

Henryk URZĘDNICZOK
Politechnika Śląska

SKŁADOWA PRZYPADKOWA BŁĘDÓW DYNAMICZNYCH PRZETWORNIKÓW POMIAROWYCH TYPU "PARAMETR-OKRES"

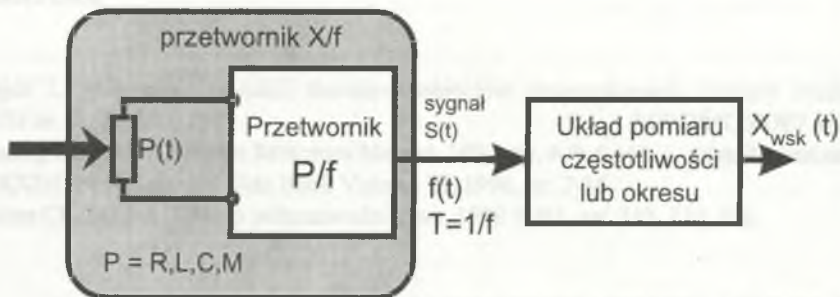
Streszczenie. W artykule omówiono pracę przetworników z czujnikami parametrycznymi w warunkach skokowej zmiany wielkości mierzonej. Wyodrębniono i przeanalizowano składową przypadkową powstającego w tej sytuacji błędu dynamicznego. Wskazano strukturę przetwornika (z grupy multiwibratorów), dla której przez odpowiedni dobór parametrów układu możliwe jest wyeliminowanie składowej przypadkowej.

THE RANDOM COMPONENT OF DYNAMIC ERRORS OF THE "PARAMETER-TO-PERIOD" MEASURING CONVERTERS

Summary. Some remarks concerning work of the parameter-to-period (P-T) converters for jump function changes of sensor parameter are given. A random component of dynamic error arising in such a situation is separated and analysed. An optimal structure of the multivibrator as P-T converter is pointed out. For this structure an elimination of random component of dynamic error is possible.

1. WPROWADZENIE

Przetwornik pomiarowy z sygnałem wyjściowym częstotliwościowym [1,2] realizuje odwzorowanie wielkości mierzonej w częstotliwość lub okres sygnału wyjściowego. Miejsce przetwornika pomiarowego z wyjściem częstotliwościowym (ozn. X/f) w torze pomiarowym ilustruje rys. 1.



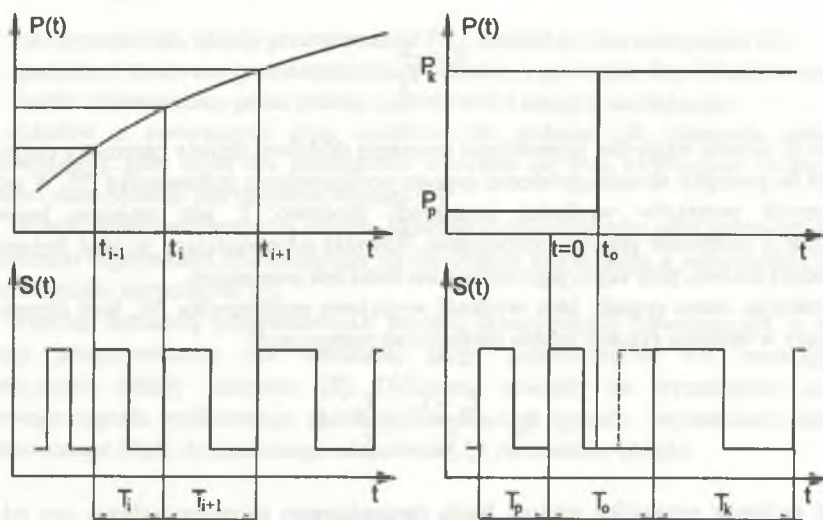
Rys. 1. Tor pomiarowy z sygnałem częstotliwościowym

Fig. 1. The measurement circuit with frequency modulated signal

Przetworniki takie mogą realizować odwzorowanie bezpośrednio (np. tensometry strunowe, termometry kwarcowe, przepływomierze wiroprowadowe i ultradźwiękowe) lub pośrednio, z wykorzystaniem czujników parametrycznych (R,C,L,M) włączonych w układy elektryczne przetworników P/f (generatorów elektrycznych sterowanych parametrem lub mostków równoważonych przez zmianę częstotliwości). Przetwornik tej drugiej grupy pokazano na rys. 1. Zalety sygnałów częstotliwościowych (prostota transmisji na duże odległości, duża odporność na zakłócenia, łatwość i duża dokładność przetwarzania na postać cyfrową [3]) sprawiają, że przetworniki X/f znajdują zastosowanie w układach regulacji automatycznej i automatycznych systemach pomiarowych. W tych zastosowaniach istotne stają się ich właściwości dynamiczne.

Realizowane przez przetworniki pomiarowe o wyjściu częstotliwościowym odwzorowanie zmiennej w czasie wartości parametru czujnika $P(t)$ na okres T ich sygnału wyjściowego $S(t)$ ilustruje rys. 2.

Przetworniki P/f są przetwornikami dokonującymi dyskretyzacji wielkości mierzonej w czasie - wartość wielkości mierzonej może zostać odczytana najwcześniej dopiero po zakończeniu aktualnego okresu sygnału wyjściowego (chwile t_{i-1} , t_i , t_{i+1} , ...). Pomiar okresu jako wielkości wyjściowej przetwornika P/f zapewnia najlepsze właściwości dynamiczne ostatniego ogniwa toru pomiarowego z sygnałem częstotliwościowym [4]. Częstotliwość jest wówczas obliczana jako odwrotność okresu. Jednocześnie przy pomiarach dynamicznych wartość wskazywana wielkości mierzonej jest pewną (często niedokładnie znaną [5]) miarą tejże wielkości za określony przedział czasu, np. za cały poprzedni okres sygnału wyjściowego. Jeżeli zatem wielkość mierzona jest zmienna w czasie, to przetworniki X/f wprowadzają błędy dynamiczne zależne od właściwości dynamicznych zarówno czujnika parametrycznego, jak i układu przetwornika P/f. Wyniki analizy właściwości dynamicznych przeprowadzonej dla przetworników z generatorami sterowanymi parametrem, przy założeniu że sygnały wejściowe są zdeterminowane i ciągłe, przedstawiono w pracy [5]. Właściwości dynamiczne samych czujników muszą być traktowane indywidualnie ze względu na ogromną różnorodność ich konstrukcji.



Rys. 2. Odzworowanie zmiennej w czasie wartości parametru na okres sygnału wyjściowego:
 a) zmiany parametru ciągłe, b) zmiana parametru skokowa

Fig. 2. Conversion of time variable value of sensor's parameter into period of output signal:
 a) continuous changes of parameter, b) jump function changes of parameter

W niniejszej pracy omawiane są zagadnienia dotyczące błędów dynamicznych dla opisanej niżej klasy układów przetworników P/f, w przypadku gdy wielkość wejściowa (parametr czujnika) zmienia skokowo swą wartość, przy czym chwila wystąpienia tej zmiany jest przypadkowa (niezdeteminowana), a jako wielkość wyjściową traktuje się okres sygnału wyjściowego.

2. METODA ANALIZY I PRZYJĘTE DEFINICJE

W sytuacji pokazanej na rys. 2a wartość parametru czujnika zmienia się w sposób ciągły i zdeterminowany. Jeżeli natomiast wartość parametru czujnika zmieni się skokowo (rys. 2b), to zmiana ta następuje praktycznie zawsze w trakcie trwania okresu sygnału wyjściowego - prawdopodobieństwo zbieżności czasowej momentów zmiany parametru i zakończenia okresu jest znikomo małe. Powoduje to obarczenie pierwszego wyniku odczytanego po zmianie parametru czujnika dodatkowym błędem dynamicznym. Błąd ten ma charakter losowy, ponieważ moment skokowej zmiany i moment rozpoczęcia aktualnego okresu są zmiennymi losowymi wzajemnie niezależnymi. Przyjmując oznaczenia takie jak na rys. 2b, w celu scharakteryzowania czynnika losowego, wprowadzono zmienną unormowaną zdefiniowaną następująco:

$$\xi = \frac{t_o}{T_p} \quad (1)$$

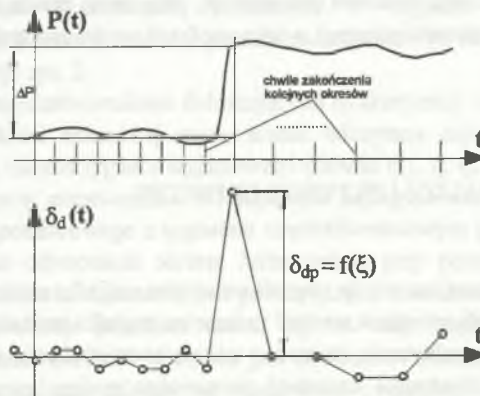
Zmienna ta określa względne przesunięcie momentu skokowej zmiany parametru czujnika w stosunku do początku aktualnego okresu sygnału wyjściowego z przetwornika P/f. W sytuacji praktycznych pomiarów wielkości zmiennych skokowo, ξ jest zmienną losową o jednostajnym rozkładzie prawdopodobieństwa. Również odpowiadający jej błąd dynamiczny jest zmienną losową, przy czym jego rozkład nie musi być jednostajny.

Traktując okres sygnału jako wielkość wyjściową przetwornika P/f, błąd dynamiczny powstający w opisaney sytuacji można zdefiniować następująco:

$$\delta_d = \frac{T_o - T_k}{T_k} = \frac{T_o}{T_k} - 1. \quad (2)$$

W ogólnym przypadku wartość błędu dynamicznego losowego zależna jest od typu układu przetwornika P/f, wartości początkowej i końcowej parametru czujnika oraz wartości zmiennej ξ .

W praktyce uzyskanie skokowej (skok "idealny") zmiany parametru czujnika nie jest możliwe. Prezentowane tu rozważania są jednak uzasadnione również w tych sytuacjach, w których czas zmiany parametru czujnika jest mniejszy niż czas trwania aktualnego okresu sygnału na wyjściu przetwornika. Sytuację taką zilustrowano na rys. 3. Również w tym przypadku wartość dodatkowej składowej błędu zależy nie tylko od zakresu zmian parametru czujnika (ΔP), ale także od chwili wystąpienia tej zmiany (ξ).



Rys. 3. Składowa przypadkowa błędu dynamicznego przy zmianach parametru czujnika zachodzących w czasie krótszym niż okres generowanego sygnału wyjściowego (przykład)

Fig. 3. The random component of dynamic error for change of sensor's parameter value in the time shorter than the period of generated output signal (example)

Jak wspomniano, układy przetworników P/f podzielić można następująco [3]:

- generatory sterowane parametrem (multiwibratory i generatory drgań harmonicznycch),
- mostki równoważone przez zmianę częstotliwości napięcia zasilającego.

Dla układów z powyższych grup możliwe jest podanie ich schematu zastępczego (uogólnionego), przy czym dla generatorów wyróżnia się dwa wymienione rodzaje, a dla mostków różnorodność jest znacznie większa [6].

Wyniki przedstawione niżej dotyczą układów multiwibratorów jako przetworników P/f. Przetworniki tego rodzaju charakteryzują się najprostszą konstrukcją, a jednocześnie dobrymi właściwościami statycznymi [7].

Analizę ilościową przypadkowych błędów dynamicznych powstających w opisanej sytuacji przeprowadzono dla wskazanej grupy przetworników P/f, modelując ich niestacjonarne układy zastępcze [8]. Obliczenia polegały na wyznaczeniu przebiegu czasowego sygnału wyjściowego, określeniu okresu tego sygnału i wyznaczeniu zależności zdefiniowanego błędu dynamicznego od zmiennej ξ i parametrów układu:

$$\delta_d = f(\xi, R, C, U_p, U_k). \quad (3)$$

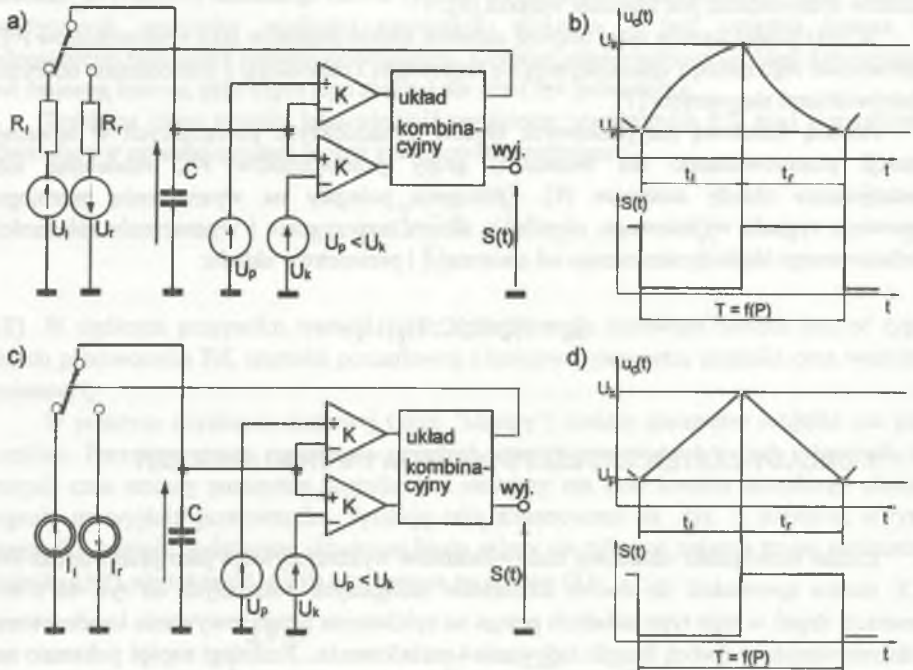
3. UKŁADY ZASTĘPCZE PRZETWORNIKÓW I WYNIKI OBLICZEŃ

Liczne rozwiązania układowe multiwibratorów wykorzystywane jako przetworniki P/f [3,5] można sprowadzić do dwóch schematów zastępczych pokazanych na rys. 4a i 4c. Generacja drgań w tego typu układach polega na cyklicznym przeładowywaniu kondensatora C dokonywanym w dwóch fazach: ładowania i rozładowania. Przebiegi napięć pokazano na rys. 4b i 4d. Wartości napięć początkowych i końcowych w tych fazach są różne, a w niektórych układach również rezystancje w obwodach ładowania i rozładowania mogą być różne. W przypadku pomiarów dynamicznych wartości przynajmniej jednego z parametrów R_r , R_l lub C są zmienne w czasie.

Na podstawie przedstawionych na rys. 4 ogólnych układów zastępczych, przy różnych rodzajach czujników, można wyprowadzić trzy przypadki szczególne pokazane w drugiej kolumnie tablicy 1. W przedstawionych w tablicy układach i przebiegach czasowych napięć uwzględniono tylko fazę ładowania. Założono, że skokowa zmiana parametru czujnika następuje w fazie ładowania. W fazie rozładowania wartość parametru czujnika jest stała.

Analizując przedstawione w tablicy 1 schematy zastępcze, stosując definicję błędów dynamicznych (2), wyprowadzono zależności o postaci ogólnej (3), określające zależność błędów dynamicznych pierwszego okresu sygnału wyjściowego po skokowej zmianie parametru czujnika od parametrów układu (w tym czujnika). Zależności te podane zostały w czwartej kolumnie tablicy 1.

Na podstawie uzyskanych zależności można ocenić zależność składowej przypadkowej błędów dynamicznych od wymienionych wyżej czynników, a w rezultacie sformułować wnioski dotyczące zasad konstruowania przetworników X/f pozwalających uniknąć lub zminimalizować wartość tej składowej błędów dynamicznych.



Rys. 4. Schematy zastępcze generatorów relaksacyjnych jako przetworników P/T

Fig. 4. The block diagrams of the relaxation generator as a P-T converter

Dla układu opisanego w wierszu pierwszym wartość dodatkowej składowej błędów dynamicznych:

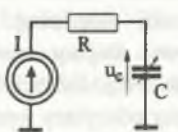
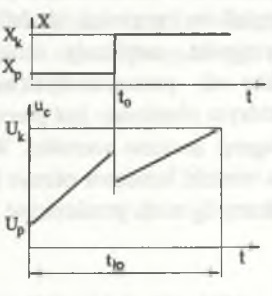
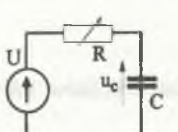
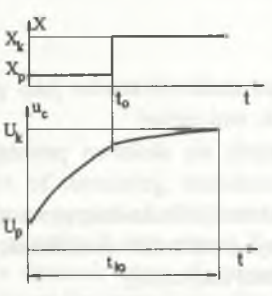
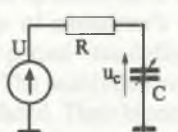
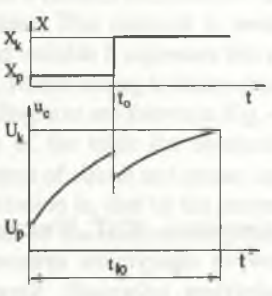
- nie ma charakteru losowego - powstający dodatkowy błąd dynamiczny nie zależy od chwili wystąpienia skokowej zmiany parametru czujnika (opisanej zmienną losową ξ),
- zależy proporcjonalnie od amplitudy skoku wielkości mierzonej,
- zależy od wartości napięć U_p i U_k ; istnieje możliwość eliminacji omawianej składowej błędów przez odpowiedni dobór parametrów układu elektrycznego przetwornika - wartość napięcia U_p powinna być równa zero.

Dla układu opisanego w wierszu drugim tablicy 1 wartość dodatkowej składowej błędów dynamicznych:

- ma charakter losowy - powstający dodatkowy błąd dynamiczny zależy proporcjonalnie od zmiennej losowej ξ ,
- zależy proporcjonalnie od amplitudy skoku wielkości mierzonej,

- nie istnieje możliwość eliminacji omawianej składowej błędu przez odpowiedni dobór parametrów układu elektrycznego przetwornika; jedyną możliwością stwarza zmniejszanie czułości czujnika pomiarowego (zmniejszanie stosunku $(R_p - R_k)/R_k$), co prowadzi do pogorszenia właściwości metrologicznych nawet przy pomiarach statycznych.

Tablica 1

Lp.	Układ i parametry	Przebiegi napięć	Błąd dynamiczny
1	 <p>$I = \text{const}$ $C = f(X)$ R nieistotne</p>		$\delta_d = \frac{U_p}{U_k - U_p} \frac{C_k - C_p}{C_k} = f(\xi)$
2	 <p>$U = \text{const}$ $R = f(X)$ $C = \text{const}$</p>		$\delta_d = \xi \frac{R_p - R_k}{R_k} = f(\xi)$
3	 <p>$U = \text{const}$ $C = f(X)$ $R = \text{const}$</p>		$\delta_d = \xi \frac{C_p}{C_k} + \frac{\ln \left[\left(\frac{C_p - 1}{C_k} \right) \frac{U}{U_k - U} + \left(\frac{U_k - U}{U_p - U} \right)^{\xi - 1} \right]}{\ln \left(\frac{U_p - U}{U_k - U} \right)}$ <p>$\delta_d = f(\xi)$</p>

Uwaga: C_p i C_k lub R_p i R_k oznaczają odpowiednio wartość początkową i końcową pojemności lub rezystancji czujnika odpowiadającą wartości początkowej i końcowej (X_p i X_k) zmieniającej się skokowo wielkości mierzonej.

W przypadku układu opisanego w wierszu trzecim wartość dodatkowej składowej błędu dynamicznego:

- ma charakter losowy - powstający dodatkowy błąd dynamiczny zależy nieliniowo od zmiennej losowej ξ ,
- zależy nieliniowo od amplitudy skoku wielkości mierzonej,
- zależy nieliniowo od parametrów układu elektrycznego; analiza tych zależności pozwala wskazać optymalne wartości parametrów, jednakże nie jest możliwe wyeliminowanie składowej przypadkowej błędu dynamicznego - możliwa jest jedynie minimalizacja wartości błędu.

W każdym z omawianych przypadków wartości dodatkowej składowej błędu dynamicznego zależą od parametrów czujnika, amplitudy skokowej zmiany wielkości mierzonej, a w dwóch przypadkach także od parametrów układu. Przy niekorzystnym doborze wymienionych czynników błąd, którym obarczony jest pierwszy odczytany wynik po skokowej zmianie na wejściu, może osiągnąć znaczne wartości. W przypadku skokowego zmniejszenia wartości parametru czujnika wartość końcowa okresu (T_k , rys. 1) jest mniejsza niż T_0 - wówczas powstający błąd dynamiczny δ_d może przekroczyć 100%.

4. PODSUMOWANIE

Przedstawione rozważania dotyczące multiwibratorów jako przetworników P/f (P/T) pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- przy pomiarach wielkości zmieniających się skokowo powstaje dodatkowa składowa błędu dynamicznego,
- składowa ta może osiągać znaczne wartości (kilkadziesiąt procent),
- dla pewnej klasy przetworników istnieje możliwość minimalizacji tej składowej, niestety przy jednoczesnym zmniejszeniu czułości statycznej,
- dla jednego typu przetwornika istnieje możliwość eliminacji składowej przypadkowej błędu dynamicznego.

LITERATURA

1. Jaworski J.: Matematyczne podstawy metrologii. WNT, Warszawa 1979.
2. Jasik J.R.: Teoria i zastosowania nowych algorytmów cyfrowej obróbki sygnałów w systemach z częstotliwościowym nośnikiem informacji. Sprawozdanie CPBP 02.20, temat II.20. Lublin 1986.
3. Tränkler H.R.: Die technik des digitalen Messens. R. Oldenbourg Verlag 1976.

4. Zakrzewski J., Urzędniczek H.: Dynamic properties of measuring circuits applied to frequency output transducers. Measurement nr 11/1993.
5. Urzędniczek H.: Analiza właściwości dynamicznych parametrycznych przetworników pomiarowych o wyjściu częstotliwościowym. Rozprawa doktorska. Politechnika Śląska, Gliwice 1990.
6. Owen E.W.: Converting measured quantities into frequency by means self-balancing bridges. Symposium IMEKO of Computerization Measurement. Dubrownik 1981.
7. Urzędniczek H.: Comparative investigations of 'parameter-to-period' measuring converters. Materiały XIII IMEKO World Congress, Turun 1995.
8. Urzędniczek H.: Metodyka analizy właściwości dynamicznych przetworników pomiarowych o wyjściu częstotliwościowym z czujnikami parametrycznymi. Materiały XXI MKM, Wrocław 1989.

Recenzent: Doc. dr hab. inż. Tadeusz Sidor

Wpłynęło do Redakcji dnia 24 października 1996 r.

Abstract

The basic structure of measuring transducers realizing the conversion of sensor's parameter into frequency or period of the electric output signal is shown in Fig. 1. The conversion of measured quantity X into period T causes the sampling operation. When the quantity X is variable, a dynamic error of conversion arises. Two possible situations are shown in Fig. 2. In this paper the second situation (Fig. 2b) is considered. It is pointed out, that the dynamic error has a random component - its value depends on the moment t_0 of the change of parameter's value. This moment is incidental in relation to the beginning of the actual period - the defined variable ξ expresses this randomness.

The multivibrators, which belong to many electric circuits applied as P-T converters, are considered. Their block diagrams are shown in Fig. 4 and results of analysis are given in table 1. In the fourth column of the table the obtained dependences of random component of dynamic error on parameters of circuit and sensor and on the random variable ξ are given.

The important conclusion is, that by the proper choice of structure and parameters of P-T converter the elimination of the random component of dynamic error is possible.