

Analiza wydajności obliczeniowej systemu pomiarowego jakości energii elektrycznej opartego na urządzeniu embedded BeagleBoard z systemem operacyjnym Linux

Jarosław Zygarlicki¹, Janusz Mroczka²

¹ Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Politechniki Opolskiej

² Katedra Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej, Politechniki Wrocławskiej

W artykule przedstawiono możliwości zastosowania niskobudżetowego modułu embedded BeagleBoard na bazie procesora OMAP firmy Texas Instruments, działającego pod kontrolą systemu Linux, do budowy zaawansowanego urządzenia pomiarowego parametrów jakości energii elektrycznej. W artykule przeanalizowano czasy obliczeń złożonych algorytmów przetwarzania sygnałów na przykładzie metody Prony'ego, mogących mieć zastosowanie przy wyznaczaniu parametrów jakości energii elektrycznej. Czasy te będą porównane z czasami obliczeń dla typowych urządzeń klasy PC o architekturze 8086. Dodatkowo zostaną pokazane możliwości dołączenia do systemu urządzeń peryferyjnych oraz sond pomiarowych.

Słowa kluczowe: analiza sygnałów, jakość energii elektrycznej, metoda Prony'ego, urządzenie wbudowane, przetwarzanie sygnałów

W ostatnich latach wzrasta zainteresowanie jakością energii elektrycznej oraz urządzeniami służącymi do jej analizy i monitoringu. Obserwuje się degradację jakości zasilania, na co mają wpływ m.in. powiększające się znacznie liczba i moc odbiorników niespokojnych i nieliniowych, wprowadzających do sieci elektroenergetycznej zakłócenia. Z kolei coraz częściej nowe odbiorniki energii elektrycznej charakteryzują się zmniejszoną odpornością na zaburzenia elektromagnetyczne. Kumulacja różnego rodzaju urządzeń w małych, nieprzystosowanych instalacjach elektrycznych może spowodować nakładanie się zakłóceń i w efekcie prowadzić do występowania częstszych awarii lub nieprawidłowej pracy podłączonych do sieci elektroenergetycznych urządzeń. Celowe staje się zatem monitorowanie oraz analizowanie parametrów jakości energii elektrycznej.

Obecnie na rynku dostępny jest szeroki asortyment różnego rodzaju urządzeń monitorujących sieć elektroenergetyczną zgodnie z określonymi normami (PN-EN 50-501160, PN-EN 61000-4-7, czy też PN-EN 61000-4-30 itp.). Okazuje się jednak, że samo badanie zgodności warunków zasilania z odpowiednią normą nie jest już wystarczające. Coraz częściej szereg wrażliwych urządzeń nie działa poprawnie pomimo spełnienia odpowiednich wymogów normatywnych. W sieciach elektroenergetycznych pojawiają się szkodliwe zakłócenia, których norma nie ujmuje lub przewiduje ich uśrednienie w takim stopniu, że mieszczą się w dopuszczalnych granicach. Dlatego też ważne jest poszukiwanie alternatywnych metod badania jakości energii elektrycznej oraz budowa urządzeń monitorujących, które wykorzystują te metody.

Badania autorów skupiają się na analizie możliwości zastosowania w urządzeniach embedded różnych modyfikacji metody Prony'ego, ze względu na szereg jej korzystnych cech, które przedstawione będą w następnym rozdziale.

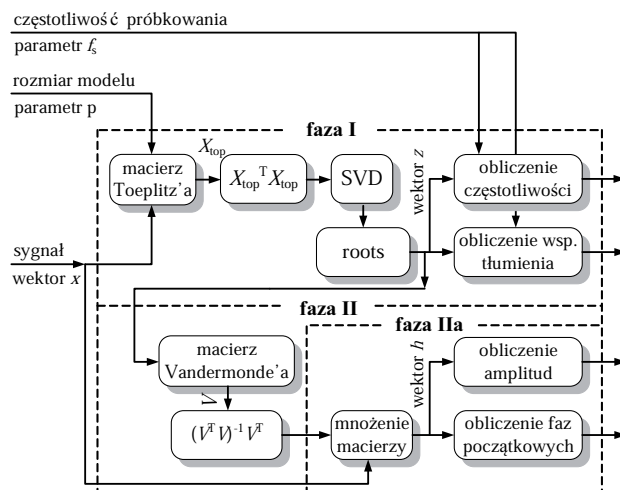
Opis metody

Metoda Prony'ego zalicza się do grupy metod parametrycznych. Jej zaletą jest precyzyjna estymacja parametrów składowych sygnału: częstotliwości, amplitudy i fazy, a także współczynników tłumienia. Metoda polega na przedstawieniu sygnału jako liniowej kombinacji funkcji eksponencjalnych, co dla sygnałów rzeczywistych może być wyrażone zależnością [1]:

$$\hat{x}_n = \sum_{k=1}^{p/2} 2a_k \exp[\alpha_k (n-1)T] \cos[2\pi f_k (n-1)T + \theta_k] \quad (1)$$

dla $n = 1, 2, \dots, N$, gdzie: N – długość sygnału (liczba próbek), p – liczba składowych eksponencjalnych (rzęd modelu), T – okres próbkowania [s], a_k – amplituda k -tej eksponenty, α_k – współczynnik tłumienia [s^{-1}], f_k – częstotliwość składowej sinusoidalnej [Hz] i θ_k – faza początkowa składowej sinusoidalnej [rad].

Metoda Prony'ego jest złożona obliczeniowo (rys. 1). Wymaga inwersji dużych macierzy, obliczenia pierwiastków wielomianów wysokiego rzędu itp. Mogą również wystąpić problemy ze stabilnością numeryczną rozwiązań. Metoda ta jest



Metoda Prony'ego jest złożona obliczeniowo (rys. 1). Wymaga inwersji dużych macierzy, obliczenia pierwiastków wielomianów wysokiego rzędu itp. Mogą również wystąpić problemy ze stabilnością numeryczną rozwiązań. Metoda ta jest

Rys. 1. Metoda Prony'ego najmniejszych kwadratów [2]

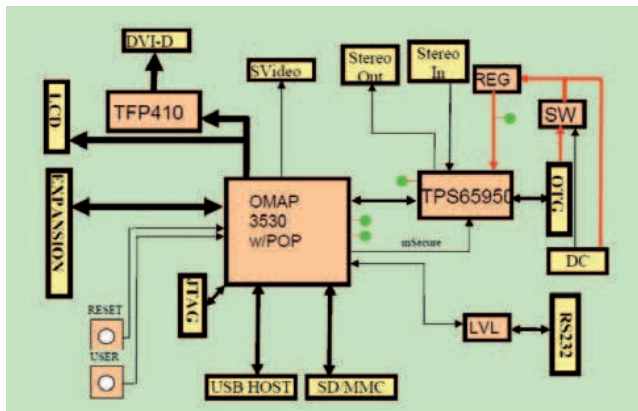
Fig. 1. Least squares Prony's method [2]

również znana ze swej wrażliwości na szum zawarty w sygnale. Pomimo tych wad można spotkać w literaturze wiele prób wykorzystania metody do badania jakości energii elektrycznej (na przykład pozycje: [3]–[6]).

Przeprowadzone badania

Ze względu na znaczną złożoność obliczeniową kompletnej metody Prony'ego, badania ograniczono do jej zredukowanej wersji [2]. Obliczenia wykonywane były dla II fazy metody Prony'ego (rys. 1). Przygotowano symulację złożoną z szeregu obliczeń przeprowadzonych metodą zredukowaną, dla różnych wartości parametrów (czasu trwania okna analizy oraz założonej rozdzielczości częstotliwościowej). Wartości poszczególnych czasów obliczeń symulacji cząstkowych zostały do siebie dodane w celu uzyskania bardziej miarodajnych wyników. Przeprowadzone badania miały charakter porównawczy, dlatego też szczególne warunki symulacji (zakres przyjętych parametrów) mają tutaj drugorzędne znaczenie, a ich opracowana forma będzie przedstawiona w kolejnych publikacjach.

Badane urządzenie docelowe to niskobudżetowy moduł BeagleBoard w wersji B7 oparty na procesorze OMAP 3530 i z pamięcią RAM 128 MB. Schemat blokowy urządzenia przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat blokowy urządzenia BeagleBoard [7]

Fig. 2. The block scheme of the embedded BeagleBoard [7]

Tab. 1. Pomiary czasu wykonania testowego algorytmu na różnych konfiguracjach sprzętowo-programowych

Tab. 1. The measurement of the required time computations for presented method for different hardware and software configurations

lp.	AMD 2200 (x86)		BeagleBoard	
	konfiguracja 1	konfiguracja 2	konfiguracja 3	konfiguracja 4
	WinXP + Matlab	Ubuntu + Octave	Ubuntu + Octave	Angstrom + Octave
	czas wykonania (s)	czas wykonania (s)	czas wykonania (s)	czas wykonania (s)
1	27,8	49,9	628	470
2	25,9	52,3	637	472
3	21,4	50,6	646	471
4	23,3	51,2	646	469
5	24,0	51,0	647	471
6	20,5	51,1		
7	20,9	51,1		
8	23,2	51,3		
9	21,1	51,2		
10	20,0	51,9		
średnia	22,8	51,2	640	471

OMAP 3530 to układ łączący w sobie procesor ARM o częstotliwości taktowania rdzenia 600 MHz i architekturze ARM Cortex™-A8 oraz procesor sygnałowy DSP o architekturze Advanced Very-Long-Instruction-Word (VLIW) Microprocessor Core, TMS320C64x+™ DSP Core. Takie połączenie architektur niesie ze sobą szereg zalet mogących mieć zastosowanie w systemach pomiarowych jakości energii elektrycznej, co zostało pokazane w publikacji [8].

W urządzeniu zainstalowano dwa systemy operacyjne: Ubuntu Lenny (kernel 2.6.29) oraz dedykowany system Linux Angstrom z podobnym kernelem. Dodatkowo zainstalowano pakiet obliczeniowy Octave w wersji 3.0.5, będący darmowym odpowiednikiem środowiska MATLAB, celem uruchomienia przygotowanych skryptów testowych.

Urządzeniem referencyjnym był komputer o architekturze x86 z jednordzeniowym procesorem AMD Mobile 2200+ z rzeczywistym zegarem 1660 MHz i pamięcią RAM 768 MB. W komputerze zainstalowano dwa systemy operacyjne: pierwszy system – podobnie jak w badanym urządzeniu – Linux w dystrybucji Ubuntu z pakietem Octave oraz drugi system Windows XP z dodatkiem Service Pack 2 i pakietem obliczeniowym MATLAB w wersji 7.0.1.

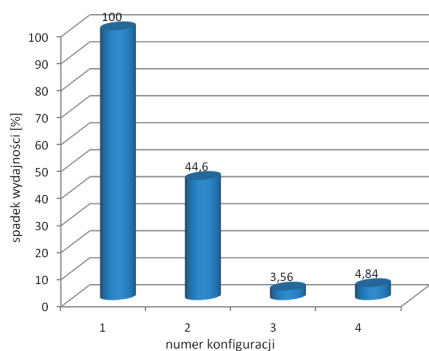
Wyniki

Wyniki przeprowadzonych badań symulacyjnych zamieszczono w tab. 1. W tab. 2 przedstawiono obliczenia wydajności poszczególnych konfiguracji sprzętowych oraz programowych w stosunku do konfiguracji o największej wydajności, to jest z procesorem x86, systemem Windows XP oraz pakietem MATLAB. Na rys. 3 przedstawiono w sposób graficzny procentowy spadek wydajności poszczególnych konfiguracji zgodnie z tab. 2.

Porównując wydajność prezentowanego modułu do konfiguracji 2 (z systemem Linux oraz pakietem Octave) można z dużym przybliżeniem odnieść prezentowany system do komputerów o architekturze x86. Spadek wydajności dla takiego porównania jest około 9-krotny, co daje przybliżoną wartość taktowania zegara procesora x86 równą $2200 \text{ MHz}/9 \approx 244 \text{ MHz}$.

Wnioski

Zaprezentowany moduł BeagleBoard z zainstalowanym systemem operacyjnym oraz zaimplementowanym pakietem obliczeniowym charakteryzuje się wydajnością obliczeniową w algorytmach analizy sygnałów (na przykładzie metody Prony'ego) porównywalną z komputerami o architekturze x86 rodziny Pentium z zegarami ok. 233 MHz. Wniosek ten jest oczywiście pewnym przybliżeniem, z szeregiem założeń upraszczających. Daje jednak pewien obraz możliwości wykorzystania niskobudżetowego systemu embedded, jakim jest prezentowany moduł do budowy aparatury monitorującej jakość energii elektrycznej z zastosowaniem innych niż fourierowskie metod analizy sygnałów. Wykazuje on oprócz niskiej ceny szereg dodatkowych zalet cennych w tego typu rozwiązaniach. Są to: niski pobór mocy (maksymal-



Rys. 3. Wykres analizy wydajności poszczególnych konfiguracji w odniesieniu do konfiguracji referencyjnej

Fig. 3. The analysis of the efficiency of the presented hardware and software configurations

nie ok. 2,5 W), małe wymiary, pełna funkcjonalność drogich urządzeń pracujących pod kontrolą systemu operacyjnego, prostota implementacji różnego rodzaju interfejsów: graficznych, WWW, komunikacyjnych (LAN, WiFi, GSM), pamięci masowych (dysków twardej USB, pendrive, karty SD) oraz możliwość łatwego dołączenia przez port Expansion (McBSP, SPI, I²C) modułów pomiarowych oraz ich prosta obsługa, np. za pomocą języka skryptowego Bash.

Kolejne prace autorów skupią się na optymalizacji oraz doborze metod (w zastosowaniu do prezentowanego modułu pod względem ich dopasowania do uzyskanej wydajności systemu) oraz na budowie układów peryferyjnych – pomiarowych sprzężonych z modułem za pomocą portu Expansion.

Bibliografia

1. Marple S., Lawrence Jr.: *Digital Spectral analysis*. Prentice Hall PTR, New Jersey 1987.
2. Zygarlicki J., Zygarlicka M., Mroczka J., Latawiec K.: *A reduced Prony's method in power quality analysis – parameters selection*. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, no. 2, April 2010.
3. Costa R.E., de Almeida L.A.L., Wegelin E.A., da Costa E.G.: *Recursive Prony's Method for Improving the Monitoring of Electrical Machines*. IMTC 2005 – Instrumentation and Measurement, Technology Conference, Ottawa, Canada, May 17–19, 2005, p. 1498–1502.
4. Costa F.F., Cardoso A.J.M., Fernandes D.A.: *Harmonic Analysis Based on Kalman Filtering and Prony's Method*. POWERENG 2007, April 12-14, 2007, Setubal, Portugal, p. 696–701.
5. Feilat E.A.: *Detection of Voltage Envelope Using Prony Analysis–Hilbert Transform Method*. IEEE Transactions On Power Delivery, October 2006, Vol. 21, No. 4, p. 2091–2093.
6. Costa F.F., Fernandes D.A., de Almeida L.A.L., Naidu S.R.: *Prony's Method versus FFT for Analyzing Power Converters Signals*. EPE – Power Electronics and Applications, 2005, Dresden, 11–14 September 2005.
7. Opis modułu BeagleBoard: <http://beagleboard.org/>, data pobrania: 13-09-2010.
8. Szmajda M., Zygarlicki J., Mroczka J.: *Systemy pomiarowe jakości energii elektrycznej*. Przegląd Elektrotechniczny, 2/2009, s. 1–6.

Tab. 2. Analiza wydajności różnych konfiguracji

Tab. 2. The analysis of the efficiency of the different hardware and software configurations

	AMD 2200 (x86)		BeagleBoard	
	konfiguracja 1 -referencyjna	konfiguracja 2	konfiguracja 3	konfiguracja 4
	WinXP + Matlab	Ubuntu + Octave	Ubuntu + Octave	Angstr. + Octave
procentowy spadek wydajności w stosunku do konfiguracji 1	100	44,6	3,56	4,84
krotność spadku wydajności w stosunku do konfiguracji 1	1	2,24	28,1	20,6

An efficiency analysis of the power quality monitoring system based on BeagleBoard embedded with Linux operating system

The article show the possibilities of use of the low cost BeagleBoard embedded system based on Texas Instruments OMAP processor with Linux operating system used for advanced power quality monitoring system. The authors show analysis results of the required time computation for presented advanced signal analysis methods like Prony's method, which can be used for power quality parameters estimation. The results were compared with computations made for PC standard computers, with x86 architecture. Additional, the article show possibility of peripheral devices connections to the presented system.

Keywords: signal analysis, power quality, Prony's method, embedded system, signal processing

dr inż. Jarosław Zygarlicki

Urodzony 20.04.1978 r. w Brzegu. Ukończył studia w 2002 r. na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej. Stopień doktora uzyskał w 2007 r. na Politechnice Opolskiej. Jest zatrudniony od 2002 r. (obecnie na stanowisku adiunkta) na Wydziale Elektroniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej. Jego zainteresowania obejmują nowoczesne metody przetwarzania sygnałów, procesory sygnałowe, systemy embedded, jakość energii elektrycznej oraz konstrukcję cyfrowych systemów pomiarowych.

e-mail: j.zygarlicki@po.opole.pl



prof. dr hab. inż. Janusz Mroczka, czł. koresp. PAN

Urodzony 27.04.1952 r. w Dębicy. Ukończył studia w 1976 r. na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej, gdzie w 1981 r. uzyskał stopień doktora, a w 1991 r. doktora habilitowanego. W wieku 44 lat otrzymał tytuł profesora nauk technicznych. Od 1999 r. prof. zw. Pol. Wr. Członek licznych towarzystw naukowych w kraju i zagranicą. Dyrektor Instytutu Metrologii Elektrycznej Pol. Wr. w latach 1991-1996. Od 1998 r. założyciel i kierownik Katedry Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej Politechniki Wrocławskiej.

e-mail: janusz.mroczka@pwr.wroc.pl

