

Jan Ryszard JASIK, Eligiusz PAWŁOWSKI
POLITECHNIKA LUBELSKA
KATEDRA METROLOGII ELEKTRYCZNEJ I ELEKTRONICZNEJ

Pomiary częstotliwości chwilowej sygnałów impulsowych

Opisano metodę pomiaru częstotliwości chwilowej, polegającą na wyznaczeniu czasu trwania kolejnych przedziałów międzyimpulsowych sygnału. Przedstawiono strukturę układu pomiarowego w postaci karty rozszerzającej do komputera klasy IBM/PC i odpowiednie oprogramowanie, które pozwala na odtworzenie zmian czasowych mierzonej częstotliwości oraz ich prezentację na ekranie monitora komputera. Przeanalizowano właściwości metrologiczne przedstawionego rozwiązania oraz wskazano możliwe dziedziny zastosowań.

ABSTRACT

The paper presents a PC-computer accessory board for measuring of the consecutive periods of a TTL signal and making the results available for review and presenting to the PC-monitor. TTL signal frequency may range from 1,2 MHz to 3,5 kHz. The upper frequency limit actually depends on speed of the computer. Typical board application include monitoring a frequency change and measuring output intervals of rotating sensors.

Wprowadzenie

Cyfrowe pomiary wielu wielkości fizycznych są często realizowane przy wykorzystaniu struktury złożonej z przetwornika typu „wielkość fizyczna – częstotliwość” i cyfrowego częstotliciomierza [3]. Specyficzną cechą takiej struktury jest cykliczność pracy, co w przypadku pomiaru zmieniającej się w czasie wielkości fizycznej prowadzi do powstawania dwóch charakterystycznych składowych błędów pomiarów, które należy traktować jako błędy dynamiczne. Pierwsza składowa to błąd uśredniania, który należy uwzględnić wówczas, gdy z wyników pomiaru częstotliwości są odtwarzane chwilowe wartości sygnału wejściowego struktury. Składowa druga wynika z aproksymacji wielkości ciągłej na podstawie dyskretnych wartości uzyskanych z pomiarów i przyporządkowanych odpowiednim momentom czasowym.

Zmniejszanie pierwszej składowej błędu jest możliwe poprzez wykonywanie pomiarów średniej częstotliwości w stykających się przedziałach czasu [2]. Korzystne w tym wypadku skracanie czasu pomiaru (uśredniania) prowadzi jednak do niedopuszczalnego zwiększania się kolejnej składowej błędu, tzn. błędu kwantowania. Błąd dynamiczny wynikający z uśredniania może również przyjmować znaczące wartości przy zastosowaniu algorytmu pomiarowego polegającego na wyznaczeniu czasu trwania wielu okresów sygnału [4]. Dlatego też najodpowiedniejszym algorytmem wydaje się być algorytm pomiaru okresu sygnału impulsowego. W tym jednak wypadku, przy zmieniającym się sygnale wejściowym w roz-

patrywanej strukturze, mamy do czynienia z sygnałem impulsowym zmodulowanym częstotliwościowo, należy więc raczej mówić o pomiarze czasu trwania przedziału międzyimpulsowego tego sygnału zamiast o pomiarze jego okresu. Z drugą składową błędu jest związany problem datowania wyniku pomiaru, polegający na przyporządkowaniu uzyskiwanych wartości odpowiednim chwilom czasowym, gdyż w rozpatrywanej strukturze odstęp czasu pomiędzy kolejnymi pomiarami nie jest stały.

Propozycją rozwiązania tych problemów jest przedstawiona w artykule struktura układu pomiarowego w postaci karty rozszerzającej do komputera PC oraz algorytm realizacji pomiarów określony przez specjalnie napisany program umożliwiający wyznaczenie wartości „chwilowych” częstotliwości jako odwrotności czasów trwania kolejnych przedziałów międzyimpulsowych sygnału, a na ich podstawie odtworzenie przebiegu mierzonej wielkości fizycznej.

Zasada pomiaru

Pomiar wartości „chwilowych” częstotliwości sygnału w celu odtworzenia kształtu przebiegu wielkości fizycznej, której jest on reprezentantem, wymaga zmierzenia czasu trwania wszystkich jego kolejnych przedziałów międzyimpulsowych. Jest to możliwe w układzie zawierającym dwa liczniki działające naprzemiennie, tzn. gdy pierwszy z nich jest odczytywany, drugi zlicza impulsy generatora częstotliwości wzorcowej w czasie trwania kolejnego przedziału międzyimpulsowego i odwrotnie. Korzystniejszym rozwiązaniem dla układu wspomaganego komputerowo jest użycie tylko jednego licznika, ale o odpowiednio dużej pojemności i odczytywanego „w locie” w chwilach czasowych odpowiadających występowaniu impulsów sygnału mierzonego, wyznaczających jego kolejne przedziały międzyimpulsowe. W tym wypadku częstotliwość „chwilowa” F_{xi} odpowiadająca przedziałowi międzyimpulsowemu od chwili t_{i-1} do t_i jest wyliczana na podstawie odczytanych w tych chwilach stanów N_{i-1} i N_i licznika oraz częstotliwości wzorcowej F_w według wzoru

$$F_{xi} = \frac{1}{T_{xi}} = \frac{F_w}{N_i - N_{i-1}} \quad (1)$$

Taki sposób realizacji pomiarów wymaga jednak rozwiązania kilku dodatkowych problemów technicznych. Przede wszystkim licznik zliczający bez przerwy impulsy o częstotliwości wzorcowej F_w ulegnie po pewnym czasie przepełnieniu nawet w przypadku zastosowania licznika o bardzo dużej pojemności [1], co spowoduje powstanie znacznego błędu podczas obliczania wyniku pomiaru według wzoru (1). Istotnym więc problemem jest uwzględnienie przepełnienia się licznika podczas pomiarów tym bardziej, że zastosowanie licznika o bardzo dużej pojemności jest technicznie kłopotliwe ze względu na trudności związane z odczytem jego zawartości. Niezależnie bowiem od pojemności licznika, zawsze odczyt jego zawartości „w locie” niesie ze sobą niebezpieczeństwo zarejestrowania błędnego stanu przejściowego tym bardziej, że liczba bitów licznika, które należy odczytać, jest z reguły większa od liczby bitów szyny danych współpracującego komputera i konieczne jest wykonanie kilku kolejnych cykli odczytu. Niezbędne jest więc zastosowanie odpowiedniego re-

Dr inż. Jan Ryszard JASIK – studia wyższe na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej o specjalności Miernictwo Elektryczne i Przyrządy Pomiarowe ukończył w 1970 r. Doktorat uzyskał w 1979 r. po odbyciu studiów aspiranckich na Wydziale Automatyki i Sterowania Politechniki Leningradzkiej. Pracuje w Katedrze Metrologii Elektrycznej i Elektronicznej Politechniki Lubelskiej, obecnie na stanowisku adiunkta. Obszar jego zainteresowań to technika sensorowa oraz konstrukcja systemów pomiarowych o niekonwencjonalnych algorytmach obróbki sygnałów z impulsowo-częstotliwościowym nośnikiem informacji.

Dr inż. Eligiusz PAWŁOWSKI – studia wyższe na Wydziale Elektrycznym Politechniki Lubelskiej ukończył w 1982 r. Na tym samym Wydziale w 1994 r. uzyskał doktorat z zakresu wspomaganých komputerowo pomiarów częstotliwości. Obecnie pracuje w Katedrze Metrologii Elektrycznej i Elektronicznej Politechniki Lubelskiej na stanowisku adiunkta. Obszar jego zainteresowań obejmuje programowe metody obróbki danych we wspomaganých komputerowo systemach kontrolno-pomiarowych.

jestru buforowego, którego praca powinna być zsynchronizowana zarówno z sygnałem wzorcowym F_w , jak i z sygnałem mierzonym F_x i z sygnałami odczytu danych magistrali komputera. Wszystkie te problemy rozwiązano w przedstawionym poniżej układzie pomiarowym.

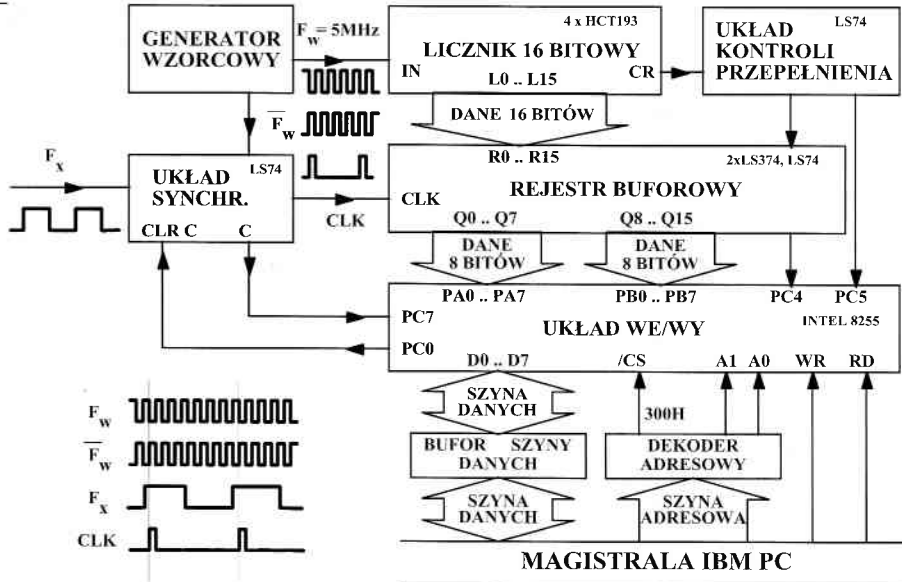
Układ pomiarowy

Zrealizowany układ pomiarowy składa się z karty rozszerzającej do komputera klasy IBM/PC oraz z odpowiedniego oprogramowania nadzorującego proces pomiaru, przetwarzającego otrzymane surowe wyniki pomiarów i prezentującego je na monitorze.

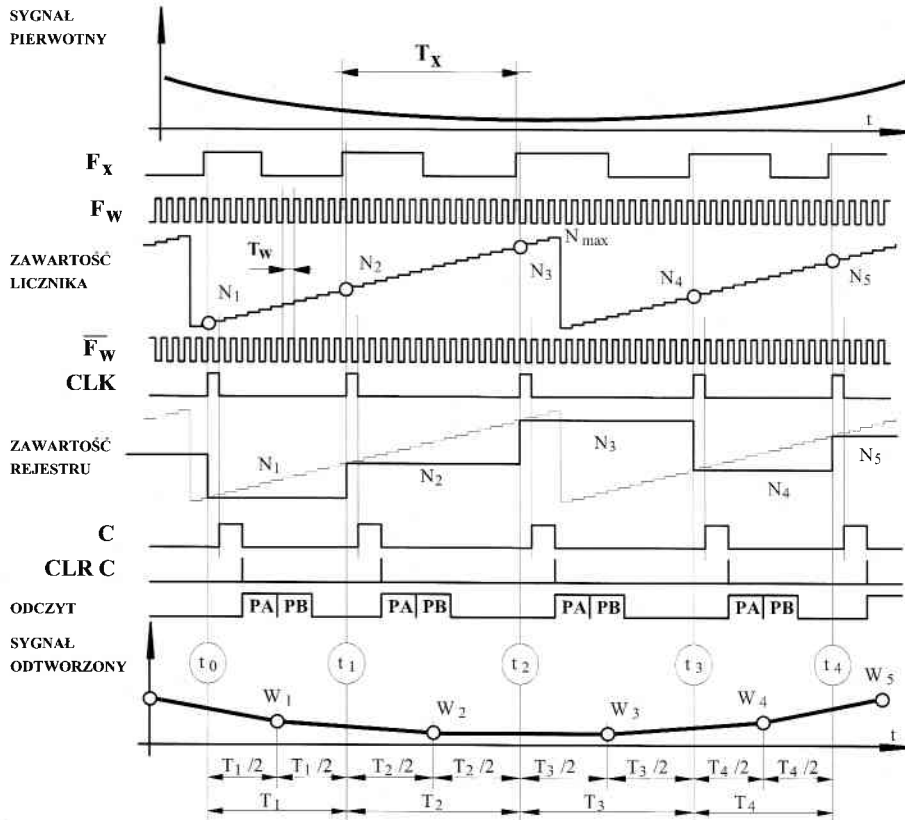
Karta pomiarowa

Schemat blokowy karty pomiarowej przedstawiono na rys. 1, a przebiegi czasowe w najważniejszych punktach układu na rys. 2. GENERATOR WZORCOWY dostarcza sygnał częstotliwości wzorcowej $F_w = 5$ MHz, którego impulsy są bez przerwy zliczane w LICZNIKU o pojemności 16 bitów. Kod wyjściowy LICZNIKA jest doprowadzony do wejść REJESTRU BUFOROWEGO i dalej poprzez UKŁAD WE/WY i BUFOR SZYNY DANYCH do magistrali współpracującego z kartą komputera PC. UKŁAD SYNCHRONIZACJI wytwarza impulsy CLK zapisu kodu LICZNIKA do REJESTRU BUFOROWEGO zawsze synchronicznie z najbliższym

Rys. 1. Schemat blokowy karty rozszerzającej



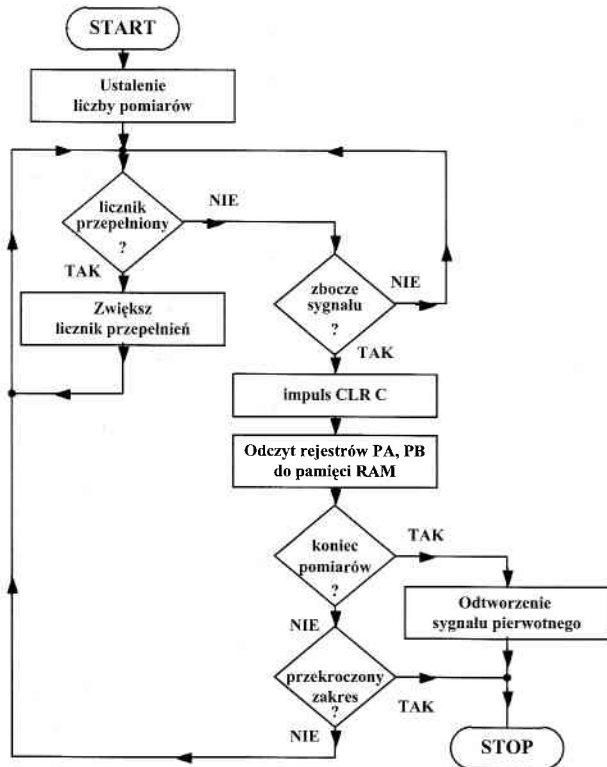
Rys. 2. Przebiegi czasowe ilustrujące zasadę pomiaru



impulsem zanegowanego sygnału wzorcowego \bar{F}_w po każdym kolejnym narastającym zboczu sygnału mierzonego F_x , co zabezpiecza przed zatrzaśnięciem w rejestrze stanu przejściowego licznika. W chwili gdy REJESTR BUFOROWY zawiera nowe dane do odczytu, UKŁAD SYNCHRONIZACJI generuje sygnał C informujący komputer o konieczności ich odczytu. UKŁAD SYNCHRONIZACJI jest zerowany sygnałem CLR C każdorazowo po rozpoczęciu procedury odczytu nowych danych z rejestru. UKŁAD WE/WY umożliwia bezkolizyjny odczyt 16-bitowych danych poprzez 8-bitową SZYBĄ DANYCH komputera. Sygnał CR przepełnienia licznika poprzez UKŁAD KONTROLI PRZEPEŁNIENIA jest odczytywany przez komputer, co umożliwia odpowiednią korektę wyniku pomiaru. DEKODER ADRESOWY zrealizowany w sposób typowy umieszcza rejestry karty w przestrzeni adresowej komputera pod adresem bazowym 300H.

Oprogramowanie

Algorytm programu sterującego pracą karty pomiarowej jest przedstawiony na rys. 3. Po wstępnym ustaleniu liczby pomiarów, które mają być zrealizowane, program w pętli testuje stan odpowiednich linii UKŁADU WE/WY w celu wykrycia wystąpienia kolejnego zbocza sygnału mierzonego oraz sygnału przepełnienia licznika. Każdorazowo po wystąpieniu narastającego zbocza sygnału mierzonego jest odczytywany z REJESTRU BUFOROWEGO zatrzaśnięty w nim stan LICZNIKA. Jednocześnie jest zliczana liczba przepełnień L LICZNIKA występujących w czasie pomiaru jednego przedziału międzyimpulsowego.



Rys. 3. Algorytm programu sterującego pracą karty pomiarowej

Dane odczytane z rejestrów PA i PB UKŁADU WE/WY nie są na bieżąco przetwarzane, lecz zapamiętuje się je w pamięci RAM komputera. Po zgromadzeniu uprzednio zadeklarowanej liczby wyników pomiarów obliczane są wartości częstotliwości wejściowej F_x odpowiadające odwrotnościom czasu trwania kolejnych przedziałów międzyimpulsowych. Po uwzględnieniu

maksymalnej pojemności licznika N_{\max} oraz liczby jego przepełnień L wzór (1) określający wartość zmierzonej częstotliwości ulegnie modyfikacji do następującej postaci

$$F_{x_i} = \frac{1}{T_{x_i}} = \frac{F_w}{N_i + N_{\max} \cdot L - N_{i-1}} \quad (2)$$

Otrzymane w ten sposób kolejne wartości częstotliwości F_{x_i} są przyporządkowywane odpowiednim chwilom czasowym, gdyż z zasady wykonywania pomiarów wynika, że nie są one rozmieszczone równomiernie w czasie i muszą być odpowiednio datowane. Dodatkowo w przypadku, gdy zmierzona częstotliwość F_{x_i} jest sygnałem wyjściowym przetwornika o znanej statycznej charakterystyce przetwarzania, jest wyliczana wartość W_i wielkości fizycznej, odpowiadająca tej częstotliwości.

Zrealizowany sposób datowania wyników pomiarów oraz odtwarzania sygnału pierwotnego jest objaśniony na rys. 2. Kody N_i licznika wykorzystane uprzednio do obliczenia kolejnych wartości F_{x_i} służą również do wyznaczenia, zgodnie z zależnością (3), chwil czasowych t_i wyznaczających granice kolejnych przedziałów międzyimpulsowych sygnału F_x .

$$t_i = t_0 + \sum_{n=1}^i T_{x_n} \quad (3)$$

Kolejne wartości F_{x_i} zmierzonej częstotliwości lub odtworzonej wielkości fizycznej W_i są przypisywane chwilom leżącym w połowie kolejnych przedziałów międzyimpulsowych T_p , a wartości leżące pomiędzy nimi są aproksymowane odciwkami.

Oprogramowanie dla karty pomiarowej napisano w języku Turbo Pascal.

Osiągnięte rezultaty

Podstawowe parametry przedstawionego układu pomiarowego wynikają z przyjętej wartości częstotliwości wzorcowej $F_w = 5$ MHz, pojemności licznika $N_{\max} = 2^{16}$ oraz z szybkości realizacji programu, co jest wprost zależne od klasy wykorzystywanego komputera. Dzięki zastosowaniu programowej kontroli przepełnienia licznika, maksymalny przedział międzyimpulsowy możliwy do zmierzenia może być dowolnie długi. W praktycznie działającym programie wynosi on $T_{x \max} = 859$ s, co odpowiada minimalnej częstotliwości $F_{x \min} = 0,0012$ Hz. Częstotliwość maksymalna przy współpracy karty pomiarowej z komputerem klasy AT 286/16 MHz wynosi ok. $F_{x \max} = 3,5$ kHz. Jednocześnie jednak należy pamiętać, że od wartości mierzonej częstotliwości F_x zależy wprost błąd kwantowania zgodnie z zależnością (4). Przyjmując więc np. dopuszczalną wartość błędu kwantowania równą 0,01% jednocześnie ograniczamy maksymalną mierzoną częstotliwość na $F_{x \max} = 500$ Hz.

$$|\delta_{kw} F_x|_{\max} = \frac{F_x}{F_w} \quad (4)$$

Zakończenie

Opracowany układ pomiarowy jest wygodnym narzędziem umożliwiającym pomiary w tych wszystkich przypadkach, w których częstotliwość sygnału niesie informację o wartościach chwilowych badanego procesu. Można tu wymienić badania ruchu obrotowego maszyn wirujących w stanach przejściowych z wykorzystaniem impulsowych przetworników prędkości obrotowej, rejestrując wielkości fizycznych przetworzonych w sygnały częstotliwościowe, badanie w stanach dynamicznych przetworników pomiarowych z wyjściem częstotliwościowym, określanie stabilności generatorów, stabilności częstotliwości sieci energetycznej itp.

Zastosowany w systemie algorytm obróbki surowych wyników pomiarów służących odtworzeniu sygnału pierwotnego nie dostosowuje się do dynamiki mierzonego procesu i wymaga dalszej optymalizacji, która powinna polegać na zminimalizowaniu sumarycznego błędu pomiaru, na który składają się błędy instrumentalne oraz błędy metody związane z kwantowaniem występującym przy pomiarze częstotliwości, uśrednianiem i aproksymacją odtwarzanego procesu na podstawie zmierzonych wartości „chwilowych” częstotliwości. Sposobem na zoptymalizowanie algorytmu może być śledzenie dynamiki badanego procesu na podstawie obliczanych stosunków kolejnych sąsiednich przedziałów międzyimpulsowych. Polepszenie właściwości metrologicznych układu będzie również możliwe poprzez zwiększenie szybkości działania programu przez zakodowanie odpowiednich jego fragmentów w języku maszynowym oraz wykorzystanie systemu

przerwań komputera do organizacji odczytu danych z karty. Zagadnienia te są przedmiotem aktualnych prac autorów.

LITERATURA

- [1] CTM-PER Continuous-Period Counter, User's Guide, Keithley Metrabyte Co. 1990.
- [2] J. R. JASIK, E. PAWŁOWSKI: Układ sprzęgania czujników pomiarowych o wyjściu czasowo-częstotliwościowym z komputerem klasy IBM PC. 30-lecie Wydziału Elektrycznego, materiały historyczne i naukowe. Wydawnictwa Uczelniane PL, Lublin 1994.
- [3] G. SAHNER: Wstęp do miernictwa cyfrowego. WKiŁ, Warszawa 1982.
- [4] J. ZAKRZEWSKI: Dynamic accuracy of multiperiod counters, *Measurement* 1995, nr 15.

Otrzymano: 30.07.97