensation of current transformers. IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., vol. 149, no. 4, July 2002, pp. 497-503.
- [7] L. Furmankiewicz: Możliwości programowej korekcji błędów wnoszonych przez transformatorowe obwody wejściowe w przetwornikach mocy przy pomiarze sygnałów okształconych. Praca doktorska, Politechnika Zielonogórska, Zielona Góra 1998.
- [8] H. Khorshadi-Zadeh, M. Sanaye-Pasand: Correction of Saturated Current Transformers Secondary Current Using ANNs. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 21, no. 1, January 2006, pp. 73-79.
- [9] Kłosiński R., Koncepcja pomiaru impedancji niestacjonarnych, cz.1.: Czasowo dyskretny opis układów o okresowo zmiennych parametrach oraz reprezentacja częstotliwościowa, Zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Elektrotechnika 25 (2003), 125-134
- [10] Kłosiński R., Opis i wyznaczanie impedancji dwójników niestacjonarnych, Pomiary Automatyka Robotyka, nr 7-8, 2004, s. 169-173.
- [11] Siwczyński M., Metody optymalizacyjne w teorii mocy obwodów elektrycznych, Seria inżynieria elektryczna, Politechnika Krakowska (1995), monografia 183