

Jan ZAKRZEWSKI

UKŁADY RÓŻNICOWE CZUJNIKÓW
O WYJŚCIU CZĘSTOTLIWOŚCIOWYM

Streszczenie. W artykule przedstawiono problemy realizacji różnicowych przetworników pomiarowych o wyjściu częstotliwościowym. Zalety układów różnicowych mogą być wykorzystane albo poprzez budowę przetworników różnicowych, lub też przez zastosowanie struktur różnicowych składających się z dwu pojedynczych przetworników. Wskazano, że w wielu praktycznych przypadkach, zwłaszcza przy wykorzystaniu czujników parametrycznych, tworzenie struktur różnicowych jest poprawniejszą metodą realizacji pomiarów różnicowych. Szczegółowo rozpatrzono możliwości budowy różnicowych przetworników przemieszczania z czujnikami pojemnościowymi. Wykazano, iż trudności budowy takich przetworników występują w konstrukcji mechanicznej (bardzo długi czujnik), jak i elektrycznej (pojemności rozproszenia, przeciąganie częstotliwości obu generatorów). Wskazano na trudności adiustacji przetworników różnicowych o wyjściu częstotliwościowym.

Wprowadzenie

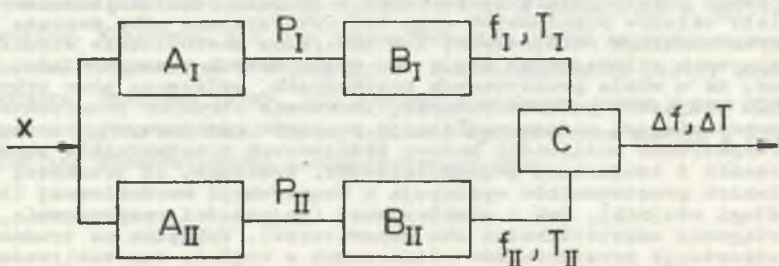
Zalety układów różnicowych są ogólnie znane i szeroko wykorzystywane w technice pomiarowej, zwłaszcza w pomiarach wielkości nieelektrycznych metodami elektrycznymi. Spektakularnymi przykładami są mostki tensometryczne lub różnicowe transformatorowe przetworniki przemieszczenia.

Wobec coraz powszechniejszego stosowania przetworników pomiarowych o wyjściu częstotliwościowym [1][2] powstaje pytanie o możliwość tworzenia układów różnicowych z wyjściem częstotliwościowym i o możliwość wykorzystania w tych układach zasadniczych ich zalet, a mianowicie linearyzacji charakterystyk statycznych i eliminacji błędów addytywnych. Możliwość linearyzacji charakterystyk statycznych w układach różnicowych wraz z ograniczeniami, jakie przy tej linearyzacji występują, zostały przedstawione w pracy [3]. W niniejszym artykule zostaną rozpatrzone zagadnienia eliminacji błędów addytywnych w różnych układach różnicowych o wyjściu częstotliwościowym. Zakłada się przy tym, że charakterystyki statyczne w zakresie pomiarowym są liniowe.

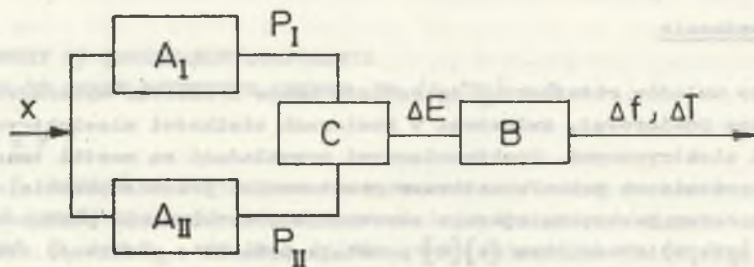
Struktury układów różnicowych

Jako tory pomiarowe o wyjściu częstotliwościowym traktować się będzie zarówno te, których wielkością wyjściową jest przedział czasu $T = \frac{1}{f}$ umownie nazywany okresem. Umownie - gdyż przy zmianie wielkości mierzonej X zmienia się wartość T , a więc nie jest to okres rozumiany w sensie przebiegów okresowych.. Dlatego też na rys. 1a przedstawiającym ogólną strukturę toru pomiarowego z wyjściem częstotliwościowym obok oznaczenia f i Δf zamieszczono oznaczenia T i ΔT .

a



b



Rys. 1

Fig. 1

Przedstawiona struktura odnosi się do przypadków, w których wielkość mierzona X powoduje zmianę parametru P (przetwornik A), a dopiero w dalszej części toru pomiarowego (przetwornik B) parametr P przetwarzany jest na częstotliwość f lub okres T . Człon C realizuje różnicę częstotliwości $\Delta f = f_I - f_{II}$ lub okresów $\Delta T = T_I - T_{II}$. Jest to najczęściej spotykana struktura, a parametrem P jest albo parametr obwodu elektrycznego L, C, R, M ; i wówczas człon B jest generatorem o wyjściu zależnym od tego parametru, albo naprężeniem mechanicznym σ i wówczas człon B jest elementem wibracyjnym pobudzany do drgań swobodnych o częstotliwości zależnej od naprężeń. Zgodnie z tą strukturą działają

pojemnościowe i indukcyjnościowe przetworniki przemieszczenia i termometry rezystancyjne o wyjściu częstotliwościowym, tensometry strunowe, ciśnieniomierze o drgającej membranie itp.

Uproszczeniem struktury byłby układ przedstawiony na rys. 1b o jednym tylko generatorze i węźle różnicowym C parametrów P. Niestety, nie istnieją proste układy realizujące różnice parametrów elektrycznych. Układy takie jak mostek, transformator różnicowy czy wzmacniacz różnicowy mogą przetwarzać różnicę parametrów na sygnał elektryczny, prądowy lub napięciowy (ΔE na rys. 1b) i z kolei ten sygnał może sterować generatorem B (VCO). Jest to jednak wprowadzenie dodatkowego członu analogowego wraz ze wszystkimi konsekwencjami związanymi z ograniczoną dokładnością członów analogowych. Przy takiej strukturze wątpliwa jest celowość realizacji toru o wyjściu częstotliwościowym, gdyż zamiast generatora B wstawiając scalony woltomierz cyfrowy (np. ICL 7106 firmy Intersil) otrzymuje się od razu przetworzenie a/c. Z podanych powodów struktura przedstawiona na rys. 1b nie będzie dalej rozważana.

Całkowicie odmienną strukturę posiadają te przetworniki o wyjściu częstotliwościowym, w których wielkość mierzona X wywołuje oscylacje lub bezpośrednio zmienia ich częstotliwość, gdyż trudno w nich wyodrębnić człon A i parametr P. Do takich przetworników należą np. przepływomierze turbinowe, przepływomierze typu Vortex lub termometry kwarcowe. W każdym z tych przypadków jednak tworzenie struktury różnicowej byłoby bardzo utrudnione bądź wręcz niemożliwe, gdyż należałoby wówczas albo znaleźć efekt odwrotny (zjawisko odwrotne), albo zastosować drugi czujnik o tej samej zasadzie działania (zjawisku), na który oddziaływałaby wielkość mierzona o tej samej wartości, lecz przeciwnym kierunkiem oddziaływania (znaku). Akurat w przypadku przepływomierzy i termometrów jest to niemożliwe. Dlatego też w dalszej części rozważane będą jedynie tory pomiarowe o strukturze przedstawionej na rys. 1a.

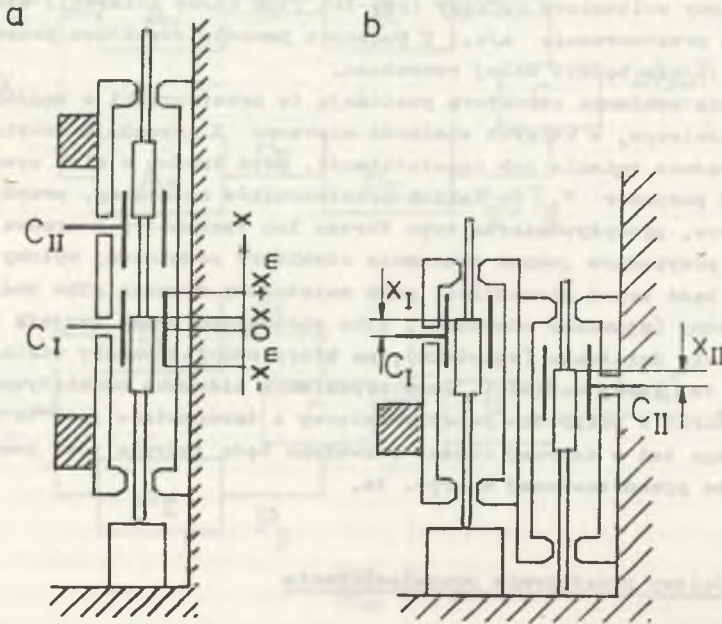
Pojemnościowy przetwornik przemieszczenia

Przykładem takiej struktury jest pojemnościowy przetwornik przemieszczenia o wyjściu częstotliwościowym. Podstawowymi wymaganiami, jakie stawia się konstrukcji takiego przetwornika, są: duża zmiana pojemności i małe wymiary. Sensowne pogodzenie tych wymagań możliwe jest wyłącznie w konstrukcji o walcowym kształcie elektrod przesuwających się poosiowo względem siebie. Taka konstrukcja umożliwia uzyskiwanie małych odległości między elektrodami i ich koncentryczności, gdyż zasadnicze problemy technologiczne zostają sprowadzone do toczenia i szlifowania otworów i wałków.

Wykorzystanie zalet układu różnicowego może być osiągnięte dwoma różnymi sposobami związanymi z budową przetworników i organizacją pomiaru.

Możliwości te przedstawione są na rys. 2. Pojemności oznaczone tam jako C_I i C_{II} są tymi właśnie parametrami obwodów elektrycznych, które powodują zmianę właściwości dołączonych do nich generatorów. Stosując np. bardzo popularne obwody czasowe 555 (np. ULY 7855) w charakterze multiwibratorów, otrzymuje się liniowe zależności okresu T_I jednego multiwibratora od pojemności C_I i okresu T_{II} drugiego multiwibratora od pojemności C_{II} . Odpowiedni układ elektroniczny wytwarza przebieg czasowy o długości trwania równej $T = T_I - T_{II}$ (lub częściej ich wielokrotności) i cyfrowo mierzy długość tego przedziału, wyświetlając wynik pomiaru w jednostkach przesunięcia mechanicznego.

Jedynie przetwornik przedstawiony na rys. 2a jest przetwornikiem różnicowym, sposób pomiaru przedstawiony na rys. 2b jest układem różnicowym wykorzystującym przetworniki nieróżnicowe.



Rys. 2

Fig. 2

Układ z ozujnikiem różnicowym

Zależności obrazujące działanie układu z rys. 2a o zakresie $\pm X_m$ są następujące:

$$C_I = C_{I0} + S_I (X_m + X), \quad (1)$$

$$C_{II} = C_{IIo} + S_{II}(X_m - X), \quad (2)$$

$$T_I = A_I C_I, \quad T_{II} = A_{II} C_{II}, \quad (3)$$

$$\Delta T = (A_I C_{Io} - A_{II} C_{IIo}) + (S_I A_I - S_{II} A_{II}) X_m + (S_I A_I + S_{II} A_{II}) X, \quad (4)$$

gdzie C_{Io} i C_{IIo} są pojemnościami w warunkach całkowicie wysuniętych elektrod ruchomych względem obudowy, czyli pojemności izolacji tych elektrod.

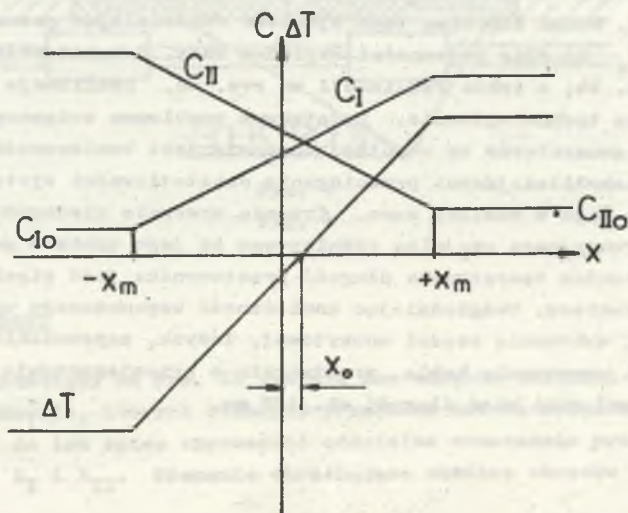
S_I i S_{II} są czułościami obu części czujnika,

A_I i A_{II} są współczynnikami przetwarzania pojemności na częstotliwość multiwibratorów.

Ze względów technologicznych nie można tak zbudować czujnika, aby ściśle zachodziło $C_{Io} = C_{IIo}$ i $S_I = S_{II}$. Wartości A_I i A_{II} są nominalnie równe, ale na ich wartość można wpływać stosunkowo prosto za pomocą zmiany odpowiednich rezystancji w układzie multiwibratora. Można zatem doprowadzić do wartości zerowej albo pierwszy człon równania (4), albo jego drugi człon w zależności od tego, czy spodziewamy się większych wpływów czynników zewnętrznych na wartość C_o czy też na wartość S . Zazwyczaj dominujący jest wpływ temperatury i wilgotności na przenikalność elektryczną materiału izolacyjnego powodujący zmiany C_o .

Powinno się dobrać zatem

$$A_I = A_{II} \frac{C_{IIo}}{C_{Io}}. \quad (5)$$



Rys. 3

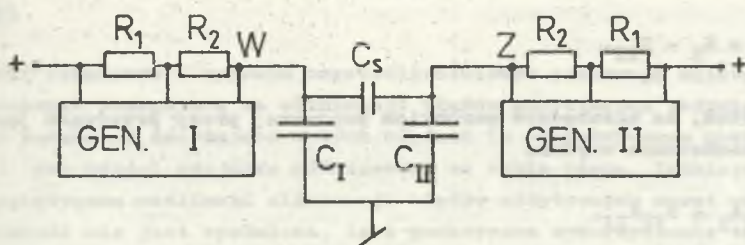
Fig. 3

Praktyczna realizacja takiego doboru wcale nie jest prosta. Rys. 3 przedstawia sytuację, w której $C_{I0} \neq C_{II0}$ i $S_I \neq S_{II}$, natomiast $A_I = A_{II}$. Pomiarowo dostępna jest jedynie różnica ΔT , która przyjmuje wartość 0 dla przemieszczenia X_0 zależnego zarówno od $\Delta C_0 = C_{I0} - C_{II0}$, jak i od $\Delta S = S_I - S_{II}$, gdyż obydwa pierwsze czony równania uwidaczniają się w wyniku jako przesunięcie zera. W dodatku wartość tego przesunięcia zera X_0 jest niemierzalna, gdyż nie jest znane położenie prawdziwego zera.

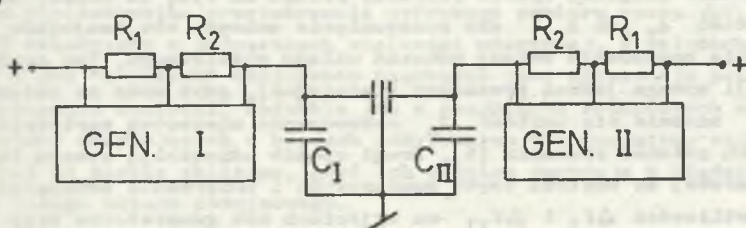
Bez trudności można wyznaczyć doświadczalnie czułość sumaryczną $S_I A_I + S_{II} A_{II}$, z pewnymi trudnościami czułości poszczególnych torów, ale pomiary takie nie pozwalają na wyznaczenie różnicy pomiędzy C_{I0} i C_{II0} i odpowiedni, zgodny ze wzorem (5) dobór A_I i A_{II} . Pozostaje bardzo żmudna procedura polegająca na świadomej zmianie wartości C_{I0} i C_{II0} i doprowadzeniu do takich samych wskazań (np. zerowych) przed zmianą, jak i po zmianie. Procedura taka też nie gwarantuje całkowicie poprawnej adiustacji, gdyż czynniki wywołujące zmianę C_0 mogą także zmieniać czułość S .

Innym poważnym problemem przy budowie czujników różnicowych jest wzajemny wpływ obwodów elektrycznych. Z oczywistych względów konstrukcyjnych elektrody przesuwne powinny być na potencjale masy, i to wspólnej, gdyż ich rozdzielenie elementem izolacyjnym wprowadza trudności związane z różnymi współczynnikami rozszerzalności liniowej. Elektrody nieruchome są izolowane, a pojemność między nimi (C_s na rys. 4a) powinna być możliwie mała. W przeciwnym przypadku nastąpią zakłócenia w pracy obu generatorów, zwłaszcza iż potencjały punktów W i Z (rys. 4) zmieniają się niesynchronicznie i przypadkowo z uwagi na niekontrolowanie faz obu generatorów. Powoduje to naruszenie liniowości przetwarzania i niepowtarzalność wskazań. Można zapobiec temu zjawisku rozdzielając geometrycznie pojemność C_s na dwie pojemności względem masy. Schemat układu przedstawiono na rys. 4b, a szkic realizacji na rys. 4c. Realizacja taka byłaby bardzo trudna technologicznie. Dodatkowym problemem związanym z umieszczeniem dwu generatorów we wspólnej obudowie jest konieczność zapewnienia warunków uniemożliwiających przeciągnięcie częstotliwości występujące przy $T_I \approx T_{II}$, a więc w okolicy zera. Trzecią wreszcie niedogodnością rozwiązania konstrukcyjnego czujnika różnicowego są jego znaczne gabaryty posłowe. Minimalna teoretyczna długość przetwornika jest pięciokrotnie większa od zakresu. Uwzględniając konieczność wspomnianego uprzednio ekranowania, wykonania części uchwytywnej, łożysk, zapewnienia miejsca na generatory i umocowanie kabla, przetwornik o przemieszczeniu ± 5 mm (zakres 10 mm) musi mieć długość ok. 120 mm.

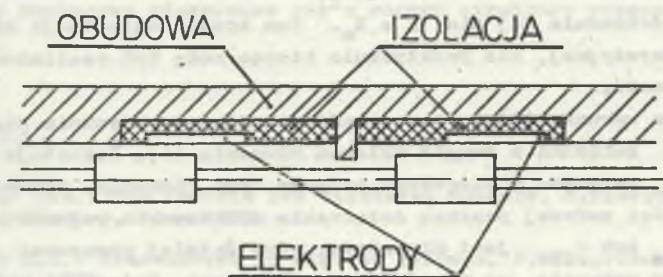
a



b



c



Rys. 4

Fig. 4

Układ różnicowy

Układ przedstawiony na rys. 2b zawiera dwa odrębne czujniki zamocowane we wspólnym uchwycie, których elementy przesuwne nie są związane ze sobą, a zatem trzeba do ich opisu wprowadzić oddzielne oznaczenia przesunięć obu czujników X_I i X_{II} . Równanie określające różnicę okresów przyjmuje postać:

$$\Delta T = (A_I C_{I0} - A_{II} C_{II0}) + (A_I S_I - A_{II} S_{II}) X_m + A_I S_I X_I - A_{II} S_{II} X_{II}. \quad (6)$$

Mierzona wielkość przemieszczenia jest równa

$$X = X_I - X_{II}. \quad (7)$$

Wynika stąd, że niezbędnym warunkiem poprawnej pracy przyrządu jest ściśle zachowanie warunku

$$S_{II}^A = S_{II}^A. \quad (8)$$

Co najmniej jeden z generatorów musi mieć zatem element nastawny umożliwiający zmianę jego współczynnika przetwarzania A . Adiustację¹ można przeprowadzić dwojako. Sposób pierwszy polega na tym, iż należy tak zmienić wartość A_I lub A_{II} , aby przesunięcie uchwytu obu czujników wzdłuż osi X nie powodowało zmiany wskazań układu różnicowego. Ten sposób adiustacji wymaga jednak procedury iteracyjnej, gdyż wraz ze zmianą A_I lub A_{II} zmienia się wartość X_0 spowodowana niezerową wartością dwu pierwszych członów równania (6). Drugi sposób adiustacji wymaga ingerencji pomiarowej do wnętrza torów pomiarowych i zmierzenia oddzielnie zmiany częstotliwości Δf_I i Δf_{II} na wyjściach obu generatorów przy przesunięciu o tę samą wartość ΔX . Następnie czułość jednego toru pomiarowego np. II należy zmienić w stosunku $\frac{\Delta f_I}{\Delta f_{II}}$. Z uwagi na precyzję adiustacji celowe jest dokonanie jej dla $X = X_m$. Ten sposób adiustacji nie wymaga procedury iteracyjnej, ale praktycznie biorąc może być realizowany jedynie u producenta.

Spełnienie warunku (8) za pomocą adiustacji automatycznie eliminuje składową X_0 związaną z drugim członem równania (6). Pozostaje natomiast składowa X_0 związana z pierwszym członem tego równania. Sprowadzenie jej do wartości zerowej poprzez dołączenie dodatkowych pojemności bocznikujących C_{Io} lub C_{IIo} jest niecelowe, gdyż łatwiej przesunąć jeden z czujników w uchwycie, co powoduje ten sam efekt. Natomiast ani jeden ani drugi sposób nie eliminuje wpływu zmian pojemności (np. termicznych) na wartość błędu addytywnego. Błąd ten jest zmniejszony na skutek użycia układu różnicowego w stopniu równym

$$\frac{C_{Io} - C_{IIo}}{C_{Io}} \quad (9)$$

i jest wyeliminowany jedynie w przypadku $C_0 = 0$, co jednak nigdy nie jest spełnione ściśle.

1) Słowo "adiustacja" niechętnie używane w środowisku pomiarowców elektryków jest tu zastosowane w znaczeniu zgodnym z PN-71/N-02050.

Wnioski

Czujniki różnicowe o wyjściu częstotliwościowym zachowują zaletę układów różnicowych polegającą na eliminacji błędów addytywnych jedynie wówczas, gdy parametry decydujące o tych błędach (w rozpatrywanym przykładzie C_0) obu części czujnika różnicowego są sobie równe. Istnieje co prawda teoretyczna możliwość eliminacji błędów addytywnych nawet wówczas gdy ta równość nie jest spełniona, lecz praktyczne wykorzystanie tej możliwości nie jest łatwe ze względu na trudną adiustację tych czujników. Czujniki takie powinny mieć wystarczająco symetryczną budowę, aby można było nie przeprowadzać jakiegokolwiek adiustacji, oczywiście oprócz takiego doboru współczynnika przetwarzania cyfrowego pomiaru czasu ΔT , aby wynik był wskazywany w jednostkach wielkości mierzonej. W układach różnicowych o dwu "zwykłych" czujnikach niezbędna jest adiustacja polegająca na wyrównaniu czułości. Podobnie jak w czujnikach różnicowych wartości parametrów decydujących o błędach addytywnych obu czujników składowych powinny być do siebie zbliżone, gdyż ich różnica decyduje o błędzie addytywnym całego układu różnicowego.

Ograniczenie rozważań do pojemnościowego przetwornika przemieszczenia mechanicznego umożliwiło odwołanie się do konkretnych rozwiązań i problemów. Podobne problemy wystąpią i podobne wnioski uzyska się rozpatrując inne układy pomiarowe mieszczące się w ramach struktury przedstawionej na rys. 1a.

LITERATURA

- [1] Tränkler H.R.: Die Technik Des digitalen Messens. R. Oldenbourg Verlag, München, Wien 1979.
- [2] Woolvet G.A.: Transducers in digital systems. P. Peregrinus LTD. Stevenage 1977.
- [3] Zakrzewski J.: Metodyka syntezy układów linearyzujących nieliniowe charakterystyki statyczne przetworników pomiarowych. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. Elektryka z. 65, Gliwice 1979.

Recenzent: Doc. dr hab. inż. Stefan Kubisa

Wpłynęło do Redakcji 1 września 1987 r.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ С ЧАСТОТНЫМИ ДАТЧИКАМИ

Резюме

В статье рассмотрены проблемы дифференциальных измерений датчиками с частотным выходом. Измерения можно перевести через реализацию дифференциальных датчиков, или через использование обыкновенных датчиков в дифференциальном режиме работы. На примере емкостных частотных датчиков перемещения показано, что реализация дифференциальных датчиков более сложна, и во многих случаях лучше использовать дифференциальный режим работы.

Усложнения возникают как по стороне механического исполнения датчика (большая длина датчика), так и по электрической стороне (паразитные емкости, взаимодействие частот).

Проверка и регуляция нуля и чувствительности дифференциальных датчиков также более сложна чем у обычных датчиков.

DIFFERENTIAL NETWORKS OF TRANSDUCERS WITH FREQUENCY OUTPUT

Summary

Realization problems of differential measuring transducers with frequency output have been presented in the paper. The advantages of the differential networks can be used either by constructing differential transducers or by employing differential structures consisting of two single transducers. It has been proved that in many practical cases, especially when using parametric transducers creation of the differential structures is more correct method of the differential measurements realization. Possibilities of constructing the displacement differential transducers with capacitive detectors have been considered in detail.

It has been shown that difficulties in constructing such transducers are caused both by mechanical reasons (very long transducer) and electrical ones (stray capacities, frequency pulling of both oscillators). Some problems with adjustment of the differential transducers with frequency output have also been pointed.