

Jan Ryszard JASIK, Krzysztof KISIEL
POLITECHNIKA LUBELSKA, KATEDRA AUTOMATYKI I METROLOGII

Analiza widmowa wejściowych wielkości fizycznych czujników z wyjściem częstotliwościowym

Dr hab. inż. Jan Ryszard JASIK

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej (1970 r.). Doktorat uzyskał w 1979 r. na Wydziale Automatyki i Sterowania Politechniki Leningradzkiej. Stopień doktora habilitowanego otrzymał w 2004 r. na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Problematyka jego badań obejmuje zagadnienia przetwarzania sygnałów pomiarowych, konstrukcji systemów pomiarowych z częstotliwościowym nośnikiem informacji oraz atestacji metrologicznej narzędzi pomiarowych.

e-mail: j.jasik@pollub.pl



Mgr inż. Krzysztof KISIEL

Ukończył Wydział Elektryczny Politechniki Lubelskiej w 2001r. Jest słuchaczem studiów doktoranckich na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Zawodowo zajmuje się wdrażaniem systemów elektronicznego obiegu dokumentów i administracją sieci komputerowych. Zainteresowania naukowe koncentrują się wokół przetwarzania sygnałów pomiarowych w systemach wspomaganym komputerowo.

e-mail: Krzych_Kissiel@poczta.onet.pl



Streszczenie

W referacie prezentowany jest nowy, korelacyjny, algorytm analizy widmowej wejściowych wielkości fizycznej czujników z wyjściem częstotliwościowym, polegający na mnożeniu impulsowego sygnału wyjściowego czujnika przez dwa, specjalnie generowane, ortogonalne sygnały bazowe (synfazowy i kwadraturowy) o płynnie zmienianej częstotliwości oraz programowanym kształcie. Algorytm zmienny jest tym, że mnożenie odbywa się sposobem logicznym z użyciem bramek AND, zaś całkowanie z użyciem liczników rewersyjnych. Przedstawia się implementację algorytmu pomiarowego w strukturze mikrokontrolera 89S8252, współpracującego z komputerem osobistym poprzez standardowy interfejs szeregowy, oprogramowany w środowisku LabVIEW for Windows, która umożliwia wyznaczenie widma amplitudowego i fazowego badanych przebiegów. Przytacza się wyniki eksperymentu, polegającego na porównaniu analizy specjalnie wygenerowanego przebiegu napięciowego o znanym składzie widmowym, stanowiącego sygnał wejściowy przetwornika U/f z użyciem zaproponowanego rozwiązania, z wynikami analizy tegoż przebiegu uzyskiwanymi z użyciem analizatora bazującego na zastosowaniu szybkiej transformaty Fouriera.

Spectral analysis of physical quantities input to sensors of frequency output

Abstract

The paper presents a new correlation algorithm of spectral analysis of physical quantities input to frequency-output sensors. The algorithm consists in multiplying of the pulse input signal of a sensor by two specially generated orthogonal base signals (in-phase and quadrature ones) of smoothly varied frequency and programmed shapes and then integrating the products obtained that way. It is characteristic for the algorithm that the multiplication is realized in a logical way with the use of AND gates, while the integration applies reverse counters that make possible to eliminate a constant component that is present in input signals of most sensors of frequency output. Implementation of the measuring algorithm into the structure of a microcontroller 89S8252 cooperating with a PC through a standard series interface programmed in the LabVIEW for Windows environment has been presented. It makes possible to determine amplitude and phase spectra of the tested waveforms. A specially generated voltage waveform of a known spectral composition used as an input signal for a U/f converter has been analyzed by means of the proposed solution and with the use of an analyzer based on the fast Fourier transform. Results of the analyses have been compared and conclusions of that comparative analysis have been given.

1. Wprowadzenie

Wielkości fizyczne, którymi zajmuje się współczesna metrologia, są najczęściej odkształconymi przebiegami okresowymi [1]. Celem eksperymentu pomiarowego jest często analiza widmowa tych przebiegów polegająca na bezpośrednim realizowaniu transformaty Fouriera [1, 2]. Analiza taka charakteryzuje się tym, że widmo badanego przebiegu jest otrzymywane w trakcie trwania tego przebiegu, w wyniku jego oddziaływania na określony przyrząd fizyczny nazywany analizatorem.

Analiza widmowa przez bezpośrednią realizację ciągłej transformaty Fouriera wymaga mnożenia analizowanego sygnału przez dwa ortogonalne, harmoniczne (sinus i cosinus) sygnały bazowe, całkowania tak otrzymanych iloczynów i wykonywania analogowych obliczeń mających na celu wyznaczenie bieżącego widma amplitudowego i fazowego [2, 3]. Analiza widmowa metodami cyfrowymi wiąże się z koniecznością zastosowania szybkiego, próbkującego, przetwarzania analogowo-cyfrowego oraz wykonania skomplikowanych obliczeń mających na celu wyznaczenie dyskretnej lub szybkiej transformaty Fouriera [3].

Wymienione wyżej sposoby analizy widmowej odnoszą się do sygnałów napięciowych lub do wielkości fizycznych bezpośrednio przez sygnały napięciowe reprezentowanych. Tymczasem w praktyce metrologicznej coraz częściej obserwuje się stosowanie, do pomiarów zmieniających się w czasie wielkości fizycznych $x(t)$, czujników typu „wielkość fizyczna-częstotliwość” (X/f), w których informacja o wartości wielkości fizycznej zawarta jest w częstotliwości $f_x(t)$ sygnału wyjściowego:

$$f_x(t) = f_{x0} + S \cdot x(t), \quad (1)$$

gdzie: S – czułość czujnika X/f , f_{x0} - częstotliwość początkowa.

Analiza widmowa wielkości fizycznych reprezentowanych przez sygnały impulsowo-częstotliwościowe wymaga opracowania specjalnych algorytmów pomiarowych i sposobów ich realizacji w oparciu o współczesną bazę elementową [5]. Jedno z możliwych rozwiązań tego problemu jest przedstawione w niniejszej pracy.

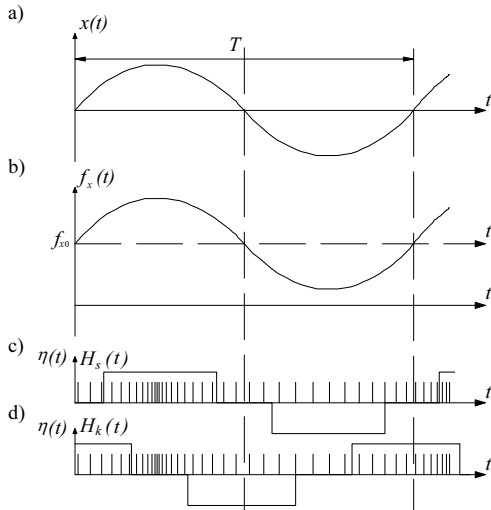
2. Korelacyjny algorytm przetwarzania

Idea analizy widmowej metodą bezpośredniej realizacji ciągłej transformaty Fouriera wielkości fizycznej $x(t)$ reprezentowanej przez częstotliwość $f_x(t)$ impulsowego sygnału wyjściowego $\eta(t)$ czujnika X/f jest przedstawiona na rys. 1. Realizacja praktyczna metody wymaga wymnożenia impulsowego sygnału wyjściowego $\eta(t)$ czujnika X/f przez dwa ortogonalne sygnały bazowe $H_s(t)$ (synfazowy) i $H_k(t)$ (kwadraturowy) oraz całkowania tak otrzymanego iloczynu. Sygnały bazowe powinny w najwyższym, uzasadnionym metrologicznie, stopniu przypominać funkcję sinus i cosinus odpowiednio. Mnożenie może odbywać się z użyciem bramek AND a całkowanie z użyciem liczników rewersyjnych, umożliwiających wyeliminowanie obecności składowej stałej w sygnale wyjściowym czujnika X/f [6].

Rezultaty zliczania w postaci kodów N_s i N_k zarejestrowanych w licznikach rewersyjnych, w czasie pomiaru T_p równym okresowi T mierzonej wielkości fizycznej lub wielokrotnie od niego większym, opisują wzory:

$$N_s = \int_0^{T_p} \eta(t) \cdot H_s(t) dt, \quad (2)$$

$$N_k = \int_0^{T_p} \eta(t) \cdot H_k(t) dt. \quad (3)$$



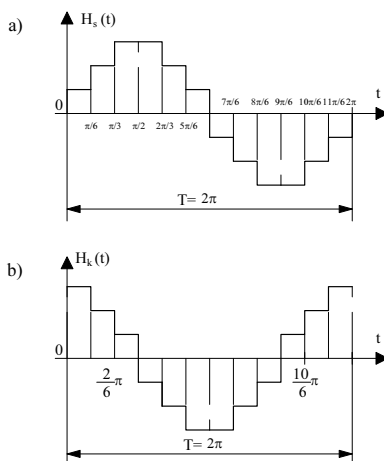
Rys. 1. Korelacyjny algorytm analizy widmowej wielkości fizycznych reprezentowanych przez sygnały częstotliwościowe
 Fig. 1. Correlation algorithm of spectral analysis of physical quantities represented by frequency signals

Korzystając z otrzymanych kodów można obliczyć amplitudę $A(\Omega)$ i fazę $\Psi(\Omega)$ składowej harmonicznej wielkości fizycznej, odpowiadającej pulsacji Ω podstawowej harmonicznej sygnałów bazowych:

$$A(\Omega) = \frac{1}{K_w T_p} \sqrt{N_s^2 + N_k^2}, \quad (4)$$

$$\Psi(\Omega) = \arctg \frac{N_k}{N_s}. \quad (5)$$

Dokładność wyznaczenia poszczególnych składowych harmonicznych widma zależy w znaczącym stopniu od kształtu K_w sygnałów bazowych, który decyduje o filtrujących właściwościach algorytmu. Predystynowane do realizacji w technice mikroprocesorowej sygnały bazowe i ich składy widmowe przedstawia odpowiednio na rys. 2 i wzór (6).



Rys. 2. Sygnały bazowe: a) synfazowy, b) kwadraturowy
 Fig. 2. Base signal: a) in-phase, b) quadrature ones

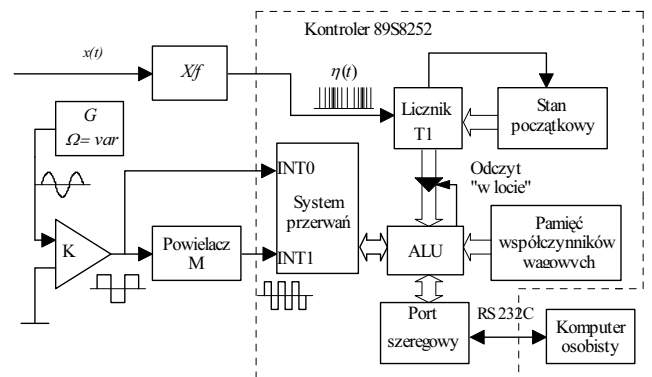
$$H(t) = \frac{2}{\pi} \left(\sqrt{2} \sin \frac{2\pi}{T} t + \frac{\sqrt{2}}{11} \sin \frac{11 \times 2\pi}{T} t + \frac{\sqrt{2}}{13} \sin \frac{13 \times 2\pi}{T} t + \dots \right) \quad (6)$$

Sygnały te zapewniają selektywność algorytmu na wszystkie harmoniczne parzyste, a także na harmoniczną 3-cią, 5-tą, 7-mą, 9-tą, 17-tą, itd. Harmoniczna jedenasta będzie osłabiona 11 razy, trzynasta 13 razy.

W implementacji mikroprocesorowej proces zliczania impulsów sygnału wyjściowego czujnika X/f może odbywać się w układzie przepelniającego się licznika zliczającego w pętli i odczytywanego „w locie” [5], a proces mnożenia odpowiednich kodów licznika przez charakterystyczne dla danych sygnałów bazowych współczynniki wagowe może odbywać się metodą programową.

3. Koncepcja mikroprocesorowego analizatora

Konfiguracja mikrokontrolera 89S8252 do realizacji korelacyjnego algorytmu analizy widmowej wielkości fizycznych reprezentowanych przez sygnały impulsowo-częstotliwościowe postaci (1) jest przedstawiona na rys. 3. Rewersyjne liczniki zostały zastąpione odczytywanym „w locie” licznikiem T1, zliczającym w pętli z przepelnieniem impulsy $\eta(t)$ sygnału wyjściowego czujnika X/f . Powstawanie sygnałów bazowych ma miejsce w mikroprocesorze poprzez nadawanie impulsom zliczonym w poszczególnych przedziałach sygnałów bazowych odpowiednich wag przyjętych dla tych sygnałów i przechowywanych w pamięci programu ROM. Mnożenie sygnałów bazowych, synfazowego i kwadraturowego, z impulsami zliczanymi przez licznik i zapamiętanymi w pamięci RAM odbywa się programowo w mikroprocesorze.



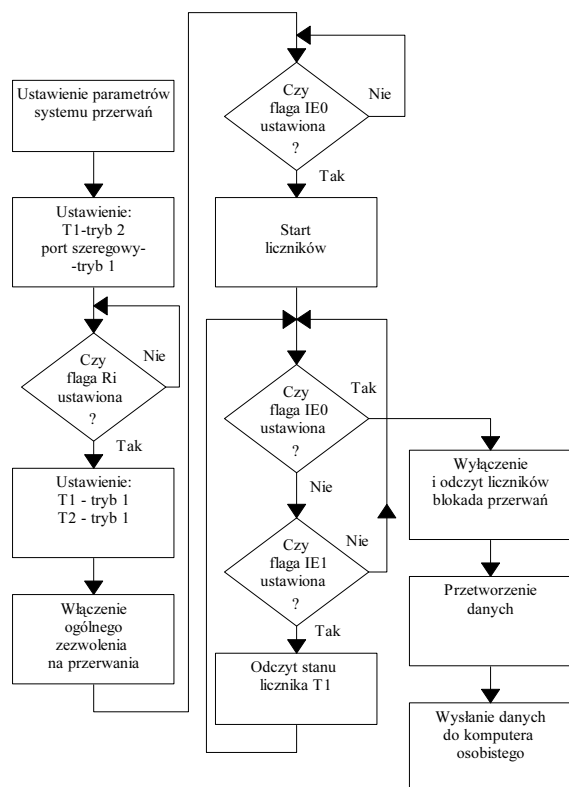
Rys. 3. Schemat strukturalny analizatora wielkości fizycznych
 Fig. 3. Structural diagram of the analyzer of physical quantities

Wyznaczanie chwil czasowych odpowiadających zmianom poziomów sygnałów bazowych realizuje powielacz częstotliwości podstawowej harmonicznej analizowanej wielkości fizycznej wylawianej przez komparator K. Zmiana współczynnika M powielenia powielacza implikuje zmianę częstotliwości podstawowej harmonicznej sygnałów bazowych, a w konsekwencji pomiar kolejnych wyższych harmonicznych analizowanej wielkości fizycznej.

4. Oprogramowanie mikrokontrolera

Sieć działań programu jest przedstawiona na rys. 4. System mikroprocesorowy rozpoczyna pomiar po nadejściu rozkazu z komputera osobistego. Pierwszym etapem jest wykrycie początku okresu podstawowej harmonicznej sygnału badanego poprzez badanie sygnału wyjściowego komparatora K.

Gdy komparator zasygnalizuje początek okresu uruchamiany jest licznik, który pracuje do momentu nadejścia kolejnego sygnału z komparatora będącego informacją o końcu okresu. W tym samym czasie kontrolowane jest wyjście powielacza częstotliwości, którego impulsy wyznaczają chwile odczytu licznika „w locie”. Gdy zostanie wykryty koniec okresu system mikroprocesorowy przechodzi do przetwarzania danych i wysłania ich do komputera osobistego za pomocą interfejsu RS 232C.



Rys. 4. Sieć działań programu mikrokontrolera
Fig. 4. Flowchart of the microcontroller software operation

Algorytm programu umieszczony na rys. 4 skonstruowano tak, że pozwala on na pomiar jednej harmonicznej. W celu zmierzenia kolejnych harmonicznych program musi być uruchomiony ponownie tyle razy ile harmonicznych będzie mierzonych. O numerze mierzonej harmonicznej decyduje współczynnik powielenia M powielacza częstotliwości.

Układ jest typowym przykładem systemu pomiarowego, w którym komputer osobisty inicjuje pomiary w systemie mikroprocesorowym, a po ich wykonaniu przyjmuje uzyskane wyniki. Do komunikacji pomiędzy urządzeniami wykorzystana jest szeregowa transmisja asynchroniczna. Wynika stąd konieczność ustawienia portu szeregowego mikrokontrolera w tryb 1. W trybie tym przesyłany jest bit startu, 8 bitów danych i bit stopu. Prędkość transmisji szeregowy ustalana jest [8] przez Timer 1. Następnie mikrokontroler czeka na bajt inicjujący pomiar wysyłany z komputera osobistego, po odebraniu którego ustawiana jest flaga RI zakończenia odbioru, która pozwala mikrokontrolerowi na rozpoczęcie (start) pomiaru.

W kolejnym kroku oba timery ustawiane są w tryb pierwszy do pracy jako pełne rejestry 16-bitowe. W tym trybie ustawienie flag TF0 i TF1 następuje przy doliczeniu do wartości 65536. Timer 0 pracuje jako timer tzn. zlicza impulsy z rezonatora kwarcowego podzielone przez 12, a więc powtarzające się co jedną mikrosekundę. Timer 0 rozpoczyna zliczanie na początku okresu sygnału badanego i jest zatrzymywany na końcu tegoż okresu. Pomiar okresu sygnału badanego dokonywany jest za pomocą Timera 0.

Impulsy wzorcowe liczone przez ten timer mają okres $1\mu s$ a więc zawartość licznika T0, po skończonym pomiarze, będzie dokładnie okresem sygnału badanego wyrażonym w μs . Timer 1 zlicza impulsy wygenerowane przez przetwornik X/f i podobnie jak T0 jest startowany i zatrzymywany w tych samych momentach. Po rozpoczęciu pomiaru program główny czeka na przerwanie. Gdy na wejściu INT0 pojawia się zbocze opadające, zostaje ustawiona flaga IE0 i mikrokontroler rozpoczyna wykonywanie podprogramu obsługi tego przerwania. Oba liczniki rozpoczynają zliczanie (start liczników). W czasie jednego pomiaru na wejściu INT1, do którego podłączony jest powielacz częstotliwości, pojawia się zbocze opadające powielonej $h \cdot 12$ razy częstotliwości sygnału badanego, gdzie h jest numerem mierzonej harmonicznej. Za każdym razem ustawiana jest flaga IE1 i wykonywany jest skok do podprogramu obsługi tego przerwania. W podprogramie tym odczytywany jest „w locie” stan licznika T1. Dane te są następnie zapisywane w kolejnych komórkach pamięci. Licznik T0 może ulec przepełnieniu przy okresach dłuższych niż 1s. W takim przypadku wykonywany jest skok do podprogramu obsługi tego przerwania.

Kolejne pojawienie się zbrocza opadającego na wejściu INT0 i ustawienie flagi IE0 powoduje zatrzymanie liczników i umieszczenie zliczonych przez nie wartości w odpowiednich komórkach pamięci. W tym momencie pomiar jest zakończony. Dane zapisane w pamięci to kolejne 16-bitowe wartości z licznika T1 np. $N_1, N_2, N_3, \dots, N_{n-1}, N_n$, gdzie: $n = h \cdot 12$. Na ich podstawie wyliczane są liczby impulsów zliczone w poszczególnych przedziałach pomiarowych zgodnie ze wzorami: $N_{2-1} = N_2 - N_1$, $N_{3-2} = N_3 - N_2$, \dots , $N_{n-n-1} = N_n - N_{n-1}$. Następnie każda wartość jest wymniana przez odpowiednią wagę, zgodnie z kształtem sygnałów bazowych, a wyniki wymnania są sumowane. Zajmują się tym odpowiednie procedury. Operacja sumowania jest przeprowadzana oddzielnie dla ujemnych i dodatnich wartości sygnałów bazowych, a po jej wykonaniu dwie otrzymane liczby są od siebie odejmowane. Ostatnim krokiem wykonywanym przez program jest wysłanie, za pośrednictwem portu szeregowego, wyników pomiarów do komputera osobistego.

5. Oprogramowanie komputera osobistego

Panel czołowy analizatora (rys. 5) jest interaktywnym interfejsem użytkownika. Za jego pomocą można inicjować pomiary oraz odczytywać wyniki analizy 9 harmonicznych. Panel składa się z pięciu zakładek. Zakładka POMIARY umożliwia zainicjowanie analizy, wybór numeru mierzonej harmonicznej oraz liczby powtórzeń pomiaru.



Rys. 5. Wirtualny panel czołowy analizatora
Fig. 5. Virtual front panel of the analyzer

Wynikiem analizy są podstawowe parametry wyznaczonej harmonicznej takie jak: amplituda, częstotliwość i jej przesunięcie fazowe względem harmonicznej podstawowej. Na panelu widoczny jest także inny ważny parametr, współczynnik powielenia M powielacza częstotliwości, który należy ustawić dla każdej mierzonej harmonicznej na wartość omówioną w punkcie 4.

W zakładce WYNIKI znajduje się rozwinięcie badanego przebiegu w szereg Fouriera aż do dziewiątej harmonicznej. W następnych trzech zakładkach znajdują się graficznie przedstawione wyniki pomiarów: widmo, przebiegi poszczególnych harmonicznych oraz suma przebiegów 9-u harmonicznych stanowiąca utworzony kształt badanego przebiegu.

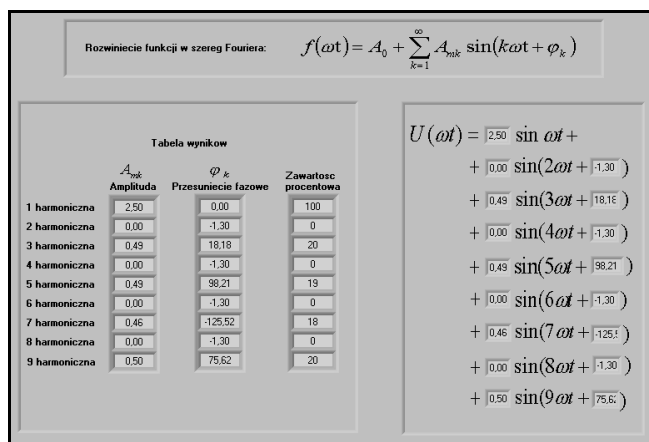
6. Zakończenie

Analizator widma został zbudowany i przetestowany w nieznacznie zmodyfikowanym układzie przedstawionym na rys. 2. Źródłem badanych przebiegów był cyfrowy generator programowany typu HP 33120A, który oprócz standardowych kształtów (np. sinus, prostokąt, piła itp.) może w trybie arbitralnym generować przebiegi okresowe zawierające dowolne harmoniczne o zadanej amplitudzie i fazie. Jako instrumentu wzorcowego użyto oscyloskopu cyfrowego Tektronix TDS 210, który oprócz zwykłej obserwacji badanych przebiegów oferuje także pomiar składowych widma metodą FFT. Źródłem sygnału częstotliwościowego był specjalnie opracowany przetwornik U/f w oparciu o układ AD 654. W charakterze programowanego powielacza częstotliwości wykorzystano model użytkowy przyrządu [6] skonstruowany w Politechnice Lubelskiej. Rys. 8 przedstawia wynik analizy, specjalnie wygenerowanego (rys. 6) przebiegu napięcia $u(t)$, zawierającego nieparzyste harmoniczne do 9-tej włącznie.



Rys. 6. Przykładowy analizowany przebieg czasowy napięcia wyjściowego generatora

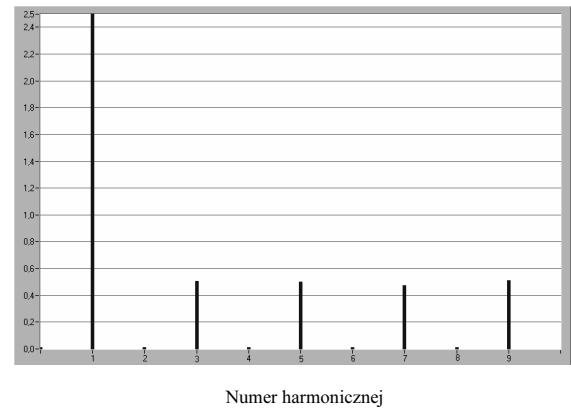
Fig. 6. Example analyzed time waveform of the generator output voltage



Rys. 7. Panel wyników analizy

Fig. 7. Panel with analysis results displayed

Amplituda (V)



Rys. 8. Widmo analizowanego przebiegu wyznaczone zaproponowanym analizatorem

Fig. 8. Spectrum of the analyzed waveform determined by means of the proposed analyzer

Wyniki eksperymentów przeprowadzonych dla szeregu sygnałów napięciowych w pełni potwierdziły przydatność zaproponowanego algorytmu korelacyjnego do analizy widmowej wielkości fizycznych reprezentowanych przez sygnały impulsowo-częstotliwościowe.

Zaprezentowana realizacja analizatora posiada pewne ograniczenia związane z pojemnością pamięci RAM mikrokontrolera ograniczającą liczbę wyznaczanych harmonicznych do 9-ciu. Zwiększenie liczby analizowanych harmonicznych o 1 wymaga zwiększenia pojemności pamięci o 12 bajtów. Wyznaczanie poszczególnych harmonicznych odbywa się sukcesywnie i wymaga przeprogramowywania współczynnika powielenia M powielacza częstotliwości.

7. Literatura

- [1] Ozimek E. Podstawy teoretyczne analizy widmowej sygnałów, PWN, Poznań 1985 r.
- [2] Sobkowski J., Częstotliwościowa analiza sygnałów, Wydawnictwo MON, Warszawa 1975 r.
- [3] Zieliński T.P., Cyfrowe przetwarzanie sygnałów, Od teorii do zastosowań, WKŁ, Warszawa 2005 r.
- [4] Bobkow J.N., Korelacyjne metody i urządzenia izmierzania składających się sygnałów, „Wisza szkoła”, Lwów 1984.
- [5] Jasik J.R., Przetwarzanie sygnałów pomiarowych w systemach z częstotliwościowym nośnikiem informacji, Politechnika Lubelska, Lublin 2003 r.
- [6] Jasik J.R., i inni, Teoria i zastosowania nowych algorytmów cyfrowej obróbki sygnałów pomiarowych w systemach z częstotliwościowym nośnikiem informacji, Sprawozdanie z realizacji II etapu tematu II.02 w ramach CPBP 02 20, Pol. Lub., Lublin 1987 r.
- [7] Nadachowski M., Kulka Z., Analogowe układy scalone, WkiŁ, Warszawa 1979 r.
- [8] Starecki T. Mikrokontrolery 8051 w praktyce, BTC, Warszawa 2002 r.
- [9] LabVIEW National Instruments, www.ni.com
- [10] Daniluk A. RS 232C Praktyczne programowanie, Helion Gliwice 2001 r.

Artykuł recenzowany