

Jerzy W. MAZUR

ELEKTRODYNAMICZNY PRZETWORNIK ZE SPRĘŻENIEM ZWROTNYM
DO POMIARU DRGAŃ

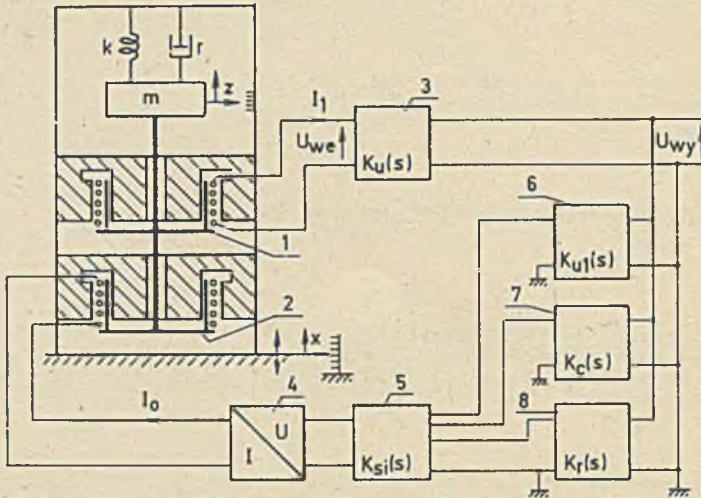
Streszczenie. W pracy omówiono możliwość kształtowania charakterystyk częstotliwościowych inercyjnego przetwornika elektrodynamicznego do pomiaru drgań przy wykorzystaniu elektromechanicznego sprzężenia zwrotnego.

W celu przeanalizowania możliwości kształtowania charakterystyk częstotliwościowych przy wykorzystaniu sprzężenia zwrotnego, założmy w ogólnym przypadku, że sygnał U_{wb} , uzyskiwany z przetwornika pomiarowego, służącego do pomiaru drgań, wzmocniony przez wzmacniacz napięciowy K_u , zostaje podany na konwerter U/I (źródło prądowe sterowane napięciem), a następnie na konwerter I/F (działający na masę sejsmiczną przetwornika o siłę F uzależnioną od prądu I). Jeżeli przyjmiemy, że układ jest liniowy, to konwerter I/F będzie wywierał na masę sejsmiczną siłę, która w ogólnym przypadku może być proporcjonalna do przemieszczenia względnego $z(t)$, prędkości względnej $v_z(t) = \frac{dz(t)}{dt}$ oraz do przyspieszenia względnego $a_z(t) = \frac{d^2z(t)}{dt^2}$. Jeżeli rolę przetwornika pomiarowego będzie spełniał przetwornik elektrodynamiczny (dostarczający sygnał napięciowy proporcjonalny do prędkości względnej $v_z(t)$), to w celu uzyskania sygnałów proporcjonalnych do przemieszczenia względnego i przyspieszenia względnego trzeba zastosować dodatkowo układ całkujący i różniczkujący. Konwerterem I/F może być natomiast cewka umieszczona w szczelinie magnesu trwałego przetwornika. Strukturę analizowanego przetwornika ze sprzężeniem zwrotnym przedstawiono na rys. 1.

Ponieważ wprowadzone do układu wzmacniacze różniczkujący i całkujący są wzmacniaczami odwracającymi fazę, to w celu zapewnienia jednakowego znaku również dla sygnału proporcjonalnego do prędkości masy sejsmicznej (proporcjonalnego do U_{wy}) zastosowano dodatkowy wzmacniacz odwracający fazę - wzmacniacz "6" na rys. 1 - dla tego toru sygnału.

Operatorowe równanie ruchu części mechanicznej przetwornika można zapisać w postaci:

$$msv_z(s) + rv_z(s) + \frac{1}{s} kv_z(s) = F(s) - [F_1(s) + F_0(s)] \quad (1)$$



Rys. 1. Uproszczona budowa przetwornika elektrodynamycznego ze sprzężeniem zwrotnym

1 - cewka pomiarowa w polu magnesu trwałego, 2 - cewka sprzężenia zwrotnego (cewka konwertera I/F), 3 - wzmacniacz napięciowy, 4 - konwerter U/I , 5 - wzmacniacz sumujący, 6 - wzmacniacz odwracający fazę, 7 - wzmacniacz całkujący, 8 - wzmacniacz różniczkujący

gdzie w postaci operatorowej:

$$F(s) = -ms^2x(s)$$

$$F_1(s) = B_m l_p I_1(s)$$

$$F_0(s) = B_s l_s I_0(s) = K_{cs} I_0(s)$$

$$B_m$$

$$l_p$$

$$B_s$$

$$l_s$$

$$K_{cs} = B_s l_s$$

$$K_{cp} = B_m l_p$$

$$k$$

$$r$$

- siła wymuszająca,

- siła tłumienia powstająca wskutek przepływu prądu $I_1(t)$ w cewce pomiarowej,

- siła oddziaływania konwertera I/F na masę sejsmiczną;

- indukcja magnetyczna w szczelinie, w której przemieszcza się cewka pomiarowa,

- długość czynna cewki pomiarowej,

- indukcja magnetyczna w szczelinie, w której przemieszcza się cewka sprzężenia zwrotnego,

- długość czynna cewki sprzężenia zwrotnego,

- stała cewki sprzężenia zwrotnego,

- stała cewki pomiarowej,

- stała sprężystości zawieszenia masy sejsmicznej,

- stała tłumienia elementu tłumiącego przetwornika,

- m - masa sejsmiczna przetwornika,
- $v_z(s)$ - prędkość względna masy sejsmicznej.

Przekształcanie równania (1) pozwala uzyskać zależność opisującą elektryczny schemat zastępczy części mechanicznej przetwornika:

$$E(s) = \frac{I_{we}(s) - I_1(s) - I'_o(s)}{\frac{1}{R} + sC + \frac{1}{sL}} \quad (2)$$

gdzie:

$E(s) = K_{cp} v_z(s)$ - SEM indukująca się w cewce pomiarowej,

$I'_o(s) = \frac{K_{cs}}{K_{cp}} I_o(s)$ - prąd oddziaływania obwodu sprzężenia zwrotnego wprowadzony na stronę cewki pomiarowej,

$R = \frac{K_{cp}^2}{r}$ - rezystancja odpowiadająca stałej tłumienia r ,

$C = \frac{m}{K_{cp}^2}$ - pojemność odpowiadająca masie sejsmicznej m ,

$L = \frac{K_{cp}^2}{k}$ - indukcyjność odpowiadająca stałej sprężystości k ,

$I_{we}(s) = \frac{F(s)}{K_{cp}}$ - prąd odpowiadający sile wymuszającej.

Uwzględniając zależność:

$$E_p(s) = K_{cs} v_z(s) = \frac{K_{cs}}{K_{cp}} E(s)$$

gdzie:

$E_p(s)$ - siła elektromotoryczna indukująca się w poruszającej się z prędkością $v_z(s)$ cewce sprzężenia zwrotnego,

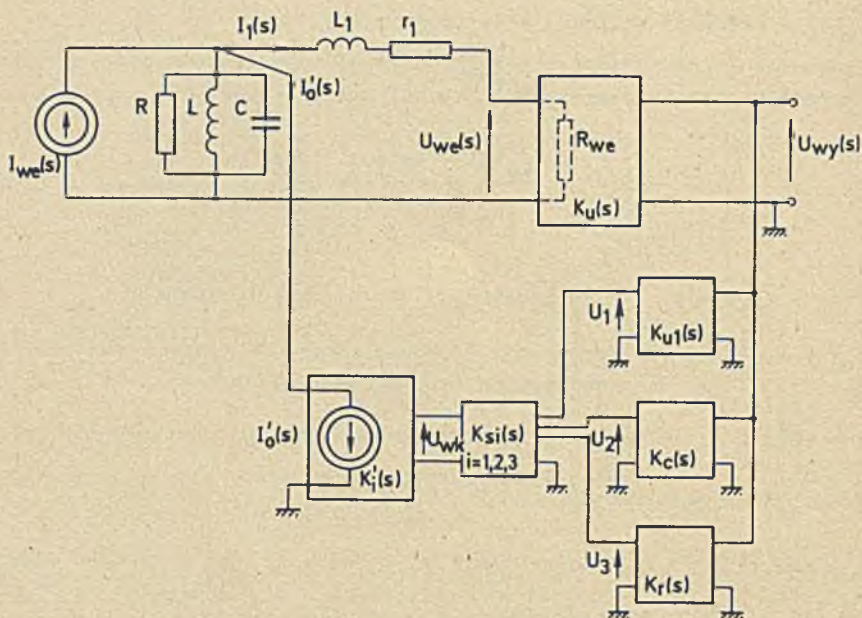
można uzyskać elektryczny schemat zastępczy inercyjnego przetwornika elektrodynamicznego z dodatkową cewką sprzężenia zwrotnego wraz ze wzmacniaczem pomiarowym i układami wchodzącymi w skład pętli sprzężenia zwrotnego. Schemat ten przedstawiono na rys. 2.

Na schemacie zastępczym z rys. 2 zastąpiono konwerter U/I o transmitancji operatowej

$$K_i(s) = \frac{I_o(s)}{U_{wk}(s)}$$

konwerterem U/I'_o o transmitancji

$$K'_1(s) = \frac{I'_o(s)}{U_{wk}(s)} = \frac{K_{cs}}{K_{cp}} K_i(s)$$



Rys. 2. Schemat zastępczy przetwornika elektrodynamycznego ze sprzężeniem zwrotnym

gdzie:

$U_{wk}(s)$ - napięcie wyjściowe wzmacniacza sumującego przy czym

$$U_{wk}(s) = K_{s1}(s)U_1(s) + K_{s2}(s)U_2(s) + K_{s3}(s)U_3(s)$$

gdzie:

$K_{s1}(s)$, $K_{s2}(s)$, $K_{s3}(s)$ - częściowe transmitancje wzmacniacza sumującego,

$U_1(s) = K_{u1}(s)U_{wy}(s)$ - napięcie uzależnione od prędkości względnej cewki pomiarowej,

$U_2(s) = K_c(s)U_{wy}(s)$ - napięcie uzależnione od przemieszczenia względnego,

$U_3(s) = K_r(s)U_{wy}(s)$ - napięcie uzależnione od przyspieszenia względnego,

$K_c(s)$ - transmitancja układu całkującego,

$K_r(s)$ - transmitancja układu różniczkującego.

Przy założeniu, że transmitancje poszczególnych układów z rys. 2 mają wartość:

$K_U(s) = K_U$ - wzmacniacz nieodwracający fazy,

$K_r(s) = -sT_1$ - układ różniczkujący,

$K_{U1}(s) = -KU_1$ - wzmacniacz dodatkowy (odwracający fazę),

$K_C(s) = -\frac{1}{sT_2}$ - układ całkujący,

$K_{s1}(s) = -K_{s1}$

$K_{s2}(s) = -K_{s2}$

$K_{s3}(s) = -K_{s3}$

$K_1'(s) = K_1 \frac{K_{cs}}{K_{cp}}$

oraz że wzmacniacz K_U ma dużą rezystancję wejściową, taką, że

$$R_{we} \gg r_1 + sL_1$$

gdzie:

r_1 - rezystancja własna cewki pomiarowej,

L_1 - indukcyjność cewki pomiarowej,

można uzyskać zależność

$$K(s) = \frac{U_{wy}(s)}{I_{we}(s)}$$

będącą transmitancją operatorową schematu zastępczego.

Jeśli uwzględni się ponadto, że

$$I_{we}(s) = \frac{F(s)}{K_{cp}}$$

gdzie:

$F(s) = -smV_x(s)$ - siła wymuszająca,

$V_x(s)$ - prędkość drgań obiektu badanego,

to można znaleźć zależność między napięciem wyjściowym układu $U_{wy}(s)$ i sygnałem wejściowym $V_x(s)$ w postaci:

$$K_V(s) = \frac{U_{wy}(s)}{V_x(s)} = K_U K_{cp} A^* \frac{(-s^2)}{s^2 + 2D^* \omega_0^* s + \omega_0^{*2}} \quad (3)$$

gdzie:

$A^* = \frac{C}{C + C_d}$ - współczynnik zmiany czułości przetwornika w wyniku działania sprzężenia zwrotnego proporcjonalnego do względnego przyspieszenia,

$$\omega^* = \frac{\frac{1}{R} + \frac{1}{R_{we}} + \frac{1}{R_d}}{2\sqrt{(C+C_d)\left(\frac{1}{L} + \frac{1}{L_d}\right)}} - \text{wypadkowe względné tłumienie przetwornika powsta-} \\ \text{stające w wyniku działania tłumienia mechanicz-} \\ \text{nego, prądu płynącego w obwodzie cewki pomia-} \\ \text{rowej oraz działania obwodu sprzężenia zwrot-} \\ \text{nego,}$$

$$\omega_0^* = \sqrt{\frac{\frac{1}{L} + \frac{1}{L_d}}{C + C_d}} - \text{pulsacja nietłumionych drgań własnych (pulsacja} \\ \text{naturalna) przetwornika ze sprzężeniem} \\ \text{zwrotnym,}$$

$$R_d = \frac{1}{K_u K'_1 K_{u1} K_{s1}} - \text{rezystancja reprezentująca wpływ sygnału sprzę-} \\ \text{żenia zwrotnego proporcjonalnego do prędkości} \\ \text{względnej cewki pomiarowej,}$$

$$C_d = T_1 K_u K'_1 K_{s3} - \text{pojemność reprezentująca wpływ sygnału sprzę-} \\ \text{żenia zwrotnego proporcjonalnego do przyspieszenia} \\ \text{względnego,}$$

$$L_d = \frac{T_2}{K_u K'_1 K_{s2}} - \text{indukcyjność reprezentująca wpływ sygnału pro-} \\ \text{porcjonalnego do przyspieszenia względnego.}$$

Na podstawie zależności (3) można stwierdzić, że wprowadzenie sprzężenia zwrotnego w założonej postaci nie zmienia charakteru układu (rzędu równania różniczkowego opisującego zachowanie się układu), lecz powoduje zmianę parametrów charakteryzujących przetwornik - pulsacji drgań własnych, tłumienia względnego i czułości.

Transmitancję operatorową układu - równanie (3) - uzyskano przy założeniu ujemnego sprzężenia zwrotnego, czyli przy założeniu, że siły powstające w wyniku działania sprzężenia są przeciwnie skierowane niż siła wymuszająca. Przy tym typie sprzężenia odpowiednie współczynniki sprzężenia zwrotnego dodają się do stałej sprężystości sprężyny, stałej tłumienia i masy sejsmicznej przetwornika. W praktyce sprzężenie zwrotne będzie sprzężeniem ujemnym dla danego parametru ruchu, gdy odpowiednia transmitancja pętli sprzężenia zwrotnego będzie spełniała warunek:

$$R_d > 0$$

lub

$$C_d > 0$$

lub

$$L_d > 0$$

Wpływ sprzężenia zwrotnego na parametry i charakterystyki inercyjnego przetwornika elektrodynamicznego

Lp.	Rodzaj sprzężenia zwrotnego		Wpływ sprzężenia zwrotnego na parametry przetwornika		Wpływ sprzężenia zwrotnego na amplitudowe charakterystyki częstotliwościowe
1.	Sprzężenie zwrotne proporcjonalne do względnego przemieszczenia masy sejsmicznej	Ujemne sprzężenie zwrotne $\frac{1}{L_d} > 0$	$\omega_o^* > \omega_o$ $D^* < D$	$A^* = 1$	
	$\frac{1}{L_d} \neq 0$ $\frac{1}{R_d} = 0$ $C_d = 0$	Dodatnie sprzężenie zwrotne $\frac{1}{L_d} < 0$	$\omega_o^{**} < \omega_o$ $D^{**} > D$	$A^* = 1$	
2.	Sprzężenie zwrotne proporcjonalne do względnej prędkości masy sejsmicznej	Ujemne sprzężenie zwrotne $\frac{1}{R_d} > 0$	$\omega_o^* = \omega_o$ $D^* > D$	$A^* = 1$	
	$\frac{1}{R_d} \neq 0$ $\frac{1}{L_d} = 0$ $C = 0$	Dodatnie sprzężenie zwrotne $\frac{1}{R_d} < 0$	$\omega_o^{**} = \omega_o$ $D^{**} < D$	$A^* = 1$	
3.	Sprzężenie zwrotne proporcjonalne do względnego przyspieszenia masy sejsmicznej	Ujemne sprzężenie zwrotne $C_d > 0$	$\omega_o^* < \omega_o$ $D^* < D$	$A^* < 1$	
	$C_d \neq 0$ $\frac{1}{R_d} = 0$ $\frac{1}{L_d} = 0$	Dodatnie sprzężenie zwrotne $C_d < 0$	$\omega_o^{**} > \omega_o$ $D^{**} > D$	$A^* > 1$	

Elektrodynamyczny przetwornik ze sprzężeniem...

natomiast dodatnie sprzężenie zwrotne można uzyskać przy spełnieniu warunku odwrotnego.

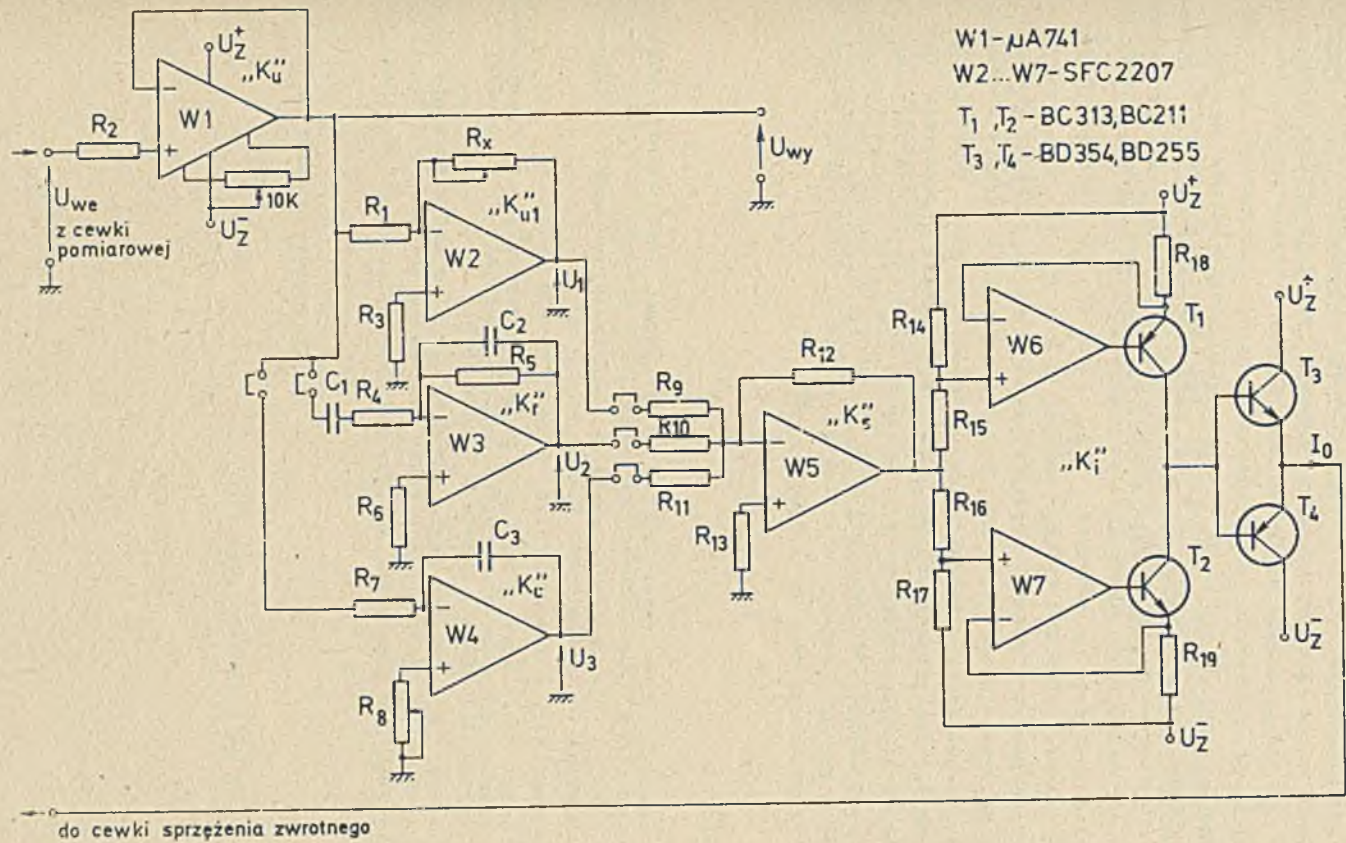
Możliwe do uzyskania zmiany parametrów i charakterystyk przetworników, powstające w wyniku działania sprzężenia zwrotnego, zestawiono w tablicy 1, przy czym występujące w niej wielkości ω_0 i D są wartościami pulsacji nietłumionych drgań własnych i tłumienia względnego części mechanicznej przetwornika inercyjnego bez sprzężenia zwrotnego.

Z zestawienia dokonanego w tablicy 1 wynika, że przez zmianę współczynników sprzężenia zwrotnego można realizować kształtowanie amplitudowej charakterystyki częstotliwościowej, a więc zmieniać pulsację naturalną przetwornika, tłumienie względne oraz czułość przetwornika. Przykładowo, rozszerzenia płaskiej części charakterystyki amplitudowej wibrometru, czyli obniżenia pulsacji naturalnej przetwornika, można dokonać przez wprowadzenie dodatniego sprzężenia zwrotnego, proporcjonalnego do względnego przemieszczenia masy sejsmicznej ($L_d < 0$). Sprzężenie takie powoduje jednocześnie wzrost tłumienia względnego. Zastosowanie tego typu sprzężenia może napotkać pewne trudności ze względu na to, że siła powstająca w wyniku działania sprzężenia zwrotnego jest wówczas orzeciwnie skierowana do siły oddziaływania sprężyny. Może to prowadzić do dużych wychyleń statycznych masy sejsmicznej (cewki pomiarowej) pod wpływem siły ciężkości oraz do niestabilności układu.

Obniżenie pulsacji naturalnej można również uzyskać, wprowadzając ujemne sprzężenie zwrotne proporcjonalne do względnego przyspieszenia masy sejsmicznej ($C_d > 0$). Rozwiązanie takie prowadzi jednak równocześnie do zmniejszenia tłumienia względnego przetwornika, a zwłaszcza do obniżenia jego czułości.

Natomiast wprowadzenie ujemnego sprzężenia zwrotnego proporcjonalnego do względnej prędkości masy sejsmicznej umożliwi uzyskanie tłumienia względnego przetwornika o żądanej wartości. Ten typ sprzężenia zwrotnego pozwala więc na optymalny dobór wartości tłumienia względnego w zależności od wymagań i przeznaczenia przetwornika oraz na pewną korekcję charakterystyki częstotliwościowej w okolicach pulsacji naturalnej (bez zmiany czułości i pulsacji naturalnej). Zastosowanie tego typu sprzężenia jest stosunkowo najłatwiejsze, gdyż wykorzystanie przetwornika elektrodynamicznego jako przetwornika pomiarowego pozwala uzyskać sygnał napięciowy proporcjonalny do względnej prędkości masy sejsmicznej, który można wykorzystać również do sterowania konwerterem U/I, bez konieczności stosowania układów całkujących i różniczkujących. W przetworniku z takim sprzężeniem zwrotnym część mechaniczna może być pozbawiona tłumika i zadaniem obwodu sprzężenia zwrotnego staje się wówczas zwiększenie tłumienia względnego, co realizuje się przez wykorzystanie ujemnego sprzężenia zwrotnego ($R_d > 0$), a ten rodzaj sprzężenia nie zagraża stabilności układu.

Zmianę znaku sprzężenia zwrotnego można realizować przez odwrócenie biegunowości dołączenia cewki sprzężenia zwrotnego lub - jeżeli zmiana znaku



- W1 - μ A741
- W2...W7 - SFC2207
- T₁, T₂ - BC313, BC211
- T₃, T₄ - BD354, BD255

Rys. 3. Schemat ideowy części elektronicznej przetwornika ze sprzężeniem zwrotnym

ma obejmować tylko jeden z torów pętli sprzężenia zwrotnego - przez wprowadzenie w tym torze dodatkowego wzmacniacza odwracającego fazę.

W celu praktycznego sprawdzenia uzyskanych wyników analizy przetwornika elektrodynamicznego ze sprzężeniem zwrotnym zbudowano na podstawie schematów z rys. 1 i 2 układ elektroniczny przedstawiony na rysunku 3. W układzie tym wzmacniacz W1 jest wzmacniaczem napięciowym, wzmacniacz W2 - dodatkowym wzmacniaczem odwracającym fazę, wzmacniacz W3 - wzmacniaczem różniczkującym, wzmacniacz W4 - wzmacniaczem całkującym, W5 - wzmacniaczem sumującym, a konwerter U/I składa się ze wzmacniaczy W6 i W7 oraz tranzystorów T_1 , T_2 , T_3 i T_4 .

Przeprowadzone pomiary wykazały, że w układzie z rys. 3 wykorzystanie toru ze wzmacniaczem różniczkującym lub całkującym pozwala z dokładnością rzędu 5% obliczyć i nastawić częstotliwość naturalną przetwornika w granicach $\pm 25\%$ w stosunku do wartości, jaką posiada przetwornik bez sprzężenia zwrotnego. Natomiast wykorzystanie toru sprzężenia zwrotnego, przenoszącego sygnał proporcjonalny do względnej prędkości masy sejsmicznej (wzmacniacz W2), pozwala w szerokich granicach regulować tłumienie względne przetwornika (od $D^* = 0,06$ do $D^* = 1$).

LITERATURA

- [1] Basel C.: Neue Möglichkeiten in der Bauart von Schwingungsmessgeräten. Archiv für Technisches Messen, I - October 1958, II - Januar 1959.
- [2] Gik L.D.: Izmerienije wibracii. Izdatielstwo Nauka - Sibirskoje ot-dielienije. Nowosibirsk 1972.
- [3] Jorisz J.I.: Wibrometrija. GNTJML, Moskwa 1963.
- [4] Mazur J.W.: Analiza miernika drgań z elektronicznie regulowanym tłumieniem przetwornika. Materiały konferencyjne - XI Międzyuczelniane Narada Metrologów. Gdańsk - Gdynia 1976.
- [5] Mazur J.W.: Analiza pracy miernika drgań z elektronicznie sterowanym tłumieniem przetwornika. Praca doktorska. Politechnika Śląska 1979.
- [6] Tietze U., Schenk Ch.: Układy półprzewodnikowe. WNT Warszawa 1976.

Recenzent: Doc. dr M. Jastrzębski

Wpłynęło do Redakcji 1.VII.1982 r.

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ
КОЛЕБАНИЙ С ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Резюме

В статье дан анализ возможностей формирования частотных характеристик амплитуды электродинамического измерительного преобразователя колебаний построенного на основе электромеханической обратной связи.

ELECTRODYNAMIC TRANSDUCER WITH ELECTROMECHANICAL FEEDBACK
LOOP FOR MEASUREMENT OF VIBRATION PARAMETERS

Summary

The electrodynamic transducer with the electromechanical feedback loop for the measurements of vibration parameters is described. The possibilities of shaping the gain-frequency response of the transducer are also presented.