ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1991

Seria: ELEKTRYKA z.114 Nr kol. 1031

Henryk URZĘDNICZOK

Instytut Metrologii i Automatyki Elektrotechnicznej
Politechniki Śląskiej

DYNAMIKA PRZETWORNIKÓW POMIAROWYCH Z WYJŚCIEM CZĘSTOTLIWOŚCIOWYM ZAWIERAJĄCYM GENERATORY RC

Streszczenie. Przedstawiono problemy dotyczące przetworników z generatorami drgań harmonicznych typu RC. Częstotliwość sygnału wyjściowego zależna jest od parametru R lub C czujnika pomiarowego zawartego w czwórniku RC. Omawiane są tylko czwórniki II rzędu. Przedstwiono metodę analizy dynamiki tego typu przetworników; określono przyczynę błędów dynamicznych i wskazano na ich nieliniowość dynamiczną. Opisano zasadę doboru elementów układu generatora dla uzyskania błędów dynamicznych w dopuszczalnych granicach.

1. Wprowadzenie

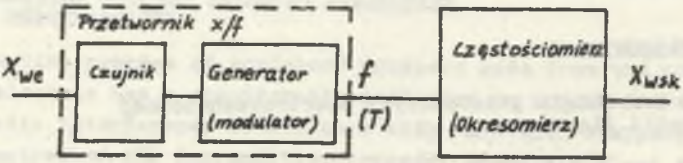
Przetworniki pomiarowe z wyjściem częstotliwościowym (x/f) znajdują, ze względu na swoje zalety ([8]), zastosowanie w torach pomiarowych automatycznych systemów pomiarowych. Strukturę takiego toru pomiarowego przedstawiono na rys.1.

Analiza właściwości dynamicznych tego typu toru pomiarowego obejmuje:
- analizę dynamiki pomiaru częstotliwości f lub okresu T,
- analizę dynamiki przetwornika x/f, a w tym:
  - analizę właściwości dynamicznych czujnika pomiarowego,
  - analizę właściwości dynamicznych generatora lub modulatora.

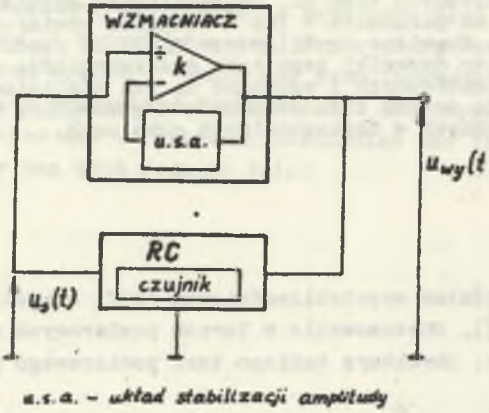
Zagadnienia te wymagają odrębnego opracowania dla każdego typu przetwornika.

Wśród wielu opisywanych rodzajów przetworników z wyjściem częstotliwościowym [1,2] wyróżnić można przetworniki z czujnikiem parametrycznym R, C, L, M, a wśród rozwiązań układów generatorów - generatory harmoniczne RC. Strukturę takiego generatora pokazano na rys.2.

Wielkość wyjściowa - częstotliwość lub okres generowanego sygnału - zależy od wartości elementów czwórnika RC. Jeden (lub kilka) spośród nich stanowi czujnik pomiarowy, którego parametr zależny jest od wielkości mierzonej. Najczęściej spotykane [1,2,3,6,5] układy czwórników RC pokazano na rys.3.



Rys.1 Tor pomiarowy z przetwornikiem o wyjściu częstotliwościowym
Fig.1 Measuring path with a frequency output transducer



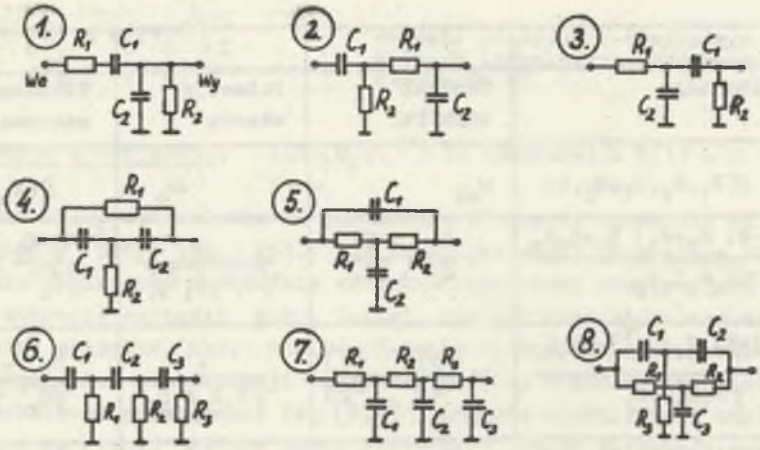
Rys.2 Schemat blokowy przetwornika z generatorem RC
Fig.2 Blok diagram of the transducer with RC-oscillator

Rozważania przedstawione poniżej dotyczą jedynie dynamiki generatora. Właściwości dynamiczne czujnika zależne są od jego rodzaju i konstrukcji uwarunkowanych rodzajem mierzonych wielkości. Celem analizy jest sformułowanie wniosków dotyczących zasad konstruowania przetworników x/f z generatorami RC zapewniających uzyskanie pożądanych właściwości dynamicznych. Ograniczono się do układów czwórników o nr 1-5 (rys.3), które są układami II rzędu. Przyjęto także założenie, że nie następuje nasycanie wzmacniacza.

2. Metody analizy pracy przetwornika

Charakterystyka statyczna przetwornika pomiarowego z generatorem RC, tj. zależność częstotliwości sygnału wyjściowego od wartości wielkości wejściowej, może być określona dwiema metodami:

1. [1,2,3] - przez analizę układu jako liniowego wzmacniacza o wzmocnieniu k objętego dodatnim sprzężeniem zwrotnym poprzez czwórnik RC o transmitancji zależnej od wartości parametrów elementów R i C. Taki sposób analizy pozwala określić częstotliwość i wymagane wzmocnienie k tylko dla stanu ustalonego, tzn. w sytuacji, gdy wartości elementów R i C (w tym czujnika) są stałe.



Rys.3 Czwórniki RC stosowane w przetwornikach x/f
Fig.3 RC-four-terminal networks applied in the x/f transducers

Nie można tą metodą analizować procesu przejściowego ustalania drgań związanego ze zmianami parametru czujnika przy zmianach wielkości wejściowej.

2. [5] - przez rozwiązanie równań różniczkowych obwodu elektrycznego generatora prowadzące do:
   - wyznaczania czasowej postaci sygnału wyjściowego,
   - określenia warunków dla których rozwiązanie to ma charakter oscylacyjny (tzw. warunek generacji), o stałej amplitudzie (tzw. warunek stabilności),
   - określenia zależności częstotliwości tego sygnału od wartości wielkości wejściowej.

Analiza właściwości dynamicznych przetwornika wymaga stosowania drugiej metody.

Równania różniczkowe opisujące układy generatorów o strukturze wg rys. 2 z czwórnikami RC wg rys. 3 nr 1-5 można zapisać w ogólnej postaci:

$$u_s''(t) + 2\xi\omega_o u_s'(t) + \omega_o^2 u_s(t) = 0 \qquad (1)$$

gdzie: $u_s(t) = \dfrac{u_{wy}(t)}{k}$

Współczynniki ξ - tłumienie i ω_o - pulsacja własna są zależne od wartości elementów R i C czwórnika oraz wzmocnienia k wzmacniacza. Zależności te podano w tablicy 1 (kolumna 1 i 3)

Tablica 1

	1	2	3	4
Nr ukł	Tłumienie	Warunek stabiln.	Pulsacja własna	Tłumienie maksymalne
rys 1	$\xi = f(R_1, R_2, C_1, C_2, k)$	k_{st}	ω_o	$\xi(t_o)$
1	$\frac{[(1-k)\ R_2+R_1]\ C_1+R_2C_2}{\sqrt{R_1R_2C_1C_2}}$	$1+\frac{R_1}{R_2}+\frac{C_2}{C_1}$	$\frac{1}{\sqrt{R_1R_2C_1C_2}}$	$\frac{C_k-C_p}{\sqrt{C_k}}\sqrt{\frac{R_2}{R_1C_1}}$
2	$\frac{[(1-K)\ C_1+C_2]R_2+R_1C_2}{\sqrt{R_1R_2C_1C_2}}$	$1+\frac{C_2}{C_1}\left[1+\frac{R_1}{R_2}\right]$	$\frac{1}{\sqrt{R_1R_2C_1C_2}}$	$\frac{C_k-C_p}{\sqrt{C_k}}\frac{R_1+R_2}{\sqrt{R_1R_2C}}$
3	$\frac{[(1-k)\ R_2+R_1]C_1+R_1C_2}{\sqrt{R_1R_2C_1C_2}}$	$1+\frac{R_1}{R_2}\left[1+\frac{C_2}{C_1}\right]$	$\frac{1}{\sqrt{R_1R_2C_1C_2}}$	$\frac{C_k-C_p}{\sqrt{C_k}}\sqrt{\frac{R_1}{R_2C_1}}$
4	$\frac{R_2(C_1+C_2)(k-1)-R_1C_2}{(k-1)\sqrt{R_1R_2C_1C_2}}$	$1+\frac{R_1C_2}{R_2(C_1+C_2)}$	$\frac{1}{\sqrt{R_1R_2C_1C_2}}$	$\frac{C_p-C_k}{C_p\sqrt{C_k}}\sqrt{\frac{R_2C_1}{R_1}}$
5	$\frac{(R_1+R_2)(k-1)C_1-R_1C_2}{(k-1)\sqrt{R_1R_2C_1C_2}}$	$1+\frac{R_1C_2}{C_1(R_1+R_2)}$	$\frac{1}{\sqrt{R_1R_2C_1C_2}}$	$\frac{C_p-C_k}{C_p\sqrt{C_k}}\frac{(R_1+R_2)\sqrt{C_1}}{\sqrt{R_1R_2}}$

Uwaga: W kolumnie 4 podano tłumienie w chwili skokowej zmiany wartości wielkości wejściowej jeżeli czujnikiem jest C_2, C_p - wartość początkowa C_2, C_k - wartość końcowa C_2

Postać ogólna rozwiązania równania (1) jest znana [4]. Aby rozwiązanie miało charakter oscylacyjny i było stabilne muszą być spełnione dwa warunki:

a) Warunek generacji: $\xi^2(t) < 1$.

Napięcie wyjściowe ma wtedy postać:

$$u_s(t) = U_m\, e^{-\delta t} \sin(\omega_s t + \Phi) \tag{2}$$

gdzie: $\delta = \xi\omega_o$,

$\omega_s = \omega_o\sqrt{1-\xi^2}$ - pulsacja sygnału,

$U_m = \sqrt{U_o^2 + \left[\frac{U'_o}{\omega_o}\right]^2}$ - amplituda początkowa,

$$\Phi = \operatorname{arctg}\left[\frac{U'_o}{\omega_o U_o}\right]$$ - faza początkowa,

$$\left.\begin{aligned} U_o &= u_s(t_o) \\ U'_o &= u'_s(t_o) \end{aligned}\right\}$$ warunki początkowe wynikające z początkowych ładunków na kondensatorach czwórnika RC.

b) Warunek stabilności: $\lim\limits_{t\to\infty} (U_m e^{-\delta t}) = \text{const} \Leftrightarrow \lim\limits_{t\to\infty} \xi(t) = 0$

Tłumienie ξ jest zależne od parametrów elementów czwórnika RC i od wzmacniania (patrz tab.1 kol.1). W przypadku pracy generatora RC w przetworniku pomiarowym spełnienie warunku stabilności możliwe jest tylko przez dobranie wartości $k=k_{st}$ takiej, aby $\xi=0$ przy akutalnej wartości parametru czujnika (tab.1 kol.2). Zadanie to w praktycznych rozwiązaniach realizuje układ stabilizacji amplitudy zawarty w bloku wzmacniacza (rys.2)

Przykładowe rozwiązania (wg [5,6]) układów stabilizacji amplitudy pokazano na rys.4. Ogólnie można stwierdzić, że są to układy automatycznej regulacji zapewniające stałość pewnje normy (np. wartości skutecznej, szczytowej lub średniej) napięcia wyjściowego. Pożądaną cechą tych układów jest pewna inercja, tak duża, aby układ wzmacniacza można było traktować jako liniowy, tzn. aby zmiany wzmocnienia nie zachodziły pod wpływem chwilowych wartości sygnału wyjściowego $u_{wy}(t)$. Ze względu na inercję układu stabilizacji amplitudy spełnienie warunku stabilności możliwe jest tylko wówczas, gdy wielkość wejściowa (a zatem i parametr czujnika) jest stała. Jeżeli warunek ten jest spełniony, to częstotliwość sygnału na wyjściu przetwornika wynosi $\omega_s = \omega_o$ i jest związana z wielkością wejściową zależnością wynikającą ze wzorów w tabeli 1,kol 3, o postaci końcowej zależnej od charakterystyki statycznej czujnika (czujników).

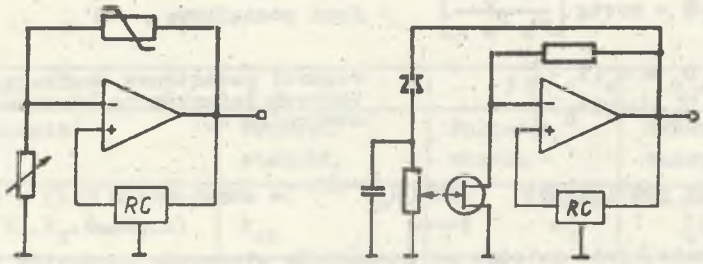
Układ stabilizacji amplitudy powinien zapewnić nienasycanie się wzmacniacza, ponieważ gdyby miało ono miejsce, generator nie mógłby być opisany ogólnym równaniem (1).

3. Praca dynamiczna

Przy pomiarach wielkości wejściowej X zmieniającej się w czasie warunek stabilności nie jest spełniony. Układ elektryczny generatora w przypadku dowolnej funkcji X(t) staje się układem parametrycznym, określenie postaci czasowej sygnału wyjściowego i jego częstotliwości wymaga analizy numerycznej.

Właściwości dynamiczne przetworników pomiarowych można charakteryzować [7] badając ich odpowiedź na wymuszenie skokowe, np. o postaci:

$$X(t) = X_o + X_m \mathbb{1}(t-t_o) \tag{3}$$



Rys.4 Przykładowe układy stabilizacji amplitudy
Fig.4 Exemplary systems for amplitude stablilzation

Prowadzi to do zmian parametru czujnika wg zależności:

$$P(t) = P_0 + P_m \, 1(t-t_o) \tag{4}$$

a w takiej sytuacji dla $t > t_o$ jest $P(t) = P_0 + P_m = const$, wobec tego analiza odpowiedzi skokowej przetwornika może bazować na przedstawionym w poprzednim punkcie ogólnym równaniu dla sygnału wyjściowego (1).

Jeżeli przed zmianą wielkości wejściowej ($t < t_o$) generator spełniał warunek stabilności, to po zmianie tej wielkości możliwe są dwie sytaucje

a) $\xi(t_o, P_0+P_m) > 1$ - warunek generacji nie jest spełniony,

b) $\xi(t_o, P_0+P_m) < 1$ - warunek generacji jest spełniony

<u>ad a</u>) W tym przypadku nastąpi zerwanie dragań - przetwornik przestaje generować sygnał wyjściowy na czas potrzebny układowi stabilizacji amplitudy do ponownego wzbudzenia generatora. Czas ten jest wówczas czasem odpowiedzi przetwornika. Oszacowanie jego wartości wymaga analizowania procesu wzbudzania generatora, przy warunkach początkowych określonych przez ładunki na kondensatorach w chwili t_o, dla konkretnej realizacji układu stabilizacji amplitudy. Sytuacja taka w przypadku pomiarów dynamicznych nie zawsze jest dopuszczalna, ponieważ do czasu wzbudzenia generatora tracona jest informacja pomiarowa. Przy projektowaniu przetworników do pomiarów dynamicznych celowe jest zapewnienie spełnienia warunku generacji dla dowolnych zmian wielkości wejściowej (w zakresie dopuszczalnym).

<u>ad b)</u> W takiej sytuacji przetwornik generuje okresowy sygnał wyjściowy o postaci czasowej danej równaniem (2). Częstotliwość tego sygnału wynosi

$$\omega_s(t) = \omega_o \sqrt{1 - \xi^2(t)} \xrightarrow[t \to \infty]{} \omega_o \tag{5}$$

Powstaje zatem pewien błąd dynamiczny, który można określić następująco:

$$\delta_d(t) = \omega_s(t) - \omega_o$$

lub

$$\delta_d^o(t) = \frac{\omega_s(t) - \omega_o}{\omega_o} = \sqrt{1 - \xi^2(t)} - 1 \leq 0 \qquad (6)$$

Wartości tego błędu są zależne od czasu ze względu na działanie układu stabilizacji amplitudy. Ponieważ układ ten na ogół jest układem elektrycznie nieliniowym, to wartości δ_d są zależne także od amplitudy zmiany wielkości wejściowej. Błąd ten osiąga maksymalne wartości przy skokowych zmianach wielkości wejściowej. Wynika to z inercji układu stabilizacji amplitudy - im wolniejsze zmiany na wejściu przetwornika, tym "bliżej" spełnienia warunku stabilności. Czas odpowiedzi przetwornika może być w tym przypadku określony jako czas potrzebny na to, aby błąd dynamiczny był mniejszy (co do modułu) niż postulowana wartość maksymalna ($\delta_{d\ max}$). Jeżeli przetwornik jest dynamicznie nieliniowy, to czas ten może zależeć od amplitudy skoku wielkości wejściowej.

Możliwe jest takie zaprojektowanie układu generatora aby nawet przy amplitudzie zmian wielkości wejściowej równej zakresowi przetwarzania spełniony był warunek: $\delta_d(t_o) < \delta_{d\ max}$. Wówczas już pierwszy wynik po zmianie wielkości wejściowej (chwila t_o) jest obarczony błędem mniejszym od dopuszczalnego. Wymaga to określenia zależności błędu maksymalnego od: parametrów czwórnika RC, wzmocnienia początkowego (tzn. wartości k_{st} wg. tab.1 dla $t < t_o$ odpowidającej $P=P_o$) oraz od amplitudy skoku wielkości wejściowej. Na podstawie takiej zależności możliwe jest dobranie wartości elementów R i C zapewnaijących wystarczająco mały błąd dynamiczny. Sposób postępowania zostanie zilustrowany przykładem.

Przykład

Należy dobrać wartości elementów R_1, R_2 i C_1 dla czwórnika wg układu 1 na rys.2, tak aby błąd dynamiczny nie przekraczał δ^o_{dmax}. Czujnikiem jest element C_2. Wielkość wejściowa zmienia się skokowo wg zależności (3)

Przyjmujemy oznaczenia: $C_p = C_2(t < t_o)$ - wartość początkowa,
$C_k = C_2(t \geq t_o)$ - wartość końcowa.

Na podstawie zależności (6) można obliczyć wartość tłumienia powodującą określony błąd dynamiczny:

$$\xi(t_o) = \pm \sqrt{1 - (\delta_d^o + 1)^2}, \qquad (7)$$

Jednocześnie można określić tłumienie, jakie wystąpi w chwili t_o przez wstawienie do wzoru w tab.1 kol.1 wartości k_{st} obliczonej dla $C_2 = C_p$ (ze względu na inerację układu stabilizacji amplitudy), uzyskując wynik:

$$\xi(t_o) = \frac{C_k - C_p}{\sqrt{C_k}} \cdot \sqrt{\frac{R_2}{R_1 C_1}} \qquad (8)$$

<u>Uwaga</u>: Odpowiednie zależności dla wszystkich układów czwórników wyrażające wartość tłumienia dla chwili t_o przy skokowej zmianie wielkości wejściowej, jeżeli czujnikiem byłyby element C_2, podano w tablicy 1 w kolumnie 4.

Porównując wyrażenia (7) i (8) można dobrać parametry R_1, R_2 i C_1. Jeżeli założyć, że $R_1=R_2$, to otrzymamy:

$$C_1 = \frac{(C_k-C_p)^2}{C_k} \cdot \frac{1}{1-(1+\delta_d^o)^2} \tag{9}$$

Należy zauważyć, że wartość tłumienia uzyskana ze zworu (8) może być dodatnia lub ujemna, w zależności od kierunku skoku wielkości wejściowej. Odpowiada jej dodatnia lub ujemna wartość we wzorze (7). W celu dobrania parametrów czwórnika w sytuacji najniekorzystniejszej (błąd maksymalny) należy założyć skok "w dół" (od $C_p=C_{max} \hat{=} X_{max}$ do $C_k=C_{min} \hat{=} X=0$), ponieważ odpowiada mu większa wartość modułu tłumienia. W rezultacie przy założonym błędzie dopuszczalnym $\delta_{d\ max}^o$ należy przjąć:

$$C_1 = \frac{(C_{min}-C_{max})^2}{C_{min}} \cdot \frac{1}{1-(1+\delta_{d\ max}^o)^2} \tag{10}$$

Np. przy $C_{min}=0{,}2$ nF, $C_{max}=1$ nF otrzymamy dla:

$\delta_{d\ max}^o = -0{,}2$ (20%) $C_1 = 9$ nF,

$\delta_{d\ max}^o = -0{,}02$ (2%) $C_1 = 81$ nF

W analogiczny sposób można dobrać elementy każdego z układów na rys.2.

4. Uwagi końcowe

Podsumowując wyniki przytoczonych rozważań można stwierdzić, że:

a) Przetworniki pomiarowe z wyjściem częstotliwościowym zbudowane w oparciu o generatory RC wykazują nieliniowość dynamiczną.

b) Określenie błędu dynamicznego dla dowolnej czasowej postaci wielkości wejściowej jest w ogólnym przypadku niemożliwe. Można jednakże stwierdzić, że błąd ten jest maksymalny przy skokowych zmianach na wejściu.

c) Możliwe jest analityczne określenie maksymalnej wartości błędu dynamicznego odpowiadającego skokowej zmianie wielkości wejściowej o zadanej amplitudzie. Możliwe jest takie dobranie elementów układu przetwornika, aby błąd ten nie przekroczył wartości przyjętej jako dopuszczalnej.

d) Analizując zależności zawarte w kolumnie 2 tablicy 1, wynikające z warunku stabilności, można zauważyć, że przy zastosowaniu czujnika złożonego z dwóch sekcji spełniających warunek $R_1=K_rR_2$ lub $C_1=K_cC_2$ (K_r i K_c - stałe) w całym zakresie pomiarowym, warunek stabilności byłby spełniony (k_{st}=const) niezależnie od wartości wielkości mierzonej.

Przetwornik z takim czujnikiem nie wykazywałby nieliniowości ani nawet błędów dynamicznych, byłby również liniowy statycznie. Zadaniem układu stabilizacji amplitudy byłaby wówczas jedynie korekcja nieidealnej zbieżności charakterystyk statycznych obu sekcji czujnika.

LITERATURA

[1] Nowickij P.W., Knorring W.G., Gutnikow W.C.: Cifrowyje pribory s czastotnymi datczikami. Energia, Leningrad 1970.

[2] Tränkler H.R.: Die Technik des digitalen Messens. R. Oldenbourg Verlag München, Wien 1976.

[3] Zagajewski T., Malzacher S., Kwieciński A.: Elektronika przemysłowa WNT, Warszawa 1972.

[4] Żakowski W.: Matematyka cz.IV, WNT Warszawa 1974.

[5] Pawłowski J.: Podstawowe układy elektroniczne. Wzmacniacze i generatory. WKiŁ, Warszawa 1980.

[6] Kulka Z., Nadachowski M.: Zastosowanie wzmacniaczy operacyjnych. WNT, Warszawa 1986.

[7] Hagel R., Zakrzewski J.: Miernictwo dynamiczne. WNT, Warszawa, 1984.

[8] Sahner R.: Wstęp do miernictwa cyfrowego, WKiŁ, Warszawa, 1982

Recenzent: doc. dr inż. Zbigniew Kędryna

Wpłynęło do Redakcji dnia 1 grudnia 1988 r.

ДИНАМИКА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ЧАСТОТНЫМ ВЫХОДОМ, СОДЕРЖАЩИХ RC ГЕНЕРАТОРЫ

Р е з ю м е

Представлены проблемы, касающиеся преобразователей с RC генератором гармонических колебаний. Частота выходного сигнала зависит от параметра R или C измерительного датчика, который заключён в RC четырёхполюсника. Обсуждены только четырёхполюсники II-порядка. Представлен метод анализа динамики вышеупомянутого типа преобразователей, определена причина динамических погрешностей и указана их динамическая нелинейность. Представлен принцип подборки элементов системы генератора для получения динамических погрешностей, не превышающих допустимых норм.

DYNAMICS OF FREQUENCY OUTPUT MEASUREMENT TRANSDUCERS WITH RC-OSCILLATORS

S u m m a r y:

The problems refer ring to the measurement transducers with RC-oscillators are presented. The frequency of the output signal dependeds on parametr R or C of the sensor, which is an element of the RC-four-terminal network. Only the second order RC-four-terminal networks are described. A method of analysis of the dynamics of such transducers is presented; the reason of dynamic errors is explained and the dynamic nonlinearity is shown. The principle of selecting the generator's elements to achieve the admissible dynamic errors is described.

KT 19