

Przyrząd do wzorcowania indukcyjnego czujnika odkształceń, rezultaty i niepewność wzorcowania

JANUSZ NURKOWSKI

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

Streszczenie

W opracowaniu przedstawiono przyrząd i sposób wzorcowania indukcyjnego, bezrdzeniowego czujnika odkształceń. Przyrząd skonstruowany został przez autora, na bazie śruby mikrometrycznej. Zamieszczono otrzymane wyniki wzorcowania oraz ich statystyczną analizę, ponadto przedstawiono rachunek niepewności procesu wzorcowania ze względu na: błędy zamocowania czujnika, sztywność układu pomiarowego, uchyb wzorca (śruby mikrometrycznej) oraz szeroko rozumianą stabilność generatora. Indukcyjny czujnik odkształceń wykorzystywany jest rutynowo do pomiarów ściśliwości próbek skał w komorze ciśnieniowej aparatu GTA-10. Czujnik stanowi indukcyjną część obwodu rezonansowego LC generatora drgań. Zmiany długości czujnika, który jest zamocowany na badanej próbce materiału, powodują zmianę częstotliwości drgań, co jest rejestrowane i stanowi podstawę do wyliczenia odkształceń próbki. Do obliczeń konieczna jest znajomość czułości czujnika, czyli zależności zmian częstotliwości od jego długości (wzorcowanie). W pomiarze ściśliwości stosowany jest również czujnik referencyjny pozwalający na redukcję błędów, w tym również błędów wzorcowania czujnika. Podczas pomiarów odkształcenia innych niż ściśliwość, czyli przede wszystkim pomiary odkształceń w trójosiowym stanie naprężenia (w komorze ciśnieniowej) oraz pomiar w jednoosiowym stanie naprężeń w urządzeniu Instron błędy wzorcowania przekładają się wprost na błędy pomiarowe.

Uzyskaną niepewność wzorcowania na poziomie około 0,4% można uznać za zadawalającą, biorąc pod uwagę fakt, że czujnik projektowano do zastosowań specjalistycznych, w warunkach wysokiego ciśnienia, w których użycie innych przyrządów pomiarowych jest problematyczne lub niemożliwe. Prawdopodobnie przyczyną stosunkowo dużej niepewności są głównie: nierównoległość mocowania czujnika względem kierunku odkształcania i zmienna wartość indukcyjności połączeń.

Słowa kluczowe: indukcyjny czujnik odkształcenia, błąd pomiaru, charakterystyka czujnika, wzorcowanie czujnika, przyrząd wzorcujący

1. Wstęp

Indukcyjny czujnik odkształcenia (rys. 1) został zaprojektowany i wykonany do pomiaru ściśliwości próbek skał w komorze ciśnieniowej aparatu GTA-10 [1]. Czujnik ma postać jednowarstwowej, bezrdzeniowej cewki indukcyjnej i stanowi indukcyjną część obwodu rezonansowego LC generatora drgań. Zmiany długości czujnika, który jest zamocowany na badanej próbce materiału, powodują zmianę częstotliwości drgań f zgodnie ze wzorem:

$$f = \left(2\pi\sqrt{L_r C_r}\right)^{-1} = \left(2\pi\sqrt{(L_s + L_p)C_r}\right)^{-1} = \left(2\pi\sqrt{\left(\frac{k}{l_s} + L_p\right)C_r}\right)^{-1}, \quad k = \mu N^2 A \quad (1)$$

gdzie:

- f – częstotliwość drgań generatora LC,
- L_r, C_r – całkowita indukcyjność i pojemność obwodu rezonansowego,
- L_s – indukcyjność czujnika (sensora),
- L_p – indukcyjność pasozytnicza połączenia czujnika z generatorem,
- l_s – długość czujnika (cewki),
- A – pole powierzchni zwoju cewki.

Indukcyjność pasożytnicza powinna być jak najmniejsza ze względu na destabilizowanie generatora i obniżanie czułości czujnika, więc powinna mieć wartość co najmniej dziesięć razy mniejszą od indukcyjności czujnika.

Czujnik z generatorem tworzy przetwornik *długość – częstotliwość*. Pomijając indukcyjność połączeń można powyższy wzór sprowadzić do postaci:

$$l = k_2 f^2, \quad k_2 = 4\pi^2 \mu N^2 A C_r \quad (2)$$

charakterystyka takiego przetwornika jest nieliniowa. Jednak dla małych odkształceń Δl , nie większych niż 1%, dla których błąd nieliniowości jest porównywalny z niepewnością pomiaru, można z dobrym przybliżeniem uznać ją za liniową.

Konieczne staje się zatem wzorcowanie czujnika. Procedura ta polega na pomiarze zmian długości czujnika za pomocą np. suwmiarki cyfrowej, śruby mikrometrycznej lub stolika mikrometrycznego i rejestracji zmian częstotliwości, która temu towarzyszy. W efekcie otrzymuje się charakterystykę czujnika zwaną krótko czułością s . (Odwrotność czułości nazywana jest stałą czujnika c).

Najwygodniej posługiwać się czułością względną [2] zdefiniowaną jako iloraz względnej zmiany częstotliwości do zmian długości czujnika:

$$s_R = \frac{\Delta f}{f} \cdot \frac{1}{\Delta l_s} \quad (3)$$

Czułość względną można wyliczyć wychodząc ze wzoru (1), mianowicie:

$$s_R = \frac{df}{dl_s} \cdot \frac{1}{f} = \frac{k_1}{l_s^2} \left(\frac{k_1}{l_s} + L_P \right)^{-\left(\frac{3}{2}\right)} (4\pi\sqrt{C_r})^{-1} \cdot 2\pi\sqrt{\left(\frac{k_1}{l_s} + L_P\right)} C_r = \frac{L_S}{2l_s(L_S + L_P)} = \frac{1}{2l_s\left(1 + \frac{L_P}{L_S}\right)} \quad (4)$$

W tym wypadku również konieczna jest znajomość wartości indukcyjności połączeń, ale korzystnie, nie występuje już pojemność obwodu rezonansowego.

Badanie ściśliwości skał wiąże się z pomiarem małych odkształceń, maksymalnie rzędu 10^{-2} do 10^{-1} przy ciśnieniu hydrostatycznym około 1GPa. Konieczny jest zatem pomiar z rozdzielczością 10^{-3} . Ograniczenie bazy pomiarowej, ze względu na rozmiar komory ciśnieniowej, do kilkudziesięciu milimetrów próbek skał, wymusza pomiar o rozdzielczości kilku mikrometrów przy zmiennym ciśnieniu i temperaturze ($\Delta T \approx 10^\circ\text{C}$). Aby sprostać tym wymaganiom i trudnym warunkom pomiaru, oprócz czujnika pomiarowego stosowany jest czujnik referencyjny, którego zadaniem jest redukcja błędów pomiarowych związanych ze średnio i długookresową niestabilnością generatora spowodowaną głównie zmianami temperatury i napięcia zasilania generatora oraz redukcja wpływu zmian ciśnienia i temperatury na czujnik pomiarowy [3]. Niezbędnym do tego warunkiem jest maksymalne podobieństwo parametrów elektrycznych, mechanicznych i geometrycznych obu czujników.

W pomiarach ściśliwości obecność czujnika referencyjnego można wykorzystać do redukcji błędów wyliczenia odkształcenia spowodowanego niepewnością wzorcowania czujnika. Mianowicie w metodzie porównawczej zmianę długości próbki Δl_M wylicza się z zależności:

$$\Delta l_M \approx \frac{1}{s_R} \left(\frac{\Delta f_{Mr}}{f_{Mr}} - \frac{\Delta f_{Rr}}{f_{Rr}} \right) - \Delta p \kappa_R l_R, \quad \text{dla} \quad s_{RM} = s_{RR} = s_R \quad (5)$$

gdzie:

- s_{RM}, s_{RR} – czułość względna czujnika pomiarowego i referencyjnego,
- f_{Mr} – częstotliwość rejestrowana z czujnika pomiarowego,
- f_{Rr} – częstotliwość rejestrowana z czujnika referencyjnego,
- p – ciśnienie
- κ_R, l_R – ściśliwość liniowa i długość wspornika mocującego czujnik referencyjny.

Dodatni przyrost długości oznacza wydłużenie więc ściśliwość we wzorze (5) ma wartość ujemną. Przy odpowiednim doborze długości wspornika i jego ściśliwości, względem badanego materiału, zmiany częstotliwości z obu czujników będą podobne, a wtedy:

$$\text{dla } \kappa_R l_R = \kappa_M l_M \quad \frac{\Delta f_{Mr}}{f_{Mr}} - \frac{\Delta f_{Rr}}{f_{Rr}} \rightarrow 0 \quad \text{wtedy} \quad \Delta l_M = -\Delta p \kappa_R l_R \quad (6)$$

gdzie κ_M, l_M to ściśliwość liniowa badanego materiału i jego długość (baza pomiarowa).

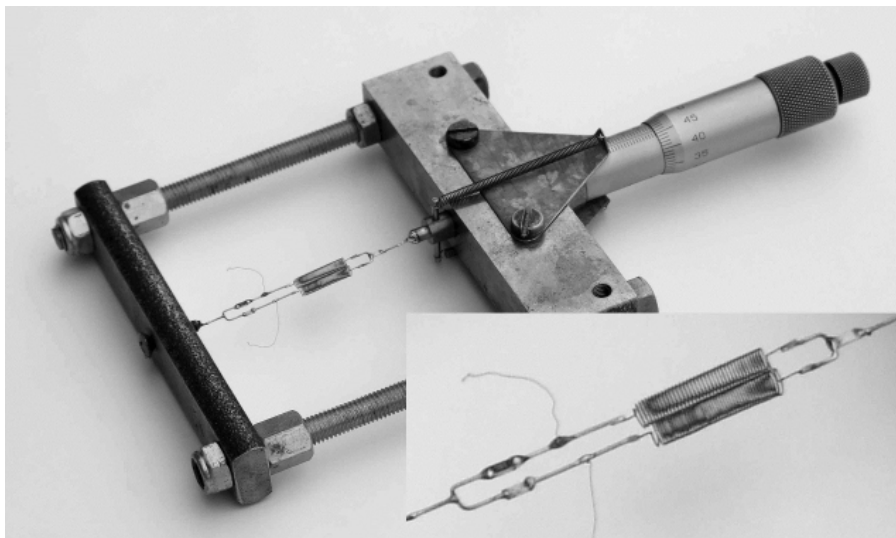
Zatem znajomość czułości obu czujników nie będzie konieczna, a w każdym razie mało znacząca. (Identyczność czułości obu czujników wynika z założenia ich podobieństwa wykonania). Wprawdzie ściśliwość badanego materiału κ_M jest nieznaną, ale można go oszacować lub wykonać wstępny pomiar.

Powyżej opisana sytuacja jest szczególna, gdyż na badany i referencyjny materiał działa ta sama siła pochodząca od ciśnienia hydrostatycznego. Jeśli siła działa tylko na badany materiał, a nie na materiał referencyjny, znajomość czułości czujnika jest niezbędna, a błędy jego wyznaczenia przełożą się wprost na błędy pomiaru odkształcenia. Dotyczy to w szczególności pomiaru odkształceń w teście konwencjonalnego trójosiowego ściskania (ang. *individual test*, por. Ulusay i Hudson, 2007) [4], w którym próbka jest jednocześnie ściskana hydrostatycznie pewnym ciśnieniem okólnym oraz obciążana siłą osiową za pośrednictwem tłoka prasy urządzenia GTA-10. Powyższe uwagi dotyczą również pomiaru deformacji próbki w teście jednoosiowego ściskania wykonywanym na maszynie wytrzymałościowej INSTRON 8500 Rock Testing System.

Dotychczas czujnik wzorcowano suwmiarką, co było mało dokładne, lub stolikiem mikrometrycznym co zaś było uciążliwe ze względu na jego duże rozmiary i wagę. W niniejszym opracowaniu przedstawiono przyrząd do wzorcowania czujnika, skonstruowany przez autora, na bazie śruby mikrometrycznej. Ponadto przedstawiono rachunek niepewności procesu wzorcowania ze względu na: błędy zamocowania czujnika sztywność układu pomiarowego, uchyb wzorca (śruby mikrometrycznej) oraz niestabilności przetwornika odkształcenie-częstotliwość. Analiza niestabilności dotyczyła oddziaływania temperatury na czujnik i generator, nietermicznych przypadkowych fluktuacje drgań oraz niestabilności położenia przewodów łączących czujnik z generatorem. Posłużono się przy tym publikacją Głównego Urzędu Miar [5].

2. Przyrząd do wzorcowania czujnika odkształceń

Przyrząd taki skonstruowano na bazie śruby mikrometrycznej. Zamocowano ją do stalowej, grubościenniej ramy, co zapewnia jej odpowiednią sztywność. W wywierconym w jednym boku ramy otworze umieszczony jest popychacz poruszany ruchem obrotowym trzpienia śruby mikrometrycznej. Między popychaczem a przeciwnym bokiem ramy zamocowany jest przez lutowanie wzorcowany czujnik. W ten sposób można w kontrolowany sposób zmieniać długość czujnika rejestrując towarzyszące temu zmiany częstotliwości generatora z którym współpracuje czujnik.



Rys. 1. Czujnik w przyrządzie do wzorcowania (skala 1:2)

W końcowej części popychacza umieszczona jest przetyczka, prostopadle do płaszczyzny ramy. Między przetyczką a ramą rozpięto, do pomocniczych wsporników, sprężyny napinające. Układ przetyczka-sprężyny pełni kilka funkcji:

- umożliwia ruch posuwisto-zwrotny popychacza, a więc wyznaczenie charakterystyki zarówno ściśkanego jak i rozciąganego czujnika. (histereza charakterystyki czujnika).
- zapobiega ruchowi obrotowemu popychacza przenoszonemu z obracanego trzpienia śruby mikrometrycznej,
- zmniejsza luzy śruby mikrometrycznej przy ruchu posuwisto-zwrotnym.

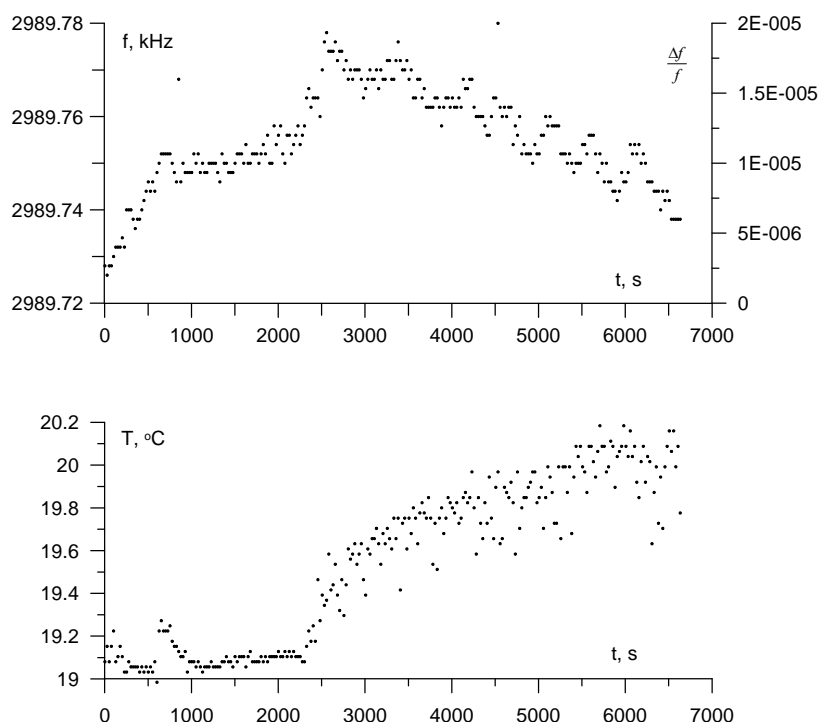
Moment obrotowy przekazywany przez półkoliste zakończenie śruby jest znikomy w porównaniu do momentu zwrotnego sprężyn na przetyczce i jest eliminowany tarciem popychacza o tuleję ramy.

Odległość między poprzeczkami ramy można regulować dzięki gwintowanym kolumnom, stosownie do rozmiarów czujnika.

3. Wyniki wzorcowania czujnika

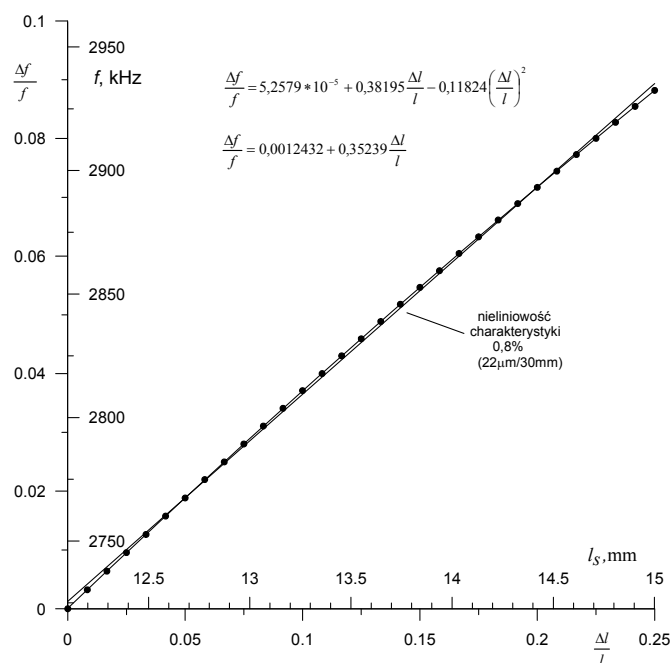
Wzorcowanie wykonano przyrządem, opisanym uprzednio, w siedmiu cyklach rozciągania i ściskania czujnika. Czujnika nie demontowano ani nie zmieniano pozycji przewodów łączących czujnik z generatorem. Oprócz czujnika wzorcowanego do generatora podłączony był tak samo wykonany czujnik referencyjny, aby obserwować stabilność generatora.

Rysunek 2 przedstawia zmiany częstotliwości czujnika referencyjnego i temperatury w otoczeniu obu czujników w czasie wzorcowania. Do około 2200 s stabilizowała się równowaga termiczna generatora i częstotliwościomierz oraz napięcia zasilające, po czym rozpoczęto pomiary charakterystyki. Widać narastanie temperatury o około 1°C , przy fluktuacjach dochodzących do $0,5^{\circ}\text{C}$, spowodowanych obecnością operatora. Towarzyszył temu spadek częstotliwości czujnika referencyjnego o ok. 40 Hz, (względna zmiana $-1,3 \cdot 10^{-5}$). Piłokształtne zmiany częstotliwości z czujnika referencyjnego od chwili rozpoczęcia wzorcowania (2700 s) powodowany jest wpływem dużych zmian indukcyjności czujnika wzorcowanego, które przenikały do obwodu rezonansowego przez pojemności pasożytnicze i sumowały się z indukcyjnością czujnika referencyjnego. (Analizę wpływu temperatury na niepewność pomiaru i możliwość zmniejszenia tej niepewności, wykorzystując czujnik referencyjny omówiono w dalszej części opracowania).



Rys. 2. Zmiany częstotliwości czujnika referencyjnego i temperatury w otoczeniu czujników w czasie wzorcowania

Czujnik o długości początkowej 12 mm rozciągnano o 3 mm do długości 15 mm, czyli o 25%, następnie skracano go do długości początkowej, z krokiem pomiarowym 0,1 mm i rozdzielczością pomiaru częstotliwości 0,01 kHz. Po demontażu i ponownym montażu cykl pomiarowy powtarzano. Na rysunku 3 pokazano przykładową charakterystykę czujnika jednokrotnie rozciągniętego z zaznaczeniem punktów pomiarowych przez które przechodzi krzywa aproksymacji funkcją drugiego stopnia. Aproksymacja jest na tyle dobra, że wzrokowo nie można stwierdzić odchyłki od niej punktów pomiarowych (wsp. determinacji $R^2 = 0,999999$).

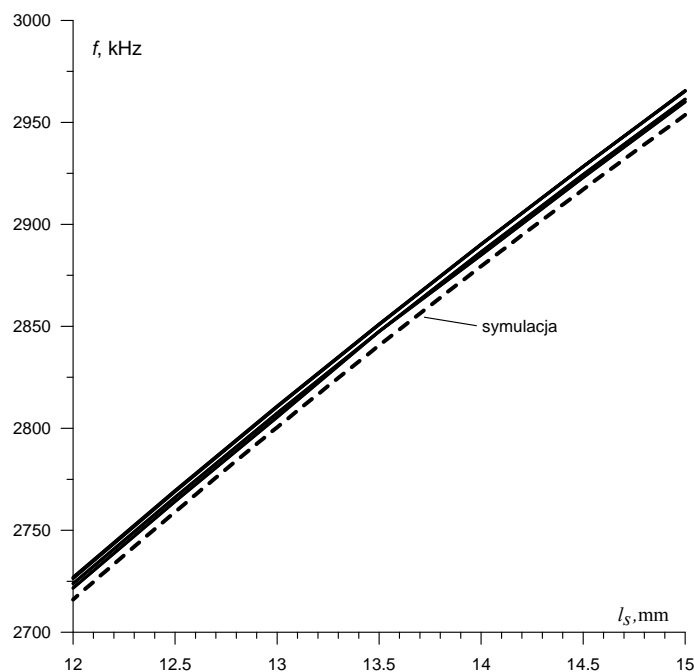


Rys. 3. Charakterystyka czujnika aproksymowana funkcją pierwszego i drugiego stopnia

Aproksymacji dokonano również funkcją liniową ($R^2 = 0,9995$), która nieznacznie różni się od aproksymacji funkcją drugiego stopnia, gdyż różnica wartości między aproksymacją liniową a kwadratową w środku zakresu odniesiona do maksymalnego rozciągnięcia czujnika o 25% wynosi 0,8%. Podana wartość maksymalnej nieliniowości obejmuje 90% środkowego zakresu pomiarowego. Można wykazać, że iloraz względnej nieliniowości do względnego zakresu pomiarowego jest dla omawianego czujnika w przybliżeniu wielkością stałą i wynosi 0,03. Czyli dla maksymalnego dopuszczalnego rozciągnięcia czujnika 50%, ograniczonego jego sprężystością, nieliniowość charakterystyki będzie $50\% \cdot 0,03 = 1,5\%$ a dla deformacji 10% nieliniowość będzie 0,3%. Warunkiem jest zgodność długości początkowej czujnika podczas wzorcowania i pomiaru oraz wyliczenie współczynnika kierunkowego charakterystyki dla środka zakresu pomiarowego. Uzyskane względne odchylenie standardowe dla siedmiu cykli ściskania i rozciągania czujnika wynosi tylko $\sigma = 0,02\%$, co świadczy o dobrej powtarzalności każdego z pomiarów i małego wpływu zmian temperatury.

Następnie dokonano wzorcowania tego samego czujnika przy czym po każdym cyklu czujnik demontowano z przyrządu i montowano ponownie. Pozwoliło to wychwycić efekty niedoskonałości mocowania czujnika polegające na niezerowym kącie między kierunkiem deformacji a osią czujnika oraz zmian indukcyjności połączeń czujnika z generatorem spowodowane nieco innym ułożeniem przewodów po demontażu i ponownym jego montażu.

Rysunek 4 przedstawia efekty wzorcowania tego samego czujnika w pięciu cyklach rozciągania i ściskania. Różnice charakterystyk są tak małe, że krzywe poszczególnych cykli są słabo rozróżnialne, a charakterystyki dla czujnika rozciąganego i ściskanego tego samego cyklu są wzrokowo identyczne. Dodatkowo pokazano linią przerywaną symulację charakterystyki według formuły (4) w skład której wchodzi dane o parametrach czujnika (ilość zwojów, średnica cewki i jej długość), indukcyjności połączeń i pojemności obwodu rezonansowego.



Rys. 4. Charakterystyka czujnika aproksymowana funkcją drugiego stopnia dla 5 cykli pomiarowych. Linia przerywana – efekt symulacji

Poniżej przedstawiono wyniki statystycznej analizy procesu wzorcowania czujnika demontowanego. Wykonano ją, dla ułatwienia, biorąc pod uwagę liniową aproksymację charakterystyk.

Wzorcowanie uśrednione dla 7. pomiarów – czujnik skracany, aproksymacja liniowa:

- Średnie nachylenie charakterystyki dla czujnika skracanego $1/s = 12,573 \mu\text{m/kHz}$
- Odchylenie standardowe $\sigma = 0,048 \mu\text{m/kHz}$.
- Niepewność rozszerzona $2\sigma = 0,096 \mu\text{m/kHz}$, czyli 0,76% względem nachylenia średniego.
- Średnie nachylenie charakterystyki dla czujnika rozciąganego $1/s = 12,568 \mu\text{m/kHz}$
- Odchylenie standardowe $\sigma = 0,047 \mu\text{m/kHz}$.
- Niepewność rozszerzona $2\sigma = 0,094 \mu\text{m/kHz}$, czyli 0,75% względem nachylenia średniego.

Wzorcowanie uśrednione dla czujnika skracanego i rozciąganego (7 cykli):

- Średnie nachylenie charakterystyki $1/s = 12,569 \mu\text{m/kHz}$
- Odchylenie standardowe $\sigma = 0,046 \mu\text{m/kHz}$.
- Niepewność rozszerzona (poziom ufności 95%) $2\sigma = 0,092 \mu\text{m/kHz}$, czyli 0,73% względem nachylenia średniego.

Niepewność rozszerzona wzorcowania (poziom ufności 95%) poniżej 1% można uznać za zadowalającą, biorąc pod uwagę fakt, że czujnik projektowano do zastosowań specjalistycznych, w warunkach wysokiego ciśnienia, w których użycie innych przyrządów pomiarowych jest problematyczne lub niemożliwe. Prawdopodobnie przyczyną stosunkowo dużej niepewności są głównie: nieosiowość mocowania czujnika i zmienna wartość indukcyjności połączeń. Oba te czynniki występują zarówno w trakcie wzorcowania jak też pomiaru i zależne są od staranności działania operatora. Zwraca uwagę mała rozbieżność czułości tego samego cyklu ściskania i rozciągania czujnika (0,040%), związana z beztarciowym jego deformowaniem a spowodowana prawdopodobnie kasowaniem luzów śruby mikrometrycznej.

Poniżej przedstawiono zidentyfikowane źródła niepewności procesu wzorcowania i ich analizę matematyczną.

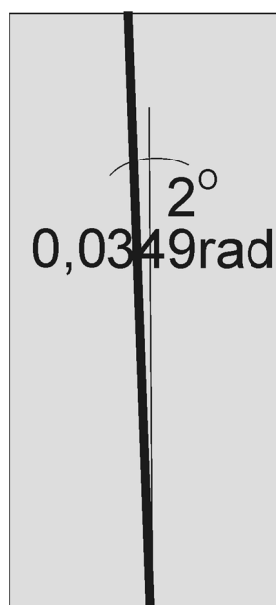
4. Błędy mocowania czujnika

Czujnik powinien być zamocowany tak, aby jego oś była równoległa do kierunku odkształcania zarówno podczas wzorcowania jak i pomiaru.

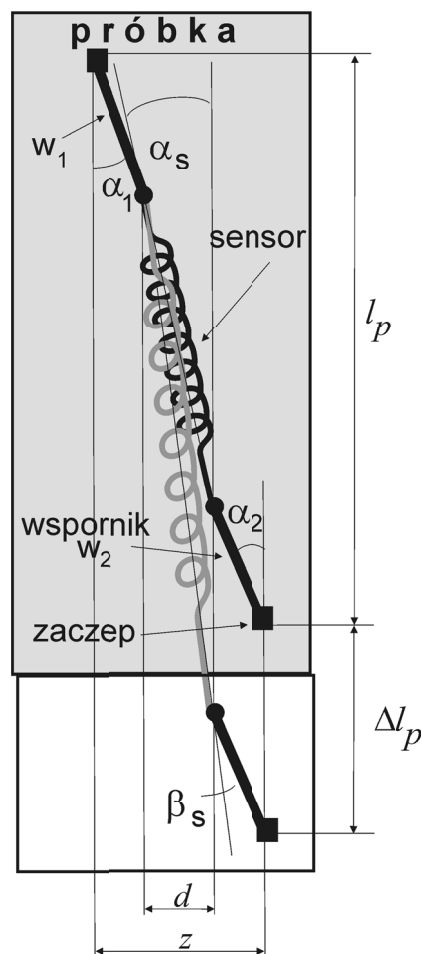
Czujnik do próbki mocuje się za pośrednictwem łączników. Umożliwia to dostosowanie długości czujnika do długości bazy pomiarowej. Taki sam układ czujnika i łączników powinien być odtworzony podczas wzorcowania czujnika.

Z praktyki wynika, że mocowanie czujnika i łączników wykonać można z błędem nie większym niż 2° . Dowodzi to rysunek 5 przedstawiający schematycznie próbkę w naturalnej proporcji i linię grubą symbolizującą czujnik, nachyloną względem boków próbki pod kątem 2° . Nierównoległość linii symbolizującej czujnik względem boków prostokąta (lewo-prawo) jak i też brak prostopadłości w stosunku do podstaw (górze-dół) łatwo stwierdzić wzrokowo.

Na kolejnym rysunku (rys. 6) przedstawiono w ujęciu geometrycznym błędy mocowania czujnika i łączników. W tym wypadku wartość kątów zwiększono znacznie dla uzyskania odpowiedniego uwidocznienia zagadnienia. Skończona wartość kątów zamocowania łączników i czujnika powoduje, że jeden z końców czujnika jest odchylony o odcinek d (dewiacja) względem drugiego końca w odniesieniu do kierunku wektora siły działającej na próbkę lub do kierunku zmian długości czujnika podczas wzorcowania. Niewspółosiowość zamocowania czujnika i jego zmian długości skutkuje błędami pomiarowymi. Czujnik będzie wskazywał większą czułość podczas wzorcowania niż rzeczywista a w pomiarach mniejsze zmiany długości badanego przedmiotu. Wynika stąd, że ze względu na niezerowy kąt mocowania czujnika względem wektora przemieszczenia (działającej siły), błąd wzorcowania częściowo może kompensować błąd podczas pomiaru, zmniejszając jego niepewność. Błąd będzie tym większy im odchylenie (dewiacja) czujnika będzie większa. Odchylenie to należy traktować jako zdarzenie losowe o ograniczonej wartości. Wynika stąd



Rys. 5. Ilustracja błędu mocowania czujnika



Rys. 6. Oznaczenie kątów i przesunięć w nieosiowo zamocowanym czujniku

niepewność wzorcowania czujnika. (Błąd mocowania nie ma znaczenia w pomiarze ściśliwości, ze względu na hydrostatyczne obciążenie.)

W obliczeniach przyjęto następujące założenia:

1. kątowne błędy zamocowania są przypadkowe ale nie większe niż 2° ,
2. wsporniki czujnika w_1, w_2 można uznać za pręty sztywne,
3. czujnik jest sprężysty, więc jego połączenie za wspornikami jest w przybliżeniu wahlwe,
4. sinusy i tangensy kątów zamocowania są równe tym kątom (po przeliczeniu na radiany).

Ostatni postulat jest uzasadniony, gdyż na przykład przyjmując maksymalny błąd $\alpha = 2^\circ = 0,0349066$ rad, błąd względny sinusa jest $(\alpha - \sin\alpha)/\sin\alpha = 2,0 \cdot 10^{-4}$, natomiast tangensa $(\alpha - \text{tg}\alpha)/\text{tg}\alpha = 2,2 \cdot 10^{-4}$. Widać więc, że błąd przybliżenia jest znikomy.

Korzystając z zależności geometrycznych widocznych na rys. 6 i 7 można otrzymać, że:

$$d = z - l_{w1} \sin \alpha_1 - l_{w2} \sin \alpha_2 = l_b \text{tg} \gamma - l_{w1} \sin \alpha_1 - l_{w2} \sin \alpha_2 \approx l_b \gamma - l_{w1} \alpha_1 - l_{w2} \alpha_2 \quad (7)$$

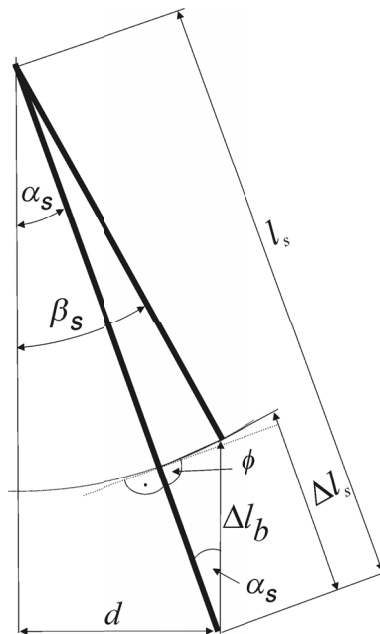
gdzie:

z – odległość drugiego zaczeput od prostej przechodzącej przez pierwszy zaczeput i równoległej do wektora obciążenia,

γ – odchyłka kątowa zamocowania jednego zaczeput względem drugiego czyli między prostą równoległą do wektora obciążenia a prostą przechodzącą przez oba zaczeput,

l_s, l_{w1}, l_{w2} – długość czujnika i wsporników,

α_1, α_2 – kąt zamocowania wsporników.



Rys. 7. Zależności geometryczne dla czujnika zamocowanego nieosiowo

Teoretycznie kąty te mogą mieć wartości ujemne względem siebie, co powoduje że $d > z$ jednak w praktyce taka sytuacja wydarzy się w razie wyjątkowo niedbałego montażu. Można więc przyjąć, że wszystkie kąty będą dodatnie, więc $d < z$.

Przyjmując graniczną wartość niepewności kątów mocowania $\gamma = \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_{\max}$

$$d_{\max} \approx (l_b - l_{w1} - l_{w2}) \alpha_{\max} = l_s \alpha_{\max} \quad (8)$$

Wartość dewiacji d można traktować jako zmienną losową, niepewności kątów mocowania w skończonym przedziale od 0 do 2° o trójkątnym rozkładzie prawdopodobieństwa. Stąd wartość średnia (oczekiwana) dewiacji będzie:

$$\bar{d} = \frac{d_{\max}}{\sqrt{6}} \approx \frac{l_s \alpha_{\max}}{\sqrt{6}} \quad (9)$$

Sztywność zaczepów i wahliwość mocowania do nich czujnika powoduje, że odkształcenie badanej próbki o Δl_b zmieni kąt mocowania czujnika α_s , do wartości β_s , przy niezmiennych wartościach kąta mocowania zaczepów α_{w1} , α_{w2} i dewiacji d . W tej sytuacji czujnik zmieni swą długość o wartość Δl_s , mniejszą od rzeczywistego odkształcenia próbki Dl_b .

Zamieszczone poniżej formuły pozwalające oszacować błąd pomiaru spowodowany przez zamocowanie czujnika pod kątem $\alpha_s > 0$ względem wektora obciążenia będą wyprowadzone przy upraszczającym założeniu, że cięciwę łączącą końce odcinków Δl_s i Δl_b zastąpiono odcinkiem oraz kątem ϕ przyległy do odcinka Δl_s ma wartość $\pi/2$, gdy w rzeczywistości jest nieco większy.

Dla próbki ściskanej określi to zależność:

$$\begin{aligned} \Delta l_s &= \Delta l_b \cos \alpha_s \\ \Delta l_s &= \Delta l_b \cos \left(\arcsin \frac{\bar{d}}{l_s} \right) \approx \Delta l_b \cos \frac{\bar{d}}{l_s} \approx \Delta l_b \cos \frac{\alpha_{\max}}{\sqrt{6}} \approx \Delta l_b \sqrt{1 - \sin^2 \frac{\alpha_{\max}}{\sqrt{6}}} \end{aligned} \quad (10)$$

Niepewność względną można wyliczyć według wzoru:

$$\delta_{\alpha_k} = 1 - \frac{\Delta l_s}{\Delta l_b} \approx 1 - \cos \frac{\bar{d}}{l_s} \approx 1 - \sqrt{1 - \sin^2 \alpha_s} \approx \frac{1}{2} \left(\frac{\bar{d}}{l_s} \right)^2 \approx \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_{\max}}{\sqrt{6}} \right)^2 \quad (11)$$

Przyjmując maksymalną wartość odchyłki kątowej zamocowania czujnika $\alpha_s = \alpha_{\max} = 2^\circ = 0,0349$ rad, spodziewana wartość niepewności będzie:

$$u_\alpha = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_{\max}}{\sqrt{6}} \right)^2 \approx \frac{1}{2} \left(\frac{0,0349}{\sqrt{6}} \right)^2 \approx 1,0 \cdot 10^{-4}$$

Taka wartość niepewności odnosi się do małych zmian długości początkowej czujnika. W miarę jego odkształcania kąt zamocowania α_s będzie się zmieniał. Dla czujnika skracanego α_s będzie rosł zwiększając niepewność, a dla czujnika rozciąganego α_s będzie maleł zmniejszając niepewność. Z dobrym przybliżeniem zmiana kąta będzie proporcjonalna do względnej zmiany długości czujnika.

$$\alpha_s \approx \arcsin \frac{l_{s0} \sin \alpha_{s0}}{l_s} \approx \frac{l_{s0}}{l_s} \quad (12)$$

Na przykład dla maksymalnego odkształcenia czujnika $\pm 50\%$ początkowa graniczna niepewność kąta zamocowania podwaja się dla czujnika skracanego (z błędem $6,1 \cdot 10^{-4}$) a dla rozciąganego dwukrotnie maleje (z błędem $1,5 \cdot 10^{-4}$).

5. Sprężystość zespołu popychacz-kulka śruby mikrometrycznej

Trzpień śruby zakończony jest półkuliście (promień 4 mm), natomiast popychacz ma płaską podstawę. Przy wysuwaniu popychacza z tulei rośnie siła reakcji sprężyn przetyczki, co powoduje wciskanie półkolistego trzpienia w płaskie czoło tulei. Powoduje to istnienie błędu systematycznego w pomiarze zmiany długości czujnika.

Publikacja [6], w tablicy 2.3 podaje wzór na obliczenie spłaszczenia sprężystego kulki w płaszczyźnie Δl_z :

$$\Delta l_z = 0,41 * 10^{-3} \left(\frac{F_z^2}{d_k} \right)^{\frac{1}{3}} \quad [\text{mm}, \text{N}] \quad (13)$$

gdzie:

F_z – siła nacisku sprężyn zwrotnych,
 d_k – średnica kulki w mm.

Powyższy wzór jest albo czysto empiryczny, albo nie podano miana stałej 0,41, gdyż nie zgadzają się jednostki, jednak posłużono się nim w obliczeniach.

Zmierzony współczynnik sprężystości każdej ze sprężyn zwrotnych ma wartość $k_z = 0,11$ N/mm. Są one wstępnie napięte z łączną siłą 0,33 N co odpowiada (wg powyższego wzoru) ugięciu o 0,45 μm . Po rozciągnięciu ich np. o 10 mm siła nacisku półkuli wzrasta do 0,55 N i powoduje ugięcie o 0,64 μm . Jest to błąd pomiaru skrócenia czujnika +0,19 μm , a względny $+2 \cdot 10^{-5}$.

W powyższym wzorze siła sprężyn zwrotnych ma wykładnik 0,66, jednak z dużym przybliżeniem, dla niewielkich (kilkuprocentowych) zmian długości czujnika można przyjąć liniową zależność tego błędu od odkształceń czujnika na poziomie +0,02 μm na 1 mm jego wydłużenia. Taką też poprawkę można wnieść przy wzorcowaniu czujnika, lub odpowiednio nieznacznie zwiększyć wartość niepewności wzorcowania.

6. Sztywność ramy

Na sztywność ramy mają wpływ dwie kolumny gwintowane i przykręcona do nich poprzeczka. Wspornik do którego zamocowana jest śruba mikrometryczna jest na tyle masywny, że można traktować go jako nieodkształcalny.

Pod wpływem zmian długości czujnika zmienia się siła jego sprężystości, co powoduje zmienne ugięcie poprzeczki, do której jest mocowany oraz zmianę długości kolumn. W prezentowanym wykonaniu ramy (stal) kolumny mocujące poprzeczkę mają gwint M8 na całej ich długości około 100 mm. Poprzeczka ma grubość 10 mm i szerokość 15 mm, w jej środkowej części jest nagwintowany otwór do wkręcenia śruby mocującej czujnik, co osłabia poprzeczkę, więc przyjęto zastępczą szerokość poprzeczki jako 10 mm. Stała sprężystości czujnika wynosi $22 \cdot 10^{-3}$ N/mm.

Ugięcie poprzeczki, przyjmując bardziej niekorzystny przypadek swobodnego podparcia na kolumnach obliczono ze wzoru:

$$\Delta l_p = -\frac{F_s l_p^3}{4Yb_p h_p^3} \quad (14)$$

gdzie:

F_s – siła sprężystości czujnika,

l_p, b_p, h_p – długość, szerokość i wysokość poprzeczki.

Podając odkształcenie czujnika z mm, ugięcie wyrażone w μm wynosi około $2,5 \cdot 10^{-3}$ $\mu\text{m}/\text{mm}$.

Skrócenie kolumn naciskanych przez poprzeczkę wyliczono ze wzoru:

$$\Delta l_k = -\frac{F_s l_k}{2YS_k} \quad (15)$$

gdzie:

F_s – siła sprężystości czujnika,

l_k, S_k – długość i pole przekroju kolumny.

Sumaryczny, systematyczny błąd pomiaru zmian długości czujnika wynikający ze skończonej sztywności ramy jest sumą odkształceń kolumn i poprzeczki i wynosi:

$$\Delta l_R = \Delta l_p + \Delta l_k = -2,5 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}/\text{mm} - 0,16 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}/\text{mm} \approx -2,7 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}/\text{mm} \approx -3 \cdot 10^{-6}$$

Ujemna wartość błędu, ze względu na sztywność ramy oznacza, że faktyczne wydłużenie czujnika jest większe niż zmierzone śrubą, ale błąd jest tak mały, że można go zaniedbać.

7. Niepewność pomiaru śrubą mikrometryczną

Błąd graniczny dopuszczalny mikrometru w warunkach temperaturowych T_1^4 (odstępstwo temperatury przyrządu pomiarowego od 20°C nie przekracza 4°C, a różnica temperatur między przedmiotem mierzonym a śrubą mikrometryczną nie przekracza 1°C) określa wzór:

$$u_{sm} = \pm \left(4 + \frac{L[\text{mm}]}{40} \right), \mu\text{m} \quad (16)$$

gdzie:

u_{sm} – błąd graniczny dopuszczalny śruby mikrometrycznej (MPE maximum permissible errors of a measuring equipment),

L – mierzona długość w mm, a wynik w μm .

Dla maksymalnego odkształcenia czujnika 10 mm błąd ten wyniósł by 4,25 μm .

Zależność ta podana w [6] wydaje się zbyt rygorystyczna w przypadku wzorcowania czujnika, gdyż wzorcowanie polega na pomiarze zmian długości a temperatura pomieszczenia w warunkach laboratoryjnych zmienia się podczas wzorcowania tylko o ułamek stopnia. Ponadto nie występuje problem odchylenia od płaskości powierzchni pomiarowych lub ich chropowatości. Arbitralnie przyjęto niepewność wskazań śruby w procesie wzorcowania MPE = 1,5 μm .

Całkowita graniczna niepewność pomiaru mikrometrem u_{pm} jest sumą geometryczną niepewności przyrządu u_{sm} i granicznej niepewności odczytu jego wskazań u_{om} , którą przyjęto jako 1/5 działki elementarnej, czyli 2 μm :

$$u_{pm} = \sqrt{u_{sm}^2 + u_{om}^2} = \sqrt{1,5^2 + 2^2} = 2,5 \mu\text{m} \quad (17)$$

Wstępne przewzorcowanie śruby np. na płytkach Johanssona pozwoliło by zmniejszyć składową niepewności u_{sm} .

8. Niepewność związana ze zmienną wartością indukcyjności połączeń

Kształt połączeń między generatorem i czujnikiem jest najbardziej zbliżony do linii symetrycznej, której indukcyjność określa zależność:

$$L_{sym} = \mu \frac{l_d}{\pi} \ln \frac{2a}{d_c} = 0,4 \cdot 10^{-6} l_d \ln \frac{2a}{d_c}, \quad \text{dla } \mu_r = 1 \quad (18)$$

Niestabilność położenia przewodów łączących prowadzi do niepewności wyznaczenia czułości czujnika.

Połączenie wykonano ze skrętki drutów o średnicy $d_c = 0,2$ mm o długości $l_d = 120$ mm, która była rozkręcona na odcinku około 20 mm z obu końców i jako proste przewody podłączono do czujnika i generatora. Odległość między przewodami ustalona była przez grubość izolacji i wynosiła 1 mm, z wystarczającym przybliżeniem uznano ją za niezmienną. Końcowe odcinki o długości 20 mm służące do podłączenia miały w przybliżeniu kształt trapezu o jednym z boków równym odległości zgrzewki czyli 1mm a drugi odpowiednio: od strony generatora 20 mm i od strony czujnika 10 mm. Trapezy te dla ułatwienia obliczenia ich indukcyjności zastąpiono linią symetryczną o odległości między przewodami odpowiednio $a = 10$ i 5 mm o wyliczonej z (18) indukcyjności 0,0313 μH i 0,0368 μH . Dla możliwych różnic w odległości między przewodami około 2 mm, czyli niepewności położenia przewodów w kolejnych wzorcowaniach, maksymalna zmiana indukcyjności będzie odpowiednio: $u_{Lp1} = 0,0038$ μH i $u_{Lp2} = 0,0041$ μH . Można przyjąć trójkątny rozkład prawdopodobieństwa położenia przewodów oraz częściową kompensację wzajemnych niepewności (odległość między przewodami jednego doprowadzenia może się zmniejszyć, a drugiego zwiększyć). Stąd spodziewana niepewność całkowita zmiana indukcyjności połączeń będzie:

$$u_{Lp} = \Delta L_p \sqrt{\frac{u_{Lp1}^2 + u_{Lp2}^2}{6}} = \sqrt{\frac{0,0038^2 + 0,0041^2}{6}} = 0,0023 \mu\text{H} \quad (19)$$

Wyliczona z (18) indukcyjność środkowego fragmentu połączenia o długości 80 mm wynosi 0,074 μH , sumując to z końcowymi trapezowymi odcinkami, całkowita indukcyjność połączenia wynosi 0,14 μH .

Korzystając ze wzoru na czułość względną czujnika jako funkcję jego długości i stosunku indukcyjności czujnika do indukcyjności połączeń (6), można otrzymać, że względna zmiana określenia czułości czujnika od niepewności indukcyjności połączeń będzie:

$$\frac{s_R + \Delta s_R}{s_R} = F(L_p) = \frac{1 + \frac{L_p}{L_s}}{1 + \frac{L_p + \Delta L_p}{L_s}} = \frac{L_s + L_p}{L_s + L_p + \Delta L_p} = \frac{2,5 + 0,14}{2,5 + 0,14 + 0,0023} = 0,9991 \quad (20)$$

a oczekiwana względna niepewność $u_{L_p} = 1 - 0,9991 = 0,0009 \approx 0,001$.

9. Oddziaływanie zmian temperatury otoczenia na generator i czujnik

Zmiana temperatury otoczenia oddziałując na generator powoduje zmianę częstotliwości drgań. Powodem są głównie zmiany rezystancji rezystorów, pojemności kondensatorów, pojemności i indukcyjności obwodów drukowanych generatora oraz przede wszystkim zmiany wielu parametrów tranzystora (np. wzmocnienie, rezystancje wejściowa i wyjściowa). Destabilizujące oddziaływanie temperatury można wydatnie zmniejszyć stosując w obwodzie rezonansowym kondensatory o odpowiednio dobranym termicznym współczynniku zmian pojemności (TWP). Efektywność tego sposobu ogranicza różna bezwładność cieplna elementów elektronicznych generatora i sprawdza się dla relatywnie wolnych zmian temperatury. Innym rozwiązaniem jest termostatowanie generatora, ale powoduje to komplikację układu i dodatkowe zapotrzebowanie na moc pobieraną z zasilacza oraz konieczność stosowania osłon termicznych. W przypadku generatora współpracującego z czujnikiem odkształceń do redukcji oddziaływania temperatury zastosowano kondensatory o odpowiednim TWP. Podyktowane było to koniecznością minimalizacji jego rozmiarów. W efekcie dla zmian temperatury nie szybszych niż około $10^{-2} \text{ }^\circ\text{C/s}$ termiczny współczynnik względnych zmian częstotliwości od generatora (TWfG) wynosi $-4 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C}$.

Zmiana temperatury otoczenia oddziałuje również na czujnik. Wzrost temperatury zwojów czujnika powoduje wzrost ich średnicy, więc zwiększa się indukcyjność czujnika, a częstotliwość drgań maleje. Termiczny współczynnik względnych zmian częstotliwości od czujnika (TWfS) jest równy jego współczynnikowi rozszerzalności termicznej i wynosi około $-1 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ (zakładając rozszerzalność termiczną materiału na którym zamocowano czujnik równy zero). Pomiarom odkształcenia w komorze ciśnieniowej towarzyszą stosunkowo duże zmiany temperatury (do 10°C), niemożliwe do stabilizacji. Przez odpowiedni dobór parametrów RLC obwodu rezonansowego i czujnika udało się zmniejszyć wpływ temperatury na czujnik do około $-1 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$. (Wykorzystano wpływ termicznych zmian rezystancji czujnika na częstotliwość rezonansową generatora).

Dalszą minimalizację wpływu temperatury na czujnik i generator osiągnięto wykorzystując czujnik referencyjny o identycznych parametrach jak czujnik pomiarowy i zamocowany na materiale o znanych właściwościach mechanicznych.

Podczas wzorcowania czujnika zmiany temperatury czujnika i generatora prowadzą do niepewności wyznaczenia jego czułości. Generator umieszczono pod osłoną termiczną, aby spowolnić oddziaływanie fluktuacji temperatury otoczenia. Czujnik musiał być dostępny do regulacji jego długości i pozostawał w otwartej przestrzeni, chociaż możliwe są częściowe przezroczyste osłony. W trakcie wzorcowania średnio czasowe (minuty) zmiany temperatury otoczenia ograniczono do $T_m = 0,2^\circ\text{C}$, natomiast rejestrowane krótkotrwałe fluktuacje (sekundy) dochodziły do $T_s = 0,3^\circ\text{C}$.

Średnio i krótkotrwałe zmiany oddziałujące na czujnik i generator potraktowano jako przypadkowe i włączono do rachunku niepewności, chociaż można próbować zredukować matematycznie wpływ zmian średnio czasowych znając termiczne współczynniki generatora i czujnika.

Sumując maksymalne zmiany temperatury otoczenia i termiczne współczynniki generatora i czujnika oraz przyjmując równoprawdopodobne wartości z zakresu sumy zmian temperatur, niepewność wzorcowania będzie:

$$\frac{\Delta f_T}{f_p} = \frac{1}{\sqrt{3}} (\Delta T_s + \Delta T_m) \cdot \frac{(TWfG + TWfS)}{f_p} \approx \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot 0,5^\circ\text{C} \cdot 4 \cdot 10^{-5} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} = 1,2 \cdot 10^{-5} \quad (21)$$

Względna niepewność z tym związana będzie stosunkiem względnych termicznych zmian częstotliwości do względnych zmian częstotliwości towarzyszących wzorcowaniu czujnika $\Delta f_p/f_p$. Korzystając z wyliczonej stałej czujnika równej 12,5 mm/kHz i maksymalnej deformacji czujnika $\Delta l_s = 3$ mm otrzymamy zmianę częstotliwości $\Delta f_p = 250$ kHz przy $f_p = 2755$ kHz (patrz rys.8)

$$u_{Tf} = \frac{\Delta f_{Tf}}{f_p} \frac{f_p}{\Delta f_p} = 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot 11 = 0,13 \cdot 10^{-3} \quad (22)$$

Czujnik referencyjny wykorzystać można do kontroli stabilności termicznej układu generator-czujnik podczas wzorcowania czujnika pomiarowego i wprowadzania odpowiednich poprawek.

10. Inne czynniki destabilizujące generator i pomiar częstotliwości

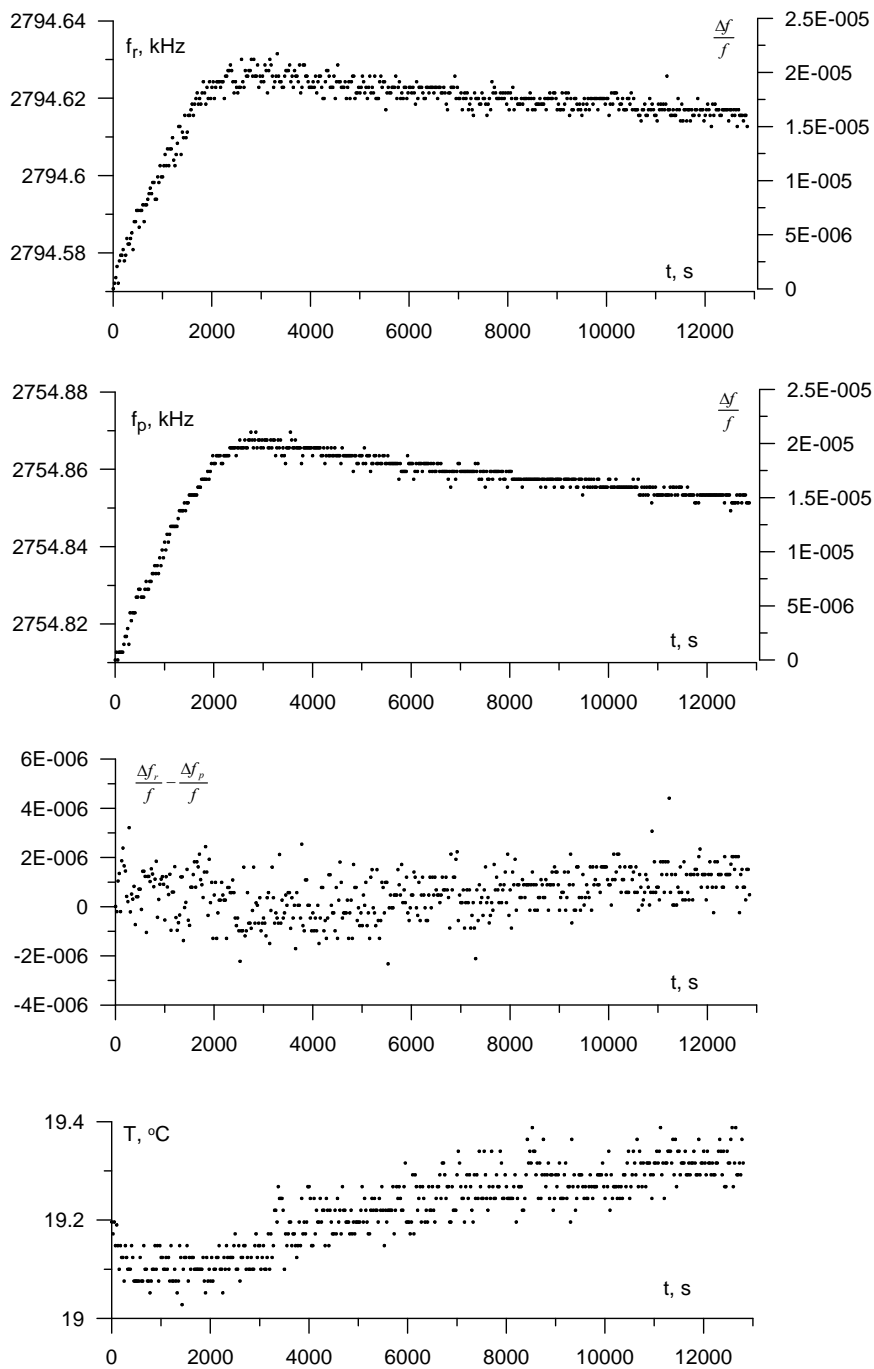
Do czynników takich należy zaliczyć:

1. Duża rezystancja czujnika a zatem mała dobroć obwodu rezonansowego i w efekcie mała stromość charakterystyki fazowej obwodu sprzężenia zwrotnego.
2. Niedośkonalszość stabilizacji napięcia zasilania generatora (temperatura).
3. Niestabilność generatora częstotliwości wzorcowej częstościomierza (temperatura, kwarc, układ elektroniczny).
4. Niestabilność układu bramkującego częstościomierza.
5. Wpływ temperatury na rezystancję przełącznika czujników (w układzie różnicowym).
6. Ograniczona rozdzielczość pomiaru częstotliwości.
7. Inne mniej istotne lub niezidentyfikowane zjawiska.

Mnogość tych czynników i trudność ilościowego ujęcia wpływu każdego z nich z osobna spowodowała, że niepewność pomiaru częstotliwości, wliczając w to niestabilność generatora, określono eksperymentalnie, rejestrując częstotliwość generacji przy możliwie minimalnych zmianach temperatury w otoczeniu generatora i czujnika. Efekty takich pomiarów przedstawia rys. 8. Widać na nim jak zmieniała się częstotliwość generatora do którego podłączano naprzemiennie czujnik pomiarowy (wzorcowany) i referencyjny, po włączeniu zasilania, przy zmianach temperatury otoczenia (pokoju z aparaturą) około 0,2°C przez prawie 4 godziny. Zmiany częstotliwości z obu czujników są mocno skorelowane. O ile każdy z czujników dawał względne zmiany częstotliwości rzędu 10^{-5} , to różnica między nimi była 10^{-6} . W początkowym okresie (do 3000 s) są one szybsze i dodatnie względem czasu i temperatury otoczenia (+60 Hz/h) a powodowane ustaleniem równowagi cieplnej w obudowie generatora i częstościomierza a otoczeniem (zmiany temperatury w ich obudowach były inne niż otoczenia). Następnie aż do końca rejestracji danych zmiany częstotliwości były wolniejsze i ujemne względem wolno zwiększającej się temperatury otoczenia (-0,1 kHz/°C oraz -7 Hz/h) a powodowane wypadkową wpływem temperatury na czujnik i generator. Wzrost temperatury w pomieszczeniu powodowany był przez moc traconą przez aparaturę (komputer, monitor) oraz przez wzrost temperatury powietrza na zewnątrz budynku.

Mając na względzie powyższe, należy stwierdzić, że podczas wzorcowania można a nawet trzeba wykorzystywać czujnik referencyjny do kompensacji zmian temperatury pomieszczenia i nagrzewania się generatora (jak to jest podczas pomiarów), co nie zwalnia z konieczności unikania niepotrzebnie dużych zmian temperatury.

Temperaturę otoczenia mierzono wykorzystując termiczne zmiany napięcia polaryzacji złącza p-n diody spolaryzowanej przewodząco [7]. Diode włączono w mostek rezystancyjny, który zasilano napięciem stabilizowanym (układ LM336), a napięcie wyjściowe doprowadzono bez wzmacniania do 12 bitowego przetwornika A/C (ICL 1209). Osiągnięto w ten sposób rozdzielczość pomiaru 0.015°C, przy szacowanej dokładności pomiaru zmian temperatury lepszej niż 0.1°C.



Rys. 8. Stabilność generacji dla czujnika referencyjnego f_r i pomiarowego f_p od momentu włączenia zasilania, przy niewielkich zmianach temperatury otoczenia T

11. Zestawienie składowych niepewności standardowej

Poniżej w formie tabeli (Tab. 1) podano zidentyfikowane źródła niepewności pomiaru czułości czujnika i ich wartości. Wśród nich tylko niepewność pomiaru śrubą mikrometryczną i niestabilność generatora są sensu stricto zdarzeniami losowymi, do których nie można stosować żadnych poprawek. Do pozostałych składowych w zasadzie należy wykonać odpowiednie poprawki mierzając temperaturę otoczenia lub obliczając ugięcie ramy i kulki śruby, a wtedy niepewność zmniejszyła by się do niepewności pomiaru temperatury i wyliczenia ugięcia. Nie zrobiono tego z dwóch powodów. Po pierwsze nawet bez poprawek wartość błędu tych pozostałych składników jest nieznacząco mała. Po drugie pomiar temperatury powietrza w otoczeniu stanowiska nie daje pewności co do temperatury częstotściomierza i generatora a szczególnie czujnika na skutek dużych zawirowań spowodowanych ruchami operatora, co skłoniło do potraktowania tych zmian jako przypadkowe.

Tab. 1. Składowe niepewności standardowej dla 3 mm odkształceniu czujnika

Składowa niepewności standardowej	Źródło niepewności	Wartość niepewności standardowej	Niepewność względna u_i
u_{Lp}	indukcyjn. połączeń	0,0023 μ H	$1 \cdot 10^{-3}$
u_{pm}	niepewność wzorca (śruby mikrometr.)	2,5 mm	$0,8 \cdot 10^{-3}$
u_{α}	niepewność kąta mocowania	0,035 rad	$0,1 \cdot 10^{-3}$
u_{Tf}	zmiany temperat. generatora i czujnika	0,5°C	$0,13 \cdot 10^{-3}$
u_k	ugięcie styku kulki mikromierza z popychaczem	0,02 μ m/mm	$0,02 \cdot 10^{-3}$
u_{fG}	Niestabilność generatora (rys. 8)	$3 \cdot 10^{-6}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$
u_{TWfS}	fluktuacje temperat. czujnika	0,5°C	$0,5 \cdot 10^{-6}$
u_R	ugięcie ramy	$2,7 \cdot 10^{-3}$ μ m/mm	$2,7 \cdot 10^{-6}$

Jak widać składniki te można ograniczyć do pierwszych czterech, czyli fluktuacji wartości indukcyjności połączeń, niepewności pomiaru śrubą mikrometryczną i kąta zamocowania czujnika oraz oddziaływania temperatury na generator i czujnik. Wartość niepewności pozostałych jest znacznie mniejsza. Niektóre składowe niepewności są w zasadzie błędami systematycznymi (sztywność układu zawieszenia), lecz ich wartość jest nieistotnie mała lub wprowadzanie poprawek jest problematyczne (wpływ temperatury na generator i czujnik), więc włączono je do bilansu niepewności. Sumując ich wartość geometrycznie otrzymamy całkowitą względną niepewność:

$$u_c = \sqrt{(u_{Lp})^2 + (u_{pm})^2 + (u_{\alpha})^2 + (u_{Tf})^2} = 10^{-3} \sqrt{1^2 + 0,8^2 + 0,1^2 + 0,13^2} = 1,3 \cdot 10^{-3} \quad (22)$$

Koresponduje to z niepewnością standardową towarzyszącą serii pomiarów charakterystyki czujnika wynoszącą około $3,7 \cdot 10^{-3}$. Wyliczona wartość niepewności jest prawie trzykrotnie mniejsza od rzeczywistości (0,47%), najprawdopodobniej z powodu niedoszacowania zmiennej wartości indukcyjności połączeń. Potwierdza to duży wzrost odchylenia standardowego z 0,02% do 0,47% dla charakterystyk czujnika niedemontowanego i demontowanego podczas wzorcowania.

12. Podsumowanie

Wykonany przyrząd do wzorcowania czujników indukcyjnych należy uznać za udany. Jest niewielki i łatwy w użyciu a koszt jego wytworzenia znikomy, gdyż powstał z podzespołów będących na wyposażeniu Pracowni. Użycie śruby mikrometrycznej jako wzorca może być akceptowane, gdyż rachunek niepewności pomiaru wykazuje, że dominującym czynnikiem niepewności jest niestabilne położenie przewodów łączących czujnik z generatorem. Niepewność związaną ze śrubą mikrometryczną można ograniczyć wzorcując ją wstępnie, np. na płytkach Johanssona. Uzyskano niepewność rozszerzoną wzorcowania na poziomie około $U_p = 0,8\%$ ($k = 2$, $n = 14$). Można ją uznać za zadawalającą, biorąc pod uwagę fakt, że czujnik projektowano do zastosowań specjalistycznych, w warunkach wysokiego ciśnienia, w których użycie innych przyrządów pomiarowych jest problematyczne lub niemożliwe.

Praca została wykonana w roku 2013 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- [1] Nurkowski J.: *Indukcyjny przetwornik odkształcenia w układzie różnicowym*. Krajowy kongres Metrologii, Gdańsk 1998, s. 223-230.
- [2] Chwaleba A., Poniński M., Siedlecki A.: *Metrologia elektryczna*. WNT W-wa 1994, s. 53.
- [3] Nurkowski J.: *Skompensowany termicznie, bezrzedzeniowy indukcyjny czujnik przemieszczenia w równoległym układzie mechanicznym*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, vol. 9, nr 1-4 (2007) s. 123-136.

- [4] Ulusay R., Hudson J., A., (eds.): *Suggested Methods for Determining the Strength of Rock Materials in Triaxial Compression: Revised Version*. In: "The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006", Kozan Ofset Matbaacilik San. Ve Tic. Sti., Ankara, Turkey, 2007, p. 157-164,
- [5] *Wyrażanie niepewności pomiaru*. Przewodnik Główny Urząd Miar 1999.
- [6] Jakubiec W., Malinowski J.: *Metrologia wielkości geometrycznych* WNT, W-Wa 2007.
- [7] Rząsa M., Kiczma B.: *Elektryczne i elektroniczne czujniki temperatury* WKŁ W-wa 2005, s. 58-62.

The instrument for calibration of inductive strain sensor, results and the uncertainty of the calibration process

Abstract

The paper presents a simple, mechanical instrument designed by author especially for calibration of coreless inductive strain sensor. This sensor, which is attached to a specimen of a tested material, works as an inductive part of a resonant circuit of LC oscillator. Change in the length of the sensor results in a change of vibration frequency of the LC oscillator. This frequency is registered and used for calculation of deformation of the specimen. For the deformation calculation it is necessary to know the characteristic of the sensor understood as a relationship between its length and oscillator frequency (sensitivity).

An inductive sensor is routinely used to measure the compressibility of rock samples in a high pressure chamber of the GTA-10 apparatus. For better reduction of measurement errors the sensor is used in the, so called, reference system with second identical sensor working as a reference sensor. It reduces the sensor calibration errors during the compressibility measurements. In case of experiments different from compressibility test (conventional triaxial test, uniaxial compression test in the INSTRON strength device) the calibration errors causes directly the measurement errors .

The calibrating instrument described below was designed and made on the basis of a micrometer screw. The paper presents some results of the calibration procedure executed by means of the instrument as well as some results of calculations of uncertainty of calibration procedure. In the uncertainty calculations the following parameters were taken into account: errors caused by sensor fixing, stiffness of the measuring system, deviation of the pattern (micrometer) and widely considered stability of the LC oscillator.

The calibration uncertainty of the sensor was about 0,5%. This result may be regarded as satisfactory if it is taken into account that the sensor was designed for strain measurements under high hydrostatic pressure of hundreds of MPa. In such very special conditions use of any other measuring devices is difficult or even impossible. As a possible reason of relative high uncertainty of a sensor two factors should be taken into account: a sensor mounting misalignment and some variations of inductance of connection between the sensor and the oscillator.

Keywords: inductive sensor of deformation, error measurement, sensor characteristic, calibration of sensor, calibration device