ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1974

Seria: Energetyka z. 51 Nr kol. 405

Czesław Graczyk, Andrzej Puszer

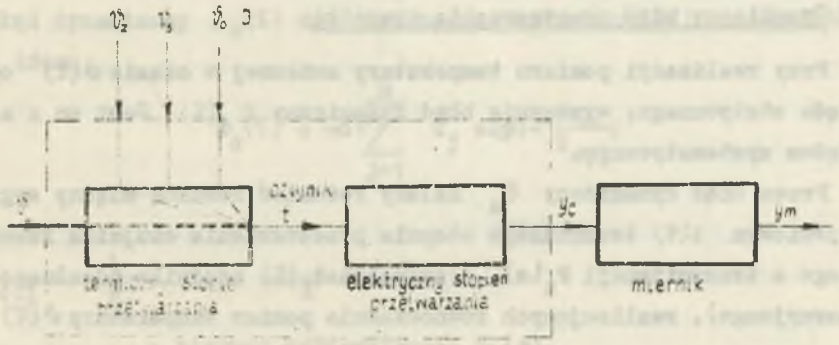
OCENA JAKOŚCI DYNAMICZNEGO PRZETWARZANIA CZUJNIKÓW TERMOMETRYCZNYCH

Streszczenie. Treścią artykułu jest problem określenia i oceny błędu dynamicznego na przykładzie czujników termometrycznych. Podano definicję błędu dynamicznego, a następnie wzory jego oceny za pomocą liniowego kryterium całkowego dla przypadku transmitancji wymiernej i transcendentnej. Teoretyczne rozważania uzupełniono wynikami obliczeń kryterium całkowego czujników oporowych produkcji krajowej.

1. Wstęp

W pomiarach przemysłowych i układach automatycznej regulacji temperatury największe zastosowanie znalazły termometry elektryczne.

Termometr elektryczny składa się z czujnika oraz miernika (rys. 1). W czujniku wyróżniono dwa stopnie przetwarzania: termiczny i elektryczny.



Rys. 1. Schemat blokowy termometru elektrycznego

Termiczny stopień czujnika idealnego przetwarza temperaturę ośrodka mierzonego ϑ w temperaturę t gorącej spoiny termopary lub rezystora termometrycznego w zależności od rodzaju czujnika.

W czujniku rzeczywistym na temperaturę t oddziaływują ponadto: temperatura ϑ_z zamocowania czujnika, temperatura ϑ_s ciał promieniujących znajdujących się w otoczeniu czujnika, temperatura ϑ_o zimnej spoiny termopary lub prąd pomiarowy J w czujniku rezystancyjnym.

W drugim stopniu czujnika temperatura t przetwarzana jest na wielkość elektryczną y_c.

Dla pomiarów temperatur ustalonych wystarczająca jest znajomość charakterystyk statycznych czujnika $y_c(\vartheta)$ oraz błędów statycznych powodowanych wielkościami zakłócającymi. Charakterystyki statyczne są podawane przez producentów czujników i wyznaczenie ich jest stosunkowo proste.

Pomiary temperatur w stanach nieustalonych, szczególnie w ważnych układach automatyki, wymagają znajomości własności dynamicznych czujnika. Własności te dotychczas nie są podawane przez producentów, a do ich wyznaczenia i opisu brak jest jednoznacznej i powszechnie przyjętej metody [1].

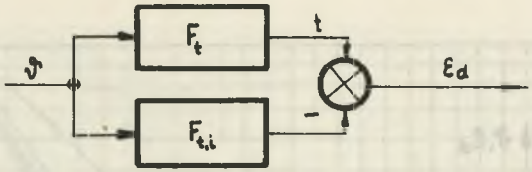
Na własności dynamiczne czujnika decydujący wpływ ma jego termiczny stopień przetwarzania charakteryzujący się, jak tego dowiodły badania, dużą inercją cieplną [2], powodującą powstawanie dynamicznego błędu pomiaru.

2. Dynamiczny błąd przetwarzania czujnika

Przy realizacji pomiaru temperatury zmiennej w czasie $\vartheta(\tau)$ oprócz błędu statycznego, występuje błąd dynamiczny $\varepsilon_d(\tau)$. Jest on z natury błędem systematycznym.

Przez błąd dynamiczny ε_d należy rozumieć różnicę między sygnałem wyjściowym $t(\tau)$ termicznego stopnia przetwarzania czujnika rzeczywistego o transmitancji $P_t(s)$, a sygnałem $t_i(\tau)$ czujnika idealnego (bezinercyjnego), realizujących równocześnie pomiar temperatury $\vartheta(\tau)$ (rys. 2)

$$\varepsilon_d(\tau) = t(\tau) - t_i(\tau) \tag{1}$$



Rys. 2. Schemat blokowy ilustrujący powstawanie dynamicznego błędu pomiaru

W zapisie operatorowym równanie błędu dynamicznego przedstawia się następująco:

$$\varepsilon_d(s) = F_d(s)\ \vartheta(s) \tag{2}$$

gdzie

$$F_d(s) = F_t(s) - F_{t,i}(s) = F_t(s) - 1$$

$$F_t(s) = \frac{B(s)}{D(s)} = \frac{1 + \sum_{k=1}^{m} b_k s^k}{1 + \sum_{j=1}^{n} d_j s^j}$$ – transmitancja termicznego stopnia przetwarzania czujnika

s – parametr całkowego przekształcenia Laplace'a.

Błąd dynamiczny $\varepsilon_d(\tau)$ dla wymuszenia skokowego $\vartheta(\tau) = 1(\tau)\,\Delta\vartheta$, $\Delta\vartheta$ – idem:

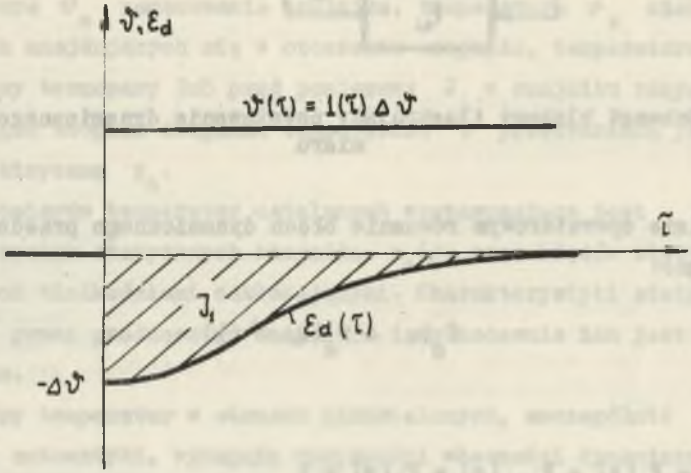
$$\varepsilon_d(\tau) = -\Delta\vartheta \sum_{j=1}^{n} C_j \exp\left(-\frac{\tau}{T_{d,j}}\right) \tag{3}$$

gdzie

$T_{d,j} = -\frac{1}{s_j}$ – stałe czasowe czujnika,

s_j – bieguny transmitancji $F_t(s)$,

$$C_j = \lim_{s \to s_j} \left[\frac{1}{s} F_d(s) \right] \text{ - stałe całkowania.}$$



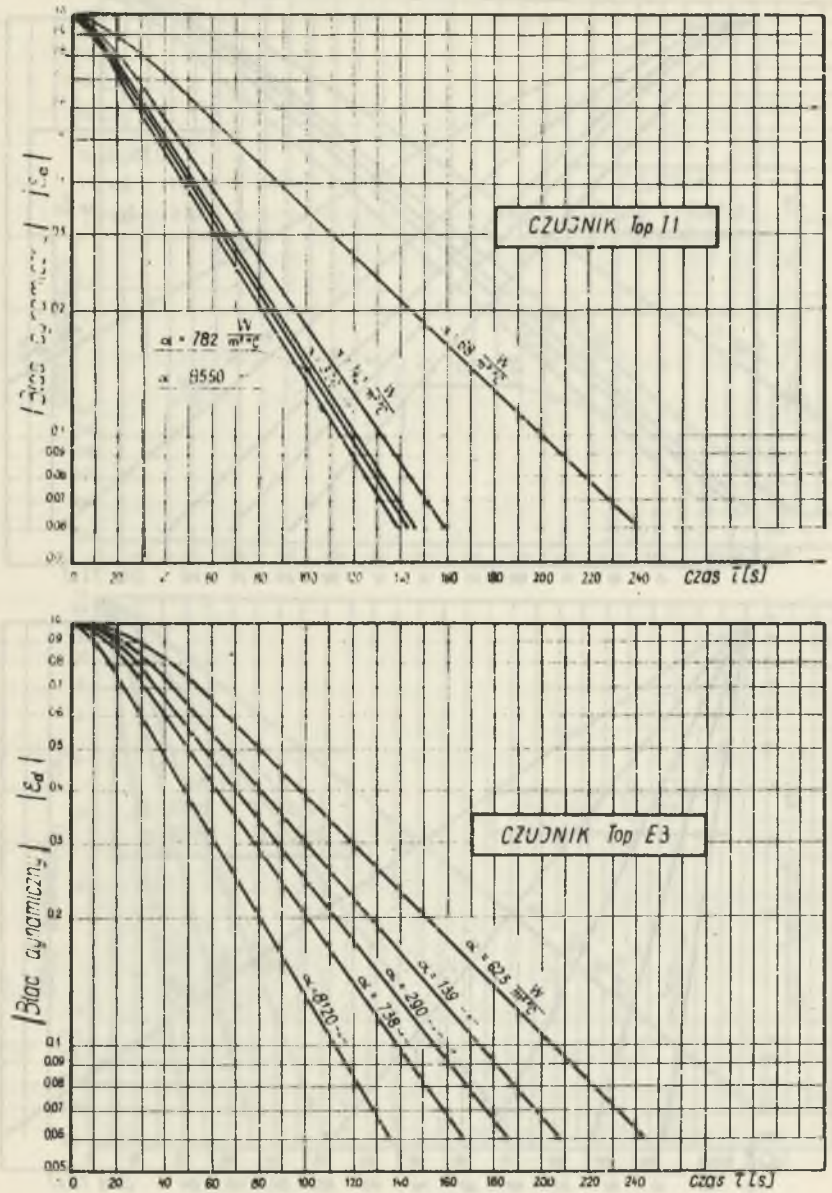
Rys. 3. Przebieg błędu dynamicznego dla skokowej zmiany temperatury ośrodka

Z zależności (3) przedstawionej na rys. 3 wynika, że maksymalna wartość błędu dynamicznego $\varepsilon_{d,max} = -\Delta\vartheta$ występuje przy $\tau = 0$ i następnie maleje do zera wraz z upływem czasu.

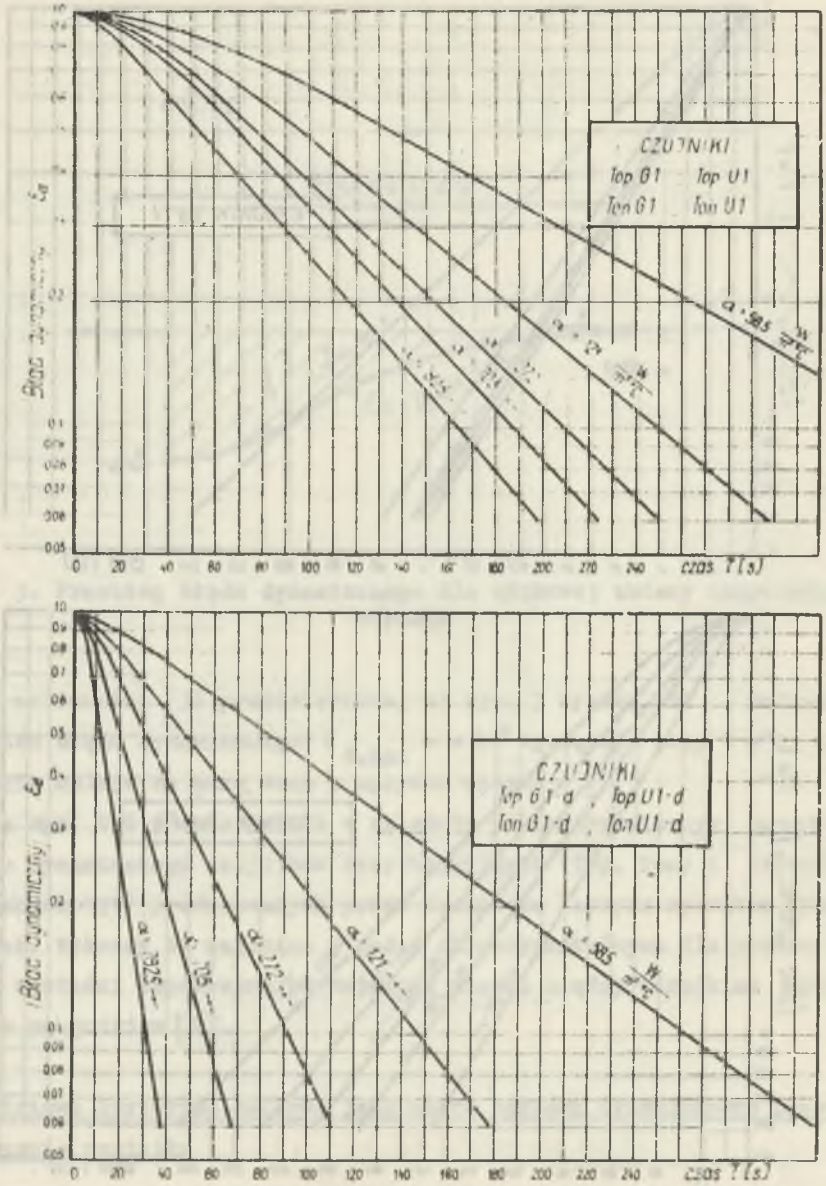
Na rys. 4-6 przedstawiono w układzie półlogarytmicznym przebiegi błędu dynamicznego czujników rezystancyjnych (Top, Ton) i termoelektrycznych (Tt) produkowanych przez Krakowską Fabrykę Aparatów Pomiarowych. Wykresy te uzyskano z badań eksperymentalnych dla pięciu różnych wartości współczynnika wnikania ciepła między ośrodkiem mierzonym a czujnikiem [2].

3. Liniowe kryterium całkowe jako miara jakości dynamicznego przetwarzania czujnika

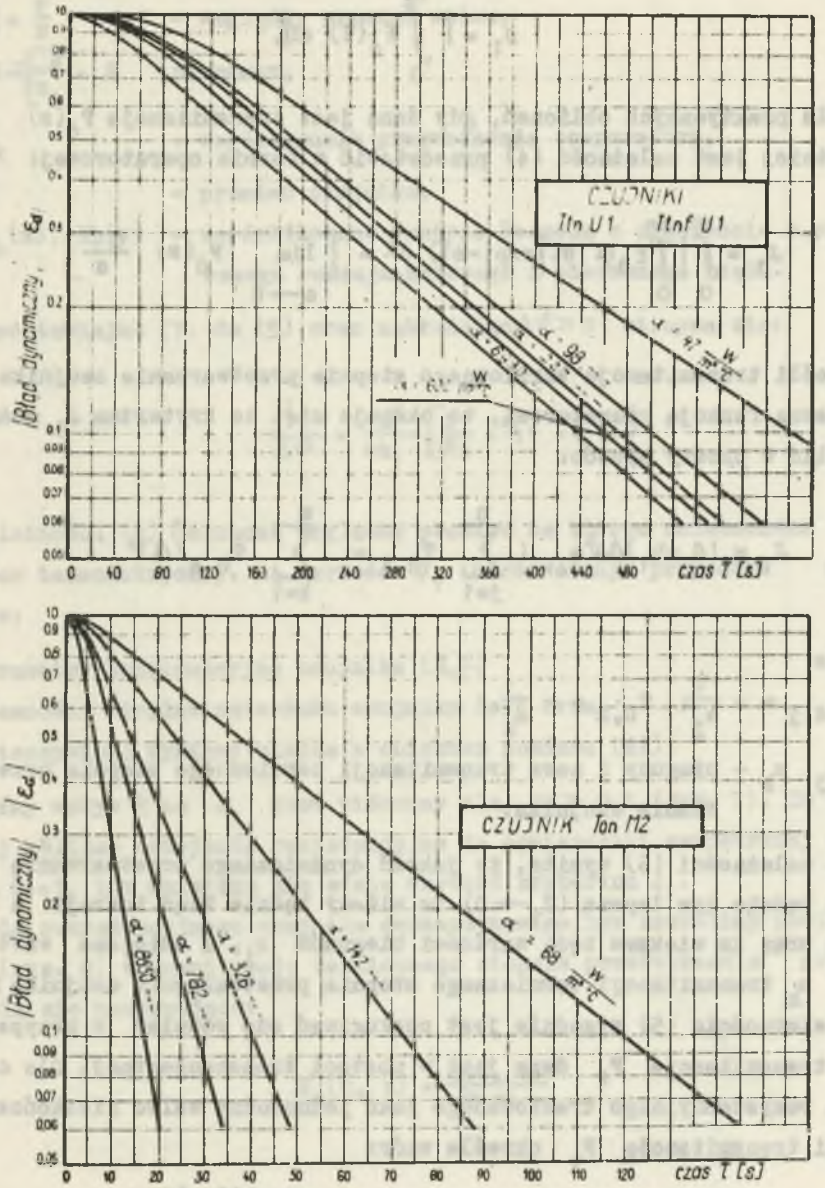
Warunkiem dobrej jakości dynamicznego przetwarzania czujnika jest szybka zbieżności do zera jego błędu dynamicznego ε_d dla $\vartheta(\tau) = 1(\tau)\Delta\vartheta$.



Rys. 4. Przebiegi błędu dynamicznego w półlogarytmicznym układzie współrzędnych



Rys. 5. Przebiegi błędu dynamicznego w półlogarytmicznym układzie współrzędnych



Rys. 6. Przebiegi błędu dynamicznego w półlogarytmicznym układzie współrzędnych

Stąd miarą jakości będzie pole J_1 zawarte między przebiegiem $\varepsilon_d(\tau)$ a osią czasu

$$J_1 = \left| \int_0^\infty \varepsilon_d(\tau)\, d\tau \right|, \tag{4}$$

Dla praktycznych obliczeń, gdy dana jest transmitancja $F_d(s)$ korzystniej jest zależność (4) przedstawić w formie operatorowej:

$$J_1 = \int_0^\infty \left| \int_0^\infty \varepsilon_d(\tau)\, d\tau \right| \exp(-s\tau)\, d\tau = \left[\lim_{s \to 0} F_d(s) \frac{\Delta\vartheta}{s} \right] \tag{5}$$

Jeśli transmitancja termicznego stopnia przetwarzania czujnika jest wymierną funkcją operatorową, to okazuje się, że kryterium J_1 można określić w prosty sposób:

$$J_1 = (d_1 - b_1)\Delta\vartheta = \left(\sum_{j=1}^{n} T_{d,j} - \sum_{k=1}^{m} T_{b,k} \right) \Delta\vartheta \tag{6}$$

gdzie

$T_{d,j} = -\frac{1}{s_j}$, $T_{b,k} = -\frac{1}{a_k}$,

s_j, a_k - bieguny i zera transmitancji termicznego stopnia przetwarzania czujnika.

Z zależności (6) wynika, że jakość dynamicznego przetwarzania czujnika będzie tym lepsza ($J_1 \to 0$) im niższy będzie rząd inercji n czujnika oraz im większe będą wartości biegunów s_j, a mniejsze wartości zer a_k transmitancji termicznego stopnia przetwarzania czujnika $F_t(s)$

Zależnością (5) wygodnie jest posługiwać się również w przypadku, gdy transmitancja F_t dana jest w postaci transcendentnej. Dla czujnika rezystancyjnego traktowanego jako jednorodny walec nieskończenie długi transmitancję F_t określa wzór:

$$F_t(\xi, s) = \frac{t(\xi, s)}{\vartheta(s)} = \frac{Bi\, I_0(\beta_\cdot, \xi)}{Bi\, I_0(\beta) + \beta I_1(\beta)} \tag{7}$$

gdzie

Bi - liczba Biota,

$\xi = \frac{r}{R} = \sqrt{\frac{s}{a_1}}$ - względny promień walca,

$\beta = \sqrt{\frac{s}{a_1}} \cdot R$ parametr,

a_1 - współczynnik przewodzenia temperatury,

R - promień czujnika,

$I_0(x)$, $I_1(x)$ - zmodyfikowane funkcje Bessela o argumencie x, pierwszego rodzaju, zerowego i pierwszego rzędu.

Podstawiając (7) do (5) oraz zakładając $\Delta\vartheta > 0$ otrzyma się:

$$\frac{J_1}{\Delta\vartheta} = \frac{R^2}{4a_1}\left[\frac{2}{Bi} + (1 - \xi^2)\right] \tag{8}$$

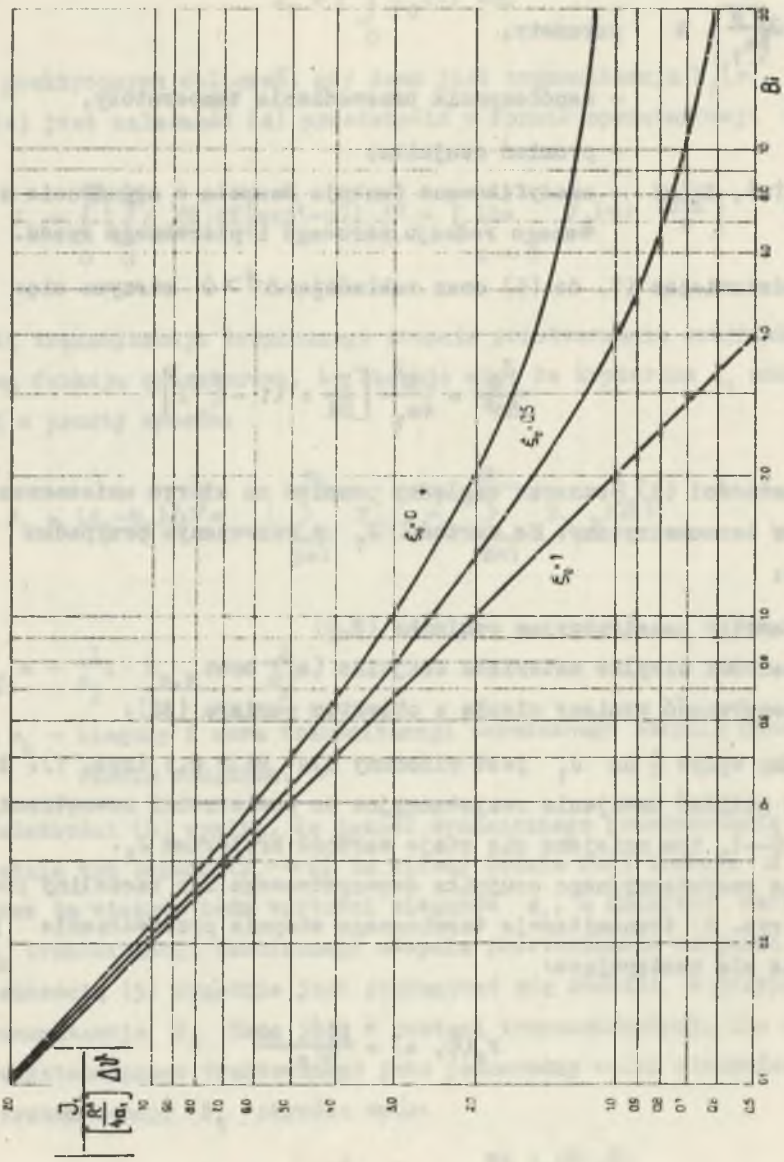
W zależności (8) ξ oznacza względny promień na którym umieszczono rezystor termometryczny. Na wartość J_1 w rozważanym przypadku mają wpływ:

- parametry konstrukcyjne czujnika (R, ξ)
- własności cieplne materiału czujnika (a_1) oraz
- intensywność wymiany ciepła z obiektem pomiaru (Bi).

Wyraźny wpływ ξ na J_1 jest widoczny dla $Bi > 0{,}1$ (rys. 7). Im bardziej zbliżać uzwojenie rezystancyjne do powierzchni zewnętrznej czujnika $\xi \to 1$, tym mniejsza się staje wartość kryterium J_1.

Dla rezystancyjnego czujnika dwuwarstwowego bez szczeliny powietrznej (rys. 8) transmitancja termicznego stopnia przetwarzania przedstawia się następująco:

$$P_t(\xi, s) = \frac{B(\xi, s)}{D(s)} \tag{9}$$



Rys. 7. Wykres zależności liniowego kryterium całkowego od liczby Biota i względnego promienia, dla czujnika jednorodnego

gdzie

$$B(\xi,s) = k_R\left[I_o(\beta_2 \cdot k_R)\cdot K_1(\beta_2 \cdot k_R) + I_1(\beta_2 k_R)\cdot K_o(\beta_2 k_R)\right] I_o\left(\frac{\beta_1}{k_R}\xi\right) \tag{9a}$$

$$D(s) = \left[\frac{\beta_2}{Bi} K_1(\beta_2) - K_o(\beta_2)\right]\left[k_\varepsilon I_1(\beta_1) I_o(\beta_2 k_R) - k_R I_o(\beta_1) I_1(\beta_2 k_R)\right] +$$

$$+\left[\frac{\beta_2}{Bi} I_1(\beta_2) + I_o(\beta_2)\right]\left[k_\varepsilon I_1(\beta_1) K_o(\beta_2 k_R) + k_R I_o(\beta_1) K_1(\beta_2 k_R)\right] \tag{9b}$$

$$\xi = \frac{r}{R_2}; \quad k_R = \frac{R_1}{R_2}; \quad k_\varepsilon = \sqrt{\frac{\lambda_1 c_1 \varrho_1}{\lambda_2 c_2 \varrho_2}}$$

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{s}{a_1}} R_1; \quad \beta_2 = \sqrt{\frac{s}{a_2}} R_2$$

$K_o(x)$, $K_1(x)$ - zmodyfikowane funkcje Bessela drugiego rodzaju zerowego i pierwszego rzędu.

Rys. 8. Przekrój czujnika dwuwarstwowego

Podstawiając zależność (9) do (5) oraz zakładając, że $\Delta\vartheta > 0$ otrzyma się:

$$\frac{J_1}{\Delta\vartheta} = \frac{R_2^2}{4a_2}\left|\frac{\xi^2}{k_a^2} - 1 + k_R^2 + 2k_R\left(\frac{k_\lambda}{k_a^2} - k_R\right)\ln k_R - \right.$$

$$\left. - \left(\frac{k_R}{k_a}\right)^2 - \frac{2}{Bi}\left[1 + k_R\left(\frac{k_\lambda}{k_a^2} - k_R\right)\right]\right| \tag{10}$$

gdzie

$$k_a = \sqrt{\frac{a_1}{a_2}}; \quad k_\lambda = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

Na wartość J_1 w rozważanym przypadku mają również wpływ: parametry konstrukcyjne (R_1, R_2, ξ), cieplne materiałów osłony i rezystora (a_2, λ_2, a_1, λ_1) oraz intensywność wymiany ciepła między czujnikiem i ośrodkiem mierzonym (Bi).

Wartość liniowego kryterium całkowego J_1 w postaci (4) łatwa jest również do określenia, gdy znana jest charakterystyka czasowa czujnika uzyskana z eksperymentu. Wartość J_1 wyznacza się w tym przypadku metodą planimetrowania.

Na rys. 9 w postaci diagramu zestawiono średnie wartości kryterium J_1 odniesione do skoku temperatury mierzonej dla pięciu ośrodków, w których wykonano badania własności dynamicznych czujników przemysłowych.

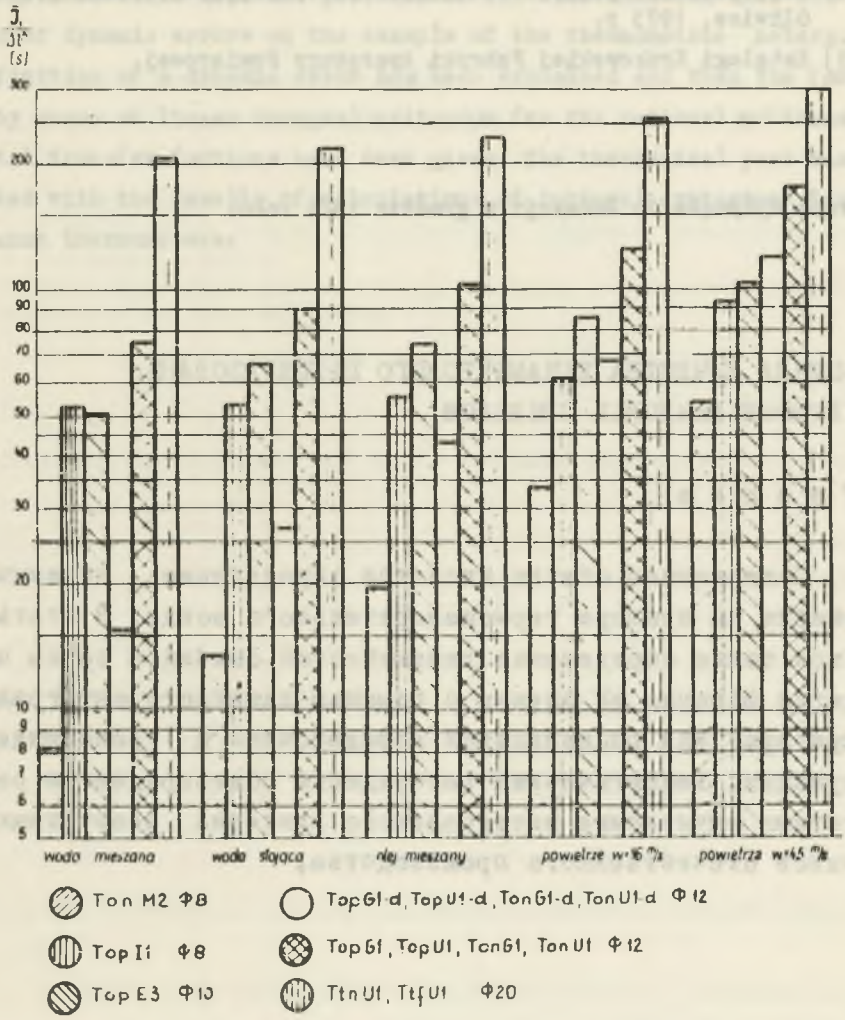
4. Wnioski

Do oceny jakości dynamicznego przetwarzania czujników termometrycznych wskazane jest stosować liniowe kryterium całkowe, proste do wyznaczenia na drodze analitycznej i eksperymentalnej oraz łatwe w interpretacji.

Przedstawione wzory (8) i (10) mogą być przydatne przy projektowaniu czujników do określenia ich dobroci przetwarzania dynamicznego. Konstrukcja czujnika powinna być taka, aby wartość kryterium J_1 była możliwie najmniejsza.

Z zestawienia przedstawionego na rys. 9 wynika, że najmniejszymi wartościami J_1 we wszystkich ośrodkach cechuje się czujnik Ton M2 [3]. Czujnik ten należy uznać za najbardziej przydatny dla automatyki. Dobrymi własnościami dynamicznymi cechują się również czujniki o podwójnym rezystorze Top...1-d, Ton...1-d.

Zdecydowanie najgorsze pod względem dynamicznych własności są czujniki termoelektryczne typu Ttn U1 i Ttf U1, dla których wartości kryterium J_1 wynoszą $J_1 = (200-300)\Delta\vartheta$.



Rys. 9. Zestawienie średnich wartości liniowego kryterium całkowego czujników produkcji krajowej

LITERATURA

[1] Graczyk Cz., Puszer A.: Badania własności dynamicznych czujników termometrycznych. PAK, 1969,r., nr 12.

[2] Puszer A. - Badania procesu przetwarzania dynamicznego i statycznego termometrycznych czujników rezystancyjnych. Praca doktorska, Gliwice, 1973 r.

[3] Katalogi Krakowskiej Fabryki Aparatury Pomiarowej.

Praca wpłynęła do Redakcji w grudniu 1973 roku.

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ДИНАМИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ТЕРМОМЕТРИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Р е з ю м е

Содержанием статьи является определение динамической ошибки на примере термоизмерительного зонда. В статье даётся также определение динамической ошибки,а затем приводятся формулы её оценки с помощью линейного интегрального критерия для рациональной передаточной и трансцендентной функции. Теоретические рассуждения подтверждаются результатами вычисление интегрального критерия реостатных датчиков отечественного производства.

THE ESTIMATE OF THE QUALITY OF DYNAMIC TRANSFORMATION OF THE THERMOMETRIC METERS

S u m m a r y

The article deals with the problems of the determination and evaluation of dynamic errors on the example of the thermometric meters. The definition of a dynamic error has been explained and then the for mulae by means of linear integral criterium for the rational and transcendental transfer fuctions have been given. The theoretical part was completed with the results of calculations of integral criterium for resistance thermometers.