

Symulacja przetwornika „napięcie-częstotliwość” w LabVIEW

Streszczenie. W wielu realizacjach toru pomiarowego z częstotliwościowym nośnikiem informacji stosuje się przetworniki typu „napięcie-częstotliwość” (U/f). Z powodu wysokich kosztów lepszym rozwiązaniem dla testów nowych rozwiązań jest symulacja. Do realizacji symulacji przetwornika U/f wykorzystano wyłącznie podstawowe elementy LabVIEW. Takie rozwiązanie daje możliwość łatwej rozbudowy symulatora. Opracowany symulator pozwala na przetwarzanie napięcia z błędem mniejszym niż 0,002%. Zaprezentowano przykładowe wyniki symulacji.

Abstract. In many realisation of a slotted line with a frequency data carrier “voltage-to-frequency” (U/f) converters are used. Because testing new construction is expensive, the better way is to evaluate new ideas using simulations. Only basic components of the LabVIEW were used to develop the simulator of the U/f converter. Such approach gives a very elastic diagram, which can be useful for extension of the simulator functionality. Designed U/f converter simulator can convert signals with inaccuracy better than 0,002%. Examples of obtained results are presented. (**Voltage-to-frequency converter simulation in LabVIEW**).

Słowa kluczowe: przetwornik „napięcie – częstotliwość”, symulacja przetwornika, LabVIEW.

Keywords: “voltage-to-frequency” converter, converter simulation, LabVIEW

doi:10.12915/pe.2014.11.37

Wstęp

We współczesnych systemach pomiarowych coraz częściej można spotkać przetworniki z wyjściem częstotliwościowym. W tego typu przetwornikach informacja o zmianach przetwarzanej wielkości $x(t)$ jest przekazywana poprzez wartość częstotliwości sygnału wyjściowego przetwornika. Aktualnie szeroko spotykanym w praktyce pomiarowej przetwornikiem pomiarowym z wyjściem częstotliwościowym jest przetwornik „napięcie-częstotliwość” (U/f). Ciągłe poszerzanie zakresu zastosowań tego typu czujników powodowane jest szeregiem charakteryzujących go zalet, do których można zaliczyć: liniowość charakterystyki przetwarzania, dokładność, szeroki zakres częstotliwości wyjściowych, niska cena, łatwość produkcji i aplikacji.

Przekazywanie informacji za pomocą sygnału częstotliwościowego posiada wiele zalet. Jest on odporny na zakłócenia, w prosty i efektywny sposób można go przekazywać na duże odległości bez straty informacji. Można jednak ciągle spotkać się z badaniami nad nowymi metodami przetwarzania sygnału częstotliwościowego [1, 2], uodpornieniem na błędy przetwarzania sygnału częstotliwościowego [3, 4] czy oszacowania dokładności przetwarzania [5, 6, 7].

Badania nowych metod przetwarzania są bardzo czasochłonne. Można je realizować zarówno drogą eksperymentalną jak i symulacyjną. Eksperymentalne testowanie pozwala na jednoznaczną weryfikację, ale wymaga dużego nakładu czasu i środków finansowych. Można również napotkać istotne problemy z doбором aparatury do przeprowadzenia eksperymentu [8]. Badanie symulacyjne ma ograniczoną możliwość weryfikacji, jednak przy przyjęciu odpowiednich założeń w sposób istotny wspomaga wstępne testy i przyspiesza uzyskanie informacji pozwalających na podjęcie decyzji co do implementacji nowych metod w modelu fizycznym.

Artykuł ma na celu prezentację realizacji symulacji przetwornika „napięcie - częstotliwość”. Dobrym rozwiązaniem jest wykorzystanie do tego celu specjalizowanego oprogramowania, takiego jak Matlab czy LabVIEW.

LabVIEW ma szerokie możliwości wyboru dołączanych urządzeń zewnętrznych. Jest przeznaczone do zastosowania w symulacjach, pomiarach i sterowaniu. Biorąc pod uwagę, że podczas badań bardzo przydatne może być dołączanie urządzeń zewnętrznych do aplikacji, w celu weryfikacji eksperymentalnej pracy wirtualnego

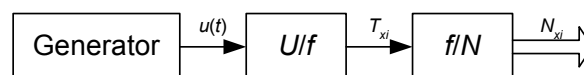
przetwornika, zdecydowano, że zostanie wykorzystane środowisko programistyczne LabVIEW.

Przetworniki „napięcie-częstotliwość”

Przetworniki U/f są układami całkującymi, w których po uzyskaniu całki napięcia wejściowego $u(t)$ o określonej wartości generowany jest koniec okresu będący jednocześnie początkiem kolejnego. Zazwyczaj do całkowania w przetwornikach U/f stosowane są następujące trzy metody [9]: całkowanie z pomocą kondensatora (zmiana częstotliwości multiwibratora przez zmianę napięcia, prądu lub rezystancji), ładowanie kondensatora przez prąd proporcjonalny do wielkości badanej i szybkie rozładowanie przez osiągnięcie poziomu progowego, ładowanie i rozładowanie kondensatora przez prąd stały proporcjonalny do wielkości mierzonej.

Aktualnie w praktyce są stosowane dwa rozwiązania. Pierwsze to sterowany prądowo multiwibrator. Jego zaletą jest prostota, niewielki koszt, mały pobór mocy. Można go stosować wszędzie tam, gdzie nie jest konieczna duża dokładność. Rozwiązanie drugie to przetwornik, w którym kompensuje się ładunek kondensatora całkującego. Przyrządy realizujące metodę kompensacji ładunku są bardziej skomplikowane, bardziej wymagające pod względem napięcia zasilającego oraz zapotrzebowania na moc, pozwalają jednak na osiągnięcie większej liniowości charakterystyki oraz zwiększenie częstotliwości wyjściowej.

Założenia symulacji



Przyjęto, że symulowany przetwornik będzie elementem wirtualnego toru pomiarowego, utworzonego według schematu blokowego pokazanego na rysunku 1.

Rys. 1. Struktura symulowanego toru pomiarowego

W skład struktury toru wchodzi trzy elementy. Pierwszy to generator sygnału testującego. W nim wytwarzane są wartości chwilowe przebiegu testującego $u(t)$. Kolejny element to przetwornik U/f . Jego rolą jest konwersja przebiegu testującego w impulsowy przebieg częstotliwościowy. Informacja o zmianach przebiegu testującego jest przekazywana poprzez kolejne okresy T_{xi} sygnału częstotliwościowego. Wartość bieżącego T_{xi} (rys.1) można obliczyć z zależności:

$$(1) \quad T_{xi} = \left(K \int_{t_{sq-1}}^{t_{sq}} u(t) dt \right)^{-1}$$

gdzie K – czułość przetwornika U/f , t_{sq} – umiejscowienie końca T_{xi} na osi czasu, t_{sq-1} – umiejscowienie początku T_{xi} na osi czasu.

Ostatni element toru to przetwornik f/N . W tym elemencie jest realizowany ciągły pomiar kolejnych, stykających się odcinków czasu sygnału częstotliwościowego, czyli przetwarzanie kolejnych wartości T_{xi} w odpowiadające im wartości liczbowe N_{xi} .

Symulator

Przyjęto, że do realizacji symulacji przetwornika U/f zostanie wykorzystany sposób działania przetwornika realizującego zasadę równoważenia ładunku [9]. Podczas symulacji przetwornika U/f powstał problem, jak dobierać moment uzyskania całki o odpowiedniej wartości uruchamiającej wygenerowanie końca danego okresu sygnału częstotliwościowego. W prezentowanej aplikacji problem został rozwiązany poprzez wykorzystanie twierdzenia o całkowaniu mówiącego, że całka sumy funkcji jest równa sumie całek. Przyjęto, że wstępnie będzie realizowane całkowanie kolejnych przedziałów wartości chwilowych z wygenerowanego sygnału testowego.

W efekcie pojawia się możliwość kontrolowania wyniku sumowania, i przerwania operacji w momencie uzyskania wymaganej wartości.

Algorytm przetwarzania próbek przebiegu $u(t)$ w przebieg częstotliwościowy pokazano na rysunku 2.

Działanie przyrządu wirtualnego realizującego funkcję przetwarzania wartości sygnału testowego $u(t)$ w sygnał częstotliwościowy rozpoczyna się od odczytu wartości pierwszych dwóch próbek przebiegu $u(t)$. Przyjęto oznaczenia dla dwóch występujących po sobie próbek jako U_{sq} i U_{sq-1} . Symulator na czas całkowania tymczasowo zachowuje w pamięci każde dwie ostatnio odczytane próbki. Są one wykorzystywane do wyliczenia całki dla zapamiętanych próbek. Całka zostaje dodana do sumy S_{ui} . Do kontroli wartości aktualnego wyniku sumowania, zapisanego w zmiennej S_{ui} , służy zmienna S . W kolejnych iteracjach wartość zmiennej S_{ui} jest odejmowana od wartości zapisanej w zmiennej S . Jeżeli różnica pomiędzy S i S_{ui} będzie mniejsza od zera, następuje wyliczenie kolejnej wartości T_{xi} (2):

$$(2) \quad T_{xi} = t_s L_T$$

gdzie: L_T – liczba iteracji sumowania dla cyklu obliczania wartości T_{xi} , t_s – odstęp czasu pomiędzy kolejnymi próbkami U_{sq} .

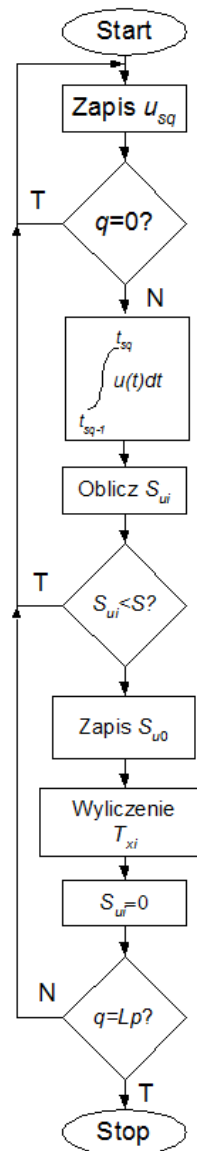
Bezpośrednio od zadeklarowanej wartości zmiennej S zależy liczba wygenerowanych T_{xi} w zadanym czasie symulacji. Stąd można przyjąć, że wartość S jest stałą przetwarzania symulowanego przetwornika U/f .

Oczywiste jest, że wartość sumy S_{ui} nie będzie dokładnie równa zadanej wartości S . W celu uniknięcia możliwości generowania dodatkowego błędu podczas całkowania przebiegu testowego, po zakończeniu procesu całkowania w danym cyklu pracy przetwornika U/f i wyliczeniu kolejnej wartości T_{xi} , następuje zachowanie pozostałej reszty z całkowania jako wartości początkowej S_{u0} , do wykorzystania podczas sumowania w kolejnym cyklu przetwarzania:

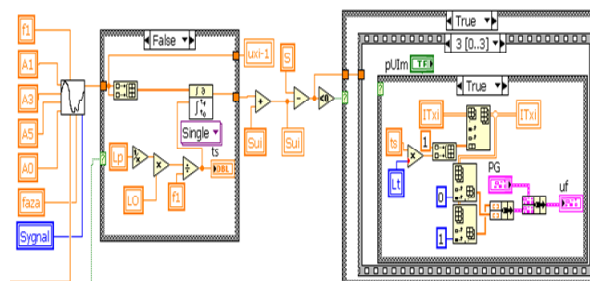
$$(3) \quad S_{u0} = S - S_{ui-1}$$

Wzór końcowy na wartość całki chwilowej przyjmuje postać:

$$(4) \quad S_u = \sum_{i=0}^{N_{xi}} \int_{t_{sq-1}}^{t_{sq}} u(t) dt + S_{u0}$$

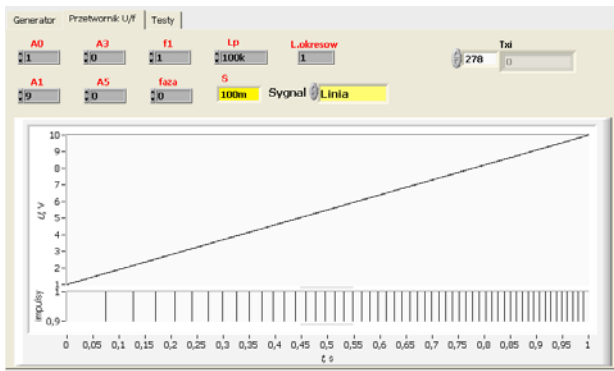


Rys. 2. Algorytm przetwarzania napięcia w kolejne okresy



Rys.3 Diagram przetwarzania U/f

Realizację programową przetwarzania U/f prezentuje fragment diagramu pokazany na rysunku 3. Panel przyrządu wirtualnego realizującego funkcję przetwornika U/f pokazuje rysunek 4.



Rys. 4. Panel symulatora przetwornika U/f

Analiza błędu

Do wyznaczenia błędu przetwarzania w torze konieczne jest wyznaczenie wartości pośrednich sygnału wygenerowanego dla chwil odpowiadających umiejscowieniu w czasie odtworzonych wartości sygnału testowego $u(t)$. Ogólnie przyjmuje się [3], że wartość odtworzoną dla danego T_{xi} umieszcza się na osi czasu w punkcie $0,5T_{xi}$. Stąd, do celów porównania, wartość przebiegu testowego również jest obliczana w chwili $t_i - 0,5T_{xi}$. W związku z powyższym, miarą bezwzględnego błędu przetwarzania informacji w torze jest różnica pomiędzy wartością średnią dla danego T_{xi} uzyskaną z przebiegu częstotliwościowego a wartością wyliczoną dla chwili $t_i - 0,5T_{xi}$ z wykorzystaniem zależności matematycznej, użytej do wyliczenia wartości chwilowych podczas wytworzenia przebiegu testującego. Przyjmując, że zasymulowano przebieg sinusoidalny o amplitudzie A_m , częstotliwości f i składowej stałej A_0 , błąd bezwzględny będzie obliczany z zależności :

$$(5) \Delta_p = \frac{1}{KN_{xi}T_{gw}} - (A_0 + A_m \sin 2\pi f(t_i - 0,5T_{xi})),$$

gdzie: T_{gw} – okres generatora wzorcowego w przetworniku f/N .

Następnie jest wyliczony błąd względny w procentach. Jest on ilorazem błędu bezwzględnego i rzeczywistej wartości wygenerowanego przebiegu testowego:

$$(6) \delta_p = \frac{\Delta_p}{u(t)} 100\%.$$

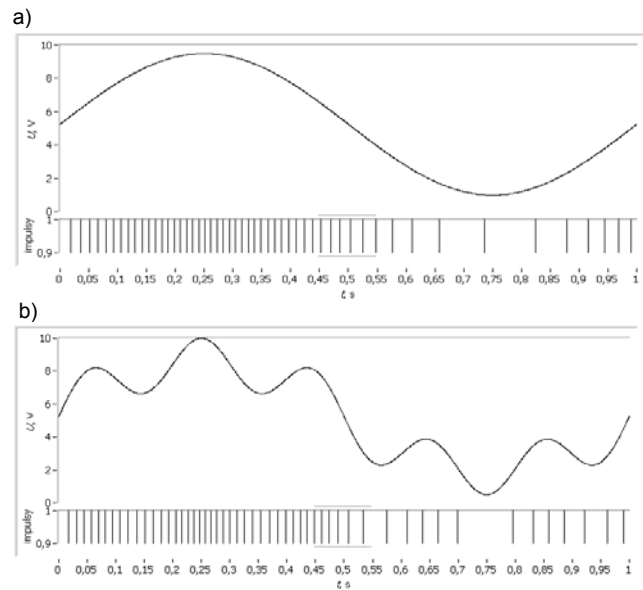
Dla rozpatrywanego przypadku, po podstawieniu (5) do (6), uzyskuje się zależność:

$$(7) \delta_p = \left(\frac{1}{K(A_0 + A_m \sin 2\pi f(t_i - 0,5T_{xi}))N_{xi}T_{gw}} - 1 \right) 100\%$$

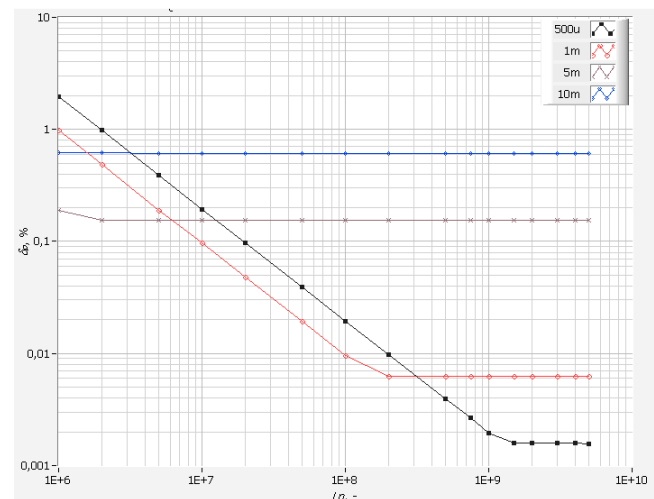
Wyniki

W celu określenia wpływu parametrów symulacji na błąd przetwarzania δ_p w torze pokazanym na rysunku 1, przeprowadzono szereg symulacji. Typowy zakres napięć wejściowych przetwornika U/f zawiera się w granicach (0-10V). Z tego powodu do testów wybrano przebieg sinusoidalny o amplitudzie 4,25V; częstotliwości 1Hz i składowej stałej 5,25V; czyli zmiana symulowanego napięcia pokrywa zakres (0,5-10). Na rysunku 5-a pokazano przykładowy efekt przetwarzania w przebieg częstotliwościowy podanego wcześniej, sinusoidalnego sygnału testującego. Istnieje również możliwość symulacji

przebiegów o innych kształtach. Na rysunku 5-b zaprezentowano efekt symulacji przetwarzania sygnału złożonego z pierwszej, trzeciej i piątej harmonicznej (b).



Rys. 5. Przykładowe efekty symulacji

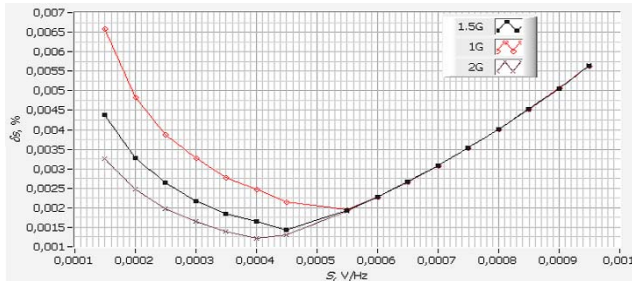


Rys. 6. Wpływ zmiany S i L_p na δ_p

Wyniki przeprowadzonych symulacji pokazują, że obliczony błąd przetwarzania w torze (7) jest zależny od zadeklarowanej stałej przetwarzania S , oraz liczby próbek L_p sygnału $u(t)$ przypadających na jego okres. Wpływ pokazano na rysunku 6. Wraz ze wzrostem liczby próbek L_p do pewnego progu, różnego dla poszczególnych wartości stałej przetwarzania S , zmniejsza się wartość błędu przetwarzania δ_p . Po osiągnięciu tego progu błąd δ_p praktycznie przyjmuje stałą wartość. Zmniejszanie wartości S również zmniejsza wartość błędu δ_p . Dla podanych parametrów sygnału testującego i parametrów symulacji najmniejsza wartość δ_p przypada dla $S=0,5mV/Hz$ i liczby próbek 2G.

W celu dokładniejszego określenia wpływu S na błąd przeprowadzono dodatkową symulację dla trzech wartości L_p , dla których błąd δ_p osiągnął najmniejsze wartości. Wartości S również przyjęto dla zakresu minimum tuż przy progu stabilizacji błędu. Uzyskane przebiegi pokazano na rysunku 7. Widać, że zarówno zbyt mała jak i zbyt duża wartość S powoduje wzrost błędu przetwarzania

δ_p . Najmniejszą wartość $\delta_p=0,0013\%$ uzyskano dla $S=0,4\text{mV/Hz}$ i $L_p=2\text{G}$. Z wykresu wynika jednak, że w praktyce można z niewiele większym błędem, tj. $\delta_p=0,0020\%$, realizować symulacje dla $L_p=1\text{G}$ i $S=0,55\text{mV/Hz}$. W drugim przypadku, przy niewiele większym błędzie uzyskuje się skrócenie czasu pojedynczej symulacji o połowę, co pozwala na szybką weryfikację pracy symulowanego układu przy realizowaniu dłuższej serii badań.



Rys. 7. Szczegółowy przebieg błędów δ_K

Czułość K_{mnk} przetwornika *Ulf*, wyznaczona dla przebiegu testowego o parametrach pokazanych na rysunku 5-a, z wykorzystaniem metody najmniejszych kwadratów, wyniosła $1999,999997\text{ Hz/V}$. Biorąc pod uwagę, że ustawiono wartość stałej przetworzenia S na $0,5\text{mV/Hz}$, oraz, że czułość przetwornika jest odwrotnością stałej przetworzenia, błąd δ_K wyznaczenia czułości, obliczany ze wzoru (8):

$$(8) \quad \delta_K = \frac{|S^{-1} - K_{mnk}|}{S^{-1}} * 100\%$$

wynosi $1,5 \cdot 10^{-7} \%$. Można więc uznać, że opracowany przyrząd wirtualny przetwarza napięcie z zadowalającą dokładnością i może być wykorzystany w badaniach symulacyjnych układów zawierających przetwornik *Ulf*.

Wnioski

W artykule zaprezentowano możliwość symulacji przetwornika napięcie częstotliwość z wykorzystaniem środowiska programistycznego LabVIEW. Oczywiście nie jest to jedyna możliwość realizacji symulacji, niemniej zaprezentowane wyniki pokazują, że można w sposób przejrzysty korzystać z bogatych możliwości tworzenia

interfejsu graficznego aplikacji, natomiast możliwości przetwarzania danych są wystarczające do realizacji symulatora. Zaprezentowany przyrząd wirtualny pozwala na przeprowadzenie analizy przetwarzania napięcia w częstotliwość w typowym zakresie przetwarzania przetwornika *Ulf*. Paca przyrządu prezentuje wytwarzanie sygnału częstotliwościowego, który można wykorzystać w symulacjach układów przetwarzających taki sygnał. Poziom błąd przetwarzania sygnału częstotliwościowego wyliczony w symulacjach osiąga wartość rzędu tysięcznych procenta. Uznano, że jest to wartość na poziomie, który można uznać za akceptowalny przy zastosowaniu do wstępnego testowania nowych metod przetwarzania informacji w urządzeniach przetwarzających sygnał częstotliwościowy.

LITERATURA

- [1] Pawłowski E.: Symulacja sygnału czujnika z wyjściem częstotliwościowym, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 10b 88 (2012), nr 10b, s. 78-81
- [2] Warda P., Metoda zmniejszenia wartości błędów uśredniania w systemie pomiarowym wykorzystującym przetwornik "napięcie-częstotliwość", *Pomiary Automatyka Kontrola*, (2011), nr 11
- [3] Jasiak J.R., Przetwarzanie sygnałów pomiarowych w systemach z częstotliwościowym nośnikiem informacji, *Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej*, Lublin 2003.
- [4] Świsulski D., Cyfrowa rejestracja sygnałów impulsowych z częstotliwościowym nośnikiem informacji. *Politechnika Gdańska, seria Monografie nr 67*, Gdańsk 2006.
- [5] Pawłowski E.: Spectrum analysis of measuring signals in sensors circuits with frequency output. *Optoelectronic and Electronic Sensors IV*, 06/13-06/16/00 Gliwice, Poland, *Proceedings of SPIE*, (2001) Vol. 4516, pp. 181-186
- [6] Jakubiec J., Błędy i niepewności danych w systemie pomiarowo-sterującym, *Wydawnictwo Politechniki Śląskiej*, Gliwice 2010.
- [7] Warda P., Wybrane problemy z oszacowaniem błędów przetwarzania w torze z częstotliwościowym nośnikiem informacji, *Przegląd Elektrotechniczny*, 89 (2013), nr 5, s. 272-274
- [8] Warda P., Generator z modulacją częstotliwości jako źródło sygnału testującego dla toru pomiarowego z częstotliwościowym nośnikiem informacji, *Przegląd Elektrotechniczny*, 86 (2010) nr 8
- [9] Kirianaki N. V., Yurish S. Y., Shpak N. O., Deynega V. P., Data acquisition and signal processing for smart sensors. *John Wiley & Sons, Ltd*, Baffins Lane, 2001.

Autor: dr inż. Piotr Warda, Politechnika Lubelska, Katedra Automatyki i Metrologii, ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin, E-mail: p.warda@pollub.pl