

Krzysztof TKOCZ,
Wojciech TWARDON
Henryk URZĘDNICZOK
Jan ZAKRZEWSKI

Instytut Metrologii i Automatyki Elektrotechnicznej
Politechniki Śląskiej

KOMPENSACJA TERMICZNA POMIAROWEGO PRZETWORNIKA POJEMNOSCIOWO-CZĘSTOTLIWOSCIOWEGO

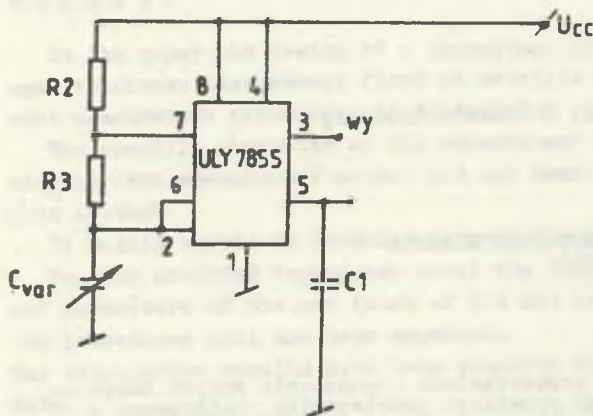
Streszczenie. W pracy przedstawiono zagadnienie wpływu temperatury na okres generowanego przebiegu przetwornika pomiarowego o wyjściu częstotliwościowym. Rozważany jest przetwornik oparty na układzie czasowym typu 555, w którym wielkość mierzona powoduje zmianę pojemności, a ta z kolei zmianę generowanego okresu. Stwierdzono, iż w takim układzie pomiarowym wpływ temperatury jest większy od katalogowego i dla dokładności przetwornika większych od 0,5% musi być kompensowany. Stwierdzono ponadto, iż współczynnik temperatury układu jest zależny od częstotliwości wyjściowej. Zaproponowano układ kompensacji wykorzystujący wejście modulujące układu czasowego typu 555. Na wejście to poddawane jest napięcie uzależnione od temperatury oraz iloczynu temperatury i generowanego okresu. Pozwala to na kompensację obu składowych błędów temperaturowego zależnej i niezależnej od okresu. Przedstawiono dwa układy realizujące kompensację i podano wyniki kompensacji dowodzące, iż osiągnięte około 10-krotne zmniejszenie błędów temperaturowego.

1. Wstęp

Z uwagi na zalety sygnałów częstotliwościowych, zwłaszcza związane z ich niewrażliwością na zakłócenia, celowe jest opracowywanie i rozwijanie grupy przetworników pomiarowych różnych wielkości o wyjściu częstotliwościowym. Jedną z możliwości realizacji tego typu przetworników jest połączenie przetwornika parametrycznego pojemnościowego z układem przetwarzania pojemności na okres generowanego przebiegu. Zagadnienie liniowości charakterystyki pojemność-okres generowanego przebiegu było tematem pracy [1], a liniowość przetwornika przemieszczenie-pojemność analizowano w pracy [2]. W niniejszym artykule zostaną rozważone właściwości termiczne przetwornika zbudowanego na podstawie układu czasowego typu 555 [3]. Rozważania zostaną ograniczone do obszaru generacji przebiegów prostokątnych o małych okresach, rzędu kilkudziesięciu mikrosekund z uwagi na możliwość uzyskania w przetworniku parametrycznym zazwyczaj małych zmian pojemności, rzędu co najwyżej kilkudziesięciu pikofaradów i powiązanie tych dwu wielkości równaniem przetwarzania o postaci

$$T = (R_2 + 2 R_3) C \ln 2 \quad (1)$$

gdzie R_2 i R_3 oznaczają odpowiednie rezystancje zewnętrzne o wartościach do ok. $1 \text{ M}\Omega$, a C jest zmienną pojemnością przetwornika (rys.1).



Rys.1 Schemat układu generatora opartego na układzie czasowym typu 555

Fig.1 Circuit of the oscillator with 555 timer

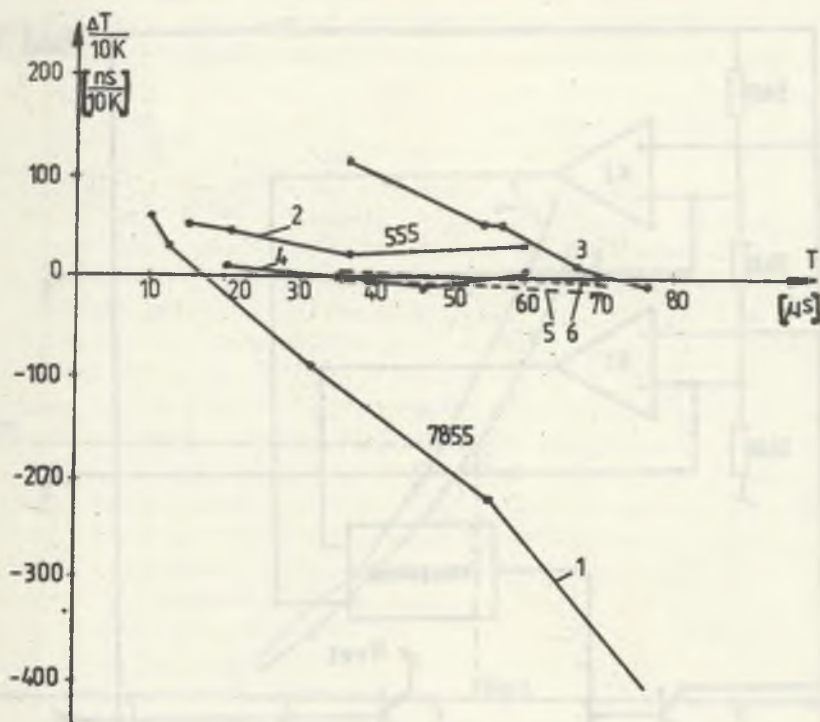
(+300 do - 600 ppm/K). Stwierdzono, że układy bipolarne tej samej serii produkcyjnej mają bardzo zbliżone do siebie współczynniki termiczne, lecz o zmiennej wartości w funkcji generowanego okresu. Zmienność ta jest przykładowo przedstawiona na rys.2 (linia 1). Zmienność współczynników termicznych układów CMOS jest mniejsza, a wartości współczynników są przesunięte w kierunku wartości dodatnich (linia 2). Również podwyższenie napięcia zasilania powoduje zmianę współczynników w kierunku wartości dodatnich.

Wyniki badań wskazują, że niezbędna jest kompensacja wpływu temperatury na okres przebiegu generowanego układem czasowym we wszystkich przypadkach, gdy niedokładność przetwornika ma być mniejsza od kilku dziesiątych części procenta. Wobec zależności współczynnika termicznego od okresu, a tym samym od wartości wielkości mierzonej, kompensacja ta jest utrudniona i wymaga specjalnych układów kompensacyjnych lub specjalnej procedury w przypadku stosowania programowanych systemów pomiarowych.

W niniejszym artykule zostanie przedstawiony układowy sposób kompensacji. W przypadku połączenia przetwornika c/f z przetwornikiem wielkości mierzonej, np. przemieszczenia mechanicznego na pojemność, kompensacja powinna obejmować oba przetworniki łącznie.

2. Zależność okresu generatora od temperatury

W katalogach podawana jest wartość zmian okresu T od temperatury na poziomie 150 ppm/K . Badania przeprowadzone na serii 6 układów bipolarnych ULY 7855 produkcji CEMI i 5 układach CMOS ICE 7555 produkcji Intersil w zakresie częstotliwości od 5 do 100 kHz nie potwierdziły danych katalogowych. Wartości współczynników temperatury zawierały się w granicach $+0,3$ do $-0,6\%/10 \text{ K}$



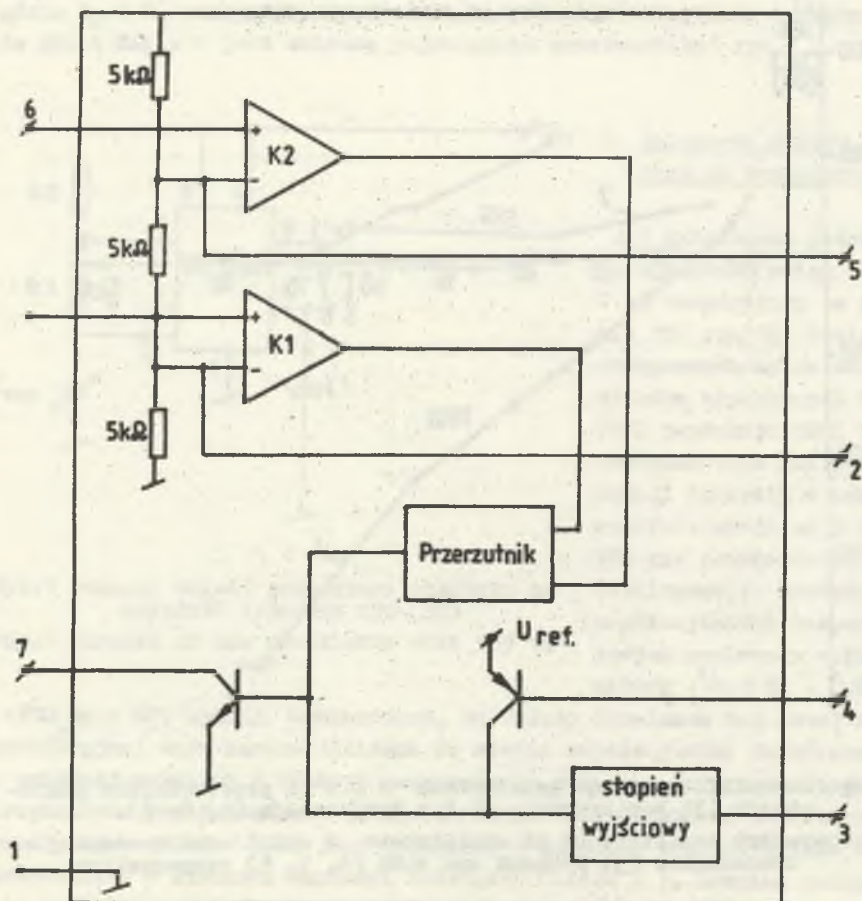
Rys.2 Współczynniki termiczne generatorów 1 i 2 i przetworników pomiarowych (3) bez kompensacji i z kompensacją (4, 5, 6).

Fig.2 Temperature coefficients of oscillators 1 and 2 and measuring transducers (3) without and with (4, 5, 6) compensation.

Kompensacja wpływu temperatury

3.1. Metoda kompensacji

Zasada działania układu czasowego ULY 7855, którego schemat strukturalny przedstawiono na rys.3, polega na porównaniu napięcia na kondensatorze z napięciem odniesienia otrzymanym z odpowiedniego podzielenia napięcia zasilania, i w zależności od wyniku porównania, kształtowaniu wartości napięcia wyjściowego (stan wysoki lub niski). Wyprowadzenie nr 5, nazywane wejściem modulującym, umożliwia zmianę napięć odniesienia przy nie zmienionym napięciu zasilania poprzez zmianę, za pomocą elementów zewnętrżnych, rozprywu prądów w dzielniku odniesienia. Wpływa to na wydłużenie lub skrócenie, zależnie od kierunku zmian wartości napięcia odniesienia, czasu ładowania i rozładowania kondensatora, a co za tym idzie, na wartość okresu przebiegu generowanego przez układ.



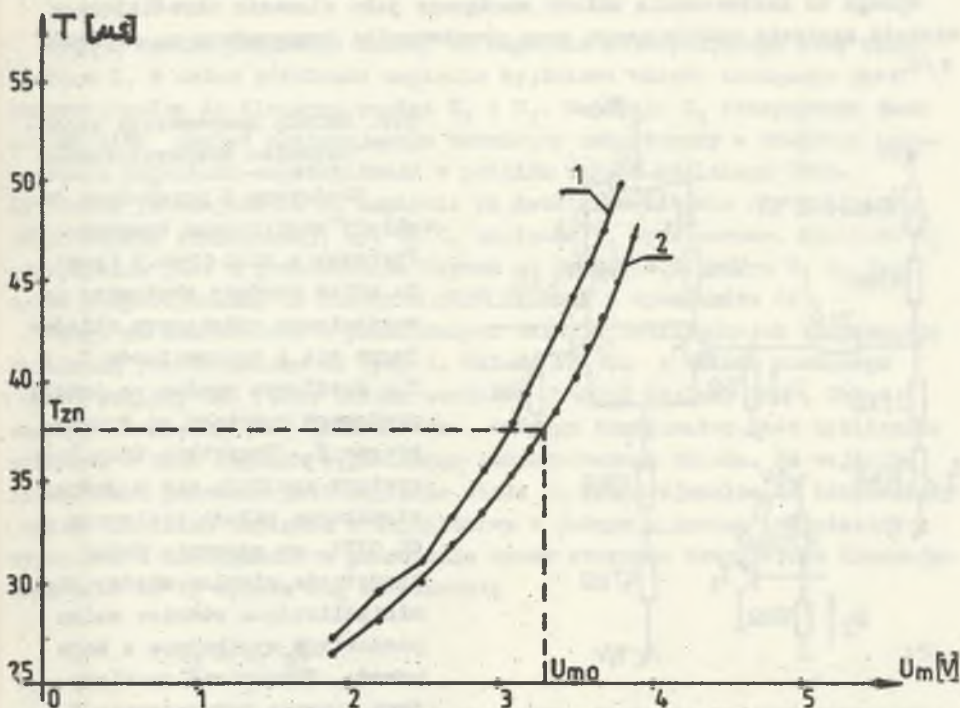
Rys.3 Schemat strukturalny układu ULY 7855

Fig.3 Circuit diagram of the timer ULY 7855

Na rys.4 przedstawiono zależność wartości okresu od wartości napięcia na wejściu modulującym, przy znamionowym okresie $38 \mu\text{s}$ generowanym przy napięciu $U_{m0} = 2 U_{CC}/3$, otrzymaną dla jednego z układów ULY 7855.

Można założyć, że w okolicy okresu znamionowego charakterystyka jest liniowa, co pozwala na skonstruowanie układu kompensacji wytwarzającego napięcie U_m wprost proporcjonalne do wymaganych zmian okresu generowanego przebiegu i podawane na wejście modulujące.

Z przebiegu zależności współczynnika temperaturowego układu od okresu (rys.2) wynika, że termiczne zmiany wartości generowanego okresu zależą nie tylko od zmian temperatury, ale także od wartości okresu.



Rys.4 Zależność okresu od napięcia modulującego doprowadzonego do wyprowadzenia 5 przy napięciu zasilania równym 5 V. 1. wyniki badań. 2. wartości obliczone

Fig.4 Dependence of the period on the control voltage supplied to the lead No 5 under supply voltage of 5V. 1. Test results. 2. Calculated values

Napięcie modulujące należy więc uzależnić od temperatury i okresu w sposób następujący:

$$U_m \sim \Delta T \Delta \psi \quad (2)$$

gdzie: $\Delta T = T - T_{odn}$,

$\Delta \psi = \psi_{ot} - \psi_{odn}$,

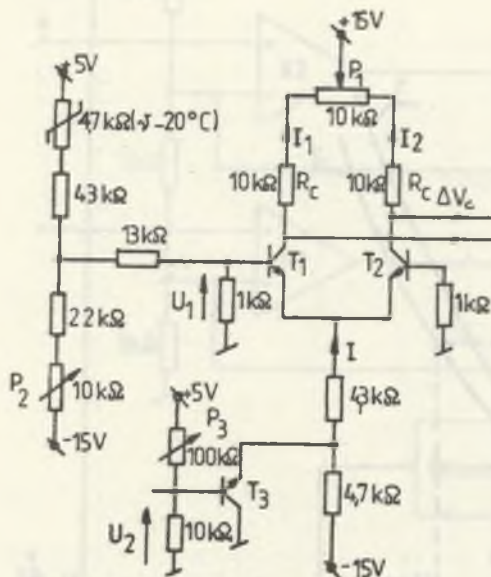
ψ_{odn} - temperatura odniesienia ,

ψ_{ot} - temperatura otoczenia ,

T_{odn} - okres odniesienia, przy którym układ ma serową wartość współczynnika temperaturowego,

T - wartość okresu generowanego przez układ

Wymaga to zastosowania układu mnożącego jako elementu określającego wartość napięcia modulującego oraz przetwornika temperatury na napięcie v/U .



Rys.5 Schemat układu kompensacji z różnicowym układem mnożącym

Fig.5 Compensation circuit with differential multiplier

Ponieważ baza jednego z tych tranzystorów jest podłączona do masy poprzez rezystor, napięcie występujące na drugiej bazie powoduje zmianę rozpięwu prądu w gałęziach wzmacniacza i pojawienie się napięcia różnicowego między kolektorami tych tranzystorów. Zmiany prądu w jednej z gałęzi wzmacniacza wywołane przyrostem ΔU_{BE} wynoszą:

$$\Delta I_1 = \Delta U_{BE} I / 4 U_T \quad U_T = K T_A / q \quad (3)$$

gdzie: K - stała Boltzmana,

T_A - temperatura absolutna,

q - ładunek elektronu,

I - sumaryczny prąd płynący przez tranzystory,

a ponieważ przyrosty prądów I_1 i I_2 mają przeciwne znaki i równe moduły:

$$\Delta U_C = 2 R_C \Delta I_1 = \Delta U_{BE} I R_C / 2 U_T = k_1 \Delta U_{BE} I = k_2 U_1 U_2, \quad (4)$$

3.2. Układy kompensacji współczynnika temperaturowego

Zbudowano i przebadano dwa układy realizujące kompensację. Pierwszy z nich (rys.5) posiada układ mnożący zbudowany na wzmacniaczu różnicowym składającym się z tranzystorów T_1 i T_2 , zasilanym prądem ze źródła prądowego opartego na tranzystorze T_3 . Wszystkie trzy tranzystory znajdują się w jednej strukturze układu scalonego UL 1111, co zapewnia dobre sprzężenie cieplne między nimi, minimalizujące różnice zmian parametrów wynikające z tego powodu. Wzmacniacz zasilany jest poprzez potencjometr P umożliwiającą precyzyjną symetryzację obu gałęzi. Napięcie wyjściowe takiego wzmacniacza zależy od różnicy napięć na bazach tranzystorów T_1 i T_2 .

Prąd I śródka prądowego zależy od napięcia polaryzującego bazę tranzystora T, a zatem różnicowe napięcie wyjściowe układu mnożącego jest proporcjonalne do iloczynu napięć U_1 i U_2 . Napięcie U_1 otrzymywane jest z dzielnika napięć zawierającego termistor umieszczony w obudowie przetwornika pojemność-częstotliwość w pobliżu układu scalonego 7855. Za pomocą potencjometru P_2 napięcie na dzielniku ustawia się tak, aby w temperaturze znamionowej, np. 20°C , napięcie U_1 było zerowe. Napięcie U_2 otrzymywane jest z przetwornika okresu na napięcie. Iloczyn $U_1 U_2$ jest zatem proporcjonalny do iloczynu $\Delta T \Delta t$ zgodnie z wymaganiem (2).

Drugi ze zbudowanych i przebadanych układów realizujących kompensację termiczną przedstawiono na rys. 6. Składa się on z układu mnożącego (układ scalony US1) oraz układu sumatora (układ scalony US2). Układ mnożący zbudowany jest z integratora, którego kondensator jest cyklicznie zwierany w takt sygnału wyjściowego kompensowanego układu. Na wejście integratora podawane jest napięcie stałe U_1 proporcjonalne do temperatury (układ dzielnika napięcia z termistorem w jednym z ramion). Napięcie wyjściowe z integratora w przedziale czasu otwarcie tranzystora kluczującego od 0 do T_1 wyraża się zależnością

$$U_3 = U_1 \frac{t}{RC} \quad (5)$$

a w przedziale czasu od T_1 do T jest zerowe. Napięcie to jest następnie uśredniane w prostym układzie składającym się z rezystora R_1 i kondensatora C_1 . Napięcie na kondensatorze wynosi:

$$U_4 = \frac{1}{T} \int_0^T U_3 dt = \frac{T_1}{T} \cdot \frac{1}{RC} U_1 \cdot \frac{T_1}{2} \quad (6)$$

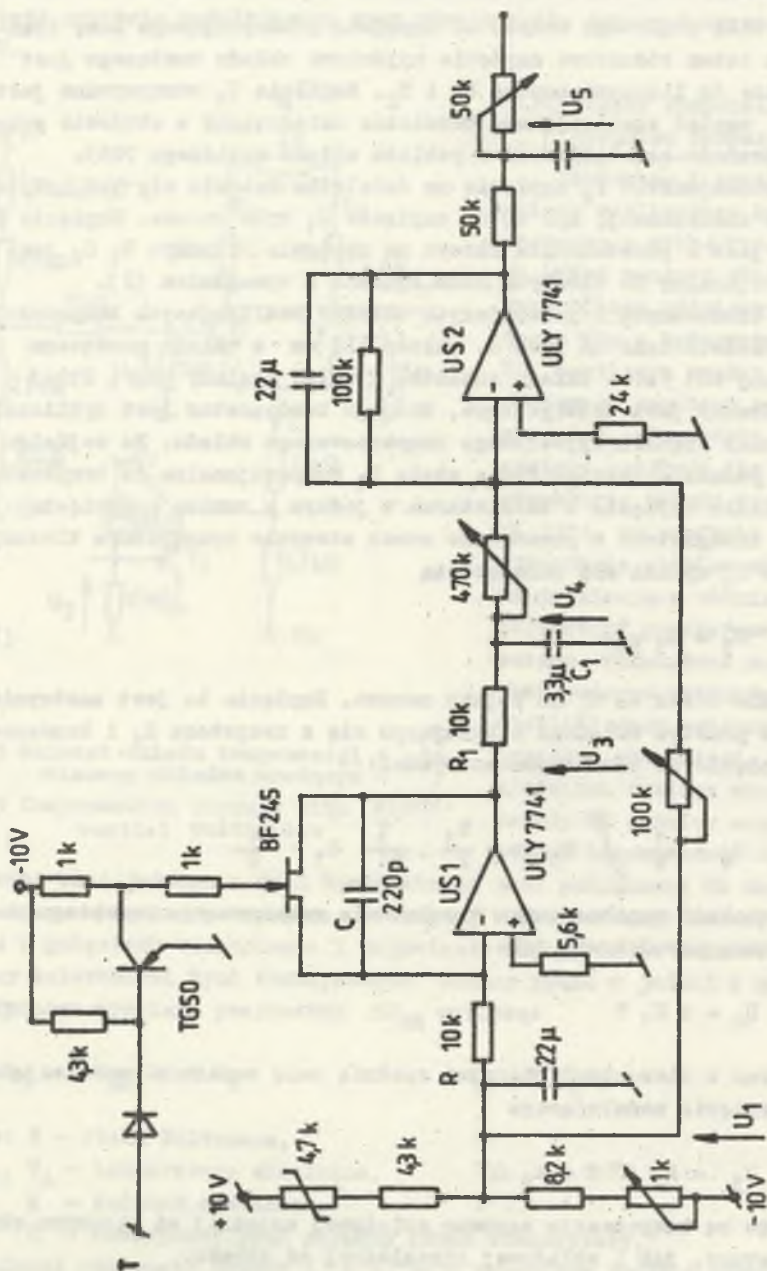
Z uwagi na stałość współczynnika wypełnienia generowanego przebiegu napięcie to można przedstawić jako

$$U_4 = k U_1 T \quad (7)$$

Układ US2 wraz z elementami biernymi spełnia rolę sumatora umożliwiającego uzyskanie napięcia modulującego

$$U_5 = k_2 \Delta V T + k_3 \Delta V \quad (8)$$

zezwalającego na kompensację zarówno składowej zależnej od iloczynu okresu i temperatury, jak i składowej niezależnej od okresu.



Rys. 6 Schemat układu kompensacji z integratorem kłusowanym napięciem wyjściowym generatorem
 Fig. 6 Compensation circuit with integrator driven by the oscillator voltage

4. Badania układów kompensacji

Badaniom poddano oba przedstawione w punkcie 3.3 układy kompensacji. W trakcie badań wstępnych sprawdzono działanie układów kompensacji przy współpracy z generatorem ULY 7855, ale bez przetwornika x/C. Zamiast niego użyto kondensatory mikowe o różnych wartościach, mające pomijalnie mały współczynnik temperaturowy. Wyniki badań układu kompensacji przedstawionego na rys. 5 zamieszczono w tabeli 1 oraz przedstawiono na rys. 2 (krzywa 4).

Tabela 1

Wyniki badań układu kompensacyjnego wg rys.5

T ODN	T	δ_{ODN}	δ	$\Delta T/10 \text{ K}$
μs	μs	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$\mu\text{s}/10 \text{ K}$
21,52	21,54	22,5	44,5	+ 0,009
35,91	35,91	20,0	44,5	0
47,68	47,66	21,5	44,5	- 0,009
59,97	59,5	21,5	44,5	+ 0,004

Otrzymane wyniki wskazują, że błędy temperaturowe są mniejsze od błędów nieliniowości układu kompensacyjnego. Powodem nieliniowości jest charakterystyka statyczna termistora oraz układu mnożącego. Przyczyną błędów nieliniowości układu mnożącego jest to, że napięcie otrzymywane z przetwornika T/U_2 dla T około $30 \mu\text{s}$ powoduje obniżenie potencjałów tranzystorów T_1 i T_2 w niewielkim stopniu, co jest przyczyną szybkiego nasycenia się jednego z tranzystorów przy wzroście temperatury. Opisany efekt można by zlikwidować zwiększając czułość toru T/U_2 , co jest jednak ograniczone dopuszczalną wartością napięcia na wyjściu integratora znajdującego się w tym torze. Kompensacja wpływu temperatury na cały przetwornik, a nie tylko na układ generatora, wymaga uwzględnienia termicznego współczynnika zmian pojemności przetwornika x/C. Przykładowe sumaryczne zmiany współczynnika przedstawione na rys. 2 jako krzywa 3. Omawiany układ kompensacji trudno jest przystosować do takiego zakresu zmian współczynnika termicznego z uwagi na omówione zjawisko nasycania się układu mnożącego przy dużej wartości okresu T_{odn} odpowiadającej zerowemu współczynnikowi termicznemu (ok. $70 \mu\text{s}$ dla krzywej 3). Ominięcie tej trudności wymagałoby dalszej rozbudowy układu kompensacji. Działanie takie uznano za niecelowe wobec możliwości osiągnięcia tych samych celów za pomocą prostszego układu kompensacji przedstawionego na rys.6.

Osiągnięte za pomocą tego układu wartości współczynników termicznych dla dwu egzemplarzy przetworników przedstawiono na rys.2 liniami przerywanymi. Dla każdego przetwornika konieczne było odrębne nastawienie parametrów układu kompensacyjnego. Błędy temperaturowe po kompensacji zawierały się w granicach 0,02 do 0,05%/10 K, co stanowi ok. 10-krotne zmniejszenie błędów w stosunku do stanu bez kompensacji. Dalsze zmniejszenie błędów temperaturowych omawianymi układami nie wydaje się celowe z uwagi na nieliniowość układu kompensacji, niestabilność elementów i konieczność skomplikowanego i żmudnego, indywidualnego nastawiania wartości czułości poszczególnych jego członów. Z powyższych powodów możliwość programowej kompensacji termicznej występująca w układach pomiarowych zawierających mikroprocesory lub komputery jednopłytkowe wydaje się być bardziej owocna. Przystąpiono do pracy nad taką metodą kompensacji.

LITERATURA

- [1] Urzędniczok H.: Wpływ pojemności rozproszenia na charakterystykę statyczną przetwornika C/T. Materiały XX Międzuczelnianej Konferencji Metrologów. Szczecin 1988.
- [2] Zakrzewski J.: Dokładny pojemnościowy przetwornik przemieszczenia. Materiały konferencji "Kierunki Rozwoju Metrologii Elektrycznej". Warszawa 1987. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej.
- [3] Katalog firmy INTERSIL: Analog Products catalog. Vol.I
- [4] Zgłoszenie patentowe P-272432.

Recenzent: doc.dr inż. Zbigniew Kędryna

Wpłynęło do Redakcji dnia 12 grudnia 1988r.

ТЕРМИЧЕСКАЯ КОМПЕНСАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ЕМКОСТНО-ЧАСТОТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Р е з ю м е

В статье представлена проблема влияния температуры на период генерируемого сигнала измерительного преобразователя с частотным выходом. Рассмотрен преобразователь с времязадающей схемой типа 555, в котором измеряемая величина влияет на емкость преобразователя, а та в свою очередь изменяет период генерируемого периода. Установлено, что в такой измерительной схеме термический коэффициент больше каталогового и для точности преобразователя выше чем 0,5 % его влияние должно быть компенсировано. Установлено также, что термический коэффициент зависит от частоты выходного сигнала.

Предложена схема компенсации, использующая модулирующий вход микросхемы типа 555. На этот вход подаётся напряжение зависящее от температуры и произведения температуры и генерированного периода. Таким образом возможна компенсация двух составляющих температурной погрешности: зависимой и независимой от периода.

Рассмотрены две схемы, осуществляющие компенсацию и представлены результаты компенсации, удостоверяющие почти 10-и кратное снижение температурной погрешности.

TEMPERATURE COMPENSATION OF A CAPACITIVE MEASURING TRANSDUCER WITH FREQUENCY OUTPUT

S u m m a r y

The problem of temperature influence on the period of frequency output signal of a measuring transducer has been presented in the paper. The transducer based on the 555 timer in which measured value causes the change in capacity and then the change in the period is considered.

It has been found that in such a measuring system temperature influence is larger than catalogue one and must be compensated for transducer accuracies of less than 0,5%. It has been also stated that the system temperature coefficient depends on the output frequency. The compensation system which uses modulating input of the 555 timer has been suggested. The voltage dependent on the temperature and the product of temperature and period generated is supplied to this input.

It allows to compensate both components of temperature error: the period-dependent and independent ones.

Two compensating circuits have been presented and the results of the compensation, proving that 10-time reduction of the temperature error had been achieved, have been given.