

Błędy temperaturowe indukcyjnego przetwornika odkształcenie-częstotliwość pracującego w oscylatorze z silnie tłumionym obwodem rezonansowym

JANUSZ NURKOWSKI

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

Streszczenie

Poniżej przedstawiono wyniki badania wpływu temperatury na indukcyjny czujnik do pomiaru odkształceń próbek skał w komorze ciśnieniowej. Próbkę tę poddawane są zmiennym ciśnieniom hydrostatycznym za pośrednictwem cieczy wypełniającej komorę. Podczas sprężania i rozprężania cieczy występują zmiany temperatury dochodzące nawet do kilkudziesięciu stopni powodując błędy pomiaru. Znaczną ich redukcję osiągnięto stosując czujnik odniesienia oraz wysokorezystywny stalowy czujnik o małej wrażliwości na temperaturę. W pracy pokazano jak parametry obwodu rezonansowego oscylatora, z którym współpracuje czujnik, wpływają na zależność: temperatura czujnika-częstotliwość oscylacji. Wykazano również, że odpowiednio modyfikując obwód rezonansowy można skompensować termicznie czujnik wykonany z niskorezystywnej stali zwiększając dzięki temu wartość pojemności obwodu rezonansowego, co przyczynia się do zmniejszenia wpływu pojemności pasożytniczych na błędy pomiaru odkształcenia. Czujniki badano w przedziale temperatur od 0 do 100°C. Charakterystykę termiczną w podanym przedziale temperatur czujnika wysokorezystywnego można uznać za liniową, zaś charakterystyka czujnika niskorezystywnego ma kształt paraboli. Czujnik manganinowy ma częstotliwościową charakterystykę termiczną liniową o współczynniku około $-15\text{ppm}/^\circ\text{C}$ niezależnym od parametrów obwodu rezonansowego.

Słowa kluczowe: indukcyjny czujnik odkształcenia, pomiar odkształceń w warunkach wysokiego ciśnienia, oscylator z obwodem rezonansowym o dużym tłumieniu

1. Wstęp

Do pomiaru odkształceń próbek skał w komorze ciśnieniowej używany jest czujnik indukcyjny w postaci jednowarstwowej, bezrdzeniowej cewki współpracującej z oscylatorem LC. Czujnik ten nie styka się bezpośrednio z powierzchnią próbki, lecz jest zamocowany do niej za pośrednictwem obejm przykręcanych na krańcach cylindrycznej próbki lub przyklejonych kowadełek do podstaw próbki w taki sposób, że jest możliwa swobodna, beztarciowa zmiana jego długości wraz z odkształcaniem próbki. Dzięki temu czujnik można stosować bez obaw gdy próbka skalna jest porowata, przewodząca elektrycznie lub silnie niejednorodna a w takich właśnie przypadkach użycie tensometru rezystancyjnego jest bardzo ryzykowne.

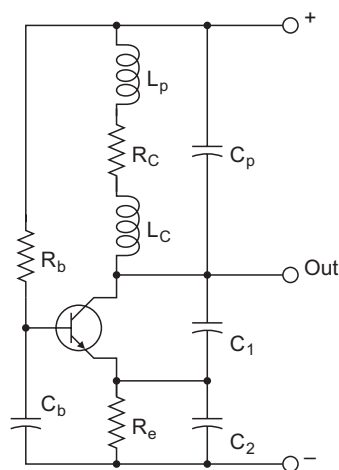
Czujnik wraz z oscylatorem LC tworzy przetwornik odkształcenie-częstotliwość. Taki przetwornik jest wrażliwy nie tylko na zmiany indukcyjności ale również na zmiany pojemności występujące w obwodzie tak po stronie niskiego jak i wysokiego ciśnienia. Aby zminimalizować związane z tym błędy używany jest czujnik odniesienia zamocowany na materiale o znanych własnościach, na przykład na stalowym wsporniku. Za pomocą elektronicznego przełącznika oba czujniki są naprzemiennie podłączane do jednego oscylatora [1]. Czujniki umieszczone wewnątrz komory ciśnieniowej połączone są z oscylatorem poprzez elektryczne przepustki ciśnieniowe w korku komory. Taki sposób doskonale kompensuje błędy niestabilności pojemności i indukcyjności pasożytniczych z wyjątkiem pojemności elektrycznych przepustów ciśnieniowych. Pojemności te są zmienne w różnym stopniu dla poszczególnych przepustów, w zależności od zmian ciśnienia i towarzyszących temu zmian temperatury [2]. Aby zminimalizować błędy z tym związane można próbować

dobrać dwa przepusty o jak najbardziej podobnych parametrach oraz zwiększyć wartość pojemności kondensatorów obwodu rezonansowego. Jednakże obecnie stosowany czujnik wykonany jest z wysokorezystywnej stali sprężynowej ($9,1 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$) więc jako cewka cechuje się bardzo małą dobrocią i obwód rezonansowy pracuje na granicy zerwania oscylacji, wobec czego zwiększenie pojemności obwodu jest niemożliwe. Czujnik wykonano z takiej stali gdyż zależność częstotliwości od jego temperatury jest kilkakrotnie mniejsza niż gdyby czujnik był ze zwykłej stali ($1,8 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$). Kompensacja termiczna czujnika polega na zmianie fazy napięcia w pętli sprzężenia zwrotnego oscylatora pod wpływem termicznych zmian rezystancji czujnika. Zjawisko kompensacji zaobserwowano w obwodach rezonansowych o małej dobroci.

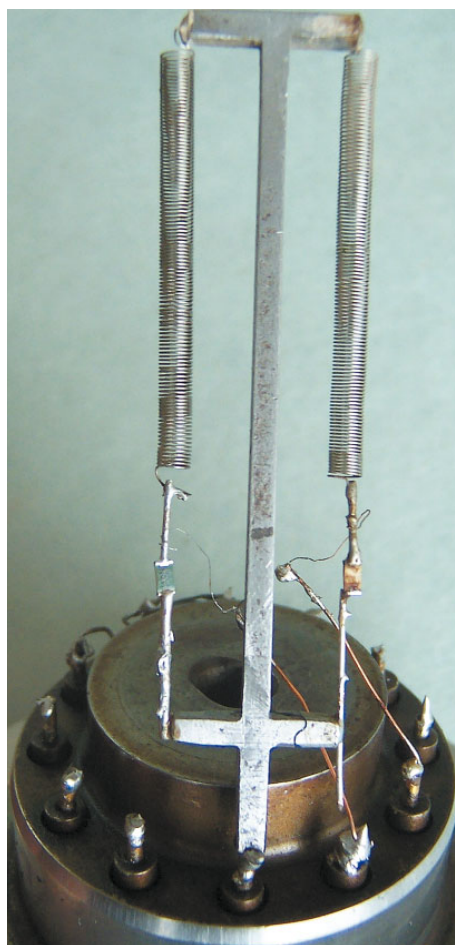
W niniejszej pracy wykazano, że przy odpowiedniej konfiguracji dzielnika pojemnościowego w obwodzie rezonansowym oscylatora możliwe jest prawie dziesięciokrotne zwiększenie jego pojemności, wykonując czujnik z niskorezystywnej stali węglowej bez utraty kompensacji temperaturowej czujnika. Testowano również czujnik z drutu manganinowego, wykazując jego pewne zalety w stosunku do czujników stalowych.

2. Parametry czujnika wysokorezystancyjnego i oscylatora

Oscylator pracuje w układzie Colpitts'a [3] z dzieloną pojemnością, elementem aktywnym jest tranzystor dużej częstotliwości małej mocy BF240 (rys. 1). Na rysunku tym pojemności C_1 i C_2 wraz z czujnikiem L_c stanowią obwód rezonansowy a C_p i L_p to pojemności i indukcyjności pasożytnicze doprowadzeń, R_c to rezystancja czujnika. Długość czujnika wynosi około 30 mm i jest nieco mniejsza długości próbki (44 mm), czujnik z jednej strony mocowany jest wprost do zaczeptu kowadła lub obejmę, a z drugiej poprzez izolator i łącznik do drugiego zaczeptu. W niniejszej pracy próbkę zastąpiono stalowym wspornikiem do którego zamocowano dwa czujniki (rys. 2).



Rys.1. Schemat oscylatora LC, w którym indukcyjnością L_c jest czujnik odkształcenia



Rys. 2. Czujniki przymocowane bezpośrednio do wspornika, podłączone do przepustów ciśnieniowych korka komory aparatu GTA-10. Skala 1,5:1

Konstrukcja czujnika jest na tyle zoptymalizowana pod względem mechanicznym i elektrycznym, że zmiana jego parametrów jest bardzo ograniczona. Zwiększenie długości czujnika komplikuje jego mocowanie i zmniejszenie czułości a zmniejszenie długości powoduje zmniejszenie jego indukcyjności co skutkuje również spadkiem czułości w wyniku istnienia indukcyjności pasożytniczych doprowadzeń. Średnica czujnika czyli jego zwojów oraz odstęp między zwojami są tak dobrane aby uzyskać maksymalną indukcyjność przy zachowaniu stabilności położenia zwojów, co gwarantuje, że nie stykają się ze sobą. Konkretnie czujnik ma 105 zwojów z drutu o średnicy 0.2 mm, zwoje mają średnicę 3 mm, a odstęp między nimi jest około 0.2 mm. W wyniku tego czujnik ma indukcyjność około 2.5 μH i rezystancję 36 Ω . Indukcyjności pasożytnicze mają wartość około 0.5 μH natomiast pojemności pasożytnicze około 100 pF, w tym pojemność przepustów 60 pF. Znaczące zmniejszenie indukcyjności i pojemności pasożytniczych jest bardzo trudne.

Kondensatory C1 i C2 w obecnym przetworniku mają taką samą wartość pojemności równą 2 nF co zapewnia maksymalną wartość pojemności obwodu rezonansowego przy minimalnej wartości pojemności C1 i C2 oraz umożliwia silne sprzężenie obwodu rezonansowego z tranzystorem. Podstawiając podane wartości do wzoru na dobroć obwodu rezonansowego:

$$Q = \sqrt{\frac{L}{R^2 C}} \quad (1)$$

otrzymamy jego wartość równą 1.45. Z uwzględnieniem dodatkowego tłumienia wnoszonego przez tranzystor i rezystor emiterowy (1 k Ω) oscylatora a także naskórkowość (dodatkowo ok. 7 Ω) dobroć ta będzie około 1.1.

Mimo tak dużego tłumienia można uzyskać stabilne oscylacje o amplitudzie około 0.5 V_{pp} przy prądzie emitera 2 mA i wzmocnieniu prądowym tranzystora $\beta = 100$.

3. Wpływ dobroci obwodu rezonansowego na zależność temperatura-częstotliwość czujnika wysokorezystancyjnego

Wzrost temperatury powoduje wydłużenie drutu cewki l_d . Jeśli przyjąć, że cewka (czujnik) jest zamocowana na materiale o zerowym współczynniku rozszerzalności termicznej, to wydłużenie drutu spowoduje wprost proporcjonalny wzrost średnicy zwojów D , przy niezmięnionej długości cewki l . Z kolei częstotliwość oscylacji obwodu rezonansowego jest odwrotnie proporcjonalna do średnicy zwojów cewki i jeśli pozostałe parametry uznać za stałe, to zgodnie z zależnością:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{k}{\sqrt{L}} = \frac{k}{\sqrt{\mu z^2 S/l}} = \frac{k}{\sqrt{\mu z^2 \pi D^2/4l}} = \frac{k}{D}. \quad (2)$$

Ostatecznie więc względne zmiany częstotliwości oscylacji pod wpływem temperatury czujnika będą:

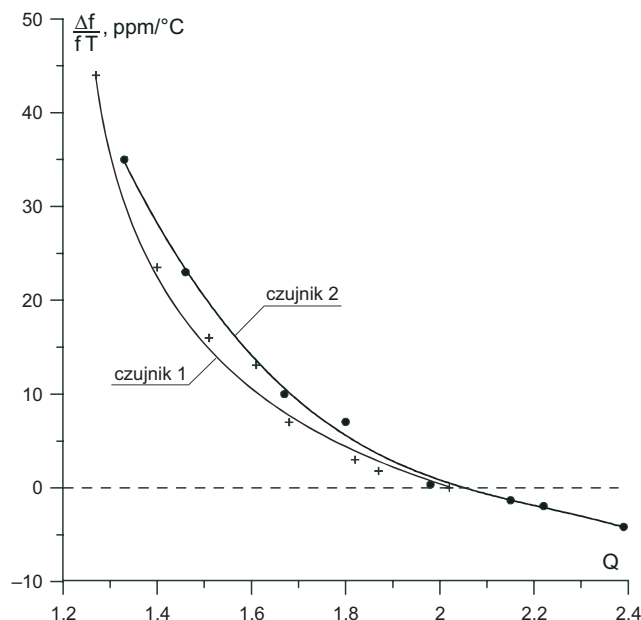
$$\frac{\Delta f}{f_T} = \frac{D_T}{D} = \frac{l_{dT}}{l_d} = \frac{\alpha_T \Delta T}{1 + \alpha_T \Delta T} \approx \alpha_T \Delta T. \quad (3)$$

Dla zmian temperatury nawet kilkudziesięciu stopni końcowe przybliżenie jest dopuszczalne (błąd ≈ 0.1 ppm).

Zgodnie z tym cewka wykonana ze stali o współczynniku rozszerzalności $\alpha_T = 12$ ppm/K, powinna w takim samym stopniu powodować zmianę częstotliwości, jednak wpływ zmiany rezystancji cewki na obwód rezonansowy radykalnie zmienia zależność temperatura-częstotliwość. Autorowi nie jest znana literatura opisująca zachowanie się oscylatorów z obwodami rezonansowymi o tak niskiej dobroci. Z reguły dąży się do osiągnięcia jak największej dobroci, która umożliwia osiągnięcie dużej sprawności energetycznej i stabilności oscylacji. Stosowane cewki w zakresie megahercowym [4] mają na ogół dobroć od 50 do 100, a w szczególnych przypadkach gdy wymagane jest poprawne przenoszenie wstęp bocznych sygnałów zmodulowanych [5], minimalna dobroć cewek jest około 10.

Pomiary zależności częstotliwości od temperatury przeprowadzono w ciśnieniu normalnym dla dwóch czujników zamocowanych na stalowym wsporniku o nieco różnej ilości zwojów zanurzonych w nafcie, której temperaturę zmieniano w zakresie od 10 do 40°C. Jeden z nich o rezystancji dla prądu stałego 36 Ω , długości 41 mm miał 109 zwojów i indukcyjność 2.5 μH , a drugi o długości 28 mm i rezystancji 33 Ω miał

100 zwojów i indukcyjność 3 μH . Drugi czujnik miał większą dobroć, bo rezystancję mniejszą a indukcyjność większą od pierwszego, na skutek mniejszych przerw między zwojami. Stosunek dobroci wynosił około 1.25, uwzględniając indukcyjność pasożytniczą 0.5 μH . Pojemność obwodu rezonansowego zmieniano w zakresie od 0.6 nF do 2.3 nF. W efekcie przybliżona dobroć (bez uwzględnienia naskórkowości) zmieniała się od 1.3 do 2.4. Wyniki eksperymentów przedstawia rysunek 3.



Rys. 3. Względne zmiany częstotliwości w funkcji dobroci dwóch czujników ze stali sprężynowej

Okazało się, że dla dobroci około 2 temperatura nie wpływa na częstotliwość obu czujników. Dla dobroci większych wzrost temperatury czujnika powoduje spadek częstotliwości przetwornika, a dla dobroci mniejszych od 2 wzrost temperatury powoduje wzrost częstotliwości czyli przekompensowanie termiczne czujnika do znacznych wartości +45 ppm przy dobroci około 1.25. Dalsze zmniejszanie dobroci obwodu rezonansowego powoduje zerwanie oscylacji. Podane wartości względnych termicznych zmian częstotliwości dotyczą czujnika zamocowanego na wsporniku stalowym o długości 44 mm. Przyjmując współczynnik rozszerzalności stali 12 ppm/K i względną czułość czujnika $10^{-2}/\text{mm}$, należy przyjąć poprawkę na wzrost częstotliwości z tym związaną pomniejszając wartości $\Delta f/f$ o 5 ppm/K, aby uzyskać wartości dotyczące samego czujnika. Odnosi się to do danych w pozostałej części opracowania.

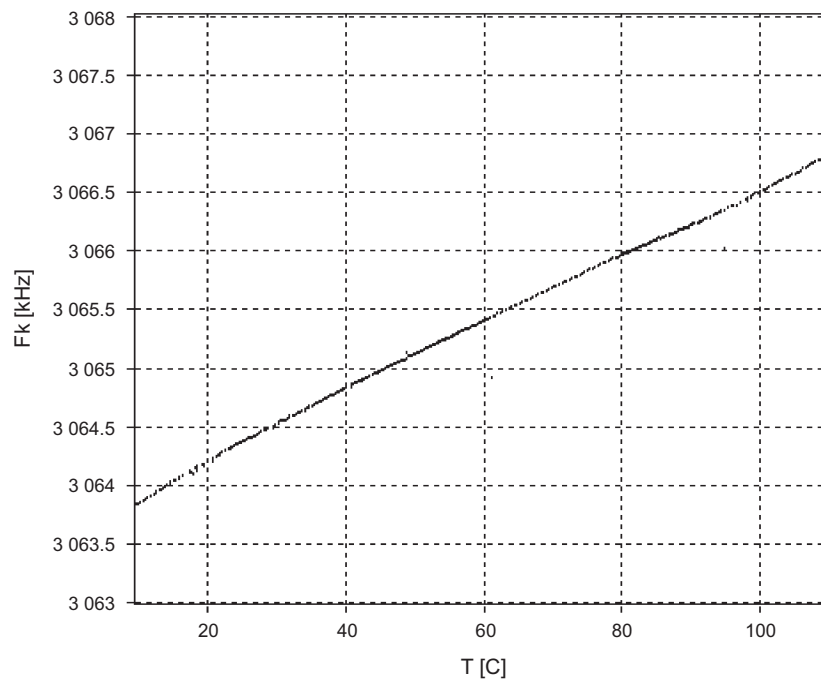
Wniosek z eksperymentu taki, że dobierając odpowiednio wartość pojemności kondensatorów oscylatora można uzyskiwać różną wrażliwość przetwornika na temperaturę w szerokich granicach: od wartości dodatnich do ujemnych, a w szczególności równą zero. Hipoteza zaś taka, że wykonując czujnik ze stali węglowej o mniejszej rezystywności w porównaniu ze stalą sprężynową i zmniejszając odpowiednio dobroć obwodu przez zwiększenie jego pojemności można uzyskać kompensację temperaturową czujnika przy zredukowanym wpływie pojemności pasożytniczych

Na rysunku 4 przedstawiono charakterystykę częstotliwość-temperatura czujnika w zakresie od 0 do 110°C dla pojemności $C_1 = C_2 = 1,5 \text{ nF}$. Widać niewielkie przekompensowanie o wartości 6,5 ppm/°C.

4. Kompensacja temperaturowa czujnika ze stali niskorezystywnej

Zwiększając wartość pojemności kondensatorów obwodu rezonansowego oscylatora zmniejsza się wpływ zmian pojemności przepustów i doprowadzeń na częstotliwość drgań. Jest to intuicyjnie oczywiste, a dowodzą tego poniższe obliczenia. Ponieważ częstotliwość drgań zależy odwrotnie od pojemności obwodu rezonansowego to:

$$\frac{f}{f_{\Delta C}} = \sqrt{\frac{C}{C + \Delta C}} \Rightarrow \frac{\Delta f}{f} = \frac{f - f_{\Delta C}}{f} = 1 - \sqrt{1 + \frac{\Delta C}{C}} \approx -\frac{\Delta C}{2C} \quad (4)$$



Rys. 4. Charakterystyka termiczna czujnika wysokorezystancyjnego

Przybliżenie jest dopuszczalne gdyż zmiany pojemności są około tysiąckrotnie mniejsze od pojemności całkowitej obwodu rezonansowego. Zwiększenie n -krotnie pojemności stałych obwodu spowoduje również n -krotne zmniejszenie wpływu zmian wartości pojemności pasożytniczych na częstotliwość oscylacji.

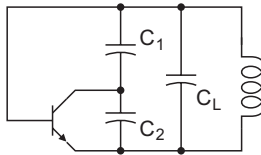
Zwiększenie pojemności obwodu ponad 1 nF w przetworniku z czujnikiem wykonanym ze stali wysokorezystywnej nie było możliwe ze względu na wzrost wrażliwości czujnika na temperaturę oraz zerwanie drgań spowodowane nadmiernym tłumieniem obwodu. Czujnik o takich samych wymiarach geometrycznych wykonany ze zwykłej stali węglowej o rezystywności $1,8 \times 10^{-7} \Omega \text{m}$ ma około 5 razy mniejszą rezystancję od czujnika ze stali sprężynowej (o rezystywności $9,1 \times 10^{-7} \Omega \text{m}$). Aby uzyskać dobroć przy której wystąpiła kompensacja termiczna czujnika wysokorezystywnego czyli $Q = 2$, zgodnie ze wzorem (1) należało zwiększyć pojemność obwodu rezonansowego 25 razy, czyli do wartości około 25 nF. Istotnym parametrem związanym z kompensacją termiczną czujnika są bezwzględne zmiany jego rezystancji, które warunkują odpowiedni wpływ tranzystora na częstotliwość oscylacji. Czujnik wysokorezystancyjny (36Ω) zwiększał rezystancję o $0,03 / \text{K}$ ($\alpha_{RT} = 9,0 \times 10^{-4} / \text{K}$), czujnik niskorezystancyjny ma tylko 7Ω , ale temperaturowy współczynnik rezystancji $\alpha_{RT} = 30 \times 10^{-4} / \text{K}$, czyli 3,3 razy większy. W sumie bezwzględne termiczne zmiany rezystancji czujnika niskorezystancyjnego są mniejsze w przybliżeniu 1.5 razy. W związku z tym kompensacja termiczna czujnika powinna nastąpić dla pojemności 25-30 nF.

Eksperymenty nie potwierdziły jednak wystąpienia kompensacji termicznej czujnika a nawet zmniejszenia jego wrażliwości na temperaturę w przedziale pojemności obwodu rezonansowego od 2 do 30 nF. Odpowiadające temu wartości dobroci były od 5,5 do 1,5. Termiczny współczynnik zmian częstotliwości pozostawał na praktycznie stałym i wysokim poziomie około -350 ppm/K . Większe pojemności powodowały zerwanie drgań. Amplitudę drgań utrzymywano na stałym poziomie 0,2 Vpp przy zasilaniu 5 V, przez zmianę wartości rezystora emiterowego od 1,5 do 0,3 k Ω , kształt oscylacji był sinusoidalny co kontrolowano oscyloskopem.

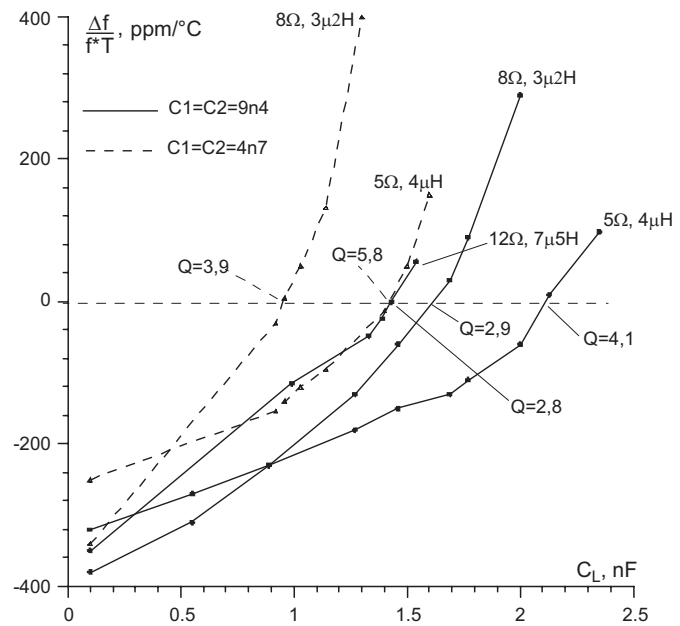
Podjęto próbę takiej modyfikacji obwodu rezonansowego, aby przy dobroci obwodu rezonansowego gwarantującej stabilne drgania, zwiększyć wpływ tranzystora na częstotliwość oscylacji. Zrealizowano to przez dodatkowy kondensator C_L bocznikujący czujnik. Przedstawia to uproszczony schemat oscylatora dla prądu zmiennego (rys. 5). Prąd płynący przez cewkę rozgałęzia się na płynący przez dodatkowy kondensator C_L oraz na prąd wpływający do dzielnika pojemnościowego C1, C2. Zwiększenie wartości C_L spowoduje zmniejszenie prądu dzielnika C1, C2 a co za tym idzie mniejsze sprzężenie tranzystora z obwodem. Aby zachować stałość amplitudy oscylacji należy zwiększyć wzmocnienie tranzystora zwiększając jego prąd

a tym samym spowodować wzrost wpływu parametrów tranzystora na częstotliwość. Są to skrajnie uproszczone rozważania niemniej jednak modyfikacja taka okazała się skuteczna. Rezultat przedstawia rysunek 6. Zamieszczono na nim wykresy zależności względnej zmiany częstotliwości na 1°C , w zależności od pojemności kondensatora bocznikującego czujnik C_L . Pomiary wykonano w zakresie temperatur od 15 do 35°C , dla pojemności kondensatorów $C_1, C_2 = 9,4 \text{ nF}$ (linia ciągła) oraz $C_1, C_2 = 4,7 \text{ nF}$ (linia przerywana) i dla dwóch rodzajów czujnika o następujących parametrach:

- pierwszy: $z = 107$, $d = 0,3 \text{ mm}$, $D = 4 \text{ mm}$ $L = 3,5 \mu\text{H}$, $R = 5 \Omega$,
- drugi: $z = 128$, $d = 0,2 \text{ mm}$, $D = 3 \text{ mm}$ $L = 2,7 \mu\text{H}$, $R = 8 \Omega$.



Rys. 5. Uproszczony schemat oscylatora



Rys. 6. Względne zmiany częstotliwości w funkcji pojemności kondensatora równoległego C_L czujników ze stali niskorezystywnej

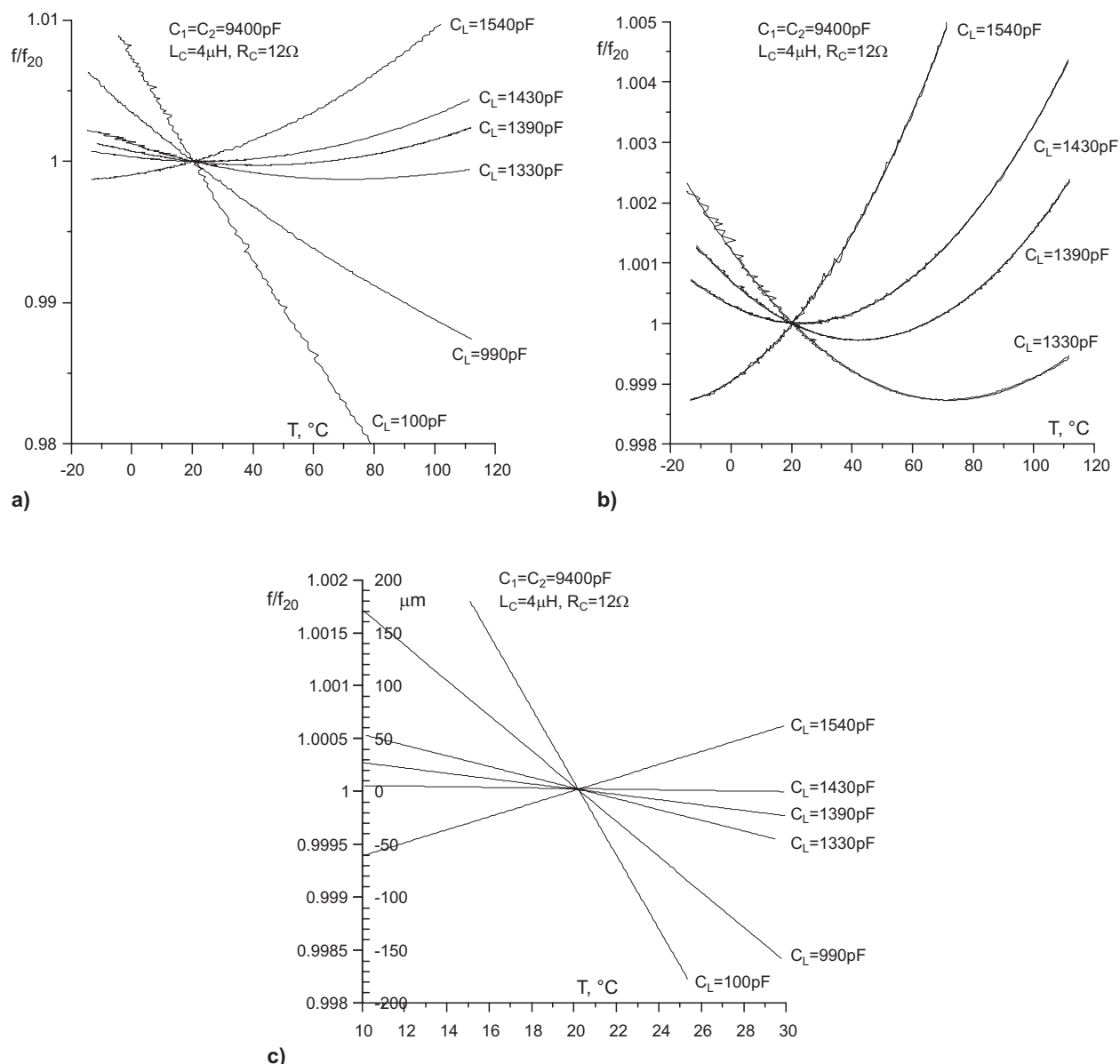
Na rysunku podano sumę indukcyjności czujnika i doprowadzeń $0,5 \mu\text{H}$, czyli $4 \mu\text{H}$ i $3,2 \mu\text{H}$. Zamieszczono również wykres dla szeregowego połączenia tych dwóch czujników pod oznaczeniem $7,5 \mu\text{H}$, 12Ω .

Analizując ten rysunek można wyciągnąć następujące wnioski:

- kompensacja temperaturowa czujnika występuje dla pojemności kondensatora bocznikującego C_L około $0,4$ pojemności szeregowego połączenia kondensatorów C_1 i C_2 ,
- im większa dobroć czujnika tym większa winna być pojemność kondensatora C_L ,
- w otoczeniu punktu stabilizacji termicznej zależność współczynnika zmian częstotliwości od pojemności kondensatora C_L jest około $0,4 \text{ ppm/pF}$,
- możliwa do osiągnięcia maksymalna wartość pojemności całkowitej obwodu rezonansowego dla czujników stalowych niskorezystancyjnych o optymalnej długości $30\text{--}40 \text{ mm}$ wynosi do 15 nF , przy większych pojemnościach trudno wzbudzić oscylacje.

Słaba zależność współczynnika temperaturowego od pojemności kondensatora C_L w otoczeniu stabilizacji termicznej ($0,4 \text{ ppm/pF}$), pozwala na kompensację przy spodziewanych maksymalnych zmianach pojemności pasożytniczej 1 pF .

W następnej serii eksperymentów zwiększono zmiany temperatur oddziałujących na czujnik od -10 do $+110^\circ\text{C}$. Rysunek 7 na trzech zespołach wykresów przedstawia efekty pomiarów względnych zmian częstotliwości pod wpływem temperatury szeregowego połączenia dwóch czujników opisanych powyżej, dla $C_1 = C_2 = 9,4 \text{ nF}$ oraz różnych wartości kondensatora bocznikującego C_L . Na rysunku 7b zawężono zakres zmian częstotliwości w stosunku do górnego dla lepszego zobrazowania zachowania się krzywych w otoczeniu punktu stabilizacji. Rysunek 7c przedstawia aproksymacje liniową krzywych dla temperatur w zawężonym przedziale od 10 do 30°C , oś pionowa pokazuje wartość zmian częstotliwości i odpowiadający temu błąd pomiaru.



Rys. 7. Względne zmiany częstotliwości w funkcji temperatury czujnika dla różnych pojemności kondensatora C_L

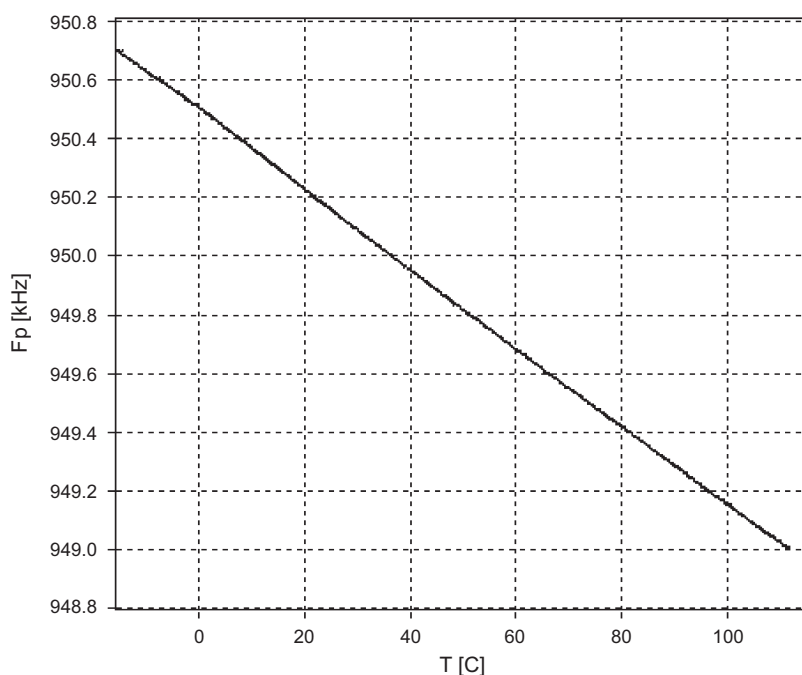
Częstotliwości unormowano w stosunku do częstotliwości przy 20°C . Dobrze widać, że krzywe mają charakter paraboliczny, których wierzchołek czyli punkt stabilizacji termicznej przesuwa się w stronę wyższych temperatur, przy spadku wartości kondensatora bocznikującego C_L . Można to wytłumaczyć tym, że stabilizacja zachodzi dla określonej wartości dobroci obwodu rezonansowego, zmniejszając kondensator C_L dobroć ta rośnie, natomiast wzrost temperatury zwiększa rezystancję czujnika powodując spadek dobroci i ponowną kompensację czujnika, ale przy wyższej temperaturze. Na przykład dla $C_L = 1.43\text{ nF}$ kompensacja występuje przy 20°C a dla $C_L = 1.33\text{ nF}$ przy 70°C . Przybliżone wartości dobroci czujnika będą odpowiednio $Q_{20} = 2,12$, $Q_{70} = 1,95$, nie są więc równe, ale obliczenia nie uwzględniają decydującego wpływu tranzystora.

Ze względu na paraboliczny kształt charakterystyki temperatura-częstotliwość, zakres stabilizacji jest ograniczony. Analizując rysunek 7b można stwierdzić, że błąd $\pm 4\mu\text{m}$ wynikły z braku kompensacji wystąpi dla różnicy temperatur $\pm 9^{\circ}\text{C}$ w stosunku do punktu stabilizacji termicznej, dla czujnika o czułości względnej 10 m^{-1} . Dla próbek o typowej długości 44 mm , badanych w komorze GTA10, skutkuje to względnym błędem pomiaru odkształcenia około 0.01% . Zastosowanie czujnika odniesienia kilkakrotnie zmniejsza ten błąd i w efekcie pomiar odkształceń do 0.1% jest całkiem możliwy dla typowych zmian temperatury cieczy w komorze ciśnieniowej około $\pm 6^{\circ}\text{C}$. Konieczne będzie jednak zachowanie dużej zgodności parametrów

toru pomiarowego i odniesienia, aby oba czujniki znalazły się w tym samym miejscu charakterystyki. Dotyczy to indukcyjności i pojemności pasożytniczych oraz indukcyjności czujników. Na przykład różnica pojemności pasożytniczych połączeń między dwoma torami 1 pF spowoduje błąd około $0,3 \mu\text{m}$ przy zmianie temperatury o 6°C .

6. Manganinowy czujnik odkształcenia

Eksperymentalnym potwierdzeniem tezy, że zmiany rezystancji czujnika wpływające na obwód rezonansowy, a co za tym idzie warunków pracy tranzystora, są przyczyną stabilizacji termicznej czujnika, było wykonanie czujnika o typowych wymiarach geometrycznych jakie omówiono uprzednio lecz wykonanego z drutu manganinowego. Rezystancja takiego czujnika wynosiła 14Ω . Zmierzony termiczny współczynnik zmian częstotliwości takiego czujnika można uznać za stały i równy około $-15 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$. Pojemność kondensatorów C1, C2 zmieniano od 1 do 14 nF a kondensatora C_L od 0 do 1,2 nF (patrz rys. 5), natomiast temperaturę w przedziale -15 do $+115^\circ\text{C}$. Przykładową charakterystykę przedstawia rys. 8. Manganin cechujący się minimalną termiczną zmianą rezystancji w porównaniu ze stałą nie zmieniał tłumienia obwodu rezonansowego i stąd stałość zmian częstotliwości pod wpływem temperatury. Zmiana częstotliwości była wypadkową rozszerzalności cieplnej drutu a więc średnicy zwojów czujnika manganinowego i wspornika stalowego.

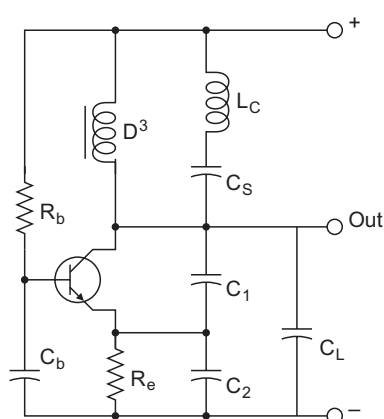


Rys. 8. Charakterystyka temperaturowa czujnika manganinowego

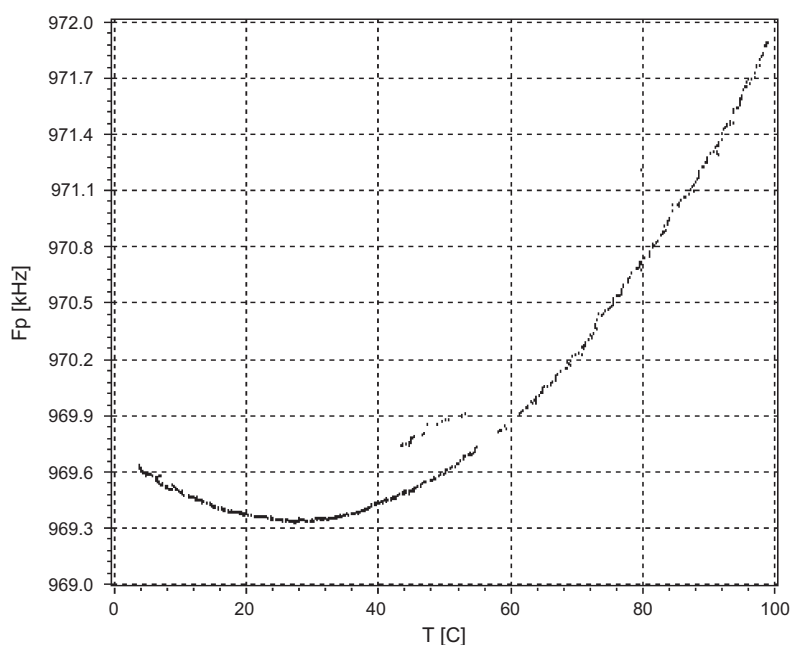
Liniowość charakterystyki i mała jej zależność od parametrów obwodu rezonansowego umożliwi lepsze warunki kompensacji termicznej w porównaniu do czujnika stalowego, gdzie ta charakterystyka była paraboliczna a punkt stabilizacji zależał od parametrów obwodu. Przewaga czujnika manganinowego może ujawnić się przy zmianach temperatury w komorze ciśnieniowej powyżej 10°C . Ze względu na prawie dwukrotnie mniejszą rezystywność manganinu od stali sprężynowej użytej do wykonania dotychczasowego czujnika, można zwiększyć pojemność obwodu rezonansowego, co korzystnie wpłynie na stabilność oscylacji i zmniejszenie wpływu pojemności pasożytniczych.

7. Czujnik z kondensatorem szeregowym

W oscylatorze pokazanym na rys. 1 czujnik jest włączony między tranzystor a zasilanie, więc płynie przez niego również składowa stała prądu polaryzującego tranzystor. Aby rozstrzygnąć czy kompensacja termiczna czujnika jest wynikiem oddziaływania zmiany jego rezystancji na składową stałą czy zmienną prądu, zmodyfikowano oscylator tak, że obwód składowej stałej zamyka dławik o indukcyjności kilkadziesiąt razy większej od indukcyjności czujnika ($200\ \mu\text{H}$), natomiast czujnik podłączono do zasilania przez kondensator o dużej, bo kilkadziesiąt razy większej pojemności ($68\ \text{nF}$) niż kondensatory C_1 , C_2 . Pokazano to na rysunku 9. W ten sposób przez czujnik płyną tylko prąd zmienny. Pomiar charakterystyki temperatura czujnika – częstotliwość oscylacji wykazał, że nie ma istotnych różnic dla jej kształtu, bez względu czy przez czujnik płynie składowa stała czy nie. Przykładową charakterystykę przedstawia rys. 10. Dowodzi to, że kompensacja termiczna jest efektem wpływania zmian rezystancji czujnika tylko na prąd zmienny płynący w obwodzie rezonansowym i przez tranzystor. Ponieważ pierwotny sposób pracy czujnika, ze składową stałą, nie wymaga stosowania dodatkowego kondensatora i cewki, więc jest prostszy w realizacji i będzie nadal stosowany.



Rys. 9. Schemat oscylatora z czujnikiem w szeregowym połączeniu z kondensatorem



Rys. 10. Charakterystyka temperaturowa czujnika bez prądu polaryzacji

7. Podsumowanie

Przeprowadzone pomiary wykazują duży wpływ zmian rezystancji czujnika na zależność częstotliwość-temperatura czujnika. W szczególności dla czujnika wykonanego ze stali niskorezystywnej wzrost temperatury czujnika powoduje kilkunastokrotnie większy spadek częstotliwości niżby wynikało to ze wzrostu średnicy zwojów czujnika spowodowanego termiczną rozszerzalnością drutu z którego jest wykonany. Jednakże modyfikując obwód rezonansowy oscylatora Colpitts'a przez dodanie kondensatora bocznikującego czujnik, można wpływać na zależność częstotliwość-temperatura czujnika. W szczególnym przypadku dla odpowiedniej wartości kondensatora bocznikującego częstotliwość praktycznie nie zależy od temperatury czujnika. Ta stabilizacja termiczna występuje dla małej dobroci obwodu rezonansowego wynoszącej około 1,5. Dodatkowo dla czujnik ze stali niskorezystywnej można osiągnąć większą pojemność obwodu rezonansowego, w porównaniu do czujnika wysokorezystywnego ze stali sprężynowej stosowanego dotychczas, redukując tym błędy spowodowane niestałością pojemności doprowadzeń. Charakterystykę częstotliwość-temperatura czujnika można aproksymować parabolą, której wierzchołek leży w punkcie stabilizacji termicznej czujnika. W związku z tym praktyczny zakres stabilizacji ograniczony jest do kilkunastu stopni Celsjusza, dla tempera-

tur większych od punktu stabilizacji częstotliwość rośnie z temperaturą. Zwiększanie wartości kondensatora bocznikującego powoduje przesuwanie się punktu stabilizacji do niższych temperatur.

Czujnik wykonany z drutu manganinowego, ze względu na niewielki wpływ temperatury na jego rezystancję, cechuje się dużą niezależnością termicznego współczynnika zmian częstotliwości co ułatwia proces kompensacji czujnikiem odniesienia. Mniejsza rezystywność manganinu w porównaniu ze stałą sprężynową umożliwia osiągnięcie większych pojemności obwodu rezonansowego, więc zmniejszenie wpływu pojemności pasożytniczych na stabilność oscylacji. Niedogodnością takiego czujnika są gorsze własności sprężyste w porównaniu z czujnikami stalowymi, co zwiększa możliwość trwałej deformacji przy nieostrożnym użytkowaniu.

Ze względu na mnogość czynników wpływających na pomiar odkształcenia czujnikiem indukcyjnym w ciśnieniu setek MPa, o wyborze materiału na czujnik zdecydują testy. Ich wykonanie będzie możliwe po zakończeniu trwającego obecnie remontu aparatury ciśnieniowej.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w ramach działalności statutowej IMG PAN w roku 2006.

Literatura

- [1] Nurkowski J.: *Indukcyjny przetwornik odkształcenia w układzie różnicowym*. Krajowy Kongres Metrologii, Gdańsk 1998, s. 223-230.
- [2] Nurkowski J.: *Błędy w pomiarach odkształcenia wykonywanych w komorze ciśnieniowej czujnikiem indukcyjnym*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN 2005 r. s.155-178.
- [3] Chojnacki W.: *Układy nadawcze i odbiorcze dla krótkofalowców*. WKŁ, Warszawa 1979.
- [4] Lenkowski J. i inni: *Odbiorniki radiowe z przemianą częstotliwości*, WKŁ, Warszawa 1977,
- [5] Ryżko S., Ebert J.: *Wzmacniacze rezonansowe i generatory mocy wielkiej częstotliwości*. WNT, Warszawa 1971.

The temperature errors of the inductive strain-frequency transducer operating in resonance circuit with high attenuation

Abstract

The paper contains some results of tests of the impact of temperature on an inductive displacement sensor made from different materials. The inductive sensor is generally used for strain measurements in the triaxial state of stress of the order of hundreds or even thousands MPa. The pressure fluctuations in the triaxial cell cause temperature changes and finally some measurement errors. The sensor cooperates with transistor LC oscillator. The thermal coefficient of the sensor is defined as the change of frequency of the oscillator with reference to a sensor temperature. It has been proved that the thermal coefficient of a steel sensor may vary in a wide range, and take positive or negative values. The value and the mark of the thermal coefficient depend on proportion between the capacities of an additional capacitor installed paralelly to sensor to main capacitors present in a resonant circuit. The temperature-frequency characteristic of the sensor is almost linear when it is made from high resistive steel and takes parabolic shape for low resistive steel. The same characteristic obtained for manganin sensor is linear with a thermal coefficient equals about -15 ppm/K and is independent from parameters of resonant circuit. Effect of thermal stabilization of frequency appears for high attenuation resonant circuit.

Keywords: inductive strain sensor, strain measurement in high pressure condition, high attenuation LC oscillator

Recenzent: Dr hab. inż. *Paweł Ligeza*, Instytut Mechaniki Górotworu PAN