

Henryk URZĘDNICZOK

MAGNETOELASTYCZNY PRZETWORNIK SIŁY Z SAMOKOMPENSACJĄ WPLYWU TEMPERATURY

Streszczenie. W artykule omówione są czynniki decydujące o właściwościach temperaturowych magnetoelastycznych przetworników siły. Wykazano, że istnieje możliwość kompensacji wpływu temperatury bez stosowania dodatkowych czujników temperatury, a jedynie przez właściwą konstrukcję czujnika magnetoelastycznego i układu elektrycznego przetwornika. Opisano odpowiedni układ. Podano wyniki badań właściwości temperaturowych przetwornika z opisanym układem.

MAGNETOELASTIC FORCE TRANSDUCER WITH TEMPERATURE INFLUENCE SELF-COMPENSATION

Summary. Factors influencing temperature properties of the magnetoelastic force transducers have been discussed in the paper. It has been proved that there is possibility to compensate the temperature influence by the appropriate construction of the magnetoelastic sensor and transducer electric circuit without application of additional temperature sensors. The circuit realising this idea has been described. Investigation results of the temperature properties of the transducer with the above mentioned circuit have been given.

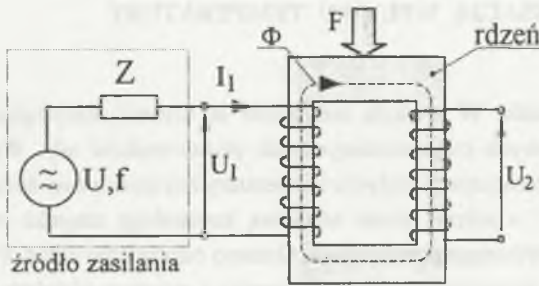
1. WPROWADZENIE

Wykorzystanie zjawiska magnetoelastyczności, tj. faktu, że właściwości magnetyczne niektórych materiałów zależą od naprężeń mechanicznych w tym materiale, pozwala budować przetworniki do pomiaru siły [1]. W porównaniu z przetwornikami tensometrycznymi, przetworniki takie charakteryzują się mniejszą dokładnością, ale także szeregiem korzystnych właściwości, istotnych zwłaszcza w zastosowaniach przemysłowych. Najważniejsze z nich to

niska cena, stosunkowo prosta konstrukcja mechaniczna i elektryczna, znacznie wyższy poziom sygnału na wyjściu, małe wymiary.

W pracy [2] opisany został nowy typ magnetoelastycznego przetwornika do pomiaru siły. Przez odpowiednią konstrukcję możliwe jest również uzyskanie przetwornika do jednoczesnego pomiaru siły i momentu skracającego [3].

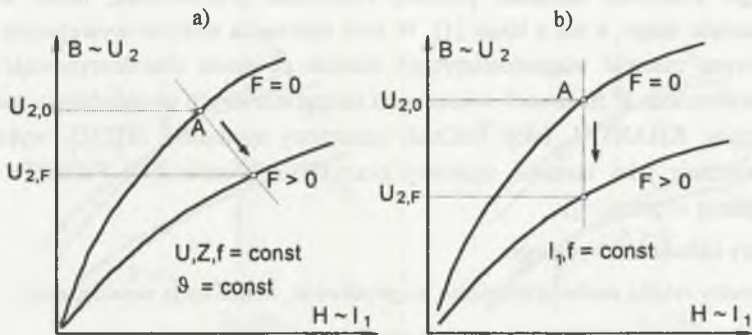
Zasadę działania magnetoelastycznego przetwornika siły ilustruje rys. 1.



Rys. 1. Podstawowy układ elektryczny magnetoelastycznego przetwornika siły
Fig. 1. Basic electric circuit of the magnetoelastic force transducer

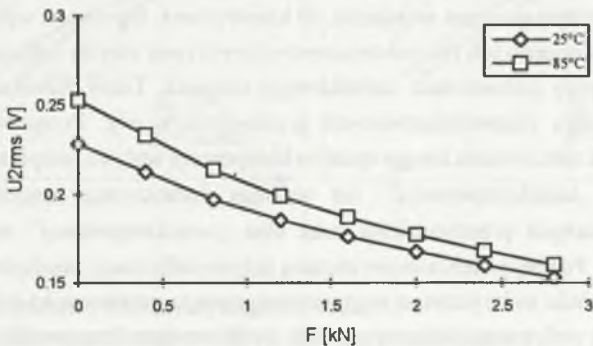
Prąd elektryczny I_1 płynący przez uzwojenie pierwotne wywołuje w rdzeniu przetwornika pole magnetyczne o indukcji B . Zależność pomiędzy napięciem U_2 na zaciskach uzwojenia wtórnego a prądem wzbudzenia I_1 wynika z charakterystycznej dla materiału rdzenia krzywej magnesowania $B = f(H)$. Napięcie U_2 jest proporcjonalne do indukcji magnetycznej, a natężenie pola magnetycznego proporcjonalne jest do prądu I_1 . W przypadku materiałów magnetoelastycznych położenie krzywej magnesowania, a zatem również odpowiedniej krzywej $U_2 = f(I_1)$, silnie zależy od naprężeń mechanicznych w materiale rdzenia. Przyłożona do rdzenia siła F powoduje powstanie naprężeń i w efekcie „przesuwa” krzywą magnesowania na płaszczyźnie U_2-I_1 . Przy ustalonych parametrach źródła zasilania następuje przesunięcie punktu pracy przetwornika, tak jak to ilustruje rys.2. co z kolei skutkuje zmianą napięcia wyjściowego. W rezultacie napięcie na zaciskach wyjściowych przetwornika zależy proporcjonalnie od przyłożonej siły — przykład charakterystyki przetwarzania pokazano na rys.3.

Jako wielkość wyjściową można traktować napięcie U_2 na zaciskach wtórnych (przetwornik pracuje wówczas w układzie transformatorowym), ale także napięcie U_1 lub prąd I_1 na zaciskach pierwotnych (przetwornik pracuje w układzie dławikowym). Jako miarę wielkości wyjściowej można wykorzystać wartość skuteczną (RMS) lub średnią dla przebiegu wyprostowanego (AVG).



Rys.2. Wpływ naprężeń w materiale rdzenia na krzywą magnesowania: a) zasilanie stałonapięciowe, b) zasilanie stałoprądowe

Fig.2. Influence of stress in the core material on the magnetization curve: a) constant voltage (RMS) supply source, b) constant current (RMS) supply source



Rys.3. Charakterystyka przetwarzania dla różnych temperatur

Fig.3. Conversion curve for two temperatures

Zależność $U_2 = f(F)$ pomiędzy przyłożoną siłą a napięciem wyjściowym zależy od szeregu czynników. Najistotniejsze z nich to [2,3,4,5]:

I Konstrukcja mechaniczna:

- kształt rdzenia i położenie uzwojeń (wzajemne ułożenie przestrzenne strumienia magnetycznego i naprężeń w rdzeniu),
- rodzaj materiału magnetycznego,

Uwaga: Ponieważ założono prostotę wykonania przetwornika, rdzeń wykonano z materiału litego, a nie z blach [1]. W celu uniknięcia efektów wywołanych prądami wirowymi materiał magnetoelastyczny rdzenia powinien charakteryzować się dużą rezystywnością. W badaniach właściwości temperaturowych uwzględniono następujące materiały: KHANTAL (stop FeCrAl) oznaczony symbolem 0H23J5, wykorzystany powszechnie jako materiał oporowy oraz INVAR oznaczony FeNi36Pr (opisane dokładniej w pracy [6]).

II Parametry układu elektrycznego:

- parametry źródła zasilania (napięcie, częstotliwość, impedancja wewnętrzna),
- rodzaj wielkości wyjściowej i przyjęta miara tej wielkości,

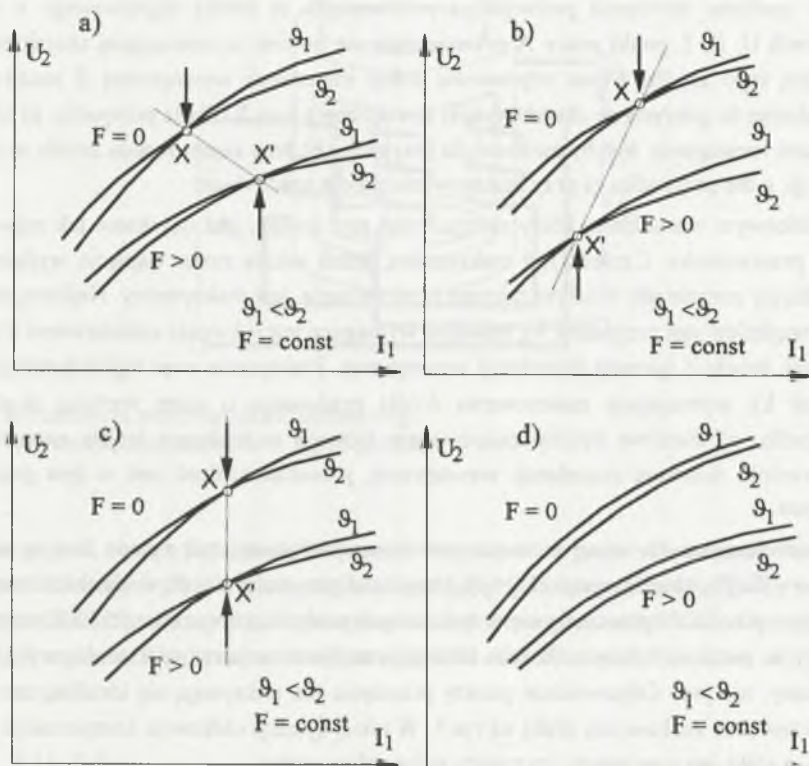
III Czynniki dodatkowe:

- temperatura,
- zewnętrzne pola elektryczne i magnetyczne,
- parametry toru transmisji sygnału wyjściowego.

W celu osiągnięcia dobrych właściwości metrologicznych należy przy konstruowaniu magnetoelastycznego przetwornika siły uwzględnić wpływ wymienionych czynników. Spośród tych czynników jedynie temperatura jest niezależna od konstruktora. Eliminacja wpływu temperatury w przetwornikach pomiarowych (w tym tensometrycznych) jest zwykle realizowana w układzie kompensacyjnym, przy zastosowaniu dodatkowego czujnika. Takie rozwiązanie jest również możliwe w przypadku magnetoelastycznych przetworników siły. Przeprowadzone badania wykazały możliwość zastosowania innego sposobu kompensacji wpływu temperatury. Sposób ten, określony nazwą „samokompensacja”, nie wymaga dodatkowego czujnika. Właściwości temperaturowe badanych przetworników oraz idea „samokompensacji” zostały dokładniej opisane w pracy [5]. Poniżej przedstawione zostaną jedynie informacje niezbędne do wyjaśnienia zasady działania układu elektrycznego magnetoelastycznego przetwornika siły, który to układ umożliwia redukcję wpływu temperatury zgodnie z efektem samokompensacji.

2. ZASADA SAMOKOMPENSACJI WPLYWU TEMPERATURY

Jak podano we wprowadzeniu, zmiana stanu naprężeń w materiale magnetycznym rdzenia powoduje zmianę położenia krzywej $U_2 = f(I_1)$ (rys.2). W rezultacie napięcie wyjściowe zmienia się pod wpływem siły przyłożonej do rdzenia. Rezultaty badań właściwości temperaturowych wskazują, że zmiana położenia krzywej $U_2 = f(I_1)$ zachodzi także pod wpływem temperatury. Wpływ ten zilustrowano poglądowo na rys.4.



Rys.4. Wpływ temperatury na krzywą magnesowania

Fig.4. Influence of stress and temperature on the magnetization curve

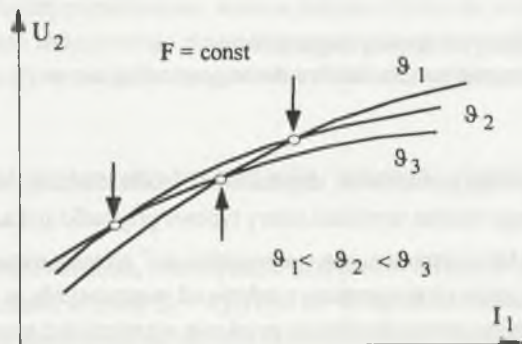
W zależności od szeregu parametrów: częstotliwość źródła zasilania, kształt rdzenia i rodzaj materiału magnetycznego można wyróżnić cztery typowe przypadki pokazane na rysunku.

W przypadkach a), b) i c) istnieją punkty „niewrażliwości” na temperaturę X i X' , dla których napięcie wyjściowe nie zależy od temperatury, a jedynie od mierzonej siły, a w przypadku d) takie punkty nie istnieją. Istnieje zatem możliwość uzyskania niezależności sygnału wyjściowego od temperatury: punkt pracy przetwornika (A na rys.2) na krzywych $U_2 = f(I_1)$ powinien pokrywać się z punktami „niewrażliwości” na temperaturę (punkty X na rys.4a, b, c). Spełnienie powyższego warunku w konstrukcji przetwornika określone zostało jako zasada „samokompensacji”. Aby osiągnąć efekt samokompensacji, należy odpowiednio dobrać kształt rdzenia, rodzaj materiału magnetycznego oraz parametry źródła zasilającego przetwornik.

Przy zasilaniu uzwojenia pierwotnego przetwornika ze źródła napięciowego o stałych parametrach U , Z , f , punkt pracy A przemieszcza się po linii wyznaczającej charakterystykę zewnętrzną tego źródła. Przez odpowiedni dobór impedancji wewnętrznej Z możliwe jest doprowadzenie do pokrycia się charakterystyki zewnętrznej z linią $X-X'$ dla przypadku a) na rys. 4. Analogiczne rozwiązania byłyby możliwe dla przypadku b) przy zastosowaniu źródła o ujemnej impedancji, a dla przypadku c) przy zastosowaniu źródła prądowego.

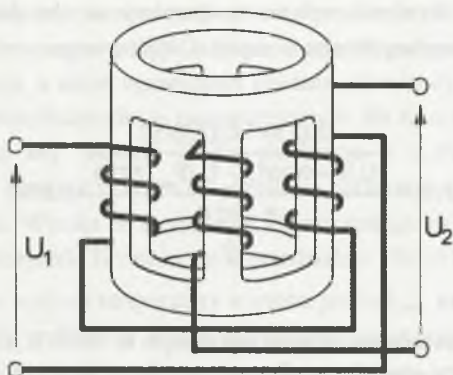
Dodatkowym warunkiem, który należy wziąć pod uwagę, jest uzyskanie jak największej czułości przetwornika. Czułość jest maksymalna, jeżeli zakres zmian napięcia wyjściowego, odpowiadający zmianie siły w całym zakresie przetwarzania, jest maksymalny. Najkorzystniejszy pod tym względem jest przypadek b), jednakże wymagane jest wówczas zastosowanie trudnego w realizacji źródła o ujemnej impedancji wewnętrznej. Praktycznie więc najkorzystniejszy jest przypadek b), wymagający zastosowania źródła prądowego o stałej wartości skutecznej. W przypadku a) możliwe byłoby zastosowanie łatwego w realizacji źródła napięciowego o odpowiednio dobranej impedancji wewnętrznej, jednakże czułość jest w tym przypadku najmniejsza.

W przedstawionych wyżej rozważaniach brano pod uwagę tylko dwie skrajne wartości temperatury. Gdyby charakterystyki $U_2 = f(I_1)$ uzyskane przy stałej sile dla wszystkich temperatur w badanym przedziale przecinały się w tym samym punkcie „niewrażliwości” na temperaturę (X , rys.4), to możliwa byłaby całkowita eliminacja wpływu temperatury. Badania wykazują, że tak, niestety, nie jest. Odpowiednie punkty przecięcia nie pokrywają się idealnie, co zostało zilustrowane (bez zachowania skali) na rys.5. W takiej sytuacji całkowita kompensacja nie jest możliwa, a efekt jest tym lepszy, im punkty te leżą bliżej siebie.



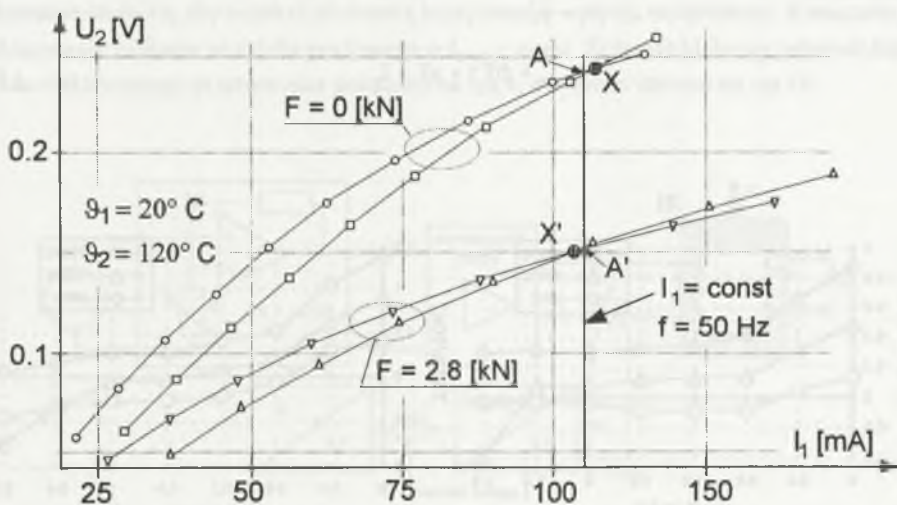
Rys.5. Przesunięcia krzywej magnesowania dla różnych temperatur

Fig. 5. Location of the magnetization curves for different temperatures



Rys.6. Konstrukcja przetwornika kolumnowego
 Fig.6. Construction of the column type transducer

Biorąc pod uwagę przedstawione wyżej uwagi, spośród badanych magnetoelastycznych przetworników siły wybrano przetwornik o konstrukcji kolumnowej (rys.6, [2, 3]), wykonany z materiału 0H23J5, zasilany przebiegiem sinusoidalnym o częstotliwości 50Hz. Charakterystyki $U_2 = f(I_1)$ uzyskane dla dwóch wartości temperatur i dwóch wartości mierzonej siły przedstawiono na rys.7.



Rys.7. Charakterystyki magnesowania dla przetwornika kolumnowego z materiału 0H23J5
 Fig.7. Magnetization curves of the column type transducer made of 0H23J5 material

W celu ilościowego określenia wpływu temperatury na charakterystykę przetwarzania zdefiniowano temperaturowy współczynnik napięcia wyjściowego:

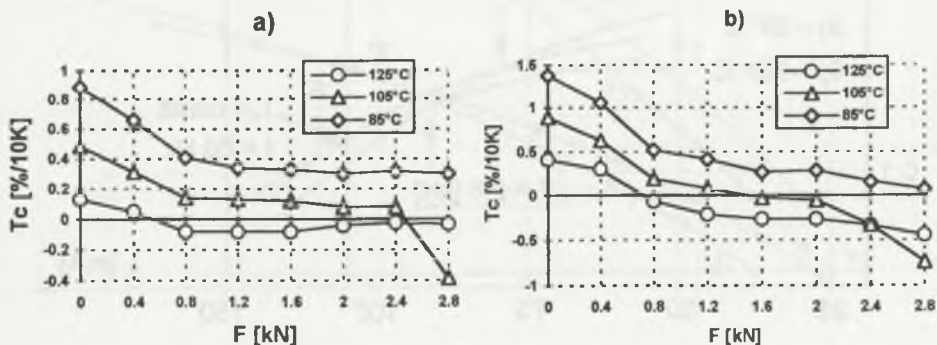
$$T_c(F, \vartheta) = \frac{U_2(F, \vartheta) - U_2(F, 20^\circ\text{C})}{\frac{U_2(F = 0, 20^\circ\text{C}) - U_2(F_{\max}, 20^\circ\text{C})}{\vartheta - 20^\circ\text{C}}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

gdzie:

- T_c jest współczynnikiem temperaturowym wyrażonym w $\%/10\text{K}$, określającym, dla pewnej stałej siły F , stosunek względnej zmiany napięcia wyjściowego do przyrostu temperatury powodującego tę zmianę,
- ϑ jest aktualną temperaturą, 20°C stanowi temperaturę odniesienia,
- F jest siłą aktualnie działającą na przetwornik, F_{\max} określa zakres pomiarowy siły,
- $U_2(F, \vartheta)$ jest napięciem wyjściowym przy aktualnej sile i temperaturze,
- $U_2(F = 0, 20^\circ\text{C}) - U_2(F_{\max}, 20^\circ\text{C})$ jest przyrostem napięcia wyjściowego odpowiadającym zakresowi pomiarowemu siły, przy temperaturze odniesienia.

Na rysunku 8a pokazano zależność $T_c = f(F)$ uzyskaną przy doborze prądu wzbudzenia o wartości skutecznej zależnej od mierzonej siły według równania prostej wyznaczonej przez punkty X i X':

$$I_{1\text{RMS}} = f(F) = aF + I_0. \quad (2)$$



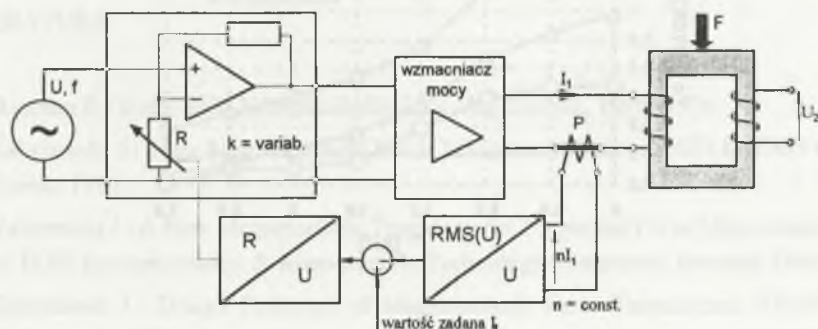
Rys. 8. Współczynniki temperaturowe dla zasilania prądowego $I_{1\text{rms}} = f(F)$ (a) i $I_{1\text{rms}} = \text{const.}$ (b)
 Fig. 8. Temperature coefficients for current supply source: $I_{1\text{RMS}} = f(F)$ (a) and $I_{1\text{RMS}} = \text{const.}$ (b)

Parametry a i I_0 zostały wyznaczone graficznie z charakterystyk $U_2 = f(I_1)$ pokazanych na rys.7, otrzymanych dla temperatury 120°C . Badania przeprowadzono w temperaturze nieco innej (125°C). Ta różnica, a także ograniczona dokładność metody graficznej powoduje, że nie uzyskano zerowych współczynników temperaturowych dla sił równych 0 i F_{max} , jednakże w całym zakresie zmian siły, wartość T_c nie przekracza $\pm 0,2\%/10\text{ K}$. Przy przyroście temperatury do wartości innej niż przyjęta do określenia parametrów prostej (2), kompensacja nie jest już tak skuteczna. Wynika to ze zjawiska zilustrowanego na rys.6. Dla różnych przyrostów temperatur współczynnik T_c mieści się w przedziale $\pm 1\%/10\text{ K}$.

W trakcie pomiarów wpływu temperatury wartości prądu I_{RMS} nastawiano ręcznie według zależności (2). Realizacja praktyczna źródła zasilającego przetwornik prądem zależnym od wartości mierzonej siły nie jest możliwa. Stosunkowo łatwo jest natomiast zrealizować źródło zasilające o $I_{\text{RMS}} = \text{const}$. Wyznaczone w ten sposób charakterystyki $T_c = f(F)$ pokazano na rys.8b. W przypadku omawianego wyżej przetwornika powoduje to pewne pogorszenie kompensacji wpływu temperatury ($\pm 1,5\%/10\text{ K}$), jednakże współczynnik temperaturowy jest kilkakrotnie mniejszy niż przy zasilaniu ze źródła o stałym napięciu (w najlepszym przypadku ok. $6\%/10\text{ K}$) [5].

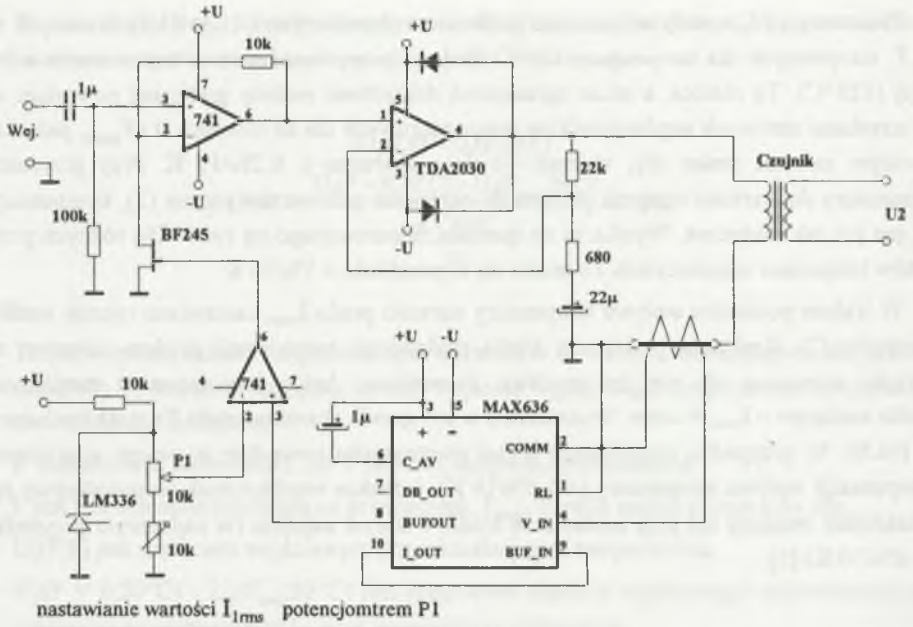
3. UKŁAD ELEKTRYCZNY MAGNETOELASTYCZNEGO PRZETWORNIKA SIŁY

W świetle przytoczonych wyżej uwag można stwierdzić, że możliwe jest takie zaprojektowanie czujnika, aby uzyskać skuteczną kompensację wpływu temperatury. Konieczne jest zastosowanie zasilania ze źródła prądowego o $I_{\text{RMS}} = \text{const}$. Schemat blokowy odpowiedniego układu elektrycznego przetwornika pokazano na rys.9, a schemat ideowy na rys.10.



Rys.9. Schemat blokowy układu elektrycznego przetwornika

Fig.9. Block diagram of the magnetoelastic force transducer electric circuit



Rys. 10. Schemat ideowy układu elektrycznego przetwornika

Fig. 10. Schematic diagram of the magnetoelastic force transducer electric circuit

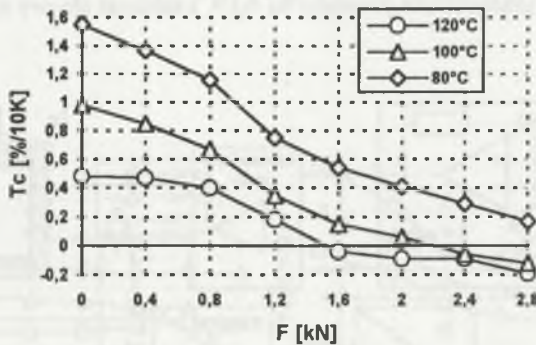
Rys. 11. Współczynniki temperaturowe dla zasilania prądowego $I_{IRMS} = \text{const.}$ (w układzie z rys. 10).

Fig. 11. Temperatur coefficients for constant current supply source (circuit shown in Fig. 10)

Jest to układ regulacji stałowartościowej. Napięcie wtórne transformatora P proporcjonalne jest do aktualnej wartości prądu I_1 . Po przetworzeniu na napięcie stałe proporcjonalne do wartości skutecznej I_1 następuje porównanie z wartością zadaną. Sterowana napięciem rezystancja R umożliwia dobranie takiej wartości wzmocnienia wzmacniacza wstępnego, aby wartość skuteczna prądu I_1 była równa zadanej.

Wyniki badań właściwości temperaturowych magnetoelastycznego przetwornika siły, uzyskane przy zastosowaniu omówionego wyżej układu do stabilizacji wartości skutecznej prądu zasilającego uzwojenie pierwotne, pokazano na rys. 11. Nastawiono taką samą wartość prądu, jak przy omówionej wyżej regulacji ręcznej.

4. UWAGI KOŃCOWE

Zastosowanie omówionej wyżej metody kompensacji pozwala kilkakrotnie zmniejszyć wpływ temperatury na napięcie wyjściowe magnetoelastycznego przetwornika siły. Nie jest przy tym konieczne zastosowanie dodatkowego czujnika temperatury, ani dodatkowego przetwornika siły w układzie różnicowym. Kompensacja jest skuteczna w szerokim zakresie temperatur (do ok. 120°C), odpowiadającym pracy przetwornika w warunkach przemysłowych. Wyznaczone w trakcie badań praktycznie osiągalne wartości współczynnika temperaturowego są na poziomie $\pm 1,5 \text{ \%}/10 \text{ K}$, co jest wartością dopuszczalną w wielu zastosowaniach. Są to jednak wartości większe niż uzyskiwane dla tensometrycznych przetworników siły. Dalsze zmniejszenie wpływu temperatury możliwe jest przez stosowanie układów różnicowych z przetwornikiem biernym lub czujników temperatury w celu wyznaczenia poprawek temperaturowych.

LITERATURA

1. Bauman E.: Elektrische Kraftmesstechnik, Verlag Technik, Berlin 1976.
2. Zakrzewski J.: New Magnetoelastic Force Transducer, Procc. of XIII IMEKO Congress, Torino 1994.
3. Zakrzewski J.: A New Magnetoelastic Transducer for Torque and Force Measurement. Procc. of IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference, Brussels 1996.
4. Zakrzewski J.: Design Problems of Magnetoelastic Force Transducers, IOS-Press, The Netherlands, 1996.

5. Urzędniczek H., Zakrzewski J.: Selfkompensation of Temperature Influence in Magnetoelastic Force Transducers, Procc. of IMEKO TC-3 Symp., Warsaw 1995.
6. Kwiczala J.: Magnetoelastic Properties of some Fe, Cr, Al Alloys, Procc. of EMMA'95 Conference, Wien 1995.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Danuta Turzeniecka

Wpłynęło do Redakcji dnia 20 maja 1997

Abstract

The principle of operation of magnetoelastic force transducers is based on the effect of magnetoelasticity — the fact that magnetic properties of a material depend on stress applied to the material. The accuracy of magnetoelastic force transducers is usually smaller than that of strain gauge transducers, but their low price, small dimensions, simple construction and comparatively high level of output signal make them very useful in industrial work conditions. In such conditions the low temperature coefficient is of great importance.

Temperature influence compensation in magnetoelastic force transducers is usually realized by applying a differential method (with an additional „idle” sensor), or by measuring temperature and correction of results. A new idea, called „selfcompensation method” and described in details in [5], is applied to the measuring circuit described in this paper. Neither additional „idle” sensor nor temperature sensor is necessary.

A simple measuring circuit with magnetoelastic force transducer is shown in Fig. 1. The output voltage U_2 depends on the force F (curve $U_2(F)$ in Fig. 3). Unfortunately, $U_2(F)$ curves change their positions due to the influence of temperature. By applying a circuit shown in Fig. 9 as a block structure and in Fig. 10 in details, and tuning properly the preset value (RMS) of the exciting current I_1 it is possible to reduce considerably the temperature influence. Total compensation is not possible. The obtained values of temperature influence coefficient defined by Eq. (1) are less than 1.5 %/10 K. This is acceptable in many applications during force measurements .