

Metoda dynamicznego doboru częstotliwości zegarowej w przetworniku częstotliwość-kod

Streszczenie. Zastosowanie do transmisji informacji sygnału o zmiennej częstotliwości pozwala na zwiększenie odporności układu na zewnętrzne pola elektromagnetyczne i ograniczenie problemu tłumienia amplitudy sygnału. Artykuł prezentuje metodę poprawy dokładności przetwarzania przetwornika częstotliwość-kod, który jest często stosowany do odtwarzania informacji niesionej sygnałem o zmiennej częstotliwości. Metoda realizuje adaptacyjny dobór częstotliwości sygnału zegarowego z uwzględnieniem bieżącej analizy wypadkowego błędu przetwarzania informacji. Omówiono działanie algorytmu realizującego proponowaną metodę. Zamieszczono przykładowe wyniki symulacji.

Abstract. The use of a variable frequency signal for information transmission allows to increase the resistance of the system to external electromagnetic fields and to reduce the problem of signal amplitude attenuation. The paper presents a method for improving the accuracy of processing a frequency-to-code converter, often used in variable-frequency signal transmission. The method realizes adaptive selection of clock signal frequency taking into account the current analysis of the resultant error in information processing. The operation of the algorithm implementing the proposed method is discussed. Example simulation results are presented. (The method of dynamic selection of the clock frequency of the frequency-to-code converter).

Słowa kluczowe: przetwornik częstotliwość-kod, przetwornik czas-liczba, pomiar częstotliwości, tor pomiarowy z częstotliwościowym nośnikiem informacji.

Keywords: frequency-to-code converter, time-to-digital conversion, frequency measurement, measurement channel with frequency carrier of information.

Wstęp

Systemy pomiarowe stosują różnorodne sposoby transmisji sygnału pomiarowego [1, 2]. Jednym z nich jest wykorzystanie sygnału o zmiennej częstotliwości. Wiele przetworników zapewnia transmisję danych o aktualnej wartości wielkości wejściowej $x(t)$ poprzez wartość częstotliwości generowanego sygnału wyjściowego. W konsekwencji tego typu przetworniki nazywane są przetwornikami wielkość fizyczna- częstotliwość (X/f) [3].

Częstotliwość w wartości liczbowe można przetwarzać różnymi sposobami. Najczęściej stosuje się dwa. W pierwszym przypadku stosowana jest konwersja częstotliwości na napięcie, a dalsze przetwarzanie odbywa się za pomocą przetwornika analogowo-cyfrowego [4]. Druga metoda polega na zamianie sygnału częstotliwościowego bezpośrednio na wartości liczbowe za pomocą zmodyfikowanego układu do cyfrowego pomiaru okresu nazywanego przetwornikiem częstotliwość-kod (f/N) [5].

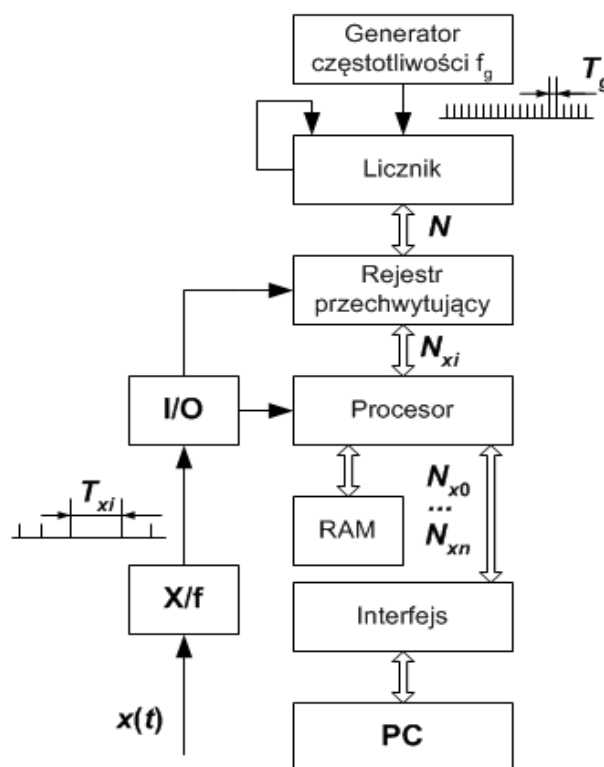
Przesyłanie informacji za pomocą sygnału o zmiennej częstotliwości może być bardzo użyteczne. Jest on odporny na zakłócenia i może być przesyłany w prosty i efektywny sposób na duże odległości bez utraty informacji [3, 5].

Pomimo, że od lat produkowane są przyrządy do ciągłego pomiaru częstotliwości [9], nadal trwają badania nad nowymi metodami przetwarzania sygnałów częstotliwościowych [6], redukcją błędów w przetwarzaniu sygnałów częstotliwościowych [4, 7] i analizie błędów przetwarzania w opracowanych systemach.

W pomiarach częstotliwości często stosuje się, posiadające szerokie możliwości, współczesne układy mikroprocesorowe [7]. Oferowana wydajność obliczeniowa wspomnianych układów jest na tyle duża, że nawet w przypadku mikrokontrolerów pozwala na realizację zarówno podstawowych pomiarów jak i pomiarów realizujących tryb adaptacyjny, dostosowujący parametry pracy systemu do parametrów przetwarzanego sygnału. W konsekwencji powstaje potencjalna możliwość stałego nadzoru aplikacji nad pracą systemu i adaptacyjnego zwiększenia dokładności uzyskiwanych wyników.

Bezpośrednia konwersja okresu sygnału w wartości liczbowe

Cyfrowy pomiar sygnału o zmiennej częstotliwości może być dokonywany różnymi metodami [3]. Jedną z nich jest zastosowanie systemu mikroprocesorowego realizującego podstawowy cyfrowy pomiar okresu, wspomagany przez licznik z dołączonym dodatkowym rejestrem zachowującym aktualny stan licznika [8, 9].



Rys.1. Przykładowa struktura przyrządu realizującego ciągły pomiar okresów sygnału o zmiennej częstotliwości

Licznik jest sterowany przez generator zegarowy o okresie T_g . Wyjście kodowe licznika jest połączone poprzez rejestr przechwytyjący stan licznika z mikroprocesorem. Na wybrane wejście mikroprocesora podawany jest sygnał częstotliwościowy o okresie T_{xi} . Mikroprocesor odczytuje stan licznika w chwili otrzymania impulsu początkowego i końcowego T_{xi} . W ten sposób w pamięci mikroprocesora gromadzone są informacje w postaci liczb reprezentujących kolejne wartości okresów T_{xi} sygnału o zmiennej częstotliwości. Schemat blokowy układu realizującego wymienione działania przedstawiono na rysunku 1.

Częstotliwość dla danego okresu T_{xi} jest określana wzorem:

$$(1) \quad f_{xi}(t) = \frac{1}{T_{xi}} = \frac{1}{t_i - t_{i-1}}$$

gdzie: t_i, t_{i-1} - chwile, w których pojawiają się charakterystyczne zbocza sygnału testowego o zmiennej częstotliwości.

Przybliżona długość okresu T_{xi} , nie uwzględniająca wpływu błędów przetwarzania w torze, jest opisana wzorem:

$$(2) \quad T_{xi} \approx \frac{N_i + N_{max} * M - N_{i-1}}{f_g}$$

gdzie: N_i i N_{i-1} - stany rejestru przechwytyjącego licznika przetwornika f/N odpowiednio w chwilach czasowych t_i i t_{i-1} , N_{max} - maksymalny stan możliwy do zapisania w rejestrze, M - liczba przepełnień licznika podczas pomiaru każdego przedziału T_{xi} , f_g - częstotliwość generatora zegarowego w przetworniku f/N.

Uwzględniając czułość S przetwornika X/f, powyższe dane pozwalają na bezpośrednią rekonstrukcję przebiegu $x(t)$ z wykorzystaniem zależności:

$$(3) \quad x(t) = \frac{1}{ST_g(N_i + N_{max} * M - N_{i-1})}$$

Błędy przetwarzania informacji

Dokładność bezpośredniej konwersji okresów sygnału o zmiennej częstotliwości na wartości liczbowe w przetworniku częstotliwość-kod jest ograniczona głównie przez dwa błędy składowe: błąd kwantowania i błąd uśredniania [8, 10].

Błąd kwantowania w przypadku pomiaru okresu sygnału o zmiennej częstotliwości jest zmienny i zależy od wartości przetwarzanego T_{xi} [4, 11]. Wartość błędu kwantowania można obliczyć z zależności:

$$(4) \quad \delta_k = \frac{1}{f_g T_{xi}} 100\%$$

Błąd kwantowania rośnie wraz ze wzrostem częstotliwości sygnału wejściowego przetwornika f/N.

Błąd uśredniania okresu sygnału $x(t)$ powstaje w wyniku całkowania wielkości wejściowej przez przetwornik wielkość fizyczna-częstotliwość [8, 12]. Przyjmując, że badany sygnał wejściowy $x(t)$ ma kształt sinusoidy i jego amplituda jest równa wartości składowej stałej, błąd względny uśredniania oblicza się z zależności [8]:

$$(5) \quad \delta_u = 0,5 \left| \frac{\sin \pi F T_{xi}}{\pi F T_{xi}} - 1 \right| * 100$$

gdzie: F jest częstotliwością sygnału $x(t)$. Z zależności tej wynika, że błąd uśredniania zależy od wartości okresu T_{xi} oraz częstotliwości F . Wartość błędu rośnie wraz ze wzrostem obu tych parametrów.

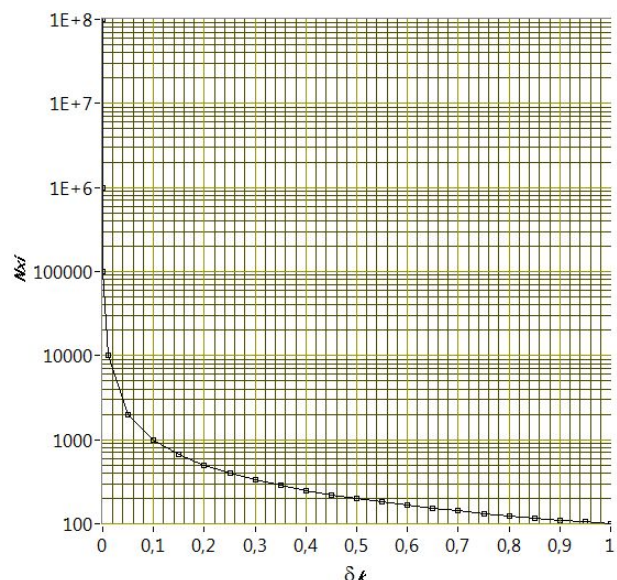
Analiza błędu przetwarzania informacji w torze pomiarowym z częstotliwościowym nośnikiem informacji, po przyjęciu idealnej konwersji X/f (praca dotyczy modyfikacji metody przetwarzania w przetworniku f/N), pozwoliła na wyznaczenie wzoru na maksymalny błąd całkowity [8] jako:

$$(6) \quad \delta_\Sigma = \frac{1}{f_g T_{xi}} + 0,5 \left| \frac{\sin \pi F T_{xi}}{\pi F T_{xi}} - 1 \right| * 100\%$$

Powstaje pytanie, jak wyznaczyć wartości stanów N_{xi} licznika, pozwalających na przetwarzanie informacji niesionej częstotliwością z określoną dokładnością. W błędzie kwantowania zależność pomiędzy błędem kwantowania a stanem licznika jest opisana formułą wynikającą z (2) i (4):

$$(7) \quad N_{xi} = \frac{1}{\delta_k} 100\%$$

Graficzna prezentacja zależności (7) została zamieszczona na rysunku 2. Można zauważyć, że w celu uzyskania niewielkich wartości błędu wymagane jest takie dobranie parametrów pracy przetwornika f/N, aby uzyskać większą liczbę N_{xi} sumowanych impulsów. Przykładowo dla dopuszczalnego błędu 0,1% stan licznika powinien wynosić 1000. Dobierając odpowiednio częstotliwość f_g można uzyskać dla danego okresu T_{xi} wymaganą dla danego N_{xi} dokładność.



Rys.2. Zależność stanu licznika od wymaganej wartości błędu kwantowania

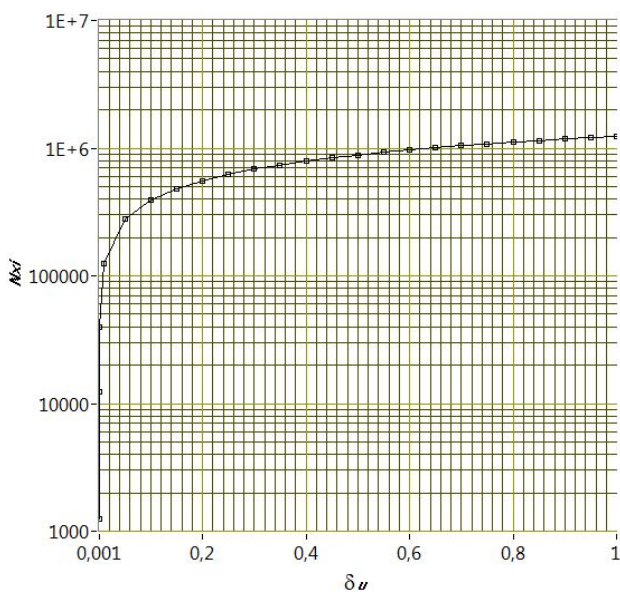
W przypadku błędu uśredniania, mającego wpływ na przetwarzanie częstotliwości w dolnym zakresie przetwarzania, przekształcenie zależności (6) wymaga rozwinięcia jej w szereg Taylora. W rezultacie, po przekształceniach wzór przyjmuje postać:

$$(8) \quad \delta_u = \frac{(\pi F)^2}{f_{xi}^2} * 100\%$$

Uzyskana formuła pozwala, po uwzględnieniu wzorów (1), (2) i (5), na przekształcenie i uzyskanie zależności na bezpośrednią relację pomiędzy błędem uśredniania i wartością liczbową N_{xi} reprezentującą dany okres T_{xi} :

$$(9) \quad N_{xi} = \frac{f_g \sqrt{0,06\delta_u}}{\pi F}$$

Widać, że błąd uśredniania nie zależy bezpośrednio od częstotliwości zegarowej, jednak zależność (9) pokazuje, że wraz ze wzrostem częstotliwości zegarowej następuje wzrost odczywanego stanu licznika N_{xi} , co zawęża zakres pomiarowy przetwornika f/N.



Rys.3. Zależność stanu licznika od wymaganej wartości błędu uśredniania

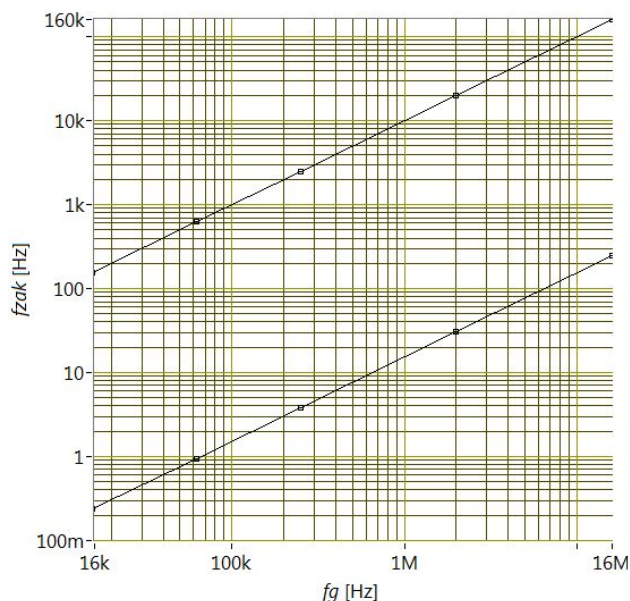
Na rysunku 3 przedstawiono graficznie zależność wartości stanu licznika N_{xi} dla wybranego zakresu błędu uśredniania. Wartość błędu prezentowana jest w procentach.

Przedstawione wykresy zależności N_{xi} od błędów kwantowania i uśredniania pokazują, że odczytywane stany N_{xi} licznika zawartego w przetworniku f/N mają istotny wpływ na błąd przetwarzania informacji w torze pomiarowym z częstotliwościowym nośnikiem informacji. Dodatkowo można zauważyć, że nieprawidłowy dobór częstotliwości zegarowej w przetworniku f/N może spowodować ograniczenie zakresu przetwarzania lub wymusić konieczność zwiększenia pojemności licznika przetwornika.

Uzyskane zależności pomiędzy wartością liczbową reprezentującą dany T_{xi} a błędem kwantowania (7) i uśredniania (9) umożliwiają określenie zakresu N_{xi} , dla którego dana częstotliwość f_g sygnału zegarowego umożliwia najdokładniejsze przetwarzanie danych wejściowych. Zależność (7) pokazuje, że wzrost częstotliwości f_g zwiększy wartość N_{xi} co wymusi zmniejszenie błędu kwantowania.

W zakresie niskich częstotliwości wzrost wartości częstotliwości zegarowej f_g zmniejsza zakres przetwarzania. W tym przypadku oczywistym jest, że częstotliwość f_g należy zmniejszyć.

Zakres przetwarzania przez przetwornik f/N zmiennej częstotliwości sygnału wejściowego jest uzależniony, przyjmując przetwarzanie idealne, od parametrów generatora zegarowego sterującego licznikiem oraz od maksymalnej liczby możliwej do wpisania do rejestru sumującego licznika przetwornika. Stały rozmiar rejestru licznika narzuca liczbę impulsów sygnału zegarowego, które można zarejestrować bez przepełnienia tego licznika. Należy jednak pamiętać, że długość zmierzonego okresu zależy również od czasu trwania okresu generatora zegarowego T_g . Przebieg zmiany wartości maksymalnej i minimalnej zakresu pomiarowego, po przyjęciu częstotliwości sygnału zegarowego 16MHz i współczynników podziału tej częstotliwości przez 1, 8, 64, 256 i 1024 pokazano na rysunku 4.



Rys.4. Zależność granic przetwarzania przetwornika f/N od częstotliwości sygnału sterującego pracą licznika przetwornika f/N

Zamieszczone przebiegi wartości maksymalnej i minimalnej granicy zakresu przetwarzania pokazują, że istnieje możliwość zmiany zakresu przetwarzania przez zmianę f_g bez konieczności zmiany rozmiaru rejestru sumującego licznika. Należy jednak tak opracować algorytm doboru f_g , aby zmiana częstotliwości generatora zegarowego zapewniała wymagany poziom dokładności przetwarzania informacji w systemie.

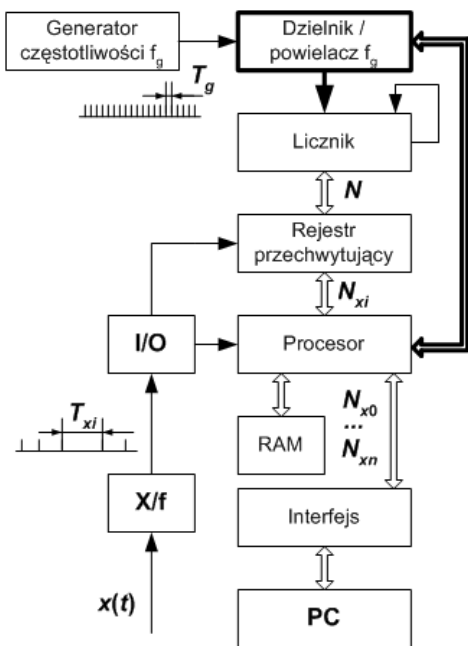
Pomiędzy wartościami f_g powodującymi zwiększenie wartości błędów istnieje pewne minimum, przy którym system pomiarowy pracuje z największą dokładnością.

Metoda

Proponowana metoda pozwala na dynamiczny dobór częstotliwości f_g sterującej pracą licznika przetwornika częstotliwość - kod.

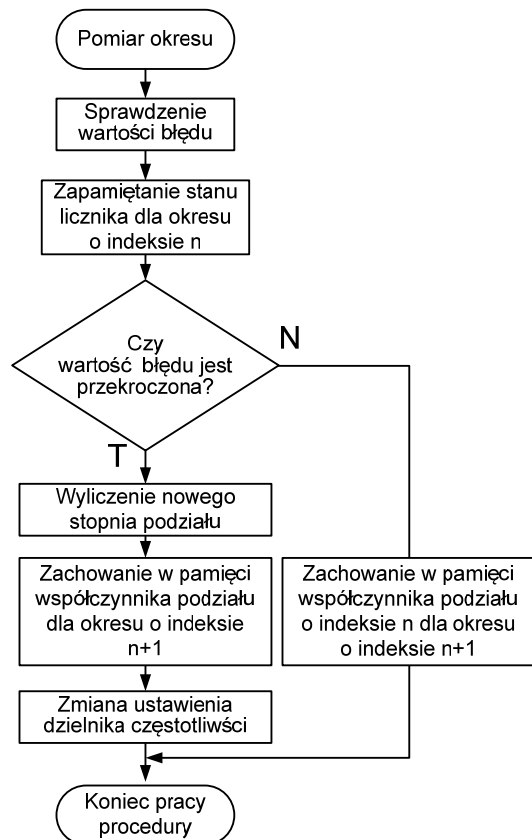
Prezentacja metody opiera się na przedstawionej wcześniej strukturze układu mikroprocesorowego przetwornika f/N (rys. 1). Modyfikacja układu jest przedstawiona na rysunku 5. Układ podstawowy został uzupełniony o moduł dzielnika/powielacza częstotliwości zegara f_g . Metoda ta pozwala na zmniejszenie błędu popełnianego podczas pomiaru kolejnych okresów sygnału o zmiennej częstotliwości oraz na zwiększenie zakresu pomiarowego urządzenia, w którym pomiar będzie wykonywany z podobnym błędem przetwarzania. Realizacja metody jest możliwa przy użyciu powszechnie stosowanych w praktyce układów procesorowych

i programowalnych, które mogą realizować wymienione funkcjonalności [3, 5, 9, 13, 14, 15, 16]. Algorytm metody przedstawiono na rysunku 6. Metoda realizowana jest w kilku fazach. W pierwszej fazie wykonywany jest omówiony wcześniej podstawowy pomiar pierwszego okresu T_{xi} sygnału o zmiennej częstotliwości.



Rys.5. Struktura przetwornika f/N umożliwiająca realizację metody dynamicznej

Dla uproszczenia rozważań przyjęto, że na wejście przetwornika f/N podawany jest sygnał prostokątny o poziomach logicznych dostosowanych do poziomów napięć wymaganych przez procesor. Zmiany stanów logicznych na wejściu procesora pozwalają oprogramowaniu procesora określić początki kolejnych okresów T_{xi} . W momencie wykrycia początku kolejnego T_{xi} procesor odczytuje aktualny stan licznika, sumując impulsy utworzone przez okresy sygnałów z modułu preskalera/powielacza częstotliwości i zmieniając częstotliwość sygnału odniesienia f_g z generatora sygnału zegarowego. Odczytany stan z licznika jest przechowywany w pamięci RAM do momentu odczytania kolejnego stanu, odpowiadającego wykryciu przez oprogramowanie procesora początku kolejnego okresu T_{xi} . Następnie procesor oblicza różnicę kolejnych stanów odczytanych z licznika, reprezentującą długość okresu T_{xi} sygnału o zmiennej częstotliwości. W tym momencie rozpoczyna się druga faza działania przetwornika f/N, realizująca procedurę korygującą współczynnik zmiany częstotliwości f_g . Różnica stanów odczytana z układu licznika odzwierciedla wartość okresu, która uwzględnia współczynnik zmiany częstotliwości w module preskalera/powielacza oraz częstotliwość sygnału z generatora sygnału zegarowego. Obliczona różnica N_{xi} jest wykorzystywana do wyznaczenia wartości maksymalnego błędu przetwarzania (8) popełnianego przy pomiarze okresu T_{xi} [8]. Wartość N_{xi} jest przechowywana w pamięci RAM pod indeksem i . Po wykryciu przekroczenia dopuszczalnej wartości błędu kwantowania (opcja "T" na rysunku 6) procedura wyznacza współczynnik zmiany częstotliwości, który pozwala na zmniejszenie błędu przetwarzania do wartości granicznej określonej w programie i ustawia wymagany współczynnik zmiany częstotliwości w module preskalera/powielacza.



Rys.6. Algorytm metody

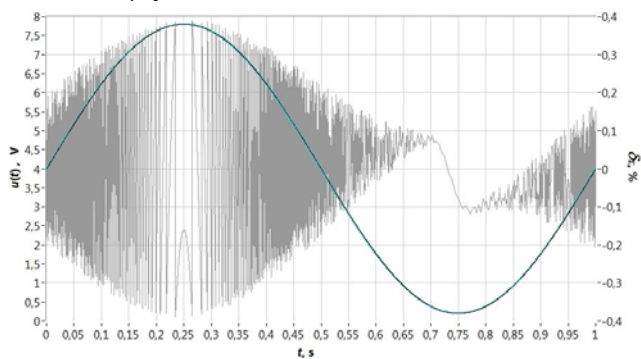
Wartość współczynnika zmiany częstotliwości jest przechowywana w pamięci do wykorzystania przy obliczaniu wartości okresu z indeksem $i+1$. W przypadku, gdy błąd nie przekracza z góry ustalonej wartości (opcja "N" rys. 6), procedura kończy działanie bez zmiany współczynnika korekcji częstotliwości wzorcowej, wykonując jedynie operację przypisania okresowi o indeksie $i+1$ wartości współczynnika zmiany jak dla okresu o indeksie i . W efekcie w pamięci przetwornika f/N przechowywane są pary liczb: obliczone różnice stanów odpowiadające kolejnym okresom T_{xi} oraz wartości współczynnika zmiany częstotliwości ustawione w module preskalera/powielacza przy pomiarze długości tych okresów. Powyższe działania powodują, że urządzenie nadrzędne, którym najczęściej jest komputer, może odczytać przez interfejs zapamiętane pary danych i obliczyć wartości kolejnych okresów T_{xi} . Operacja ta wymaga jedynie uwzględnienia stałej dla danego konwertera częstotliwości sygnału zegarowego, która również może być przesłana przez konwerter lub wprowadzona bezpośrednio do oprogramowania urządzenia nadrzędnego.

Wyniki symulacji

Dokonano weryfikacji symulacyjnej przedstawionej metody. Model symulacyjny został opracowany z wykorzystaniem środowiska programistycznego LabVIEW. Oprogramowanie miało za cel odwzorowanie rzeczywistego układu realizującego przetwarzanie sygnału o zmiennej częstotliwości. W tym celu opracowano trzy oddzielne moduły. Pierwszy służył do wytwarzania wartości liczbowych reprezentujących okresy przebiegu o zmiennej częstotliwości. Drugi moduł realizował funkcjonalność układu symulatora pracy przetwornika częstotliwość – kod przetwarzającego okresy sygnału wejściowego zgodnie z algorytmem omawianej metody. Trzeci moduł służył do generowania reprezentacji graficznej uzyskanych wyników.

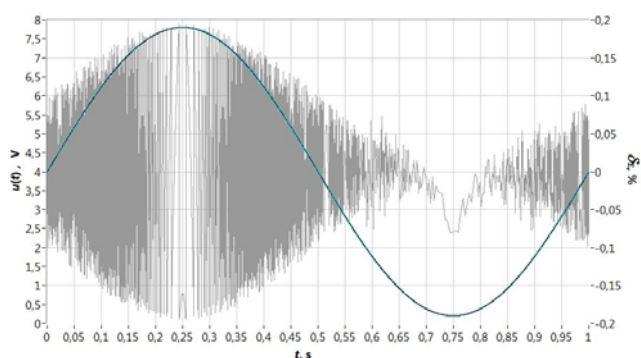
Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono przykładowe wyniki. Prezentowane przebiegi uzyskano dla sinusoidalnego przebiegu testowego napięciowego o składowej stałej 4V, amplitudzie 3,8V i częstotliwości 1Hz. Przyjęto, że czułość przetwornika X/f wynosi 1kHz/V i że jest to przetwarzanie idealne. Częstotliwość generatora zegarowego ustawiono na 1MHz.

Rysunek 7 przedstawia przebieg błędu wypadkowego uzyskanego dla pracy przetwornika w trybie podstawowym dla struktury pokazanej na rysunku 1. Widać, że najwyższa wartość błędu, rzędu 0,4%, jest osiągnięta dla maksymalnej wartości napięcia.



Rys.7. Efekt symulacji przetwarzania sygnału częstotliwościowego z wykorzystaniem standardowego algorytmu

Rysunek 8 prezentuje przebieg błędny przetwarzania po zastosowaniu ograniczenia podwajającego częstotliwość generatora zegarowego dla $N_{xi} = 1000$ i dwukrotnie zmniejszającego częstotliwość f_g dla $N_{xi} = 2500$. Widać, że w efekcie błąd przetwarzania zmniejszył się do około 0,2%.



Rys.8. Efekt symulacji przetwarzania z wykorzystaniem algorytmu dobierającego f_g w zależności od N_{xi} .

Powyższe rozważania pozwalają stwierdzić, że proponowana metoda może być przydatna do poprawy dokładności przetwarzania informacji przekazywanej sygnałem o zmiennej częstotliwości.

Podsumowanie

Z przeprowadzonych badań symulacyjnych wynika, że przedstawiona metoda dynamicznego doboru częstotliwości zegarowej w przetworniku częstotliwość-kod okazuje się skuteczna w poprawie parametrów pracy tego układu. Wykazano, że możliwy jest dobór wartości progowych N_{xi} , wymuszających zmianę częstotliwości f_g sygnału zegarowego konwertera f/N w sposób pozwalający na zwiększenie dokładności przetwarzania informacji o badanej wielkości fizycznej oraz rozszerzenie zakresu przetwarzania.

Zwiększenie okresu T_g powoduje zmniejszenie wartości N_{xi} uzyskiwanych z licznika przetwornika f/N dla danego T_{xi} ,

co pozwala na przetwarzanie dłuższych okresów T_{xi} i zwiększa dolny zakres mierzalnych częstotliwości.

Zmniejszanie okresu sygnału zegarowego pozwala na zwiększanie odczytywanych stanów licznika N_{xi} dla wyższych częstotliwości, umożliwiając zmniejszenie błędu przetwarzania w górnej części zakresu przetwarzania. W konsekwencji poszerzeniu ulega górny zakres możliwości do zmierzenia z zadowalającym błędem częstotliwości.

Wyniki symulacji potwierdziły poprawność rozważań teoretycznych.

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

LITERATURA

- [1] Pereira, J.M., Postolache, O.A., Girao, P.S. Analog to Digital Conversion Methods for Smart Sensing Systems. In *Advances in Measurement Systems*; Sharma, M.K., Ed.; InTech Open: Rijeka, Croatia, (2010).
- [2] Horyński M., Majcher J., Application of cloud computing in programming intelligent electric networks in prosumers' households., *Journal of Ecological Engineering*, 17 (2016), nr 5, 107-113
- [3] Kirianaki, N.V., Yurish, S.Y., Shpak, N.O., Deynega, V.P. Data Acquisition and Signal Processing for Smart Sensors, *John Wiley & Sons, Ltd.*, Chichester (2001)
- [4] Otomański P., Pawłowski E., Szlachta A., The Evaluation of Expanded Uncertainty of DC Voltages in the Presence of Electromagnetic Interferences using the LabVIEW Environment, *Measurement Science Review*, 21 (2021), nr 5, 136-141
- [5] Szyducyński, J.; Kościelnik, D.; Miśkiewicz, M. Time-to-digital conversion techniques: A survey of recent developments. *Measurement* 2023, 214, 112762.
- [6] Helal, E., Alvarez-Fontecilla, E., Eissa, A.I., Galton, I. A time amplifier assisted frequency-to-digital converter based digital fractional-N PLL., *IEEE J. Solid-State Circuits* 56 (2021), 2711–2723
- [7] Swisulski, D., Pawłowski, E., Dorozhovets, M. Digital Processing of Frequency-Pulse Signal in Measurement System. In *Analysis and Simulation of Electrical and Computer Systems*; Springer: Cham, Switzerland, (2018), 319–322
- [8] Warda, P. Error of conversion of "physical quantity-to-frequency" converter output signal. In *Proceedings of the 14th International Conference on Optical and Electronic Sensors*, Gdansk, Poland, 19–22 June 2016, Jasiński, P., Ed.; SPIE: Bellingham, WA, USA, (2016) Volume 10161, doi:10.1117/12.2244496
- [9] Tancock, S.; Arabul, E.; Dahnoun, N. A review of new time-to-digital conversion techniques. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2019, 68, 3406–3417
- [10] Murillo, C.A.; López, B.C.; Celma, S. Voltage-to-Frequency Converters: CMOS Design and Implementation; Springer: New York, NY, USA, 2013
- [11] Dorozhovets, M.; Pawłowski, E.; Swisulski, D. Frequency measurement research with weight averaging of pulse output signal of voltage-to-frequency converter. *Measurement* 2023, 216, 112912.
- [12] Yurish, S.Y.; Kirianaki, N.V. Interface circuit design for frequency-time domain MEMS sensors. *J. Phys. Conf. Ser.* 2006, 34, 17
- [13] Garzetti, F.; Coma, N.; Lusardi, N.; Geraci, A. Time-to-digital converter IP-core for FPGA at state of the art. *IEEE Access* 2021, 9, 85515–85528
- [14] Portaluppi, D.; Pasquinelli, K.; Cusini, I.; Zappa, F. Multi-channel FPGA time-to-digital converter with 10 ps bin and 40 ps FWHM. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2022, 71, 2002109
- [15] Leśniewicz, M. (2021). Współczesne metody i układy generacji taktów zegarowych o wysokiej dokładności i stabilności oraz znikomym jitterze. *Przegląd Elektrotechniczny*, 97
- [16] Makowiecki, K., Lisowiec, A., Michalski, P., & Habrych, M. (2022). UTC Synchronized Signal Generation for Synchrophasors and Sampled Values Measurements. *Energies*, 15(19), 7095