

P O L S K A A K A D E M I A N A U K
INSTYTUT MASZYN PRZEPLYWOWYCH

PRACE
INSTYTUTU MASZYN
PRZEPLYWOWYCH

TRANSACTIONS
OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

87

WARSZAWA - POZNAŃ 1984

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE

PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPŁYWOWYCH

poświęcone są publikacjom naukowym z zakresu teorii i badań doświadczalnych w dziedzinie mechaniki i termodynamiki przepływów, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki maszyn przepływowych

*

THE TRANSACTIONS OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

exist for the publication of theoretical and experimental investigations of all aspects of the mechanics and thermodynamics of fluid-flow with/special reference to fluid-flow machinery

RADA REDAKCYJNA - EDITORIAL BOARD

TADEUSZ GERLACH · HENRYK JARZYNA · JERZY KRZYŻANOWSKI
STEFAN PERYCZ · WŁODZIMIERZ PROSNAK · KAZIMIERZ STELLER
ROBERT SZEWAŁSKI (PRZEWODNICZĄCY - CHAIRMAN) · JÓZEF ŚMIGIELSKI

KOMITET REDAKCYJNY - EXECUTIVE EDITORS

KAZIMIERZ STELLER - REDAKTOR - EDITOR
WOJCIECH PIETRASZKIEWICZ · ZENON ZAKRZEWSKI
ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA - EDITORIAL OFFICE

Instytut Maszyn Przepływowych PAN
ul. Gen. Józefa Fiszer 14, 80-952 Gdańsk, skr. pocztowa 621, tel. 41-12-71

Copyright
by Państwowe Wydawnictwo Naukowe
Warszawa 1984

Printed in Poland

ISBN 83-01-05677-0

ISSN 0079-3205

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE - ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 300 + 90 egz.	Oddano do składania 30 XI 1983 r.
Ark. wyd. 10,25. druk. 9,5	Podpisano do druku 3 IX 1984 r.
Pap. druk. sat. kl. V, 70 g, 70×100	Druk ukończono we wrześniu 1984 r.
Cena zł 120,-. A-12/542.	Zamówienie nr 160/36.

DRUKARNIA UNIwersytetu IM. ADAMA MICKIEWICZA W POZNANIU

ANATOL JAWOREK

Gdańsk

Ogólna analiza powstawania i metod redukcji błędów przetwarzania elektromagnetycznego przepływomierza pływakowego*

W pracy rozważono oddziaływanie niektórych wielkości wpływających na dokładność przetwarzania elektromagnetycznego przepływomierza pływakowego. Ustosunkowano się również do różnych możliwości zmniejszenia wartości błędu przetwarzania.

1. Wprowadzenie

Zagadnienia rozważane w pracy odnoszą się do elektrycznego przetwornika natężenia przepływu cieczy lub gazu. Elektromagnetyczny przepływomierz pływakowy [1] jest przetwornikiem transformatorowym, parametrycznym, wykorzystującym zasadę zawieszenia magnetycznego ruchomego rdzenia zanurzonego w przepływającym płynie.

Każdy przyrząd pomiarowy przetwarza mierzoną wielkość fizyczną z pewną dokładnością wynikającą z jego właściwości konstrukcyjnych, warunków otoczenia oraz dokładności skalowania. Każde odstępstwo od warunków skalowania (zwanymi warunkami odniesienia) może być przyczyną błędu przetwarzania zwanego błędem dodatkowym. W pracy omówiono błędy dodatkowe spowodowane zmianami najważniejszych wielkości — napięcia, natężenia prądu i częstotliwości zasilania przetwornika oraz temperatury uzwojenia i przepływającego czynnika.

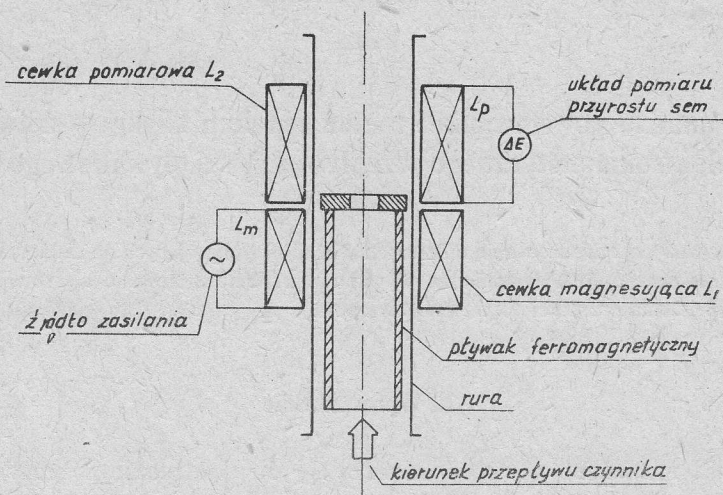
Brak możliwości analitycznego opisu charakterystyk statycznych przetwornika utrudnia jednoznaczne określenie zależności wielkości błędów przetwarzania od parametrów konstrukcyjnych i warunków pracy. Dlatego w wielu przypadkach ograniczono się do ich przybliżonego oszacowania. Wartość liczbowa błędu jest uzależniona od konkretnego rozwiązania konstrukcyjnego.

2. Budowa i zasada działania elektromagnetycznego przepływomierza pływakowego

Elektromagnetyczny przepływomierz pływakowy [1] jest przetwornikiem transformatorowym, w którym element sprzęgający (ruchomy rdzeń) jest swobodnie zawieszony w polu magnetycznym cewki pierwotnej (magnesującej) zasilanej prądem zmiennym

* Praca wykonana w ramach problemu międzyresortowego MR. I. 26 pt.: „Podstawy projektowania maszyn i urządzeń energetycznych”, grupa tematyczna 10.

(rys. 1). Czynnik (gaz lub ciecz), którego natężenie przepływu jest mierzone, przepływa przez rurę o kalibrowanej średnicy z materiału nieferromagnetycznego, usytuowaną pionowo. Wewnątrz rury umieszczony jest ferromagnetyczny pływak wykonany z cienkościennej rurki stalowej. W jego górnej części umieszczony jest kołpak, w środku którego



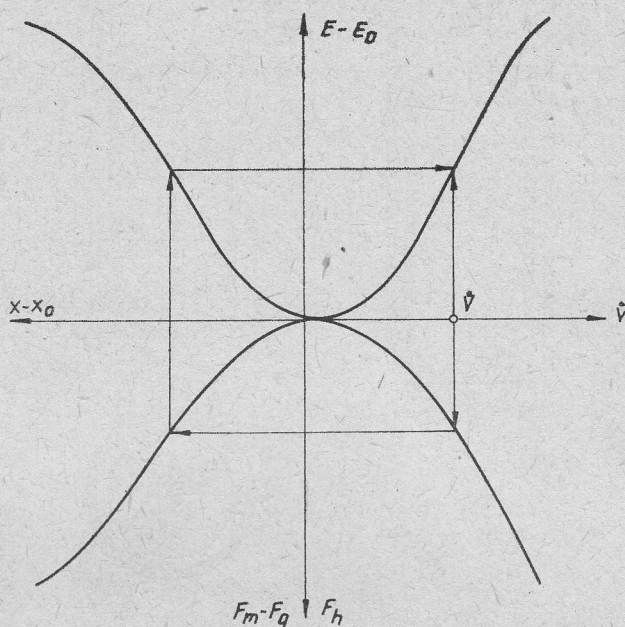
Rys. 1. Budowa elektromagnetycznego przepływomierza pływakowego

może być wykonany kalibrowany otwór o średnicy zależnej od mierzonego natężenia przepływu. Na zewnątrz rury nawinięte są koncentrycznie dwie cewki. Cewka dolna zasilana jest prądem zmiennym o natężeniu niezbędnym do utrzymania rdzenia w stanie zawieszenia. Cewka górna jest cewką pomiarową, w której indukuje się siła elektromotoryczna indukcji wzajemnej zależna m. in. od położenia rdzenia (pływaka), a więc wartości współczynnika sprzężenia magnetycznego między cewkami. Położenie rdzenia w stanie ustalonym przepływu określone jest przez równowagę siły magnetycznej F_m (będącej funkcją położenia rdzenia), siły naporu hydrodynamicznego F_h (zależnej od natężenia przepływu czynnika), siły wyporu hydrostatycznego rdzenia F_w i siły grawitacji działającej na rdzeń F_g .

$$F_m + F_h + F_w + F_g = 0. \quad (1)$$

Pod wpływem zmian natężenia przepływu czynnika zmienia się wartość siły naporu hydrodynamicznego, powodując przemieszczenie rdzenia aż do zrównoważenia siły hydrodynamicznej przez przyrost siły magnetycznej F_m . Wielkością wyjściową w przetworniku jest siła elektromotoryczna E indukcji wzajemnej, której wartość zależna od położenia rdzenia x jest funkcją natężenia przepływu czynnika $\dot{V}$.

Charakterystyka przetwornika jest nieliniowa i powstaje jako superpozycja charakterystyki hydrodynamicznej $F_h(\dot{V})$, charakterystyki elektrodynamicznej $F_m(x)$ oraz charakterystyki elektrycznej $E(x)$. Procedurę tworzenia charakterystyki wypadkowej przedstawiono na rysunku 2. Współrzędna x_0 oznacza położenie rdzenia przy braku przepływu, tj. przy $\dot{V} = 0$.



Rys. 2. Charakterystyka statyczna przetwornika jako superpozycja charakterystyk pośredniczących

Siła naporu hydrodynamicznego wyraża się równaniem [1, 2]

$$F_h = \frac{2\rho_c}{\pi D_p^2} \left(\frac{D_p^2}{D_0^2} - 1 \right)^2 \dot{V}^2, \quad (2)$$

gdzie ρ_c — gęstość czynnika, D_p — średnica przewodu pomiarowego (rury), D_0 — średnica otworu w kołpaku pływaka (rys. 3a).

Zależność (2) jest słuszna dla pływaka z otworem centralnym, przy założeniu, że przepływ następuje tylko przez ten otwór, zaś przepływ przez szczelinę boczną między pływakiem a przewodem jest pomijalnie mały.

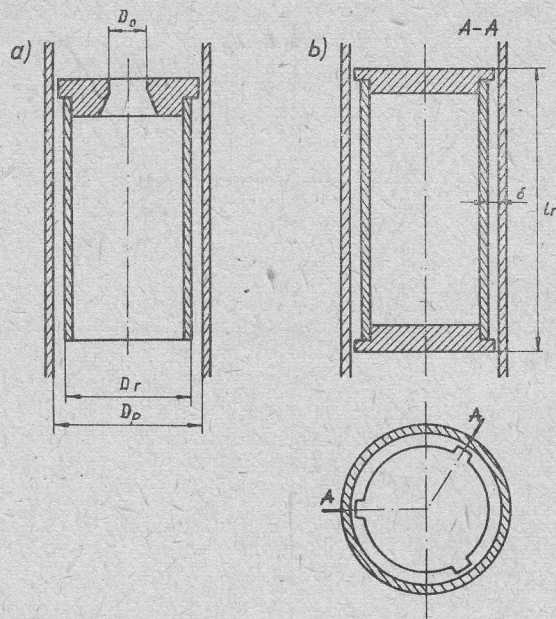
W przypadku przepływu czynnika przez szczelinę pierścieniową między pływakiem a przewodem pomiarowym obowiązuje inna zależność [1, 2]

$$F_h = \frac{3\mu_c l_r \dot{V}}{\delta^2} \left(\frac{D_p}{\delta} + 2 \right) + \frac{0,2\rho_c \dot{V}^2}{\pi\delta^2}, \quad (3)$$

gdzie μ_c — współczynnik lepkości dynamicznej czynnika, l_r — długość rdzenia (pływaka), δ — szerokość szczeliny między pływakiem a przewodem (rys. 3b),

$$\delta = \frac{D_p - D_r}{2}. \quad (4)$$

(Ze względu na ograniczoność miejsca zagadnienie błędów dla przepływomierza ze szczeliną obwodową nie będzie w tej pracy rozważane.)



Rys. 3. Konstrukcja plywaków; a) do pomiaru dużych natężeń przepływu, b) do pomiaru małych natężeń przepływu

Siła magnetyczna działająca na rdzeń wyraża się ogólną zależnością

$$F_m = \frac{I^2}{2} \frac{\partial L_m}{\partial x}, \quad (5)$$

gdzie I — wartość skuteczna natężenia prądu płynącego przez cewkę magnesującą, L_m — indukcyjność cewki magnesującej, x — współrzędna osiowa położenia rdzenia.

Siła elektromotoryczna indukcji wzajemnej jest proporcjonalna do szybkości zmian strumienia magnetycznego, czyli do szybkości zmian natężenia prądu

$$E = \omega M I, \quad (6)$$

gdzie ω — pulsacja prądu zasilającego, M — współczynnik indukcji wzajemnej obu cewek.

Gdy przetwornik zasilany jest ze źródła napięciowego U , to

$$E = \frac{\omega M U}{\sqrt{R_m^2 + \omega^2 L_m^2}}, \quad (7)$$

gdzie R_m — rezystancja, L_m — indukcyjność uzwojenia pierwotnego (magnesującego).

Zależności na siłę magnetyczną F_m i siłę elektromotoryczną od wymiarów geometrycznych układu cewek z rdzeniem nie są znane w postaci analitycznej, dlatego w analizie błędów należy odwołać się do danych eksperymentalnych.

3. Zmiany napięcia lub prądu zasilania jako źródło błędu

Jako parametryczny przetwornik transformatorowy, elektromagnetyczny przepływomierz pływakowy jest czuły na zmiany amplitudy napięcia lub natężenia prądu zasilającego. Podstawowym sposobem eliminacji tego wpływu jest stabilizacja napięcia lub prądu zasilania. Jednak w szczególnych przypadkach i przy niezbyt rygorystycznych wymaganiach co do dokładności pomiaru może być stosowany układ kompensacji błędu.

Wpływ zmian natężenia prądu na wartość błędu może być oszacowany z ogólnej zależności (6) przez wyznaczenie czułości

$$S_I = \frac{\partial E}{\partial I} = \omega M + \omega I \frac{\partial M}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial I}, \quad (8)$$

lub w postaci bezwymiarowej

$$\frac{S_I}{\omega M} = 1 + \frac{IN_m}{M} \frac{\partial M}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial (IN_m)}, \quad (9)$$

gdzie N_m — liczba zwoi cewki magnesującej.

Pierwszy składnik w wyrażeniach (8) i (9) reprezentuje bezpośredni wpływ zmian natężenia prądu na przyrost wartości siły elektromotorycznej, tzn. tak, jak gdyby rdzeń był unieruchomiony. Przyrosty te są proporcjonalne. Składnik ten jest zawsze większy od zera.

Drugi składnik w wyrażeniach (8) i (9) jest nieliniowy i wynika z superpozycji zależności położenia rdzenia jako funkcji siły magnetomotorycznej $\partial x / \partial (IN_m)$ i zależności współczynnika indukcji wzajemnej od położenia rdzenia $\partial M / \partial x$. Składnik ten reprezentuje zmiany siły elektromotorycznej spowodowane przemieszczeniem rdzenia w wyniku zmian siły magnetomotorycznej IN_m . Dla rdzeni zawieszonych poniżej środka cewki, tj. dla $x < 0$ czynnik $\partial x / \partial (IN_m)$ jest dodatni, natomiast dla $x > 0$ — jest ujemny. Czynnik $\partial M / \partial x$ jest zawsze większy od zera (obszar, w którym $\partial M / \partial x < 0$ nie jest wykorzystywany). Wynika stąd, że dla $x > 0$ może następować częściowa kompensacja przyrostów siły elektromotorycznej (przeciwnie znaki obu składników w wyrażeniach (8) lub (9)), spowodowanych zmianami natężenia prądu zasilającego.

W analogiczny sposób można przeprowadzić rozważania dla przypadku, gdy przetwornik zasilany jest ze źródła napięciowego. Wówczas czułość wyrażona wzorem (por. [3])

$$S_U = \frac{\partial E}{\partial U} = \frac{\omega M}{\sqrt{R_m^2 + \omega^2 L_m^2}} + \frac{\omega U}{\sqrt{R_m^2 + \omega^2 L_m^2}} \frac{\partial M}{\partial U} - \frac{\omega^3 L_m M U}{\sqrt{(R_m^2 + \omega^2 L_m^2)^3}} \frac{\partial L_m}{\partial U} \quad (10)$$

jest także funkcją parametrów elektrycznych uzwojenia pierwotnego. Wyrażenie (10) można znormalizować względem pierwszego składnika

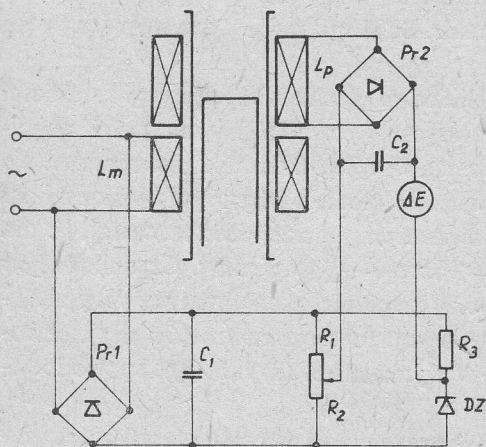
$$\frac{\sqrt{R_m^2 + \omega^2 L_m^2}}{\omega M} S_U = 1 + \frac{U}{M} \frac{\partial M}{\partial U} - \frac{\omega^2 L_m U}{R_m^2 + \omega^2 L_m^2} \frac{\partial L_m}{\partial U}. \quad (11)$$

W wyrażeniu (11) czynnik $\partial M/\partial U$ jest dodatni dla $x < 0$ i ujemny dla $x > 0$, zaś czynnik

$$\frac{\partial L_m}{\partial U} = \frac{\partial L_m}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial U} \quad (12)$$

jest zawsze dodatni, gdyż dla $x < 0$ $\partial L_m/\partial x > 0$ i $\partial x/\partial U > 0$, a dla $x > 0$ (w warunkach przepływu) $\partial L_m/\partial x < 0$ i $\partial x/\partial U < 0$. Tak jak w poprzednim przypadku, istnieje możliwość częściowej kompensacji błędu przez odpowiedni dobór parametrów konstrukcyjnych. Sposoby te są jednak ograniczone do pewnego obszaru zmienności wielkości mierzonej. Z tych względów należy poszukiwać układowych sposobów eliminacji błędu dodatkowego spowodowanego zmianami napięcia lub natężenia prądu zasilania.

Jednym z możliwych rozwiązań jest kompensacja wielkości błędu przez układowe wprowadzenie poprawki do wyniku pomiaru, tzn. kompensację napięcia wyjściowego proporcjonalnie do przyrostów napięcia zasilającego (rys. 4). Rozwiązanie to pozwala na około pięciokrotne obniżenie wartości błędu i może być stosowane wówczas, jeśli dokładność pomiaru nie musi być wysoka. Ten sposób zmniejszenia wartości błędu jest jednak skuteczny tylko dla rozwiązań konstrukcyjnych przetwornika, dla których składniki nieliniowe w wyrażeniu (11) są pomijalnie małe wobec składnika liniowego. Szczegółowe dane dotyczące projektowania układu kompensacyjnego zawarte są w pracach [4, 5] oraz [1, rozdz. 7].



Rys. 4. Układ kompensacji błędu dodatkowego pochodzącego od zmian napięcia zasilania

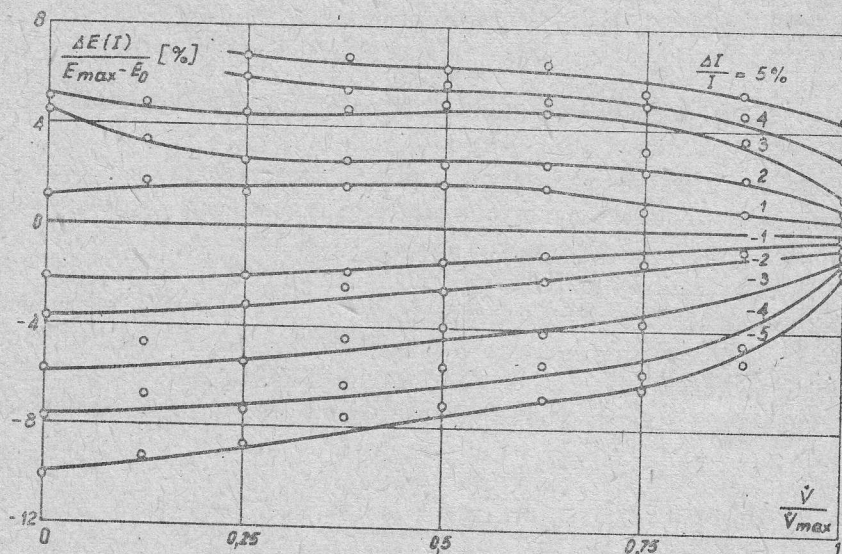
Najsukuteczniejszym sposobem eliminacji błędu jest stosowanie stabilizowanych zasilaczy napięcia lub prądu zmiennego. Stosowanie zasilaczy prądowych eliminuje ponadto wpływy zmian rezystancji uzwojenia pierwotnego, np. wskutek zmian jego temperatury. Wadą takiego rozwiązania jest konieczność używania indywidualnego zasilacza (stabilizatora) do każdego przetwornika. Zasilanie napięciowe wymaga jednak kompensacji zmian rezystancji uzwojenia.

Pomimo stosowania zasilaczy stabilizowanych mogą wystąpić błędy przetwarzania wynikające z niestabilności zasilacza (spowodowanej np. starzeniem), różnic wartości natężenia prądu (napięcia) w poszczególnych egzemplarzach zasilaczy (przetwornik może współpracować z różnymi zasilaczami), lub niedokładnego ustawienia wartości prądu.

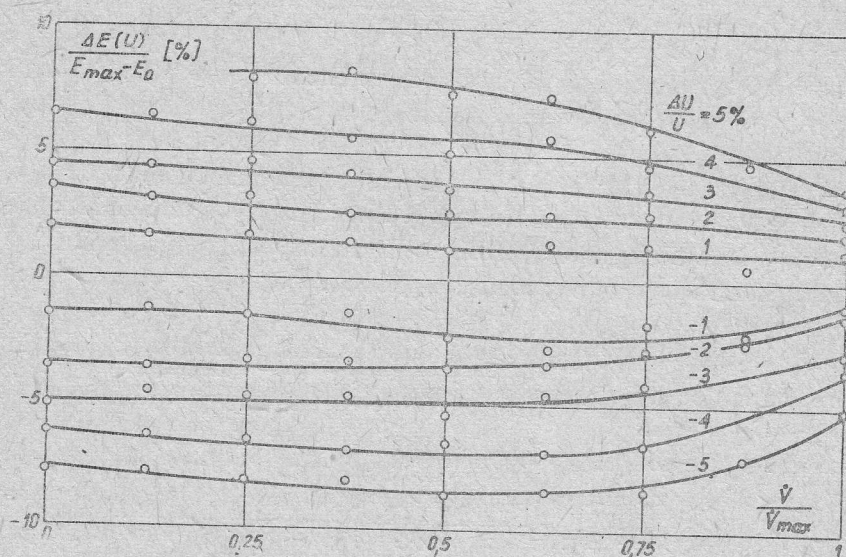
Wartość względnego błędu dodatkowego wynikającego ze zmian natężenia prądu zasilającego można oszacować z wyrażenia

$$\delta_I = \frac{\Delta E(I)}{E_{\max} - E_0} = \frac{M + IN_m \frac{\partial M}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial (IN_m)} \frac{\Delta I}{I}}{M_{\max} - M_0} \quad (13)$$

eżeli znane są wartości współczynnika indukcyjności wzajemnej M . Uzyskany z pomiarów wykres błędu dla różnych natężeń przepływu przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Błąd względny dodatkowy pochodzący od zmian natężenia prądu zasilania



Rys. 6. Błąd względny dodatkowy pochodzący od zmian napięcia zasilania

W podobny sposób wyznaczony względny błąd dodatkowy wynikający ze zmian napięcia zasilania

$$\delta_U = \frac{\Delta E(U)}{E_{\max} - E_0} = \frac{S_U}{\frac{\omega M_{\max}}{\sqrt{R_m^2 + \omega^2 L_m^2(x_{\max})}} - \frac{\omega M_0}{\sqrt{R_m^2 + \omega^2 L_m^2(x_0)}}} \frac{\Delta U}{U} \quad (14)$$

przedstawiono na rysunku 6.

Wykresy 5 i 6 pozwalają wyznaczyć poprawki, jakie należy wprowadzić do wyniku, jeśli znane jest odchylenie napięcia lub natężenia prądu zasilającego.

4. Wpływ zmian częstotliwości zasilania na błąd przetwarzania

W przetworniku transformatorowym z wymuszonym położeniem rdzenia zależność między amplitudą siły elektromotorycznej indukcji wzajemnej a częstotliwością zasilania jest liniowa, jeśli pomija się straty na prądy wirowe, histerezę oraz nasycanie się rdzenia, a przetwornik zasilany jest ze źródła prądowego.

W elektromagnetycznym przepływomierzu pływakowym rdzeń jest swobodnie zawieszony w polu magnetycznym cewki. W przypadku zasilania ze źródła prądowego proporcjonalność jest również zachowana (por. (6)), gdyż ani M , ani I nie są funkcjami ω . Czułość sygnału wyjściowego na przyrost pulsacji ω wyraża się zatem prostą zależnością

$$S_{\omega I} = \frac{\partial E}{\partial \omega} = MI. \quad (15)$$

Względny błąd dodatkowy przetwarzania odniesiony do zakresu pomiarowego wynosi

$$\delta_{\omega I} = \frac{\Delta E(\omega)}{E_{\max} - E_0} = \frac{M}{M_{\max} - M_0} \frac{\Delta \omega}{\omega}. \quad (16)$$

Wyniki pomiaru tak określonego błędu przedstawiono na rysunku 7a. Zmiany częstotliwości o $\pm 4\%$ w przypadku zasilania prądowego są przyczyną błędu o wartości dochodzącej do 5%.

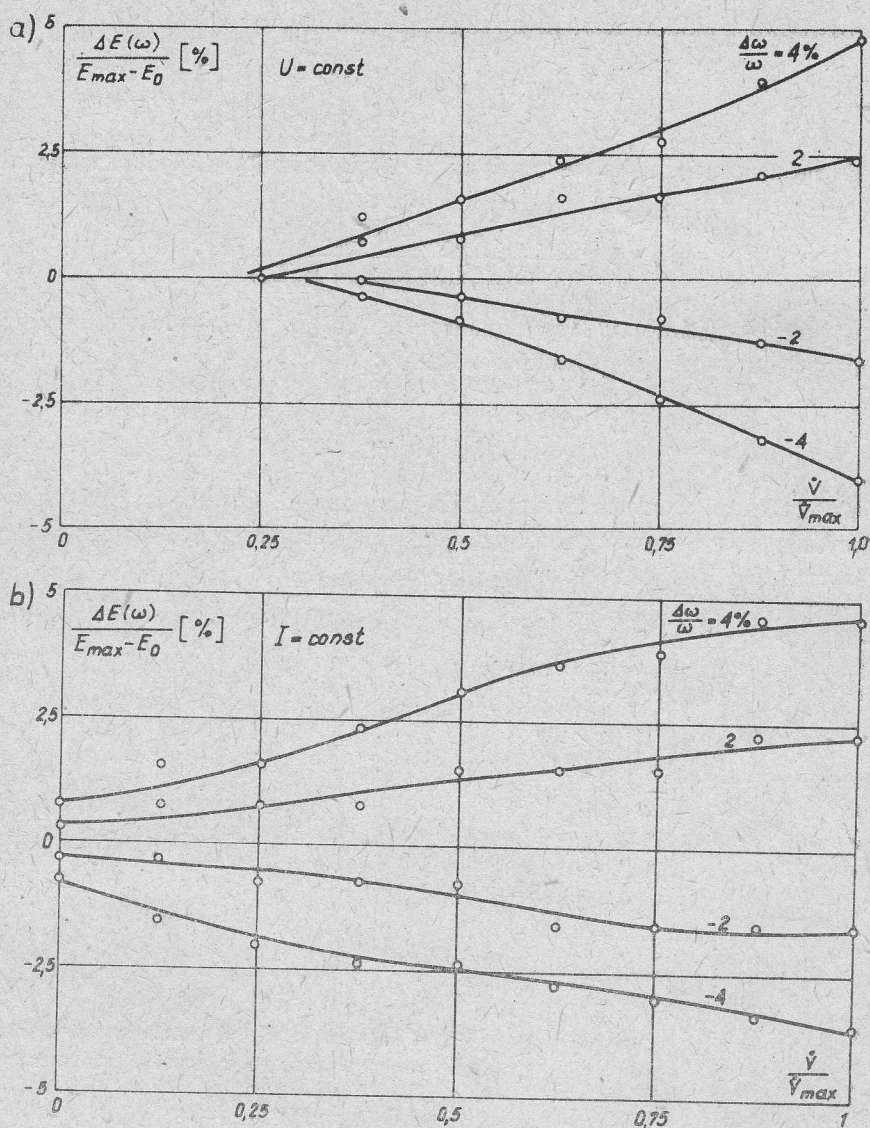
Z zależności (15) wynika, że nie można uzyskać zmniejszenia czułości S_{ω} (a więc także wartości błędu $\delta_{\omega I}$) na drodze konstrukcyjnej. Zmniejszenie wartości indukcyjności wzajemnej powoduje bowiem proporcjonalne obniżenie czułości pomiarowej.

W przypadku zasilania przetwornika ze źródła napięciowego czułość określa wyrażenie:

$$S_{\omega U} = \frac{\partial E}{\partial \omega} = \frac{MR_m^2 U}{\sqrt{(R_m^2 + \omega^2 L_m^2)^3}} + \frac{\omega U}{\sqrt{R_m^2 + \omega^2 L_m^2}} \frac{\partial M}{\partial \omega} - \frac{\omega^3 M L_m U}{\sqrt{(R_m^2 + \omega^2 L_m^2)^3}} \frac{L_m}{\partial \omega}. \quad (17)$$

Błąd względny dodatkowy przetwarzania

$$\delta_{\omega U} = \frac{\Delta E(\omega)}{E_{\max} - E_0} = \frac{S_{\omega U} \Delta \omega}{\frac{\omega M U}{\sqrt{R_m^2 + \omega^2 L_m^2(x_{\max})}} - \frac{\omega M_0 U}{\sqrt{R_m^2 + \omega^2 L_m^2(x_0)}}} \quad (18)$$



Rys. 7. Błąd względny dodatkowy pochodzący od zmian pulsacji zasilania przetwornika linearyzowanego; a) przy zasilaniu prądowym, b) przy zasilaniu napięciowym

wykreślony został na rysunku 7b. Zmiany częstotliwości o $\pm 4\%$ w przypadku zasilania ze źródła napięciowego są przyczyną błędu rzędu 5%.

W celu wyeliminowania błędu dodatkowego pochodzącego od zmian częstotliwości przetwornik należy zasilac z generatora.

Innym układowym sposobem obniżenia wpływu zmian częstotliwości jest pomiar przesunięcia fazowego między napięciem zasilającym a siłą elektromotoryczną indukcji wzajemnej [6] (rys. 8). Układ zasilany jest z generatora napięciowego o stabilizowanej wartości średniej natężenia prądu, co pozwala na uzyskanie stabilnego położenia rdze-

nia. Z rozwiązania układu równań opisującego obwód

$$\begin{bmatrix} U \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_m + j\omega L_m & j\omega M \\ j\omega M & R_0 + R_p + j\omega L_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

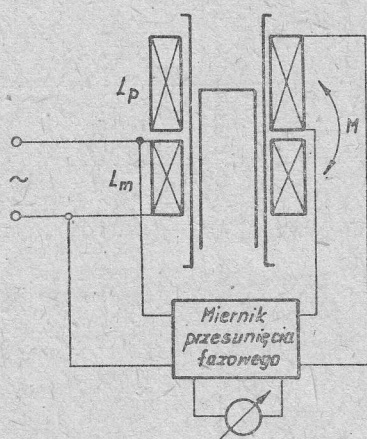
otrzymuje się przesunięcie fazowe napięcia na obciążeniu R_0 względem napięcia zasilania

$$\varphi = \arctg \frac{R_m R_p + R_m R_0 - \omega^2 L_m L_p + \omega^2 M^2}{\omega (R_m L_p + R_0 L_m + R_p L_m)} \quad (20)$$

Jeśli rezystancja wejściowa układu pomiarowego R_0 jest dużo większa od impedancji uzwojenia pomiarowego, to przesunięcie fazowe:

$$\varphi = \arctg \frac{R_m}{\omega L_m} \quad (21)$$

jest zależne tylko od parametrów uzwojenia pierwotnego. O wartości przesunięcia fazowego decydują zmiany indukcyjności uzwojenia magnesującego L_m , dlatego należy dążyć do maksymalizacji ich przyrostów ($\partial L_m / \partial x \rightarrow \max$).



Rys. 8. Schemat ideowy pomiaru przesunięcia fazowego w przetworniku transformatorowym

Czułość zmian przesunięcia fazowego na zmiany częstotliwości zasilania wynosi

$$S_\varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial \omega} = \frac{R_m / \omega L_m}{1 + (R_m / \omega L_m)^2} \frac{1}{\omega} \quad (22)$$

Osiąga ona minimum dla $R_m = \omega L_m$.

Pomiar przesunięcia fazowego jest kilkakrotnie mniej czuły na zmiany częstotliwości zasilania od pomiaru siły elektromotorycznej [6]; wykazuje też mniejszą wrażliwość na zmiany kształtu napięcia zasilającego (co ułatwia jego stabilizację) oraz zmiany wartości średniej napięcia. Ten sposób przetwarzania wielkości mierzonej jest jednak czuły na zmiany rezystancji uzwojenia pierwotnego. Zmiany rezystancji pod wpływem temperatury mogą być wyeliminowane przez kompensację termistorową.

Zagadnienie pomiaru fazy w transformatorowych przetwornikach pomiarowych przedstawiono w pracy [6].

Wpływ zniekształceń napięcia zasilającego na błąd przetwarzania przedstawiony został szczegółowo w pracy [7] i nie będzie tutaj rozważany.

5. Termiczne źródła błędów przetwarzania

Decydujące o wyniku pomiaru przemieszczenie rdzenia zależne jest od gęstości czynnika (a więc od jego temperatury i ciśnienia) poprzez siłę naporu hydrodynamicznego F_h ((2) lub (3)). Temperaturowe zmiany parametrów czynnika są przyczyną tego, że równowaga sił (1) występuje dla położenia rdzenia różnego od nominalnego dla danego natężenia przepływu $\dot{V}$.

Drugim skutkiem zmian temperatury jest przyrost rezystancji uzwojenia pierwotnego, co w przypadku zasilania przepływomierza ze źródła napięciowego staje się przyczyną zmian natężenia prądu.

Błąd dodatkowy względny przetwarzania wynosi

$$\delta_T = \frac{\Delta E(T)}{E_{\max} - E_0} = \frac{\partial E / \partial T}{E_{\max} - E_0} \Delta T. \quad (23)$$

Pochodną $\partial E / \partial T$ można rozwinąć do postaci

$$\frac{\partial E}{\partial T} = \frac{\partial E}{\partial x} \left(\frac{\partial x}{\partial F_h} \frac{\partial F_h}{\partial T} + \frac{\partial x}{\partial I} \frac{\partial I}{\partial R_m} \frac{\partial R_m}{\partial T} \right). \quad (24)$$

W wyrażeniu (24) pierwszy składnik opisuje wpływ zmian parametrów czynnika, a drugi – wpływ zmian parametrów uzwojenia pierwotnego.

Przyjmując w pierwszym przybliżeniu proporcjonalność przyrostów siły magnetycznej F_m do przemieszczenia rdzenia

$$x = -x_{\max} \frac{F_m}{F_{\max}} \quad (25)$$

oraz zakładając, że na krańcach zakresu pomiarowego spełniona jest nierówność

$$\frac{\Delta E}{\Delta x} \leq \frac{E_{\max} - E_0}{x_{\max} - x_0}, \quad (26)$$

otrzymuje się wyrażenie na składową błędu spowodowaną zmianami parametrów czynnika w postaci

$$\delta_{T_c} \leq \frac{1}{F_{\max}} \frac{\partial F_h}{\partial T} \Delta T_c, \quad (27)$$

przy czym uwzględniono, że $x_0 = -x_{\max}$ oraz $F_{h,\max} = 2F_{\max}$.

Dla przepływomierza z otworem centralnym w pływaku pochodna siły hydrodynamicznej opisanej równaniem (2) (dla gazu) wyraża się zależnością

$$\frac{\partial F_h}{\partial T} = -\frac{F_h}{\rho_c} \frac{\partial \rho_c}{\partial T}. \quad (28)$$

Dla natężenia przepływu dążącego do zera błąd spowodowany temperaturowymi zmianami gęstości gazu dąży do zera, ponieważ siła hydrodynamiczna dąży do zera. Dla maksymalnego natężenia przepływu błąd

$$\delta_{T_c} \leq -\frac{1}{\rho_c} \frac{\partial \rho_c}{\partial T} \Delta T_c. \quad (29)$$

W zakresie od $\dot{V}=0$ do $\dot{V}_{\max}$ błąd względny przetwarzania wzrasta od zera do wartości określonej nierównością (29).

W przypadku pomiaru natężenia przepływu cieczy siła hydrodynamiczna zwiększa się o wypór hydrostatyczny

$$F_h + F_w = \frac{2\rho \dot{V}_c^2}{\pi D_p^2} \left(\frac{D_p^2}{D_0^2} - 1 \right)^2 + \frac{\pi D_r^2 l_r}{4} g \rho_c \left(1 - \frac{D_{rw}^2}{D_r^2} \right); \quad (30)$$

pochodna (30) wynosi

$$\frac{\partial (F_h + F_w)}{\partial T} = (-F_h + F_w) \frac{1}{\rho_c} \frac{\partial \rho_c}{\partial T}. \quad (31)$$

Dla natężenia przepływu $\dot{V} \rightarrow 0$ błąd temperaturowy określa nierówność

$$\delta_{T_c} \leq \frac{F_w}{2F_{\max}} \frac{1}{\rho_c} \frac{\partial \rho_c}{\partial T} \Delta T_c = \frac{1}{4\rho_{Fe}} \frac{\partial \rho_c}{\partial T} \Delta T_c, \quad (32)$$

natomiast dla $\dot{V} \rightarrow \dot{V}_{\max} (F_h \rightarrow 2F_{\max})$

$$\delta_{T_c} \leq \left(-1 + \frac{F_w}{2F_{\max}} \right) \frac{1}{\rho_c} \frac{\partial \rho_c}{\partial T} \Delta T_c = \left(\frac{1}{4} \frac{1}{\rho_{Fe}} - \frac{1}{\rho_c} \right) \frac{\partial \rho_c}{\partial T} \Delta T_c. \quad (33)$$

Z nierówności (33) wynika, że dla $\dot{V}_{\max}$ wartość błędu dodatkowego przetwarzania dąży do zera (dla $F_w/F_{\max} \rightarrow 2$). Kryterium to pozostaje w sprzeczności z wymaganiem wynikającym z (32), według którego $F_w/F_{\max}$ powinno dążyć do zera.

Dla typowych parametrów przepływomierza: $D_p = 10$ mm, $D_r = 9,5$ mm, $l_r = 50$ mm i $D_0 = 5,3$ mm, natężenia przepływu powietrza $\dot{V} = 100$ dm³/min błąd pomiaru $\delta_{T_c} \leq 6,5\%$ przy zmianie temperatury o ± 20 K. Błąd (29) jest niezależny od konstrukcji przepływomierza. Pomiar przepływomierzem natężenia przepływu wody o wielkości $\dot{V} = 2,5$ dm³/min, przy $D_0 = 4,8$ mm obarczony jest błędem $\delta_{T_c} \leq 0,002\%$ dla $\dot{V} \rightarrow 0$ i $\delta_{T_c} \leq |-0,25\%|$ dla $\dot{V}_{\max}$ przy zmianie temperatury czynnika ± 10 K. Elektromagnetyczny przepływomierz pływakowy jest mniej wrażliwy na zmiany temperatury wody niż powietrza.

W wyprowadzonych zależnościach na błąd przetwarzania nie przytoczono konkretnych wyrażeń na pochodne $\partial \rho_c / \partial T$ ze względu na możliwość wyboru wielu ich postaci w zależności od parametrów czynnika (temperatury, gęstości, ciśnienia) i rodzaju czynnika. Zależności takie można znaleźć w [8]. W oszacowaniach błędu zwykle wystarczająca jest znajomość skończonego przyrostu gęstości dla przewidywanego przyrostu temperatury.

W przypadku składowej błędu pochodzącej od zmian rezystancji uzwojenia pierwotnego pochodna $\partial I / \partial R_m$ wynosi

$$\frac{\partial I}{\partial R_m} = - \frac{UR_m}{(R_m^2 + \omega^2 L_m^2)^{3/2}}, \quad (34)$$

zaś rezystancja uzwojenia zależna jest od temperatury zgodnie z relacją

$$R_{mT} = R_{m0} [1 + \alpha (T_u - T_0)]. \quad (35)$$

W zależności (35) dla niewielkich przyrostów temperatury $T_u - T_0$ można w pierwszym przybliżeniu założyć niezależność współczynnika rezystywności α od temperatury. Temperatura T_0 jest temperaturą odniesienia, T_u — temperaturą uzwojenia. Rezystancja R_{m0} jest rezystancją uzwojenia w temperaturze odniesienia T_0 .

Pochodna $\partial x / \partial I$ po uwzględnieniu w (25) związku (5), wynosi

$$\frac{\partial x}{\partial I} = -x_{\max} \frac{F_g - F_h}{F_{\max}} \left(-\frac{2}{I} \right). \quad (36)$$

Na podstawie zależności (25), (26), (34), (36) i pochodnej (35) można wyznaczyć błąd temperaturowy spowodowany zmianami temperatury uzwojenia pierwotnego

$$\delta_{T_u} \leq \frac{2x}{x_{\max} - x_0} \frac{\alpha (T_u - T_0)}{1 + \left(\frac{\omega L_m}{R_m} \right)^2}. \quad (37)$$

Dla $\omega L_m / R_m = 1$ błąd temperaturowy (37) nie przekracza wartości 4,5% przy zmianach temperatury o 20 K. Zwiększenie stosunku $\omega L_m / R_m$ prowadzi do obniżenia błędu temperaturowego. Na przykład dla $\omega L_m / R_m = 5$ błąd temperaturowy wyznaczony z (37) nie przekracza wartości 0,5%.

Praca wpłynęła do Redakcji w kwietniu 1981 r.

Literatura

- [1] J. Śmigielski, *Elektromagnetyczne, pływakowe przetworniki wydatku i ciśnienia*. PWN, Warszawa — Poznań 1980.
- [2] J. Śmigielski, *Electromagnetic Float Flowmeter with Magnetic Suspension*. Bull. Acad. Pol. des Sci., Sér. sci. tech., v. XXVII, nr 10 - 11, 1979, s. 49 - 58.
- [3] A. Jaworek, *Błędy pomiaru elektromagnetycznego przepływomierza pływakowego*. Zesz. Nauk. IMP PAN, nr 73/964/1979.
- [4] A. Jaworek, *Kompensacja błędów spowodowanych zmianami napięcia zasilania przy pomiarach elektromagnetycznym przepływomierzem pływakowym*. Zesz. Nauk. IMP PAN, nr 4/879/1977.
- [5] A. Jaworek, *Charakterystyki statyczne elektromagnetycznego przepływomierza pływakowego*. Zesz. Nauk. IMP PAN, nr 42/908/1978.
- [6] A. Jaworek, *Pomiar fazy w transformatorowych przetwornikach pomiarowych*. Zesz. Nauk. IMP PAN, nr 38/904/1978.
- [7] A. Jaworek, *Wpływ wyższych harmonicznych na dokładność pomiaru przetwornikami transformatorowymi*. Prace IMP, z. 82, 1982.
- [8] S. Bretsznajder, *Własności gazów i cieczy*. WNT, Warszawa 1962.

Общий анализ возникновения и методов редукции ошибок превращения электромагнитного поплавкового расходомера

Резюме

В работе представлена зависимость ошибок превращения электромагнитного поплавкового расходомера от изменений некоторых влияющих величин. Учтены изменения напряжения и силы питающего тока, его частоты, а также изменения температуры обмотки и среды. Обсуждены различные возможности уменьшения значения ошибки превращения.

General Analysis of Generation and Methods of Reduction of Conversion Errors in the Electromagnetic Float Flowmeter

Summary

Dependence of conversion errors in the electromagnetic float flowmeter on changes of some input variables is presented in the paper. Changes of the power supply voltage, current and frequency, as well as winding and medium temperature changes are taken into consideration. Also various possibilities of conversion error reduction are discussed.