

Termiczne właściwości indukcyjnego, bezrdzeniowego czujnika odkształceń – teoria i praktyka

JANUSZ NURKOWSKI

Instytut Mechaniki Górotworu PAN; ul. Reymonta 27, 30-059 Kraków

Streszczenie

Opracowanie prezentuje wyniki kontynuacji badań nad zastosowaniem indukcyjnego, bezrdzeniowego czujnika odkształceń, wykonanego z różnych metali. Celem było uzyskanie szerokiego zakresu stabilizacji termicznej czujnika przy zachowaniu dużej pojemności obwodu rezonansowego, z którym współpracuje czujnik, co minimalizuje destabilizujący wpływ niestabilnych pojemności połączeń. W niniejszej pracy przedstawiono poprawione równania określające zależność częstotliwości drgań generatora od temperatury czujnika z nim współpracującego, dla różnych parametrów elektrycznych czujnika i obwodu rezonansowego. Analizie matematycznej poddano także układ pomiarowy złożony z badanego materiału, czujnika odkształceń i łącznika, ze względu na rozszerzalność termiczną tych elementów. Łącznik dopasowuje długość czujnika do żądanej długości bazy pomiarowej. Uzyskane formuły skonfrontowano z wynikami eksperymentów. Stwierdzono dobrą zgodność charakterystyk termicznych czujników wykonanych z miedzi i ze stali węglowej uzyskanych eksperymentalnie z wyznaczonymi na podstawie odpowiednich równań. Dokonano więc symulacji takich charakterystyk dla czujników wykonanych z brązu i mosiądzu. Stwierdzono ich potencjalną przydatność ze względu na korzystną charakterystykę termiczną i właściwości sprężyste. Wyniki dotychczasowych badań skłaniają do dalszych poszukiwań optymalnej konstrukcji czujnika, celem uzyskania zarówno dobrych parametrów elektrycznych jak i mechanicznych, przez wykonanie go przez połączenie różnych materiałów, szczególnie takich jak brąz, mosiądz, manganin oraz stal nisko i wysoko rezystywna.

Słowa kluczowe: indukcyjny czujnik odkształcenia, oscylator z obwodem rezonansowym o dużym tłumieniu, liniowa poprawka częstotliwości

1. Wstęp

Indukcyjny, bezrdzeniowy czujnik odkształceń stosowany od wielu lat w Pracowni Odkształceń Skał PAN. Wykonany jest on w postaci jednowarstwowej cewki z cienkiego drutu sprężynowego. Na badanym materiale jest mocowany poprzez zaczepy przytwierdzone do powierzchni materiału. Zaprojektowanie i skonstruowanie go w Pracowni było koniecznością wynikającą z dużej zawodności rezystancyjnych czujników tensometrycznych naklejanych wprost na próbkę i pracujących w warunkach wysokiego ciśnienia. Czujnik taki jest włączony w obwód rezonansowy, w ten sposób zmiany długości czujnika przekładają się na zmiany indukcyjności tegoż obwodu, co prowadzi do zmiany częstotliwości rezonansowej. Włączając obwód rezonansowy w układ generatora, najlepiej Colpitts'a, można uzyskać przetwornik odkształcenie – częstotliwość. Czujnik cechuje się prostotą wykonania, odpornością na udary mechaniczne i wysokie ciśnienie, a sygnał wyjściowy przetwornika – częstotliwość łatwo jest zmierzyć i zarejestrować. Ma on doskonałe właściwości mechaniczne, które pozwalają na odkształcanie go podczas pomiaru, w zakresie sprężystym, nawet o około 80%. Głównym mankamentem takiego czujnika jest zależność jego indukcyjności nie tylko od zmiany jego długości, ale też od temperatury. Można jednak osiągnąć niezależność częstotliwości drgań od temperatury czujnika, czyli jego kompensację termiczną dla ściśle określonych parametrów obwodu rezonansowego, w szczególności jego pojemności i indukcyjności. Pierwszy skompensowany termicznie czujnik wykonano z wysokorezystywnej stali sprężynowej. Zakres temperatur czujnika wykonanego z wysokorezystywnej stali sprężynowej odpowiadający jego kompensacji termicznej wynosi praktycznie kilkadziesiąt stopni Celsjusza,

a więc wystarczająco dużo do wielu zastosowań. Główną wadą tego czujnika jest mała pojemność obwodu rezonansowego odpowiadająca kompensacji termicznej czujnika. Wynosi ona około 1 nF. Tak mała wartość ogranicza dokładność pomiaru odkształcenia, szczególnie w pomiarach odkształceń w komorze ciśnieniowej, ze względu na stosunkowo duże pasożytnicze pojemności połączeń czujnika z generatorem (głównie elektrycznych przepustów w ścianie komory) wynoszące około 0,1 nF. Wartość ich zależy od temperatury i ciśnienia, więc ograniczają dokładności pomiaru.

Zwiększenie pojemności obwodu rezonansowego próbowano osiągnąć wykonując czujnik z niskorezystywnej stali węglowej. Rezystancja takiego czujnika jest kilkakrotnie mniejsza od czujnika ze stali sprężynowej, więc można uzyskać również kilkakrotnie większe wartości pojemności obwodu rezonansowego [1]. Tak jest istotnie, lecz w konwencjonalnym obwodzie rezonansowym kompensacja termiczna takiego czujnika jest niemożliwa. Kompensację osiągnięto modyfikując odpowiednio obwód rezonansowy przez dodanie kondensatora bocznikującego czujnik. Charakterystyka termiczna czujnika czyli zależność częstotliwość drgań od temperatury czujnika ma, w zmodyfikowanym obwodzie rezonansowym, kształt paraboli. Jest ona wypadkową parabolicznej zależności częstotliwości od termicznych zmian rezystancji czujnika oraz liniowej zależności częstotliwości od rozszerzalności termicznej czujnika. Z tego powodu kompensacja termiczna jest możliwa dla ściśle określonej temperatury, a praktycznie dla pewnego zakresu temperatur w jej otoczeniu.

Pojemność takiego zmodyfikowanego i skompensowanego termicznie obwodu generacyjnego do którego włączono czujnik z niskorezystywnej stali węglowej jest kilkakrotnie większa niż dla czujnika ze stali sprężynowej. Niestety wadą niskorezystywnego czujnika stalowego jest jego mocno paraboliczna charakterystyka termiczna, co znacznie ogranicza zakres zmian temperatury czujnika, ze względu na błędy pomiaru odkształceń. Również paraboliczną charakterystykę termiczną ma czujnik miedziany, lecz jest ona bardziej płaska w porównaniu do charakterystyki czujnika ze stali węglowej. Ponadto wartość pojemności obwodu rezonansowego, która odpowiada kompensacji czujnika miedzianego jest kilkakrotnie większa niż dla czujnika ze stali niskorezystywnej, co jeszcze bardziej pozwala zwiększyć dokładność pomiaru.

W opracowaniu przedstawiono analizę wpływu rozszerzalności cieplnej układu czujnik-wspornik-badany materiał na częstotliwość drgań oraz możliwość jego kompensacji termicznej.

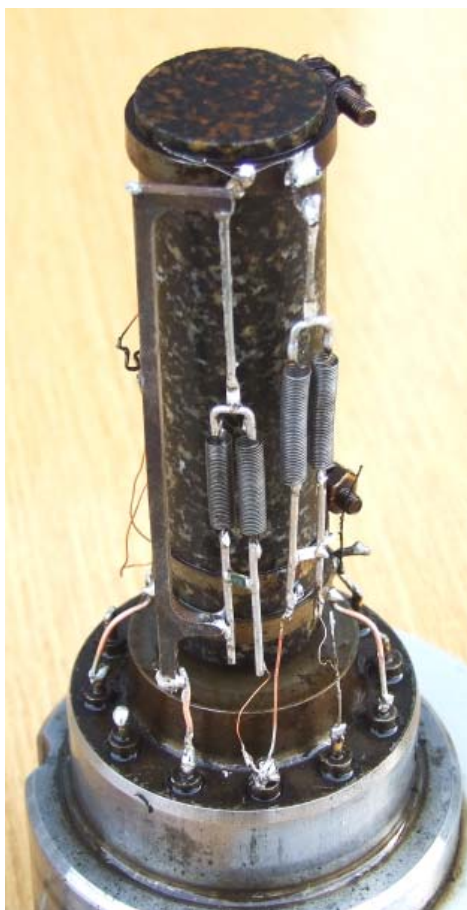
Wykonano również matematyczną analizę wpływu termicznych zmian rezystancji i indukcyjności czujnika na częstotliwość drgań, w oparciu o fazowy warunek generacji drgań. Pozwoliło to na symulację charakterystyki termicznej czujnika, w zależności od parametrów składowych zmodyfikowanego obwodu rezonansowego. Na tej podstawie określono warunki kompensacji termicznej czujników wykonanych z różnych metali oraz sposoby zwiększenia dopuszczalnego zakresu oddziaływania temperatury na czujnik. Analizę teoretyczną skonfrontowano z danymi eksperymentalnymi.

2. Bilans częstotliwości dla zmiennej temperatury układu: czujnik, łącznik, wspornik

Omawiany układ pomiaru odkształceń składa się z badanego materiału, do którego poprzez łącznik (konektor) zamocowany jest indukcyjny czujnik odkształceń współpracujący z generatorem drgań LC. (W opracowaniu poniższym bezrdzeniowy, indukcyjny czujnik odkształcenia będzie nazywany krótko „czujnikiem”). Łącznik wraz z czujnikiem tworzy bazę pomiarową. Badany materiał stanowi wspornik sprężystego czujnika. Wspornikiem może być również materiał odniesienia o znanych właściwościach mechanicznych, w porównawczej metodzie pomiaru odkształcenia [2].

Poniżej przedstawiono analizę matematyczną zmian częstotliwości drgań ze względu na rozszerzalność cieplną poszczególnych elementów układu pomiarowego. Pominięty zostanie w tym rozdziale wpływ termicznych zmian rezystancji czujnika na częstotliwość drgań. Zależność częstotliwości drgań generatora od temperatury czujnika będzie określane krótko jako charakterystyka termiczna czujnika. Brak takiego wpływu temperatury oznaczać będzie jego kompensację termiczną.

Przyjmijmy, że czujnik, wspornik i łącznik znajdują się w takiej samej, lecz zmiennej temperaturze, zaś układ generatora pozostaje w stałej temperaturze. Na skutek rozszerzalności cieplnej drutu, z którego jest wykonany czujnik, przy wzroście temperatury wzrasta średnica jego zwojów a zatem indukcyjność, więc maleje częstotliwość rezonansowa obwodu drgań. Jednocześnie zwiększa się długość wspornika materiału rozciągając czujnik, co zwiększa częstotliwość. Zwiększa się również długość łącznika, co z kolei powoduje spadek częstotliwości na skutek skrócenia czujnika. Tak więc oddziaływanie temperatury na czujnik jest



Rys. 1. Próbką skalną przygotowana do pomiaru ściśliwości. Czujniki w układzie podwójnym: pomiarowy (po prawej), odniesienia zamocowany na stalowym wsporniku (po lewej)

przeciwstawne do oddziaływania na wspornik pod względem częstotliwości generacji. Zjawiska te można wykorzystać do zmniejszenia wpływu temperatury na układ pomiarowy lub nawet jego całkowitej kompensacji termicznej, co zostanie wykazane poniżej.

Bilans zmian częstotliwości można przedstawić za pomocą sumy oddziaływań temperatury na składowe układu pomiarowego:

$$\Delta f_T(\alpha_l, T) = \Delta f_T(l_s, \alpha_{ls}, T) + \Delta f_T(l_w, \alpha_{lw}, T) + \Delta f_T(l_k, \alpha_{lk}, T) \quad (1)$$

gdzie:

$\Delta f_T(\alpha_l, T)$ – termiczne zmiany częstotliwości ze względu na rozszerzalność cieplną elementów układu pomiarowego α_l ,

l_s, l_w, l_k – długość czujnika, wspornika, łącznika,

$\alpha_{ls}, \alpha_{lw}, \alpha_{lk}$ – termiczny współczynnik liniowej rozszerzalności czujnika, wspornika i łącznika.

Można przyjąć, z wystarczającą w tym przypadku dokładnością, wzór na indukcyjność cewki:

$$L_s = \frac{\mu z^2 S_s}{l_s} \approx \frac{\mu_0 z^2 \pi D_s^2}{4 l_s} \quad (2)$$

gdzie:

μ – przenikalność magnetyczna rdzenia cewki, w praktyce równa przenikalności próżni μ_0 , jeśli cewka, czyli czujnik, umieszczona jest w nafcie lub powietrzu,

z, D_s, l_s – ilość zwojów i ich średnica oraz długość czujnika.

Pomijając indukcyjności połączeń i rezystancję czujnika częstotliwość drgań generatora f określi wzór:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_r}} = \frac{\sqrt{l_s}}{\pi z D_s \sqrt{C_r}} \quad (3)$$

gdzie: C_r – pojemność obwodu rezonansowego.

Ponieważ długość czujnika jest różnicą długości wspornika (bazy pomiarowej) i długości łącznika ($l_s = l_w - l_k$) oraz, że długość drutu którym nawinięto czujnik jest ($l_d = \pi z D_s$) otrzymamy:

$$f = \frac{\sqrt{l_w - l_k}}{l_d \sqrt{\pi \mu C_r}} \quad (4)$$

Jeśli temperatura zmieni się o $\Delta T = T - T_0$, zmieniają się wszystkie długości we wzorze (4), stąd po przekształceniach:

$$\frac{f_T(\alpha_l)}{f_0} = \frac{1}{1 + \alpha_{ls} \Delta T} \sqrt{1 + \frac{\Delta T (l_w \alpha_{lw} - l_k \alpha_{lk})}{l_w - l_k}} \quad (5)$$

Można dokonać uproszczenia pierwiastka, gdyż w praktycznie występującym zakresie temperatur i wymiarów układu pomiarowego jego wartość jest bliska jedności, zgodnie z rozwinięciem w szereg i po przekształceniu otrzymać, że:

$$\frac{f_T(\alpha_l)}{f_0} \approx \frac{1}{1 + \alpha_{ls} \Delta T} \left(1 + \frac{\Delta T (l_w \alpha_{lw} - l_k \alpha_{lk})}{2(l_w - l_k)} \right) \approx 1 + \frac{\Delta T (l_w \alpha_{lw} - l_k \alpha_{lk})}{2l_s} \quad (6)$$

a względny przyrost częstotliwości będzie:

$$\frac{\Delta f_T(\alpha_l)}{f_0} = \frac{f_T - f_0}{f_0} = \left(\frac{l_w \alpha_{lw} - l_k \alpha_{lk}}{2l_s} - \alpha_{ls} \right) \Delta T \quad (7)$$

Dla jednej z dwóch sytuacji:

- w układzie pomiarowym nie ma łącznika ($l_k = 0$), czyli baza pomiarowa jest równa długości czujnika,
- wspornik (czyli badany materiał) i łącznik mają taki sam współczynnik rozszerzalności $\alpha_{lw} = \alpha_{lk}$,

równanie (7) uprości się do postaci:

$$\frac{\Delta f_T(\alpha_l)}{f_0} = \left(\frac{\alpha_{lw}}{2} - \alpha_{ls} \right) \Delta T \quad \text{dla } \alpha_{lw} = \alpha_{lk} \quad \text{lub } l_k = 0 \quad (8)$$

Pierwszą ewentualność można łatwo zrealizować. Drugi przypadek będzie możliwy tylko w nielicznych sytuacjach, ponieważ łącznik praktycznie można wykonać tylko z metalu, więc badany materiał musiałby mieć podobną rozszerzalność termiczną.

Możliwy jest jeszcze trzeci przypadek, kiedy współczynnik rozszerzalności łącznika będzie równy zeru. Można go spełnić wykonując łącznik z inwaru (stop żelaza (54-64%) i niklu (36-46%) z niewielkim dodatkiem węgla i chromu), a wtedy:

$$\frac{\Delta f_T(\alpha_l)}{f_0} = \left(\frac{l_w \alpha_{lw}}{2l_s} - \alpha_{ls} \right) \Delta T \quad \text{dla } \alpha_{lk} = 0 \quad (9)$$

W pomiarach odkształceń skał, których współczynnik rozszerzalności termicznej jest na ogół mniejszy od metali, trudno osiągnąć kompensację termiczną układu pomiarowego ze względu na rozszerzalność termiczną czujnika. Najkorzystniejszy przypadek to taki, gdy krótki czujnik zamocowany jest na długim, mało rozszerzalnym łączniku, tworząc długą bazę pomiarową. Wtedy stosunkowo duże wydłużenie próbki może na tyle rozciągnąć krótki czujnik, że znacznie zredukuje to spadek częstotliwości wywołany wzrostem średnicy zwojów czujnika. Warunkiem pełnej kompensacji ze względu na rozszerzalność cieplną układu pomiarowego jest stan gdy:

$$\frac{\Delta f_T(\alpha_l)}{f_0} = \frac{l_w \alpha_{lw} - l_k \alpha_{lk}}{2l_s} - \alpha_{ls} = \frac{l_w \alpha_{lw} - (l_w - l_s) \alpha_{lk}}{2l_s} - \alpha_{ls} = 0 \quad (10)$$

Z wyrażenia (10) można wyliczyć, jaka powinna być długość bazy pomiarowej dla osiągnięcia kompensacji termicznej, przy znanej rozszerzalności termicznej składników układu pomiarowego:

$$l_w = \frac{l_s (2\alpha_{ls} - \alpha_{lk})}{\alpha_{lw} - \alpha_{lk}} \rightarrow l_w = 2l_s \frac{\alpha_{ls}}{\alpha_{lw}} \quad (11)$$

Na podstawie powyższego wzoru można rozpatrzeć dwa przypadki graniczne, kiedy uzyskanie kompensacji termicznej jest niemożliwe:

1. Jeśli rozszerzalność termiczna czujnika i łącznika stają się równe ($\alpha_{ls} \approx \alpha_{lk}$), to długość badanego materiału powinna być nieskończenie mała.
2. Jeśli rozszerzalność termiczna badanego materiału i łącznika stają się równe ($\alpha_{lw} \approx \alpha_{lk}$), to długość badanego materiału powinna dążyć do nieskończoności.

Najkorzystniejsza konfiguracja w pomiarach odkształceń większości skał będzie z łącznikiem inwaryjnym o praktycznie zerowej rozszerzalności. Powyższe rozważania zakładają, że nie ma termicznych zmian rezystancji czujnika, które mają wpływ na częstotliwość drgań. Założenie to będzie spełnione dla czujnika manganinowego. Wtedy zakładając średnią rozszerzalność skał na poziomie $\alpha_l = 8 \cdot 10^{-6}$ i manganinowy czujnik o $\alpha_l = 12 \cdot 10^{-6}$, teoretycznie można skompensować termicznie układ pomiarowy, gdyż zgodnie z wzorami (9) i (11):

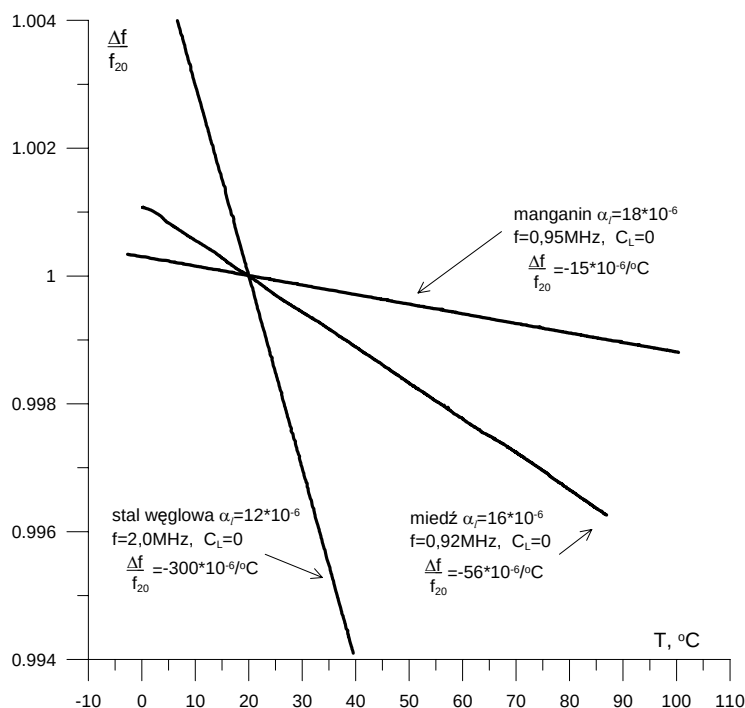
$$l_w = 2l_s \frac{\alpha_{ls}}{\alpha_{lw}} \quad \text{dla } \alpha_{lk} = 0 \quad (11a)$$

W tym wypadku badany materiał winien mieć długość trzykrotnie większą niż czujnik. Optymalna długość czujnika, ze względu na minimalizację wpływu indukcyjności połączeń i maksymalizację jego czułości, wynosi 10 do 20 mm, więc próbka skalna powinna mieć długość w granicach 30 do 60 mm, co koresponduje z wysokością ciśnieniowej komory aparatu GTA-10 równą 100 mm. Czujnik miedziany ($\alpha_{lCu} = 16 \cdot 10^{-6}$) według (11a) powinien być czterokrotnie mniejszy od bazy pomiarowej, w warunkach kompensacji termicznej. W pomiarach innych materiałów lub w innym układzie pomiarowym stosując łącznik o odpowiedniej długości współczynnika rozszerzalności, można uzyskać kompensację termiczną.

Na rys. 2 przedstawiono charakterystyki termiczne czujników wykonanych z: drutu manganinowego o rozszerzalności $\alpha_l \approx 18 \cdot 10^{-6}$, ze stali węglowej ($\alpha_l = 12 \cdot 10^{-6}$) i miedzianego ($\alpha_l = 16 \cdot 10^{-6}$), zamontowane na stalowym wsporniku. Czujniki te umieszczono w kąpeli z podgrzewaną naftą. Odczytane z charakterystyki względne termiczne zmiany częstotliwości dla czujnika manganinowego wynoszą $-15 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, podczas gdy obliczenia wg wzoru (11) dają wartość $-12 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Można uznać dobrą zgodność pomiarów z obliczeniami. Czujnik stalowy i miedziany włączono w układ rezonansowy, o dużej dobroci, który cechuje się małym wpływem termicznych zmian rezystancji czujnika na częstotliwość. Rzeczywiste względne termiczne zmiany częstotliwości wynoszą dla czujnika stalowego $-300 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, a dla miedzianego $-56 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, podczas gdy obliczone wg wzoru (11) wartość około $-0,6 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Różnica między tymi wartościami jest duża, szczególnie w przypadku czujnika stalowego, bo dwudziestokrotna. Przyczyną takiej dużej rozbieżności są prawdopodobnie termiczne zmiany rezystancji czujnika stalowego, które wpływają jednak znacząco na częstotliwość drgań, chociaż biorąc pod uwagę liniową poprawkę częstotliwości [4, 5] wpływ termicznych zmian rezystancji powinny mieć odwrotny skutek do zaobserwowanego. Liniowa poprawka częstotliwości dotyczy wpływu zmian rezystancji cewki, np. termicznych na częstotliwość drgań, według której dla generatorów z obwodem rezonansowym z dzieloną pojemnością, a taki zastosowano, wzrost rezystancji zwiększa częstotliwość.

Wyniki przedstawionych pomiarów sugerują możliwość realizacji skompensowanego układu do pomiaru odkształceń skał wykorzystując manganinowy czujnik i inwaryjny łącznik.

Należy zauważyć, że istnieje wielka dysproporcja w bezwładności termicznej między układem czujnik-łącznik, który wykonany jest z metalowego pręta o grubości maksymalnie 1 mm a walcową próbką skalną o grubości 22 mm, która jest bardzo słabym przewodnikiem ciepła. W związku z tym postulat o równomiernej temperaturze całego układu pomiarowego, na podstawie którego otrzymano powyższe zwory, będzie spełniony tylko w przypadku odpowiednio wolnych zmian temperatury. Sensowne wydaje się więc takie rozwiązanie,



Rys. 2. Charakterystyki termiczne czujników ze stali węglowej, miedzi i manganinu włączone w klasyczny obwód rezonansowy, tzn. bez kondensatora bocznikującego cewkę ($C_L = 0$)

aby tylko czujnik był skompensowany termicznie, a jego użytkownik sam wprowadzał ewentualne korekty w wynikach pomiarów ze względu na rozszerzalność cieplną badanego materiału i łącznika podczas pomiaru odkształcenia. Dysponując hipotetycznym łącznikiem o ujemnym współczynniku rozszerzalności cieplnej można by ograniczyć wpływ temperatury układu czujnik-łącznik na częstotliwość drgań, niestety wydaje się to praktycznie niemożliwe. (jednak według tablic fizycznych [3] istnieje stop żelaza z platyną o ujemnej rozszerzalności cieplnej o symbolu Fe_3Pt , który ma $\alpha_l = -0,5 \cdot 10^{-6}$).

3. Równania opisujące charakterystyki termiczne czujników niskorezystywnych w zmodyfikowanym obwodzie rezonansowym

Stosowany obecnie czujnik wykonany jest z wysokorezystywnej stali sprężynowej, ma on doskonałe właściwości mechaniczne, które pozwalają na odkształcanie go podczas pomiaru, w zakresie sprężystym, nawet do 100%. Jego charakterystyka termiczna jest bardzo płaska, praktycznie jest ona liniowa, więc taki czujnik można stosować w szerokim zakresie temperatur. Główną wadą tego czujnika jest mała pojemność obwodu rezonansowego odpowiadająca kompensacji termicznej czujnika. Wynosi ona około 1 nF. Tak mała wartość ogranicza dokładność pomiaru odkształcenia, szczególnie w pomiarach odkształceń w komorze ciśnieniowej, ze względu na stosunkowo duże pasożytnicze pojemności połączeń czujnika z generatorem (głównie elektrycznych przepustów w ścianie komory) wynoszącą około 0,1 nF. Wartość ich zależy od temperatury i ciśnienia, więc ograniczają dokładność pomiaru, lub zmniejszają zakres zmian temperatury czujnika.

„Wysokorezystywność” oznaczać będzie rezystywność powyżej $\rho = 20 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$. Wykonany z takiego materiału czujnik będzie nazywany „wysokorezystywnym”. Określenie czujnik nisko- lub wysokorezystywny charakteryzuje materiał, z jakiego wykonano czujnik a nie jego małą lub dużą rezystancję.

Konstrukcja czujników niskorezystywnych ma na celu zwiększenie pojemności skupionych obwodu rezonansowego zachowując kompensację termiczną czujników. Zwiększenie pojemności będzie skutkowało redukcją negatywnego wpływu niestabilnych pojemności połączeń na dokładność pomiarów.

Kompensacja termiczna przetwornika odkształcenie-częstotliwość, w którym pracuje czujnik wykonany z niskorezystywnego drutu jak np. stal węglowa lub miedź możliwa jest tylko wtedy, gdy klasyczny obwód rezonansowy z dwoma kondensatorami w układzie dzielnika pojemnościowego uzupełniony jest o dodatkowy kondensator połączony równolegle do cewki (czyli do czujnika). Opis takiego zmodyfikowa-

nego obwodu i sposób wyprowadzenia równania opisującego zależność częstotliwości drgań od temperatury czujnika jest dziełem autora tego opracowania i podano go w [6]. Włączenie dodatkowego kondensatora w obwód rezonansowy znacznie skomplikowało analizę matematyczną, więc aby uzyskać równanie w przystępnej formie umożliwiającej praktyczne jego stosowanie, na wielu etapach przekształceń niezbędne były uproszczenia. Chociaż starano się sprawdzać skutki takich uproszczeń, w końcowym etapie wykonano jedno zbyt daleko idące uproszczenie, w konsekwencji uzyskano liniową zależność częstotliwości generatora od temperatury czujnika. W rzeczywistości zależność ta jest paraboliczna. Na rys. 3 przedstawiono obwód rezonansowy a poniżej równanie opisujące zależności fazowe występujące w nim, szczegółowo omówione w pracy [6].

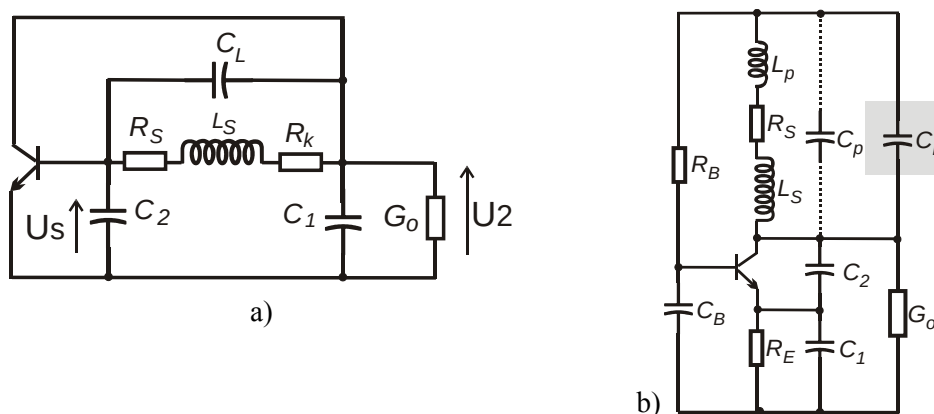
$$\beta_u = \frac{U_s}{U_2} = \frac{i \cdot X_{C2}}{U_2} = \frac{U_2}{\frac{(R_s + R_K + R_w + X_{Ls})}{R_s + R_K + R_w + X_{Ls} + X_{CL}} + X_{C2}} \frac{X_{C2}}{U_2} \quad (12)$$

gdzie:

X_{C2} i X_{CL} – reaktancje pojemnościowe kondensatorów C_2 i C_L ,

R_s, R_K – rezystancja czujnika i klucza przełączającego czujniki lub R_K symbolizujące rezystancje połączeń czujnika pozostające poza wpływem oddziaływania temperatury,

R_w – przetransformowana rezystancja obciążenia generatora G_0 do zacisków cewki.



Rys. 3. Schemat zastępczy (a) i ideowy (b) generatora ze zmodyfikowanym obwodem rezonansowym, czyli z kondensatorem C_L bocznikującym cewkę – czujnik

Ze względu na otrzymanie prostszych formuł przyjęto założenie, że pojemności $C_1 = C_2 = C_{1,2}$. Założenie to sprzyja postulatowi o maksymalizacji pojemności obwodu rezonansowego. Z równania tego, po licznych przekształceniach otrzymano, że zmiana fazy napięcia sprzężenia zwrotnego ze względu na termiczny wzrost rezystancji czujnika będzie:

$$\Delta\phi_{\beta_{uT}} = \left(\frac{R_{rT}}{\sqrt{L_{sT}}} - \frac{R_{r0}}{\sqrt{L_{s0}}} \right) \left(\frac{8 \frac{C_L^2}{C} + 8C_L + 2C_{1,2}}{\sqrt{4C_L + 2C_{1,2}}} \right) = \left(\frac{R_{rT}}{\sqrt{L_{sT}}} - \frac{R_{r0}}{\sqrt{L_{s0}}} \right) \left(\frac{4 \frac{C_L^2}{C_{1,2}} + 4C_L + C_{1,2}}{\sqrt{C_L + 0,5C_{1,2}}} \right) \quad (13)$$

gdzie:

R_{r0}, R_{rT} – rezystancja obwodu rezonansowego w temperaturze początkowej i zmienionej,
 L_{s0} do L_{sT} – indukcyjność czujnika w temperaturze początkowej i zmienionej.

Stwierdzono, że zmiana fazy praktycznie nie zależy od wpływu temperatury na indukcyjność czujnika. Wykazano to na zamieszczonych w dalszej części charakterystykach termicznych czujnika (rys.4). Pozwoliło to na uproszczenie końcowych wzorów.

Znajomość wpływu termicznych zmian rezystancji czujnika na fazę i dobroć obwodu rezonansowego $Q_r(T)$ pozwala wyliczyć zmiany częstotliwości drgań przy oddziaływaniu temperatury na czujnik według wzoru:

$$\frac{\Delta f_T(\alpha_R)}{f_0} = \frac{\Delta \phi_{BuT}}{2Q_r(T)} \quad (14)$$

Po odpowiednich przekształceniach otrzymano równanie opisujące zależność częstotliwości drgań w funkcji temperatury czujnika oraz parametrów generatora (w pracy [6] oznaczone jako (4.1a)):

$$\begin{aligned} \frac{\Delta f_T(\alpha_{Rs})}{f_0} = & \frac{2\Delta T \left(\frac{C_L^2}{C_{1,2}} + C_L + \frac{C_{1,2}}{4} \right)}{L_s (1 + \alpha_l \Delta T)} \left(\frac{L_s G_o \alpha_l}{4C_L + 2C_{1,2}} + R_s (\alpha_{Rs} - \alpha_{ls}) - R_K \alpha_{ls} \right) \cdot \\ & \cdot \left(\frac{L_s G_o (1 + 2\alpha_{ls} \Delta T)}{4C_L + 2C_{1,2}} + R_s (1 + \alpha_{Rs} \Delta T) + R_K \right) \end{aligned} \quad (15)$$

gdzie:

f_T, f_0 – częstotliwość drgań generatora w temperaturze T i początkowej,
 α_{Rs}, α_{ls} – termiczny współczynnik rezystancji i wydłużenia drutu czujnika.

Ostatni człon równania (15) reprezentuje rezystancję obwodu włączoną szeregowo z cewką w postaci sumy konduktancji wyjściowej generatora przetransformowanej do zacisków czujnika oraz rezystancji czujnika R_s i przełącznika wraz z połączeniami R_K .

Przełącznik cyklicznie łączy dwa czujniki: pomiarowy zamocowany do badanego materiału i czujnik odniesienia zamocowany na materiale o znanych właściwościach do tego samego generatora w porównawczej metodzie pomiaru odkształcenia. W zastosowaniach ciśnieniowych przełącznik i generator znajdują się na zewnątrz komory, więc przyjmuje się, że nie działa na nie zmienna temperatura (mogą być termostatowane).

Przyjmując, że zależność rezystancji i rozszerzalności od temperatury czujnika spełniają warunki: $\alpha_{Rs} \gg \alpha_{ls}$ oraz $\alpha_{Rs}, \alpha_{ls} \ll 1$ otrzymano po uproszczeniu równanie (w pracy [6] oznaczone jako (4.2)):

$$\frac{\Delta f_T(\alpha_{Rs})}{f_0} = \frac{2\Delta T}{L_s} \left(\frac{C_L^2}{C_{1,2}} + C_L + \frac{C_{1,2}}{4} \right) \left(\frac{L_s G_o \alpha_{ls}}{4C_L + 2C_{1,2}} + \alpha_R R_s \right) \left(\frac{L_s G_o}{4C_L + 2C_{1,2}} + R_s + R_K \right) \quad (16)$$

Według powyższego równania zależność częstotliwości od temperatury czujnika jest liniowa, więc dla pewnych wartości parametrów obwodu rezonansowego, teoretycznie można uzyskać kompensację termiczną w nieskończenie szerokim zakresie temperatur. Tę rozbieżność między wnioskami wyciągniętymi z powyższego równania a rzeczywistymi własnościami czujnika podkreślono we wnioskach pracy [6]. Eksperymentalnie wyznaczony kształt charakterystyki termicznej czujnika bardzo dobrze opisuje parabola, której wierzchołek wyznacza punkt kompensacji.

Akceptując uproszczenie, że $\alpha_r \gg \alpha_l$ oraz $\alpha_l \ll 1$, to założenie że $R_s(1 + \alpha_R \Delta T) = R_s$ w końcowym czynniku równania (15) jest nadużyciem prowadzącym do niepoprawnej, liniowej funkcji względem temperatury. Właściwa forma równania winna być następująca:

$$\frac{\Delta f_T(\alpha_R)}{f_0} = \frac{2\Delta T}{L_s} \left(\frac{C_L^2}{C_{1,2}} + C_L + \frac{C_{1,2}}{4} \right) \left(\frac{L_s G_o \alpha_l}{4C_L + 2C_{1,2}} + \alpha_R R_s \right) \left(\frac{L_s G_o}{4C_L + 2C_{1,2}} + R_s (1 + \alpha_R \Delta T) + R_K \right) \quad (17)$$

Po przekształceniach równanie (17) można przedstawić w innej formie:

$$\frac{\Delta f_T(\alpha_R)}{f_0} = \frac{2\alpha_R R_s}{L_s} \left(\frac{C_L^2}{C_{1,2}} + C_L + \frac{C_{1,2}}{4} \right) \left(R_s \alpha_R \Delta T^2 + \left(\frac{L_s G_o}{4C_L + 2C_{1,2}} + R_s + R_K \right) \Delta T \right) \quad (18)$$

Jest to równanie paraboli typu: $y_R = k(ax^2 + bx)$

Z równania (7) i (18) można otrzymać wypadkową termicznych zmian częstotliwości:

$$\begin{aligned} \frac{f_T}{f_0} &= 1 + \frac{f_R(\alpha_R, T)}{f_0} + \frac{f_I(\alpha_I, T)}{f_0} = \\ &= 1 + \frac{2\alpha_R R_s}{L_s} \left(\frac{C_L^2}{C_{1,2}} + C_L + \frac{C_{1,2}}{4} \right) \left(R_s \alpha_R \Delta T^2 + \left(\frac{L_s G_o}{4C_L + 2C_{1,2}} + R_s + R_K \right) \Delta T \right) - \left(\frac{l_w \alpha_{lw} - l_k \alpha_{lk}}{2l_s} - \alpha_{ls} \right) \Delta T \end{aligned} \quad (19)$$

Warunkiem kompensacji temperaturowej jest by szybkość zmian częstotliwości związanych z termicznym oddziaływaniem na rezystancję czujnika była równa szybkości zmian częstotliwości związanych z termicznym oddziaływaniem na jego indukcyjność, (ze względu na rozszerzalność cieplną układu czujnik-badany materiał) ale ze znakiem przeciwnym. Matematycznie oznacza to zrównanie się, z odpowiednim znakiem, pochodnych względem temperatury:

$$\begin{aligned} \frac{d}{d(\Delta T)} \left(\frac{f_R(\alpha_R, T)}{f_0} \right) &= - \frac{d}{d(\Delta T)} \frac{f_I(\alpha_I, T)}{f_0} \Rightarrow \\ \frac{2\alpha_R R_s}{L_s} \left(\frac{C_L^2}{C_{1,2}} + C_L + \frac{C_{1,2}}{4} \right) \left(2R_s \alpha_R \Delta T + \frac{L_s G_o}{4C_L + 2C_{1,2}} + R_s + R_K \right) &= - \frac{l_w \alpha_{lw} - l_k \alpha_{lk}}{2l_s} + \alpha_{ls} \end{aligned} \quad (20)$$

W powyższych równaniach nie ma w sposób jawny podanej temperatury odniesienia, lecz jednoznacznie określa ją temperatura, w której dokonano pomiarów wartości rezystancji czujnika oraz wymiarów: czujnika, wspornika i łącznika. Wymiary te między innymi determinują indukcyjność czujnika.

Formuła (19) i (20) nie nakłada ograniczeń na pojemność obwodu rezonansowego, zatem warunek kompensacji podany w powyższym wzorze należy koniecznie uzupełnić warunkiem na możliwość zaistnienia generacji, co określa dobroć obwodu rezonansowego Q :

$$Q = \frac{1}{R_r} \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} > 0,5 \quad (21)$$

w którym występujące parametry oznaczają odpowiednio całkowitą: rezystancję, indukcyjność i pojemność obwodu rezonansowego. W praktyce, aby osiągnąć drgania o wymaganej amplitudzie i stabilności dobroć powinna być jeszcze większa. Postulat ten ogranicza w szczególności maksymalną wartość pojemności obwodu.

Paraboliczny kształt charakterystyki termicznej powoduje, że kompensacja może zaistnieć tylko dla określonej temperatury. W praktyce, akceptując pewien błąd pomiaru z tym związany, kompensacja taka zachodzi dla pewnego przedziału temperatur. Zmiana jakiegokolwiek parametru obwodu rezonansowego przesuwa wierzchołek paraboli w stronę większych lub mniejszych temperatur.

Dla zwiększenia dokładności pomiaru odkształceń korzystnym jest aby:

1. Indukcyjność czujnika i pojemność obwodu rezonansowego były jak największe, co zmniejsza destabilizujący wpływ pasożytniczych indukcyjności i pojemności połączeń czujnika z generatorem,
2. Paraboliczna charakterystyka termiczna czujnika winna być maksymalnie płaska, co daje możliwie duży zakres dopuszczalnych zmian temperatury czujnika (ze względu na błąd pomiaru),
3. Punkt kompensacji musi przypadać na użyteczny zakres temperatur,
4. Zmiany indukcyjności czujnika powinny jak najmniej wpływać na przesunięcie punktu kompensacji termicznej, co zapobiega rozkompensowaniu czujnika w miarę jego odkształcania wraz z badanym materiałem, lub na skutek zmiennej długości początkowej czujnika podczas montażu czujnika na próbce,
5. Względne zmiany częstotliwości drgań pod wpływem odkształcenia badanego materiału były jak największe, czyli żeby czujnik miał dużą czułość.

Z równania (19), a także z praktyki wynika, że do warunku kompensacji termicznej czujnika wchodzi wszystkie parametry elektryczne czujnika i generatora. Powoduje to, że wymienione wymagania są na ogół sprzeczne ze sobą, stąd poszukiwanie takiego czujnika, który byłby ich kompromisem, lub opracowanie kilku typów czujników, stosowanych wymiennie w zależności od konkretnych warunków pomiarowych. Zwiększenie dokładności pomiaru osiągnięto stosując porównawczą metodę pomiaru z czujnikiem od-

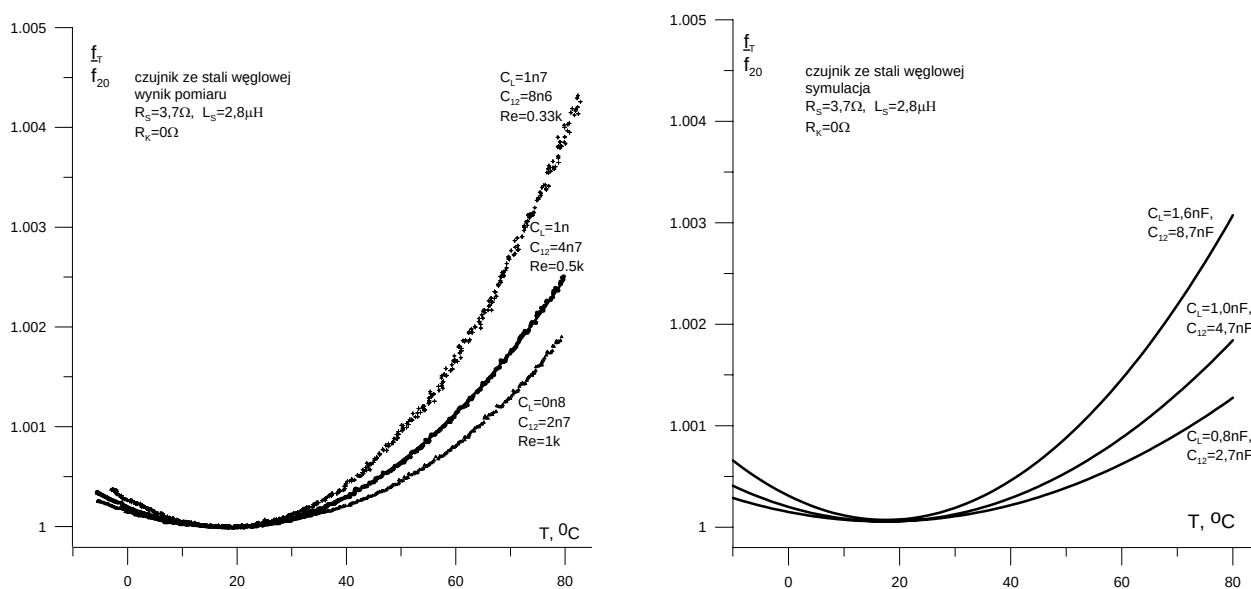
niesienia zamocowanym na materiale o znanych właściwościach mechanicznych. Metodę tą omówiono w opracowaniu [2].

Poniżej pokazano charakterystyki termiczne czujników wykonanych ze stali nisko- i wysokorezystywnej, z miedzi oraz z manganinu. Charakterystyki te otrzymano drogą symulacji wg równania (19) i porównano je z charakterystykami rzeczywistymi uzyskanymi w pomiarach zmian częstotliwości dla czujników umieszczonych w podgrzewanej naftcie. Przedstawiono także pewne sposoby uzyskania lepszych charakterystyk termicznych czujników.

4. Charakterystyka termiczna czujnika wykonanego z niskorezystywnej stali

Jak uprzednio wspomniano, problem uzyskania większej pojemności obwodu rezonansowego próbowano rozwiązać wykonując czujnik z niskorezystywnej stali węglowej. Rezystancja takiego czujnika jest kilkakrotnie mniejsza od czujnika ze sprężynowej stali, więc można uzyskać również kilkakrotnie większe wartości pojemności obwodu rezonansowego [1]. Tak też jest istotnie, lecz w konwencjonalnym obwodzie rezonansowym kompensacja termiczna takiego czujnika jest niemożliwa. Kompensację osiągnięto modyfikując obwód rezonansowy (rys. 3) przez dodanie kondensatora bocznikującego czujnik, uzyskując pojemność obwodu rezonansowego kilkakrotnie większą niż dla czujnika ze stali sprężynowej. Wadą czujnika niskorezystywnego jest silnie paraboliczna charakterystyka termiczna, co znacznie ogranicza zakres zmian temperatury czujnika w porównaniu do czujnika ze stali sprężynowej.

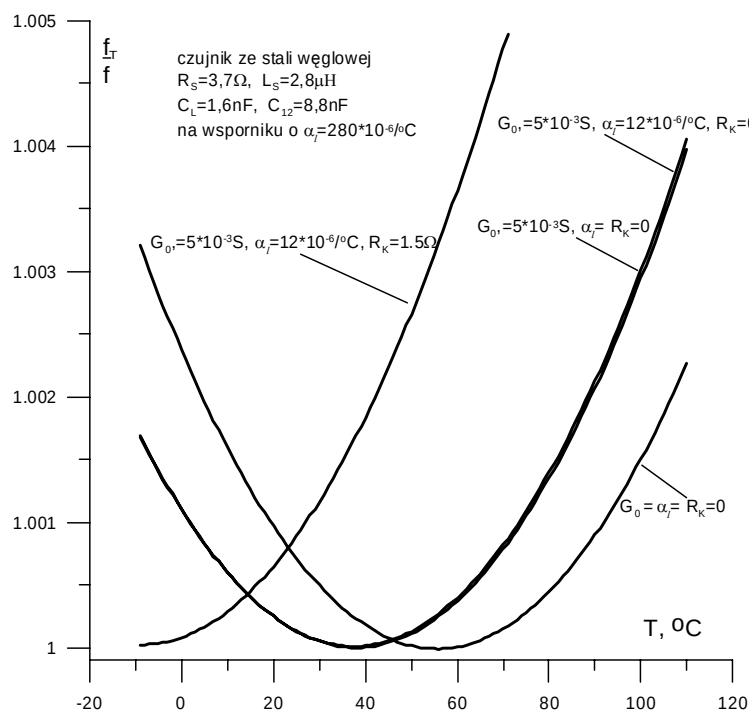
Poniżej przedstawiono symulację rodziny charakterystyk termicznych skompensowanego czujnika ze stali węglowej oraz charakterystyk rzeczywistych (rys. 4). Rzeczywiste charakterystyki, uzyskane drogą pomiaru zmian częstotliwości podgrzewanego w naftcie czujnika, odnoszą się do takich samych parametrów czujnika i obwodu rezonansowego jak podczas symulacji. Zarówno symulacja jak i pomiar charakterystyk pokazują, że zmniejszając wartość pojemności można osiągnąć bardziej płaską charakterystykę termiczną. Symulowane charakterystyki w porównaniu do rzeczywistych są bardziej płaskie, przy czym różnice między nimi nie przekraczają kilkunastu procent.



Rys. 4. Charakterystyki termiczne, wyznaczone eksperymentalnie i poprzez symulację, czujników z niskorezystywnej stali węglowej, dla różnych wartości kondensatorów obwodu rezonansowego

Na rysunku 5 przedstawiono symulację charakterystyki termicznej czujnika wykonanego ze stali węglowej według równania (19), w kolejnych stopniach uproszczenia tego równania. Ma to na celu wykazanie zasadności tych uproszczeń oraz pokazanie jak rezystancja klucza i obciążenie obwodu przewodnością wyjściową wpływa na punkt kompensacji termicznej. Parabole przesuniętą najbardziej w prawo uzyskano

przy założeniu, że nie ma obciążenia obwodu rezonansowego przez rezystancję klucza i konduktancję generatora, czyli $R_K = G_0 = 0$, oraz że termiczne zmiany indukcyjności nie mają wpływu na zmianę fazy napięcia sprzężenia zwrotnego i dobroć cewki, czyli $\alpha_l = 0$, a tylko na częstotliwość obwodu rezonansowego (według (5)).



Rys. 5. Symulacja charakterystyk termicznych czujników ze stali węglowej dla różnych parametrów obwodu rezonansowego

Parabola środkowa reprezentuje przypadek uwzględniający obciążenie obwodu rezonansowego układem generatora. W konsekwencji dobroć obwodu maleje i zgodnie z (14) daje to większą zmianę częstotliwości pod wpływem temperatury, więc punkt kompensacji termicznej przesuną się w stronę mniejszych temperatur z $57^\circ C$ do $38^\circ C$. Na tę parabolę nałożona jest parabola uzyskana przy uwzględnieniu wpływu termicznych zmian indukcyjności na zmianę fazy napięcia sprzężenia zwrotnego (według (13)) i na dobroć cewki (α_l i $G_0 > 0$). Widać, że wpływ ten jest tak niewielki, że obie parabole praktycznie pokryły się, więc uproszczenie równania (15) do postaci (17) jest zasadne.

W skrajnej lewej paraboli uwzględniono rezystancję przełącznika (klucza) czujników R_K i $G_0 > 0$. Obciążenie obwodu rezonansowego wzrosło jeszcze bardziej i punkt kompensacji przesunął się do temperatury $-8^\circ C$.

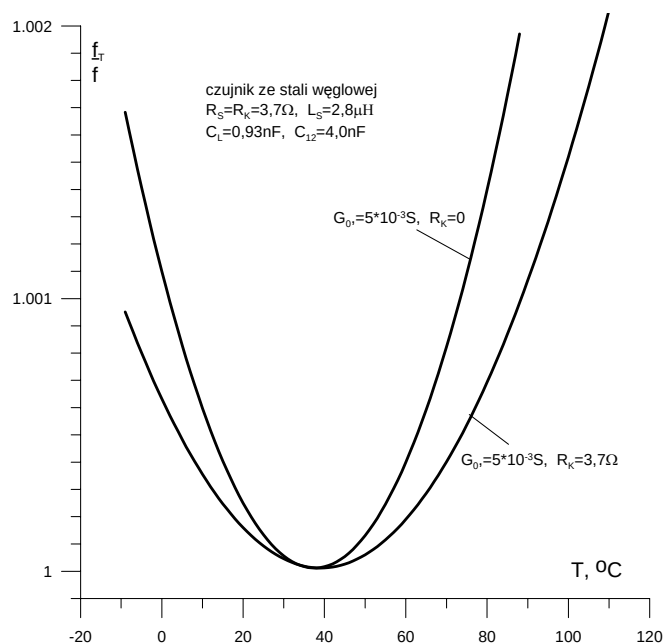
Temperatury kompensacji, wynikające z symulacji charakterystyk pokazanych na rys. 5 uzyskano podstawiając do wzoru rozszerzalność termiczną wspornika $280 * 10^{-6} / ^\circ C$, więc kilkanaście razy większą niż metalowych bądź skalnych wsporników, jakich używano w eksperymentach. Pojemności i rezystancja była analogiczna jak dla faktycznie występujących podczas pomiarów. Jeśli w symulacji wprowadzono rozszerzalność odpowiadającą metalom, uzyskano kompensację dla ujemnych temperatur, co nie odpowiada rzeczywistym charakterystykom. Takie rozbieżności między charakterystykami symulowanymi a rzeczywistymi występowały również dla czujników wykonanych z miedzi, z tym, że dysproporcja ta była mniejsza, bo rzeczywiste temperatury kompensacji uzyskiwano w symulacji dla rozszerzalności wspornika około $60 * 10^{-6} / ^\circ C$. W związku z tym w dalszej części opracowania skoncentrowano się na kształcie symulowanych charakterystyk, co faktycznie jest najistotniejsze ze względu na właściwości czujnika, pomijając przesunięcie temperatury kompensacji, które w praktyce łatwo skorygować przez nieznaczną zmianę wartości pojemności obwodu rezonansowego.

Jak wspomniano, wprowadzenie kompensacji termicznej jest możliwe tylko dla określonej temperatury, ale praktycznie dotyczy to pewnego zakresu temperatur. Zakres ten będzie tym większy, im paraboliczna

charakterystyka termiczna czujnika będzie bardziej płaska. Analizując równanie (19) można dojść do wniosku, że można to osiągnąć na kilka sposobów:

1. Zwiększając wartość składnika liniowej zależności od temperatury, czyli $\left(\frac{L_s G_0}{4C_L + 2C_{1,2}} + R_s + R_K \right) \Delta T$ przez wzrost wartości rezystancji klucza R_K lub obciążenia obwodu przez generator G_0 ,
2. Osłabiając wpływ członu determinującego paraboliczny kształt charakterystyki $R_s \alpha_R \Delta T^2$ przez zmniejszenie rezystancji czujnika wykonując go np. z miedzi.
3. Można też wykonać czujnik z materiału o mniejszym termicznym współczynniku rezystancji α_R . Wprawdzie współczynnik ten dla większości metali jest podobny i wynosi około $4 \cdot 10^{-3}/K$, ale nie dla stopów. Można zatem skonstruować kombinowany czujnik np. stalowo-manganinowy (współczynnik ten dla manganinu jest bliski zeru) i realnie uzyskać wypadkowy termiczny współczynnik rezystancji o połowę mniejszy ($\alpha_R \approx 2 \cdot 10^{-3}/K$). Ponieważ rezystywność manganinu ($\rho = 45 \cdot 10^{-8}$) jest około 5 razy większa od stali węglowej ($\rho = 9,7 \cdot 10^{-8}$), z której wykonano czujnik, rezystancja takiego kombinowanego czujnika będzie kilkakrotnie większa niż czujnika tylko ze stali węglowej. Ze względu na to, że temperatura nie wpływa na rezystancję manganinu, to we wzorze (19) rezystancja manganinowego czujnika będzie reprezentować parametr R_K , co w konsekwencji uczyni charakterystykę jeszcze bardziej płaską, chociaż odbędzie się to kosztem zmniejszenia pojemności obwodu rezonansowego, co skutkować będzie wzrostem destabilizującego wpływu pojemności pasozytniczych.

Realizując sposób pierwszy, czyli zwiększając rezystancję klucza (lub wstawiając szeregowo w obwód czujnika odpowiedni rezystor) punkt kompensacji przesunie się w kierunku mniejszych temperatur, zgodnie z równaniem (19) i symulacją pokazaną na rys.5. Aby punkt kompensacji znalazł się w zakresie użytecznych temperatur, należy zmniejszyć odpowiednio wartość pojemności obwodu rezonansowego. Efekt uzyskania bardziej płaskiej charakterystyki po włączeniu dodatkowego rezystora przedstawia rysunek 6, na którym pokazano wynik symulacji równania (19). Symulację wykonano dla czujnika o rezystancji $3,7 \Omega$ i rezystancji klucza równej 0Ω oraz równej rezystancji czujnika, czyli $3,7 \Omega$. W pierwszym przypadku kompensację uzyskano dla pojemności obwodu rezonansowego $C_r = 6 \text{ nF}$, a po dołączeniu rezystancji klucza pojemność należało zmniejszyć do 3 nF . Rezystancja klucza w symulowanej charakterystyce wynosząca $3,7 \Omega$ jest równa nie tylko rezystancji czujnika, ale także jest bliska rezystancji tranzystorowego klucza ($\sim 3 \Omega$), wykonanego z krzemowych tranzystorów bipolarnych typu BC238. Tak więc pozornie niekorzystnie wysoka wartość rezystancji klucza może być wykorzystana do zwiększenia zakresu kompensacji termicznej czujnika.



Rys. 6. Symulacja charakterystyk termicznych czujników z niskorezystywnej stali węglowej z i bez włączonej szeregowo do czujnika rezystancji będącej poza wpływem zmian temperatury

Towarzyszące temu zmniejszenie pojemności obwodu rezonansowego jest z kolei niekorzystne, gdyż jak wspomniano uprzednio rośnie wpływ pojemności pasożytniczych.

W następnym rozdziale pokazany będzie drugi sposób uzyskania bardziej płaskiej charakterystyki termicznej czujnika, czyli zmniejszając jego rezystancję przez wykonanie go z miedzi.

5. Charakterystyka termiczna czujnika wykonanego z miedzi

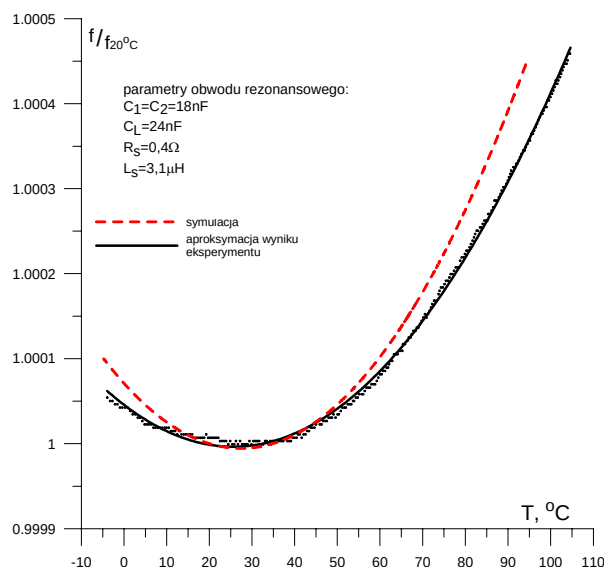
Stosując miedziany czujnik niskorezystywny można uzyskać dużą pojemność obwodu rezonansowego, odpowiadającą kompensacji termicznej, wynoszącą powyżej 20 nF. Jest ona kilkadziesiąt razy większa niż w przypadku czujnika wysokorezystywnego (1 nF), a kilkanaście razy większa niż w przypadku czujnika ze stali węglowej (~5 nF). Tak duża pojemność skupiona pozwoli praktycznie wyeliminować wpływ niestabilnych, co do wartości pojemności połączeń, np. w zmiennym ciśnieniu, na dokładność pomiaru odkształceń w komorze GTA-10. Czujnik miedziany ma, korzystnie, znacznie bardziej płaską charakterystykę termiczną w porównaniu do czujnika ze stali węglowej, więc zakres dopuszczalnych zmian temperatury czujnika rozszerza się z kilkunastu do kilkudziesięciu stopni Celsjusza (ze względu na błąd pomiaru).

Analizując fragment wzoru (19), odpowiadający za kształt charakterystyki termicznej:

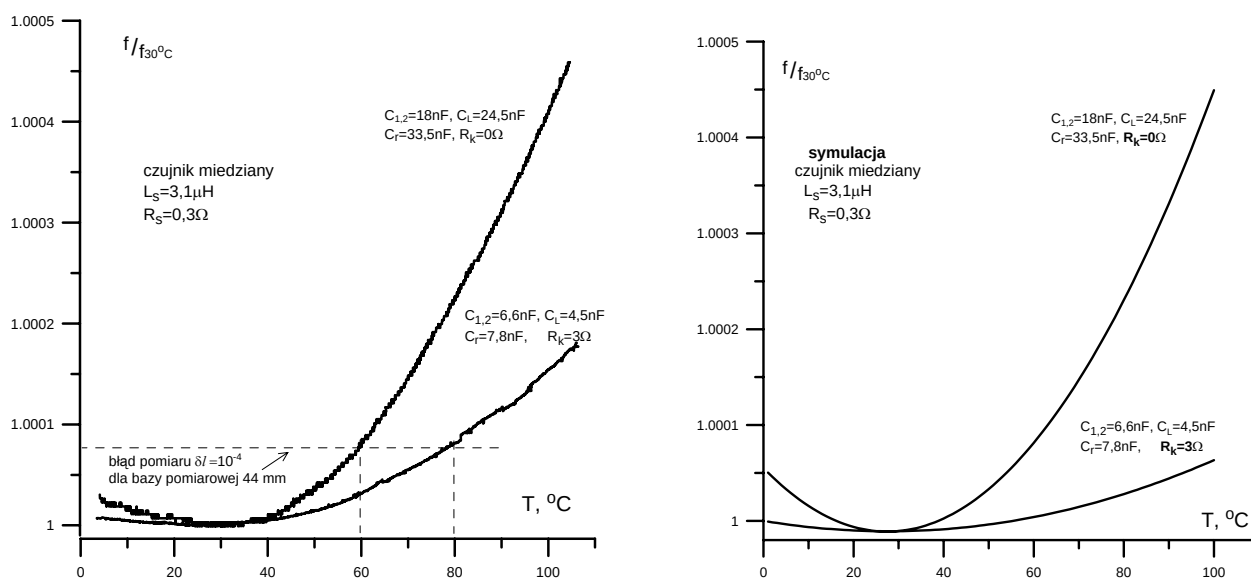
$$R_s \alpha_R \Delta T^2 + \left(\frac{L_s G_0}{4C_L + 2C_{1,2}} + R_s + R_K \right) \Delta T$$

widać, że rezystancja czujnika R_s jest współczynnikiem przy ΔT^2 , więc im jest mniejsza tym znaczenie członu kwadratowego będzie mniejsze. Rezystancja ta występuje również w członie liniowym ΔT , ale wspólnie z sumą rezystancji klucza R_K i przewodnością wyjściową generatora G_0 . Można więc dla spłaszczenia charakterystyki termicznej zmniejszyć rezystancję czujnika wykonując go z miedzi, a wywołane tym przesunięcie punktu kompensacji skorygować zwiększając rezystancję klucza i/lub pojemność obwodu rezonansowego. Ponadto przy wzroście rezystancji klucza wzrasta znaczenie członu liniowego w stosunku do kwadratowego, co umożliwia dalszą poprawę liniowości charakterystyki czujnika, lecz powoduje przesunięcie punktu kompensacji w stronę mniejszych temperatur. Należy to skorygować zmniejszając wartość pojemności obwodu rezonansowego. Ceną za bardziej płaską charakterystykę jest zmniejszenie pojemności obwodu. Mając na względzie zalety porównawczej metody pomiaru odkształceń, w której niezbędnym elementem jest przełącznik (klucz) czujników, można wykorzystać jego rezystancję, uważaną dotychczas za szkodliwą, do kształtowania charakterystyki termicznej. Rezystancja klucza w obecnym wykonaniu na tranzystorach BC328 jest trochę zbyt duża, bo wynosi około 3 Ω , więc pojemność obwodu rezonansowego wynikająca z warunku kompensacji spadłaby poniżej 10 nF. Gdyby okazało się, że jest to zbyt mała wartość pojemności, to można rozważyć wersję klucza zrealizowanego na mechanicznych miniaturowych przełącznikach z włączoną szeregowo rezystancją o pożądanej wartości. Należy nadmienić, że chociaż rezystancja takich przełączników w stanie włączenia jest, korzystnie, bardzo mała (~0,01 Ω), w porównaniu do tranzystora (~3 Ω), to trwałość i szybkość przełączania styków mechanicznych jest nieporównanie mniejsza od przełącznika tranzystorowego.

Na rysunku 7 pokazano charakterystykę termiczną czujnika miedzianego wyznaczoną eksperymentalnie (linią ciągłą) oraz jej symulację na podstawie wzoru (19) liniją przerywaną przy parametrach RLC obwodu rezonansowego identycznych jak w eksperymencie. Natomiast na rysunku 8 pokazano charakterystyki termiczne czujnika miedzianego z włączoną szeregowo rezystancją o wartości 3 Ω i bez niej (po lewej rzeczywiste, a po prawej symulacja).



Rys. 7. Charakterystyka termiczna czujnika miedzianego wyznaczona eksperymentalnie (linią ciągłą) oraz na podstawie wzoru (19) linią przerywaną



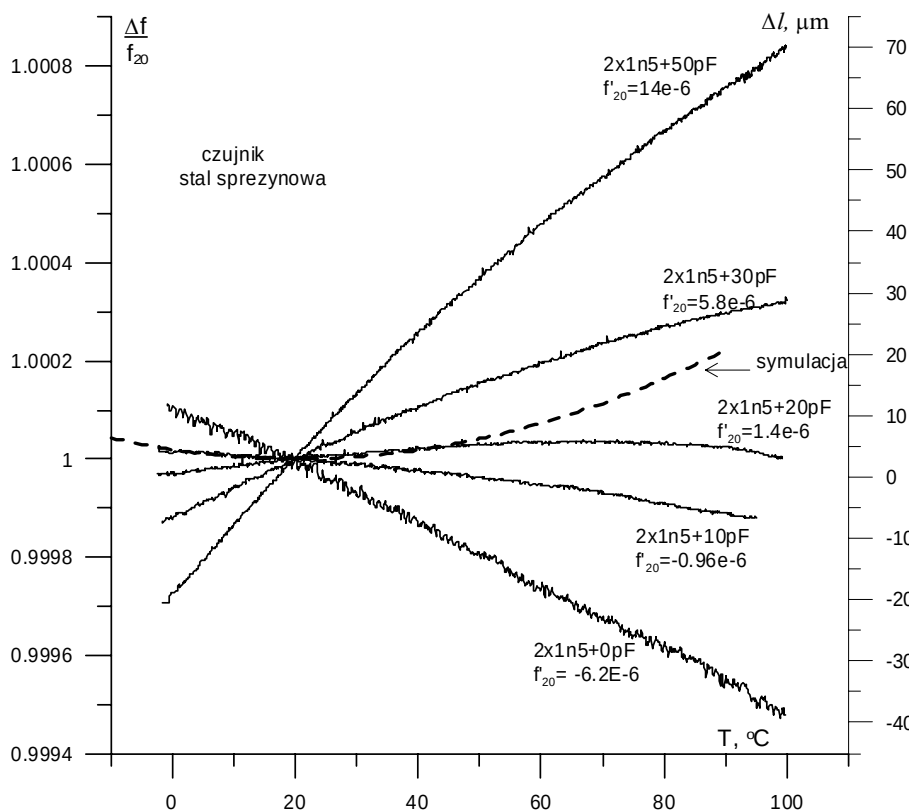
Rys. 8. Charakterystyki termiczne czujnika miedzianego z włączoną szeregowo rezystancją o wartości 3Ω i bez niej (po lewej rzeczywiste, po prawej symulacja)

6. Charakterystyka termiczna czujnika stalowego wysokorezystywnego z drutu sprężynowego

Czujnik wykonany z wysokorezystywnej stali sprężynowej jest używany do chwili obecnej z powodu bardzo dobrych właściwości mechanicznych, co pozwala uzyskać duży zakres pomiarowy (do 80%) i odporność na uszkodzenia podczas montażu na badanej próbce. Cechuje go również bardzo płaska charakterystyka termiczna, umożliwiając pomiary w szerokim zakresie temperatur kilkudziesięciu $^{\circ}\text{C}$. Główną wadą tego czujnika jest mała pojemność obwodu rezonansowego odpowiadająca kompensacji termicznej czujnika. Wynosi ona około 1 nF.

Rysunek 9 przedstawia rodzinę charakterystyk otrzymanych drogą pomiaru dla różnych wartości kondensatora bocznikującego czujnik C_L , w zmodyfikowanym obwodzie rezonansowym, oraz symulację charakterystyki termicznej takiego czujnika (linia przerywana). Prawa pionowa oś przedstawia orientacyjny błąd pomiaru odkształcenia wynikający z termicznych zmian częstotliwości. Rzeczywiste charakterystyki,

niespodziewanie, są parabolami, których ramiona skierowane są w dół, przeciwnie jak w symulacji takiej charakterystyki lub w odniesieniu do czujnika miedzianego lub ze stali niskorezystywnej. Większa wartość kondensatora C_L powoduje większe wygięcie ramion paraboli, więc także mniejszy zakres kompensacji termicznej czujnika. Pomimo parabolicznego kształtu charakterystyki jest ona o wiele bardziej płaska w porównaniu do czujnika miedzianego a tym bardziej do czujnika ze stali węglowej niskorezystywnej, co pokazuje rys. 10. Należy podkreślić, że dla tak małych termicznych wahań częstotliwości rzędu $10^{-5}/K$ duże znaczenie ma wpływ temperatury na pojemności połączeń czujnika z generatorem, stabilizację temperatury samego generatora i wiele innych czynników, stąd trudności w eksperymentalnym wyznaczeniu takiej charakterystyki. W innych pomiarach charakterystyki termicznej czujnika ze stali sprężynowej otrzymano prawie idealnie liniowy jej przebieg w zakresie od 0 do 100°C .



Rys. 9. Charakterystyki termiczne czujników ze stali sprężynowej wysokorezystywnej dla różnych wartości kondensatora bocznego czujnika C_L (od 0 do 50 pF). Krzywa przerywana odpowiada symulacji charakterystyki równaniem (19), widoczny jest brak zgodności z charakterystykami rzeczywistymi. Pionowa oś z prawej strony określa bezwzględny błąd pomiaru w metodzie bezpośredniej (bez czujnika odniesienia)

Na charakterystykach pokazanych na rys. 9 można zaobserwować jak stosunkowo niewielka zmiana pojemności C_L bocznikującej czujnik o 10 pF, powoduje przesunięcie temperatury kompensacji o około 100°C . Skojarzone zmiany ciśnienia i temperatury w komorze ciśnieniowej skutkują zmianą pojemności przepustów elektrycznych komory. Dla poszczególnych przepustów różnice w zmianach pojemności mogą dochodzić nawet do 1 pF. Zmniejsza to efektywność kompensacyjną czujnika odniesienia w porównawczej metodzie pomiaru odkształceń lub w metodzie bezpośredniej wprost skutkuje błędami pomiarowymi.

Charakterystyki czujnika z wysokorezystywnej stali sprężynowej nie da się w ogóle odtworzyć równaniem. Dotyczy to zarówno kształtu jak i punktu kompensacji. Prawdopodobnie nie są temu winne błędy w poszczególnych etapach wyprowadzania końcowej formuły (sprawdzano je wielokrotnie) ani liczne przybliżenia podczas upraszczania wyrażeń. Gdyby popełniono błędy w wyprowadzaniu równaniu (19) nie odtwarzałoby ono zadawalająco kształtu charakterystyki czujnika miedzianego i stalowego niskorezystywnego. Przyczyną błędnej symulacji charakterystyki przez równanie w tym przypadku może być ograniczość stosowania wzorów na dobroć i odstrojenie obwodu rezonansowego, określone przez (14) i (21), które zakładają dużą dobroć obwodu, a ta jest najmniejsza dla czujnika wysokorezystywnego.

7. Czujnik ze stopów metali

Stopy metali charakteryzuje duża rozpiętość wartości termicznych współczynników rozszerzalności termicznej α_l i zmian rezystancji α_R , od wartości typowych dla monometali do zera (od $\alpha_l \approx 15 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ i $\alpha_R \approx 4 \cdot 10^{-3}/^\circ\text{C}$ do $\alpha_l \approx \alpha_R \approx 0$). Duży jest również zakres rezystywności tych materiałów: od $\rho = 8,3 \cdot 10^{-7} \Omega\text{m}$ dla inwaru, poprzez mosiądze, stal węglową i brązy ($\rho = 0,6$ do $1,4 \cdot 10^{-7} \Omega\text{m}$) do stali sprężynowej ($\rho = 9 \cdot 10^{-7} \Omega\text{m}$). Oznacza to duże możliwości konstruktorskie w poszukiwaniu optymalnego czujnika.

Poniżej omówiono kilka takich zrealizowanych rozwiązań lub oceniono hipotetyczną przydatność na podstawie analizy właściwości mechano-elektrycznych oraz symulacji charakterystyki termicznej. Poniżej zamieszczono tabelę właściwości metali i ich stopów, na podstawie których wykonano symulację charakterystyk termicznych z nich wykonanych. Wartości dotyczące stopów należy traktować orientacyjnie, gdyż zależą one silnie od rodzaju i proporcji składowych.

Tab. 1. Stałe materiałowe wybranych metali i ich stopów

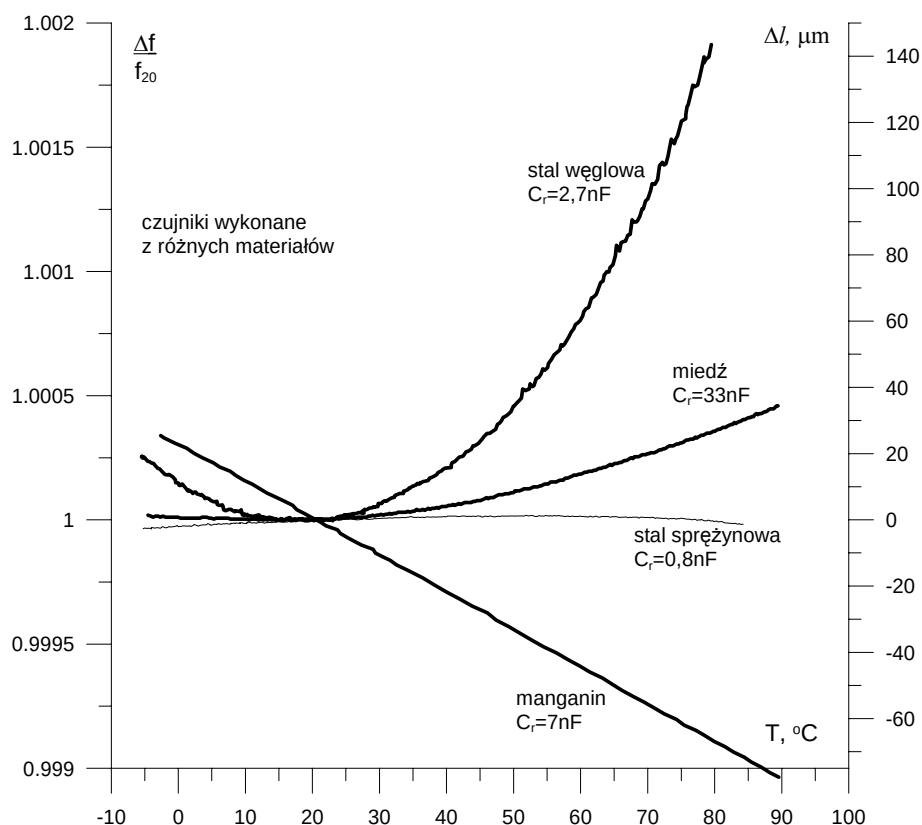
Material	Rezystywność	Współczynnik temperaturowy rezystancji	Współczynnik temperaturowy rozszerzalności	Granica plastyczności
	$\rho \cdot 10^{-8}, \Omega\text{m}$	$\alpha_R \cdot 10^{-4}/^\circ\text{C}$	$\alpha_l \cdot 10^{-8}/^\circ\text{C}$	R_e, MPa
miedź	1,7	40	16	60 (80*)
mosiądz	6	17	18	-
cynk	6	37	28	-
stal węglowa	9,7	45	12	~200
stal sprężynowa	91	8	16	~1200
konstantan	52	~0	15	-
manganin	45	~0	18	~500*
dural	5	24	24	-
chromonikiel	100	2	-	-
nikielina	40	1,1	-	-
brąz cynowy	14	6	18÷20	18÷20
inwar	70	20	~0	-

* – zmierzone przez autora po wstępnym plastycznym naciągnięciu

1. **Czujnik manganinowy** cechuje się praktycznie brakiem wpływu temperatury na jego rezystancję (w otoczeniu 20°C), więc termiczne zmiany częstotliwości będą wynikiem tylko rozszerzalności cieplnej ($\alpha_l = 18 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, według „wikipedia.pl”). Potwierdzają to pomiary charakterystyki termicznej, które wykazały liniową zależność temperatura-częstotliwość z nachyleniem $\Delta f_T/f_0 = -15 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, dla czujnika manganinowego zamocowanego na stalowym maszcie. Nachylenie charakterystyki wyliczone ze wzoru (8) wynosi $-12 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, więc zgodność eksperymentu z teorią jest dobra. Charakterystykę termiczną takiego czujnika pokazano na rys. 10. Rezystywność manganinu $\rho = 45 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ jest dwukrotnie mniejsza od stali sprężynowej, możliwe będzie więc osiągnięcie pojemności obwodu na poziomie 10 nF. Pojemność obwodu, do którego będzie włączony czujnik manganinowy jest wprawdzie mniejsza od pojemności odpowiadającej czujnikowi miedzianemu, jednak na tyle duża, że destabilizujące pojemności połączeń będą miały niewielkie znaczenie. Właściwości sprężyste czujnika manganinowego są pośrednie między czujnikiem miedzianym a wykonanym ze stali sprężynowej oraz nieco lepsze od stali węglowej, więc można je zaakceptować ze względu na zakres mierzonych odkształceń i odporność na uszkodzenie. Spora jego rezystancja umożliwia stosowanie tranzystorowego klucza, bez konieczności zmniejszania pojemności obwodu rezonansowego.

Jeśli manganin uznać za materiał o zerowym termicznym współczynniku rezystancji, to inwar jest materiałem o zerowej rozszerzalności termicznej.

2. **Czujnik inwarowy** o praktycznie zerowej rozszerzalności, podlegałby tylko wpływowi temperatury na rezystancję. Według danych tablicowych [3] termiczny współczynnik rezystancji inwaru wynosi $\alpha_R = 20 \cdot 10^{-4}/^\circ\text{C}$, a rezystywność $\rho = 70 \cdot 10^{-7} \Omega\text{m}$. Rezystywność o takiej wartości, jest o około 30% mniejsza od stali sprężynowej, więc pozwoli hipotetycznie uzyskać pojemność obwodu rezonansowego dwukrotnie większą niż dla czujnika ze stali wysokorezystywnej. Trudno spekulować o kształcie charakterystyki termicznej inwarowego czujnika, na pewno będzie miał spore znaczenie wpływ termicznych zmian jego rezystancji na częstotliwość generacji. Sprężystość drutu inwarowego wydaje się porównywalna do



Rys. 10. Charakterystyki termiczne czujników ze stali sprężynowej wysokorezystywnej, stali niskorezystywnej i miedzi, skompensowanych termicznie w temperaturze 20°C oraz czujnika z manganinu. Pionowa oś z prawej strony określa bezwzględny błąd pomiaru w metodzie bezpośredniej (bez czujnika odniesienia)

drutu ze stali węglowej lub manganinu, co jest korzystnym prognostykiem. Niestety autor opracowania nie dysponuje na razie odpowiednio cienkim drutem do wykonania czujnika.

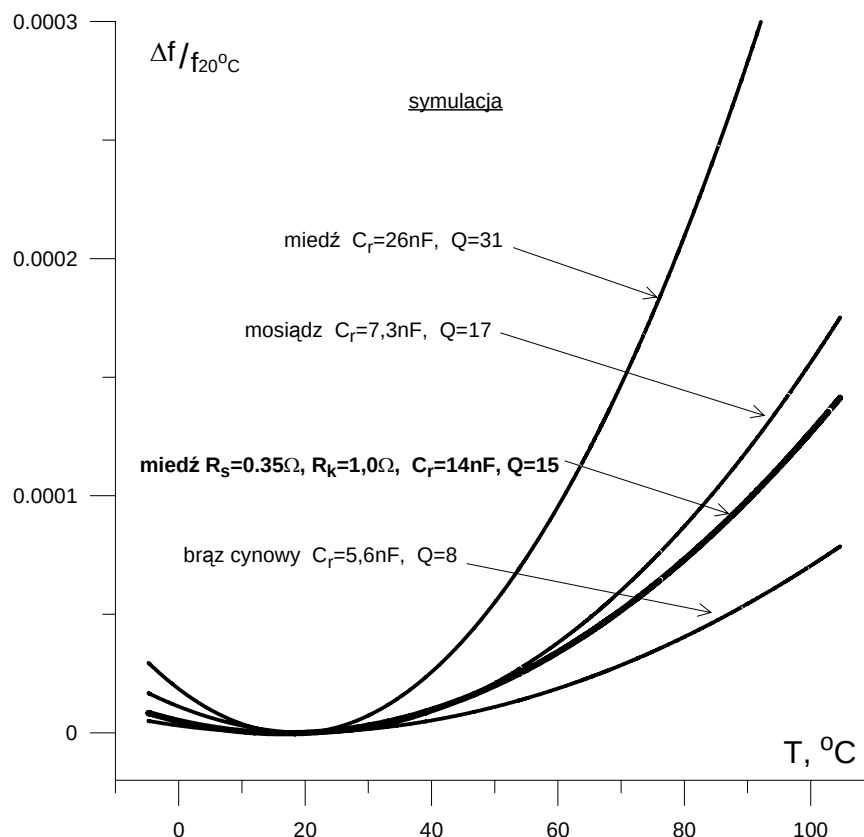
3. **Mosiądze i brązy** mogą okazać się bardzo przydatne do wykonania czujnika, ze względu na dobre właściwości sprężyste, małą zależność rezystancji od temperatury i stosunkowo małą rezystywność. Symulację charakterystyki termicznej czujników z różnych materiałów przedstawiono na rys. 11. Oprócz czujnika z brązu i mosiądzu zamieszczono charakterystykę czujnika miedzianego z szeregowym rezystorem 1 Ω, reprezentującym np. klucz tranzystorowy i bez niego. Podano również pojemność i dobroć obwodu rezonansowego odpowiedniego czujnika. Z charakterystyk tych wynika, że czujnik mosiężny lub z brązu cynowego ma dość płaską charakterystykę, porównywalną do czujnika miedzianego, lecz jest zdecydowanie bardziej sprężysty od niego. Aktualnie autor nie dysponuje drutami do wykonania takich czujników.

8. Podsumowanie charakterystyk termicznych czujników

Zaprezentowane charakterystyki czujników wykonanych z różnych materiałów, według autora, nie pozwalają jednoznacznie wskazać najbardziej przydatnego rodzaju czujnika.

Czujnik ze stali sprężynowej ma najlepszą, bo najbardziej płaską charakterystykę termiczną, lecz mała pojemność obwodu rezonansowego odpowiadająca kompensacji termicznej powoduje destabilizację generowanych drgań przez pasożytnicze pojemności połączeń. Wobec dużej rezystancji czujnika, można pominąć wpływ rezystancji tranzystorowego klucza przełączającego czujniki, w porównawczej metodzie pomiaru. Pomimo doskonałej sprężystości takiego czujnika, mała pojemność obwodu rezonansowego jest główną jego wadą, prowadzącą do trudno kompensowalnych błędów pomiarowych. Preferowany w pomiarach dużych odkształceń.

Czujnik miedziany można skompensować termicznie stosując duże pojemności kondensatorów, dzięki czemu pasożytnicze pojemności połączeń praktycznie przestają mieć znaczenie. Charakterystyka termiczna



Rys. 11. Symulacja charakterystyk termicznych czujników z brązu, mosiądzu i miedzi. Podano również odpowiadające im pojemność C_r i dobroć obwodu rezonansowego Q

jest tylko trochę bardziej nieliniowa niż czujnika ze stali sprężynowej, co można skompensować stosując czujnik odniesienia. Mała rezystancja czujnika powoduje znaczący wpływ rezystancji klucza na charakterystykę termiczną czujnika oraz na spadek pojemności obwodu rezonansowego. Sprężystość czujnika miedzianego jest zdecydowanie mniejsza od czujnika ze stali sprężynowej, co ogranicza zakres sprężystych odkształceń do kilkunastu procent i czyni go podatnym na uszkodzenia. Preferowany w pomiarach małych odkształceń.

Czujnik manganinowy ma liniową charakterystykę termiczną o niewielkim nachyleniu, wynikającą tylko z rozszerzalności termicznej drutu manganinowego. Liniowość i nachylenie tej charakterystyki są niezależne od pojemności obwodu i indukcyjności czujnika, co pozwoli w pełni wykorzystać zalety zastosowania czujnika odniesienia. Dwukrotnie mniejsza rezystancja takiego czujnika w porównaniu do czujnika ze stali sprężynowej pozwoli odpowiednio na około czterokrotne zwiększenie pojemności obwodu rezonansowego. Pojemność obwodu do którego będzie włączony czujnik manganinowy jest wprawdzie mniejsza od pojemności odpowiadającej czujnikowi miedzianemu, jednak na tyle duża, że destabilizujące pojemności połączeń będą miały niewielkie znaczenie. Właściwości sprężyste czujnika manganinowego są pośrednie między czujnikiem miedzianym a wykonanym ze stali sprężynowej, więc można je zaakceptować ze względu na zakres mierzonych odkształceń i odporność na uszkodzenie. Spora jego rezystancja umożliwia stosowanie tranzystorowego klucza. Przydatny do pomiarów dużych odkształceń przy znacznych zmianach temperatury.

Czujnik ze stali niskorezystywnej (węglowej), ma zdecydowanie nieliniową, paraboliczną charakterystykę termiczną, a pojemność obwodu odpowiadającą kompensacji, tylko nieznacznie większą w porównaniu do czujnika ze stali sprężynowej. Wydaje się, że duża nieliniowość charakterystyki termicznej i stosunkowo mała pojemność obwodu czynią ten czujnik mało przydatnym pomimo niezłej jego sprężystości.

Czujnik kombinowany można wykonać zestawiając w parę każdy z dwóch wymienionych powyżej czujników. Mając na względzie właściwości sprężyste, wydaje się, że najkorzystniejszą parą będą czujniki manganinowo-stalowe. Należy dokonać pomiarów właściwości takich kombinowanych czujników dla obu rodzajów stali, nisko i wysokorezystywnej. Proporcje indukcyjności czujników w parze mogą być zmienne,

stąd duża liczba kombinacji takich zespołów i ich właściwości. Czujnik kombinowany będzie miał prawdopodobnie właściwości pośrednie co do zakresu odkształceń i temperatury, z potencjalnym przeznaczeniem jako „uniwersalny”.

9. Wnioski

Z przeprowadzonych badań i symulacji charakterystyk termicznych czujników wykonanych z różnych materiałów wynika że:

- Równanie określające zależność częstotliwości drgań generatora od temperatury czujnika współpracującego z nim, uzyskane z analizy matematycznej zmodyfikowanego obwodu rezonansowego wykonanego przez autora, dość dobrze odwzorowuje rzeczywiste charakterystyki termiczno-częstotliwościowe różnych czujników.
- Charakterystyki termiczne czujników mają paraboliczny kształt, więc kompensację termiczną można uzyskać w przedziale temperatur odpowiadającym jej wierzchołkowi. Bardziej płaska charakterystyka pozwoli na większe zmiany temperatury czujnika, przy założonej wartości błędu pomiarowego.
- Najważniejsze parametry optymalizujące czujnik to: jego możliwie płaska charakterystyka termiczna pozwalająca na duży zakres zmian temperatury czujnika, dobra sprężystość czujnika determinująca duży zakres mierzonych odkształceń oraz duża pojemność obwodu rezonansowego odpowiadająca kompensacji termicznej czujnika, co minimalizuje destabilizujący wpływ pasożytniczych pojemności połączeń czujnika z generatorem.
- Uzyskane charakterystyki czujników wykonanych z różnych materiałów nie pozwalają, na tym etapie badań, jednoznacznie wskazać najbardziej przydatnego rodzaju czujnika i najprawdopodobniej koniecznych będzie kilka rodzajów czujników dedykowanych do różnych warunków pomiaru odkształceń.
- Dalsze badania właściwości czujników, szczególnie czujników kombinowanych, wykonanych jako pary cewek z różnych materiałów, z pewnością pozwolą opracować lepsze czujniki niż wykonane z miedzi lub stali sprężynowej.
- Najbardziej obiecującym jest czujnik manganinowy, skojarzony z inwarowym łącznikiem. Jego charakterystyka termiczna jest liniowa o niewielkim nachyleniu, niezależnym od pojemności i indukcyjności obwodu rezonansowego.

Praca została wykonana w roku 2011 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- [1] Nurkowski J.: *Błędy temperaturowe indukcyjnego przetwornika odkształcenie-częstotliwość pracującego w oscylatorze z silnie tłumionym obwodem rezonansowym*. Prace IMG PAN, 2006, s. 69.
- [2] Nurkowski J.: *Indukcyjny przetwornik odkształcenia w układzie różnicowym*. Krajowy kongres Metrologii, Gdańsk 1998, s. 223-230.
- [3] Mizierski W., Nowaczek W.: *Tablice fizyczno-astronomiczne*. Adamantan, Warszawa 1995, s. 54.
- [4] Pawłowski J.: *Wzmacniacze i generatory*. WKiŁ, Warszawa 1980, s.750.
- [5] Kuta S., Krajewski G., Jasielski J.: *Układy elektroniczne część II*. Wydawnictwa AGH.
- [6] Nurkowski J.: *Indukcyjny czujnik odkształceń wykonany z miedzi, w zmodyfikowanym obwodzie rezonansowy*. Prace IMG PAN, 2010, s. 11-25.
- [7] Nurkowski J.: *Bezrdzeniowy indukcyjny sensor do pomiaru odkształceń próbek skalnych w komorze ciśnieniowej*. Archiwum Górnictwa, Vol. 52 (2007), No 3, s. 311-330.

Thermal properties of a coreless induction deformation sensor – theory and practice

Abstract

The article presents the results of the continued research into the ways of application of a coreless induction deformation sensor made of various metals. The research objective was to obtain a wide range of the sensor's thermal stabilization while keeping a high capacity of the resonant circuit with which the sensor cooperates (this minimizes

the destabilizing influence of unstable link capacities). The present paper provides some corrected formulas determining the relationship between the vibration frequency and the sensor temperature, for various electrical parameters of the sensor and the resonant circuit. Another subject of mathematical analysis was a measuring system composed of the material being tested, a deformation sensor, and an adapter/connector (?), due to thermal expansion of these elements. The adapter/connector adapts the length of the sensor to the required length of the measurement base. The obtained formulas were confronted with the results of the experiments. It was confirmed that the thermal properties of sensors made of copper and carbon steel, obtained in the course of the experiments, and the properties determined by means of proper formulas are highly compatible. Therefore, a simulation of such properties was performed for sensors made of bronze and brass. It was found that, due to their high elastic properties, they are potentially useful. The results of the research that has hitherto been done inspire further search for an optimal construction of the sensor, in order to obtain satisfactory electrical and mechanical parameters due to combining various construction materials – in particular, copper, bronze, brass, manganin, as well as low – and high-resistant steel.

Keywords: induction deformation sensor, a high-damping oscillator with a resonant circuit, linear correction for frequency