

Wiesław MICZULSKI

POLITECHNIKA ZIELONOGÓRSKA
INSTYTUT METROLOGII ELEKTRYCZNEJ

Układy mostkowe z przetwarzaniem kątów przesunięć fazowych w pomiarach wielkości nieelektrycznych¹⁾

Dr inż. Wiesław MICZULSKI

– studia wyższe ukończył na Wydziale Elektrycznym Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Zielonej Górze w 1979 r. Po ukończeniu studiów rozpoczął pracę w Instytucie Automatyki i Metrologii Elektrycznej w Wyższej Szkole Inżynierskiej w Zielonej Górze. Stopień doktora nauk technicznych uzyskał na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej w 1989 r. Aktualnie dyrektor Instytutu Metrologii Elektrycznej Politechniki Zielonogórskiej. Jest autorem ponad 40 publikacji naukowych i 2 patentów. Główny obszar zainteresowań obejmuje pomiary impedancji.



Streszczenie

Przedstawiono możliwości zastosowania metody przetwarzania kątów przesunięć fazowych (PKPF) w układach mostkowych współpracujących z czujnikami. Określono zależności opisujące charakterystyki przetwarzania oraz wskazano możliwości kształtowania przebiegu tych charakterystyk. Z przeprowadzonych analiz oraz badań doświadczalnych układów mostkowych z zastosowaniem metody PKPF wynika, że możliwa jest budowa nowej grupy przetworników wielkości nieelektrycznych.

Abstract

In the paper, application possibilities of phase shift angle conversion method to bridge circuits with sensors are presented. There are defined dependencies of processing characteristics and possibilities of their shaping are outlined. Results of analysis of bridge circuits with conversion of phase shift angle to co-operation with sensors shown that it is possible to build a new generation of non-electrical quantities transducers.

Wstęp

Wielkościami wyjściowymi parametrycznych czujników wielkości nieelektrycznych na elektryczne są m.in. moduł impedancji (np. absorpcyjne przetworniki wilgotności), rezystancja (np. tensometryczne przetworniki naprężeń), pojemność (np. przetworniki grubości materiałów) i indukcyjność (np. przetworniki przesunięć liniowych), których wartości mogą być wyznaczane w różnych układach pomiarowych, głównie z zastosowaniem metod niezerowych. O strukturze układu pomiarowego oraz jego parametrach i właściwościach (np. napięcie zasilania, częstotliwość pracy, czułość, dokładność pomiaru) decydują głównie właściwości metrologiczne czujników. Ponadto obserwowany w ostatnim okresie rozwój rozproszonych systemów kontrolno-pomiarowych, których podstawowym elementem są inteligentne węzły pomiarowe zawierające m.in. parametryczne przetworniki wielkości nieelektrycznych, wymusza stosowanie takiej struktury układu pomiarowego, która zapewniłaby pomiar impedancji o dowolnym charakterze w szerokim zakresie ich wartości i częstotliwości pracy na określonym poziomie czułości i dokładności. Dlatego też istotne staje się poszukiwanie metod i układów pomiarowych umożliwiających spełnienie powyższych wymagań.

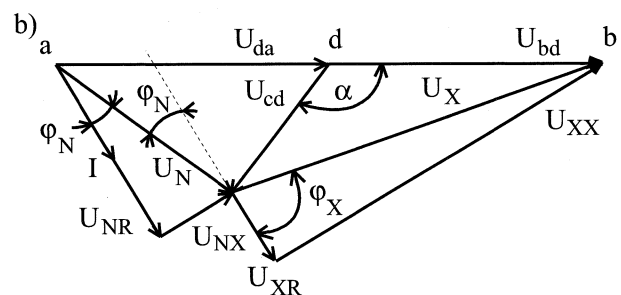
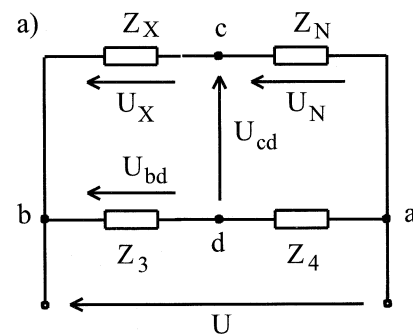
Jedną z najczęściej stosowanych metod w układach pomiarowych współpracujących z czujnikami wielkości nieelektrycznych jest metoda mostkowa. Niewielkie zmiany parametrów czujników pod wpływem wielkości mierzonych powodują nieduże zmiany napięcia na przekątnej pomiarowej układu mostkowego. Wymaga to

stosowania wzmacniaczy o dużych wartościach wzmocnienia jak i ochrony układu przed zakłóceniami. Dotychczasowe prace [m.in. 3, 6] związane z zastąpieniem przetwarzania impedancji na napięcie na przetwarzanie impedancji na kąt przesunięcia fazowego wskazują, że układy mostkowe z zastosowaniem metody PKPF (przetwarzania kątów przesunięć fazowych) charakteryzują się dużo większą czułością, ale i również dużą nieliniowością charakterystyki statycznej w szerokim zakresie zmian kąta fazowego. Linearyzacja charakterystyki statycznej parametrycznego modulatora kąta fazowego może być przeprowadzona dwoma sposobami. Pierwszy z nich związany jest z odpowiednią konstrukcją układu modulatora kąta fazowego, prezentowaną m.in. w pracy [8], wynikającą z proponowanej metody linearyzacji charakterystyki [9]. Drugi sposób dotyczy programowej linearyzacji charakterystyki statycznej, stosowany jako jedno z wielu zadań realizowanych w inteligentnych przetwornikach pomiarowych [1], które stanowią podstawowe wyposażenie inteligentnych węzłów pomiarowych.

Układ mostkowy z przetwarzaniem kątów przesunięć fazowych

Zasada pomiaru

W mostku prądu przemiennego napięcie przekątnej mostka (rys.1a) określone jest zależnością

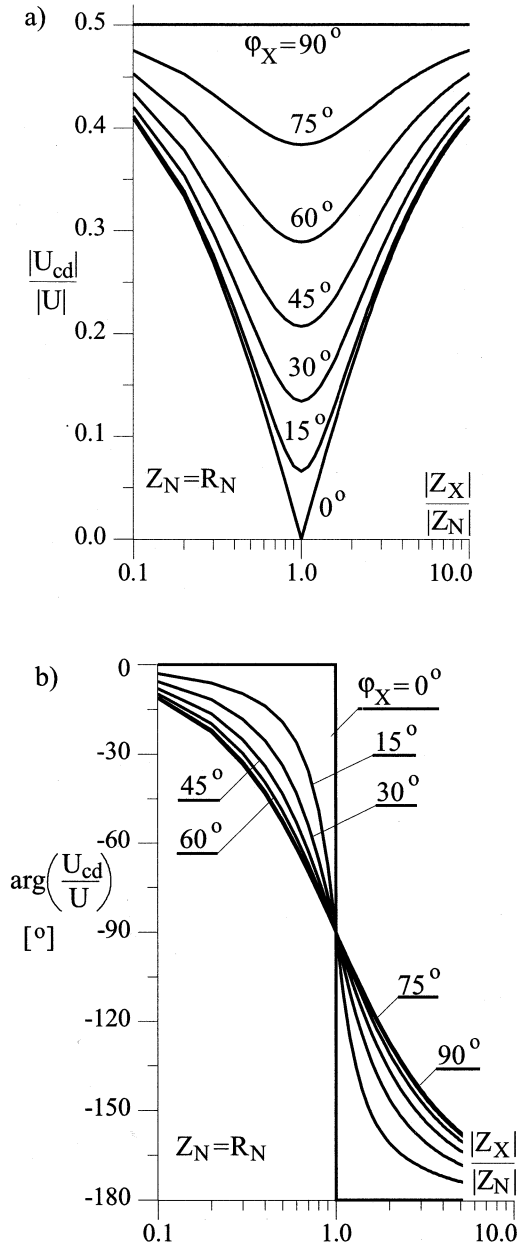


Rys. 1: a) mostek prądu przemiennego, b) wykres wektorowy dla $Z_3 = Z_4 = R$

¹⁾ Projekt badawczy KBN Nr 8 T10C 024 14 pt. „Zasady projektowania rozproszonych systemów pomiarowych i ich komponentów”.

$$U_{cd} = U \frac{Z_N Z_3 - Z_X Z_4}{(Z_N + Z_X)(Z_3 + Z_4)} \quad (1)$$

Moduł i argument napięcia U_{cd} zależą między innymi od wartości mierzonej impedancji Z_X . Na rys. 2 przedstawiono przykładowe charakterystyki zmian modułu i argumentu napięcia U_{cd} dla różnych wartości argumentu φ_X mierzonej impedancji Z_X przy założeniu, że impedancję Z_N stanowi rezystor R_N . Podobne przebiegi prezentowanych charakterystyk występują przy innych wartościach argumentu φ_X i charakterze wzorca Z_N [4]. Z charakterystyk tych m.in. wynika, że:



Rys. 2: a) względne zmiany napięcia wyjściowego mostka w zależności od zmiany wartości impedancji Z_X dla różnych wartości argumentu φ_X
b) zależność zmiany kąta przesunięcia fazowego między napięciami U_{cd} a U w zależności od zmiany wartości impedancji Z_X dla różnych wartości argumentu φ_X

- 1) wartość kąta przesunięcia fazowego między napięciami U_{cd} i U zależy od wartości impedancji Z_X , a dla określonych wartości $|Z_X|$, φ_X i charakteru impedancji Z_N jest to zależność w przybliżeniu liniowa;
- 2) największą czułość układu osiąga się w przypadku, gdy wartości modułu i argumentu impedancji Z_X są zbliżone do wartości modułu i argumentu impedancji Z_N [3], występują jednak wtedy małe wartości napięcia U_{cd} ;
- 3) pomiar impedancji Z_X metodą PKPF jest możliwy do realizacji wówczas, gdy $Z_X \neq Z_N$ i $|U_{cd}| > 0$ co oznacza, że gdy:
 - impedancję Z_N stanowi rezystor R_N , to argument mierzonej impedancji Z_X musi być różny od zera ($\varphi_X \neq 0$),
 - impedancję Z_N stanowi kondensator C_N , to argument mierzonej impedancji Z_X musi być różny od $-\pi/2$ ($\varphi_X \neq -\pi/2$).

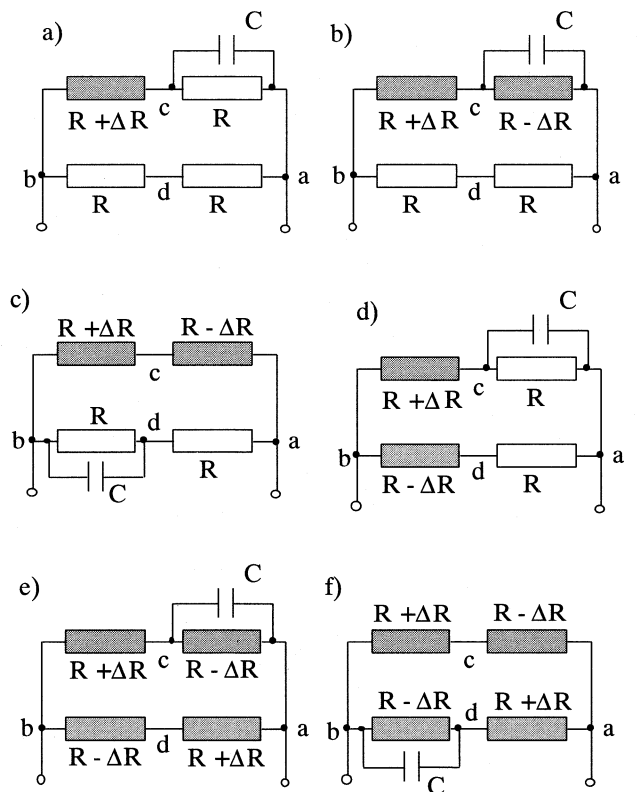
Z powyższych wniosków wynika, że kąt przesunięcia fazowego między napięciami U_{cd} a U może być miarą mierzonej wielkości nieelektrycznej. Ze względu na czułość charakterystyki przetwarzania najkorzystniejszy jest pomiar kąta przesunięcia fazowego (α) między napięciami U_{cd} a U_{bd} (rys.1b) [5], którego wartość można obliczyć z zależności [4]:

$$\alpha = \arctg \frac{\text{Im}(W)}{\text{Re}(W)} \quad (2)$$

gdzie:

$$W = \frac{U_{cd}}{U_{bd}} = \frac{Z_N Z_3 - Z_X Z_4}{(Z_N + Z_X) Z_3} \quad (3)$$

W układach mostkowych z przetwarzaniem kątów przesunięć fazowych przeznaczonych do współpracy z czujnikami wielkości nieelektrycznych można wyróżnić, podobnie jak w dotychczas znanych mostkach niezrównoważonych, układy ćwierćmostków (z jednym czujnikiem), półmostków (z dwoma czujnikami) i pełnych most-



Rys. 3. Przykładowe układy mostkowe z czujnikiem rezystancyjnym

ków (z czterema czujnikami). W zależności od typu czujnika (rezystancyjny, pojemnościowy, indukcyjnościowy), zgodnie z wnioskami wynikającymi z rys. 2, należy dobrać odpowiednio elementy mostka. Na rys. 3 przedstawiono przykładowe układy mostków z 1, 2 i 4 czujnikami rezystancyjnymi, w których w jedno z ramion mostka włączono kondensator C (zgodnie z wnioskiem 3 wynikającym z rys. 2). Podobne układy mostkowe (po uwzględnieniu wniosków wynikających z rys. 2) mogą być zdefiniowane dla czujników pojemnościowych lub indukcyjnościowych. Wzory opisujące zależność kąta α od względnych zmian rezystancji czujnika (δ_R) dla poszczególnych układów są następujące:

- dla układu mostkowego wg rys. 3a

$$\alpha = \arctg \left[\frac{4\pi f \tau (1 + \delta_R)}{\delta_R (2 + \delta_R) (1 + 4\pi^2 f^2 \tau^2) + 4\pi^2 f^2 \tau^2} \right] \frac{180}{\pi} \quad (4)$$

- dla układu mostkowego wg rys. 3b

$$\alpha = \arctg \left[\frac{\pi f \tau (1 - \delta_R) (1 - \delta_R^2)}{\delta_R + \pi^2 f^2 \tau^2 (\delta_R^2 - 1)^2} \right] \frac{180}{\pi} \quad (5)$$

- dla układu mostkowego wg rys. 3c

$$\alpha = \arctg \left[\frac{\pi f \tau (\delta_R + 1)}{\delta_R} \right] \frac{180}{\pi} \quad (6)$$

- dla układu mostkowego wg rys. 3d

$$\alpha = \arctg \left[\frac{\pi f \tau (1 + \delta_R) (2 - \delta_R)}{\delta_R (2 + \delta_R) + 2\pi^2 f^2 \tau^2 (1 + \delta_R)^2} \right] \frac{180}{\pi} \quad (7)$$

- dla układu mostkowego wg rys. 3e

$$\alpha = \arctg \left[\frac{\pi f \tau (1 - \delta_R) (1 - \delta_R^2)}{2\delta_R + \pi^2 f^2 \tau^2 \delta_R [(\delta_R^2 - 1)^2 + \delta_R (\delta_R^2 - 2)]} \right] \frac{180}{\pi} \quad (8)$$

- dla układu mostkowego wg rys. 3f

$$\alpha = \arctg \left[\frac{\pi f \tau (\delta_R + 1) (1 - \delta_R^2)}{2\delta_R} \right] \frac{180}{\pi} \quad (9)$$

gdzie:

$$\tau = RC,$$

f – częstotliwość napięcia zasilania mostka,

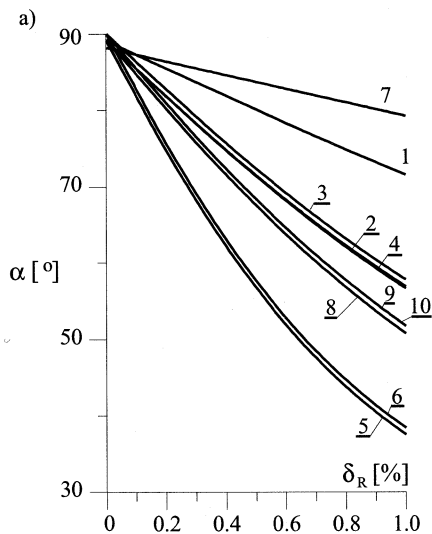
$$\delta_R = \frac{\Delta R}{R} \quad \text{– względna zmiana rezystancji czujnika wielkości nieelektrycznej.}$$

Wadą układów mostkowych przedstawionych na rys. 3, w stosunku do klasycznych układów półmostków i pełnych mostków, jest błąd temperaturowy charakterystyki przetwarzania wynikający z zależności pojemności kondensatora C od temperatury.

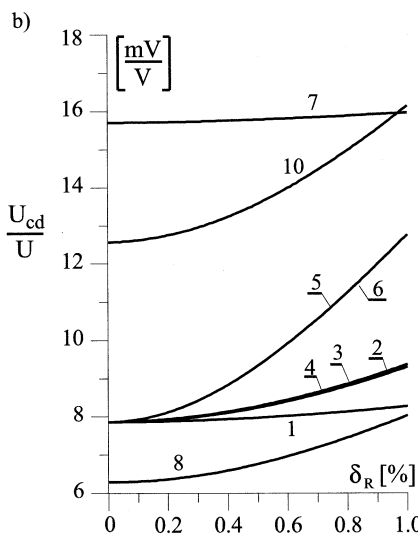
Wyniki badań

Na rys. 4a przedstawiono wyniki badań symulacyjnych charakterystyki $\alpha = f(\delta_R)$ dla poszczególnych układów mostkowych z rys. 3, wyznaczone na podstawie zależności (4÷9). Z charakterystyk tych wynika, że czułość charakterystyki przetwarzania układu mostkowego zależy od wartości iloczynu $f\tau$ i jest największa dla mostków

z czterema czujnikami, przy tej samej wartości iloczynu $f\tau$. Zwiększenie wartości iloczynu $f\tau$ powoduje zmniejszenie błędu nieliniowości, ale i również zmniejszenie czułości charakterystyki przetwarzania przy jednoczesnym wzroście wartości napięcia na przekątnej mostka (krzywe 1 i 7, 6 i 10). O przebiegu charakterystyki $\alpha = f(\delta_R)$ decyduje również sposób włączenia kondensatora C . Dla układu półmostka i pełnego mostka najkorzystniejszymi są sposoby prezentowane na rys. 3c i rys. 3f. Takie włączenie kondensatora w tych układach powoduje, że dla $\delta_R = 0$ wartość kąta α jest równa 90° i nie zmienia się przy zmianach wartości iloczynu $f\tau$.



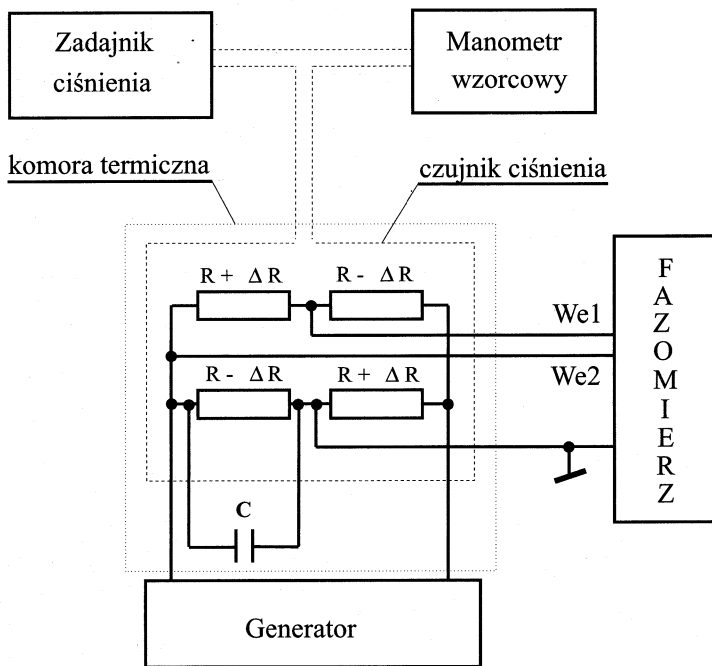
1 - rys.3a, $f\tau = 5 \cdot 10^{-3}$ 2 - rys.3b, $f\tau = 5 \cdot 10^{-3}$
 5 - rys.3e, $f\tau = 5 \cdot 10^{-3}$ 6 - rys.3f, $f\tau = 5 \cdot 10^{-3}$
 9 - rys.3c, $f\tau = 4 \cdot 10^{-3}$ 10 - rys.3f, $f\tau = 8 \cdot 10^{-3}$



3 - rys.3c, $f\tau = 5 \cdot 10^{-3}$ 4 - rys.3d, $f\tau = 5 \cdot 10^{-3}$
 7 - rys.3a, $f\tau = 10 \cdot 10^{-3}$ 8 - rys.3b, $f\tau = 4 \cdot 10^{-3}$

Rys. 4. Zmiany kąta α i napięcia U_{cd} w zależności od względnych zmian rezystancji δ_R dla układów mostkowych z rys. 3 przy różnych wartościach iloczynu $f\tau$

Cenną właściwością układów mostkowych, z zastosowaniem metody PKPF, współpracujących z czujnikami jest możliwość kształtowania charakterystyki przetwarzania (liniowości i zakresu zmian kąta fazowego) poprzez odpowiedni dobór wartości iloczynu $f\tau$.



Rys. 5. Układ do wyznaczania charakterystyki przetwarzania czujnika ciśnienia

Przykładowo w układzie z rys. 3f dla przyjętego zakresu zmian $\delta_R = 0 \div 1\%$ i wartości błędności nieliniowości charakterystyki przetwarzania $\delta_n = 0.2\%$ zmiana kąta fazowego $\Delta\alpha$ wynosi 20° przy $f\tau = 17.5 \cdot 10^{-3}$. Natomiast dla przyjętego 5 razy mniejszego zakresu zmian $\delta_R = 0 \div 0.2\%$ i przy założeniu, że $\delta_n = 0.2\%$, zmiana kąta fazowego $\Delta\alpha$ jest równa 20° dla $f\tau = 3.4 \cdot 10^{-3}$. Większy zakres zmian kąta fazowego dla przyjętego zakresu zmian $\delta_R = 0 \div 1\%$ jest możliwy do osiągnięcia przy określonej wartości iloczynu $f\tau$ (dla $f\tau = 7.5 \cdot 10^{-3}$ $\Delta\alpha = 40^\circ$ przy $\delta_n = 1.5\%$, dla $f\tau = 3.5 \cdot 10^{-3}$ $\Delta\alpha = 61^\circ$ przy $\delta_n = 6.5\%$)

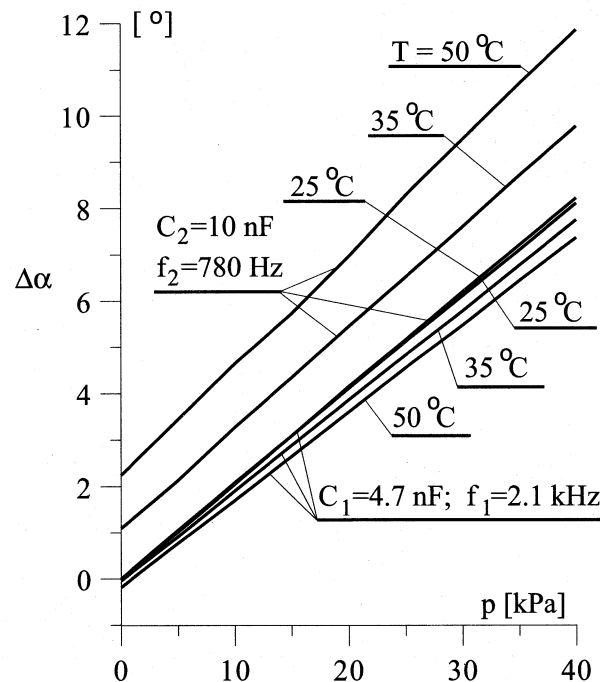
Badania doświadczalne charakterystyki przetwarzania układu mostkowego przeprowadzono na przykładzie piezorezystancyjnego czujnika ciśnienia, o zakresie pomiarowym $0 \div 40$ kPa, pracującego w układzie pełnego mostka. Średnie względne zmiany rezystancji piezorezystorów wynoszą około 1%. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rys. 5. Do jednego z piezorezystorów dołączono równolegle, zgodnie z rys. 3f, kondensator C . Przyrost kąta przesunięcia fazowego $\Delta\alpha$ (w stosunku do wartości początkowej równej 272.91°) mierzono fazomierzem typu 6620, firmy Krohn-Hite (USA), o dokładności pomiaru kąta równej 0.05° i rozdzielczości 0.01° . Jako przyrząd wzorcowy do pomiaru ciśnienia zastosowano mikroprocesorowy manometr typu 350, firmy Meriam Instrument (USA), o dokładności pomiaru ciśnienia równej 0.05% i rozdzielczości 0.1 kPa. Wybrane wyniki badań charakterystyki przetwarzania czujnika ciśnienia przedstawiono na rys. 6. Przy określonych właściwościach zadajnika ciśnienia i manometru wzorcowego wartość iloczynu $f\tau$ (równą około $50 \cdot 10^{-3}$) dobrano w taki sposób, aby otrzymać liniową charakterystykę przetwarzania czujnika ciśnienia o rozdzielczości 0.05 kPa. Konsekwencją tego była maksymalna zmiana kąta fazowego sygnału wyjściowego o 8° . Pomiar w rzeczywistych warunkach tak niedużych zmian kąta fazowego w obecności szumów i zakłóceń wymaga stosowania odpowiednich metod i układów pomiarowych [7, 8, 9]. W warunkach laboratoryjnych, w jakich prowadzono badania, odchylenia wartości mierzonego kąta fazowego od wartości średniej dla serii pomiarów nie były większe niż 0.02° .

Charakterystyki przetwarzania czujnika ciśnienia wyznaczono w trzech temperaturach (25 , 35 i 50°C) przy zastosowaniu dwóch różnych typów kondensatora C (MKSE i KFPm) różniących się

wartościami pojemności i współczynnikami temperaturowymi. Przy temperaturze 25°C wartość iloczynu $f\tau$, dla układu z kondensatorem C_1 i C_2 , dobrano w taki sposób (poprzez wybór odpowiedniej wartości częstotliwości napięcia zasilania mostka), aby otrzymać liniowe charakterystyki przetwarzania o zbliżonych wartościach czułości. Otrzymane wyniki badań wskazują, że przy danej wartości współczynnika temperaturowego rezystancji piezorezystorów można minimalizować błąd temperaturowy przetworzonego ciśnienia poprzez dobór kondensatora o określonej wartości współczynnika temperaturowego. Innym możliwym sposobem minimalizacji błędów temperatury jest zastosowanie odpowiednio przygotowanej programowej procedury korekcji.

Podsumowanie

Przeprowadzone analizy metrologiczne związane z zastosowaniem metody PKPF w układach mostkowych współpracujących z czujnikami wielkości nieelektrycznych wskazują na możliwość budowy nowej grupy inteligentnych przetworników, w których mierzona wielkość nieelektryczna jest przetwarzana na kąt fazowy. Potwierdzają to otrzymane wyniki badań symulacyjnych i doświadczalnych. W tego typu przetwornikach wielkości nieelektrycznych możliwe jest kształtowanie charakterystyk przetwarzania (liniowości i zakresu zmian kąta fazowego) jak i łatwość uzyskania bardzo dużych czułości, zbliżonych do czułości osiągniętych w mostkach przeciwfazowych. Umożliwia to konstrukcję przetworników, zbudowanych z czujników o tym samym charakterze impedancji (np. czujników rezystancyjnych), przeznaczonych do pomiaru lub detekcji bardzo małych zmian wartości mierzonej wielkości nieelektrycznej. Błąd temperaturowy charakterystyki przetwarzania, jak i jej nieliniowość, mogą być minimalizowane poprzez zastosowanie odpowiednich programowych procedur korekcji.



Rys. 6. Charakterystyki przetwarzania czujnika ciśnienia

Literatura

- [1] R. S. JACHOWICZ, J. WEREMCZUK: Czujniki inteligentne we współczesnej aparaturze pomiarowej. *Elektronizacja* 11/1992, str. 2 – 6.
- [2] J. GAJDA: Optymalizacja algorytmu estymacji chwilowego przesunięcia fazowego. *Pomiary Automatyka Kontrola* 3/1997, str. 68 – 72.
- [3] W. MICZULSKI, W. KULESZA: Czulość układów do pomiaru impedancji metodą przetwarzania kątów przesunięć fazowych. *Mater. konf. VIII Sympozjum „Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych”* Krynica 98, str. 232 – 239, Kraków 1998.
- [4] W. MICZULSKI: Układy do pomiaru impedancji metodą przetwarzania kątów przesunięć fazowych. *Metrologia i Systemy Pomiarowe*, tom V, zeszyt 1 – 2, Warszawa 1998, str. 81 - 95.
- [5] W. MICZULSKI, W. KULESZA: Sposoby realizacji pomiaru impedancji w układzie mostkowym metodą przetwarzania kątów przesunięć fazowych. *Mater. konf. XXX MKM 98, Szczecin 1998*, str. 359 - 364.
- [6] W. MICZULSKI: Impedance measurement by phase shift conversion. *Mater. konf. 10th International Symposium IMEKO TC-4, Italy 1998*, str. 671 - 675.
- [7] J. SIUZDAK: Analiza wpływu szumów i zakłóceń na pomiar fazy sygnałów sinusoidalnych. *Prace naukowe Elektronika z.93, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1991*.
- [8] R. SROKA: Modulator kąta fazowego w wersji „czynnej” – model i jego weryfikacja. *Materiały Sympozjum „Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych”* Krynica 94, str. 60 – 67.
- [9] M. SZYPER, T. P. ZIELIŃSKI, R. SROKA: Spectral analysis of nonstationary signals with wide phase modulation. *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, Vol.41. No 6, 1992, str. 919 – 920.
- [10] T. P. ZIELIŃSKI: Metody estymacji chwilowego przesunięcia fazowego. *Materiały Sympozjum „Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych”* Krynica 95, str. 76 – 100.

Artykuł recenzowany

MWK'2001

V JUBILEUSZOWA SZKOŁA – KONFERENCJA „METROLOGIA WSPOMAGANA KOMPUTEROWO” MWK'2001 w roku 50-LECIA WOJSKOWEJ AKADEMII TECHNICZNEJ

Odbędzie się w dniach 21-24 maja 2001 r. w CENTRUM KONFERENCYJNYM MINISTERSTWA OBRONY NARODOWEJ w WARSZAWIE (21.05.2001 r.) oraz w Wojskowym Ośrodku Wypoczynkowym w RYNI k. WARSZAWY (22-24.05.2001 r.).

**Patronat nad MWK'2001 objęli:
MINISTER OBRONY NARODOWEJ;
MINISTER NAUKI - Przewodniczący KOMITETU BADAŃ NAUKOWYCH**

W ramach SZKOŁY będą wygłoszone cztery wykłady;

- ZABEZPIECZENIE METROLOGICZNE JAKO ISTOTNY SKŁADNIK DETERMINUJĄCY POZIOM WSPÓŁCZESNEJ TECHNIKI SIŁ ZBROJNYCH – S. DĄBROWSKI;
- METODY EKSPERTOWE W PLANOWANIU I ANALIZIE EKSPERYMENTU – Z. POLAŃSKI (wykład wiodący SZKOŁY);
- INTERFEROMETRIA LASEROWA STAN AKTUALNY I PROGNOZA ROZWOJU – M. KUJAWIŃSKA;
- PROBLEMY PROJEKTOWE PRECYZYJNEJ METROLOGII CZASU – J. KALISZ, R. PEŁKA, R. SZPLET

W ramach części konferencyjnej, poza referatami dotyczącymi prac własnych, będą prezentowane prace z tematyki projektów badawczych i celowych finansowanych przez KBN. Konferencji będzie towarzyszyła wystawa sprzętu, oprogramowania i wydawnictw Naukowo-Technicznych.

**PATRONAT MEDIALNY objęło czasopismo Naukowo-Techniczne
POMIARY – AUTOMATYKA – KONTROLA**

Wszystkich metrologów serdecznie zapraszamy do jak zwykle aktywnego i licznego uczestnictwa w MWK'2001

Przewodniczący
Komitetu Organizacyjnego
prof. n. dz. dr hab. inż. C. Przybysz

Przewodniczący
Komitetu Naukowego
prof. dr hab. inż. J. Barzykowski

Bieżące informacje można uzyskać na stronie <http://www.wel.wat.waw.pl>

Adres organizatora: Instytut Podstaw Elektroniki WEL MWK'2001, ul. Kaliskiego 2, 00-908 WARSZAWA 49
skr. poczt. 50 tel. 022-685-91-35, fax 0-22-685-90-81 e-mail: cprzybysz@wel.wat.waw.pl