

Zmodyfikowany indukcyjny czujnik przemieszczenia w pomiarze ruchu tłoka prasy GTA-10

JANUSZ NURKOWSKI

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

Streszczenie

W artykule zaprezentowano indukcyjny czujnik do pomiaru zmian długości wyposażony w nieruchomy rdzeń ferrytowy. Czujnik jest liniową cewką indukcyjną włączoną w obwód generatora *LC*. Pomiar zmian długości wynika z pomiaru zmian częstotliwości spowodowanej zmianą indukcyjności cewki odkształcanej osiowo wraz z mierzonym obiektem. Zakres pomiarowy dotyczy zmiany długości cewki poza rdzeniem, czyli w trakcie pomiaru cewka jest dłuższa niż rdzeń. Indukcyjność takiej cewki zmienia się przez zwiększenie jej długości oraz, ze względu na to, że rdzeń przestaje oddziaływać na pole magnetyczne zwojów cewki znajdujących się poza nim. Ta dodatkowa zmiana indukcyjności spowodowana malejącym wpływem rdzenia powoduje, że w porównaniu z podobnym urządzeniem, ale bez rdzenia, gdzie zmiana indukcyjności wywołana jest tylko jej zmianą długości, kilkakrotnie maleje nieliniowość charakterystyki *długość-częstotliwość* i dodatkowo kilkakrotnie wzrasta czułość przetwornika do rzędu ułamka mikrometra. Zarazem po umieszczeniu rdzenia kilkakrotnie wzrasta indukcyjność czujnika, co z kolei umożliwia zwiększenie pojemności obwodu rezonansowego, co w sumie wydatnie zwiększa stabilność oscylacji przetwornika. Urządzenie zastosowano do pomiaru ruchu tłoka prasy GTA-10.

Słowa kluczowe: pomiar przemieszczenia, czujnik przemieszczenia, oscylator LC

1. Wstęp

Jednym z testów wytrzymałościowych wykonywanych w Pracowni Odształceń Skał jest wykonywany w komorze ciśnieniowej urządzenia GTA-10 test konwencjonalnego trójosiowego ściskania (por. Kovári i in., 1983), podczas którego oznacza się w sposób ciągły naprężenia w próbce oraz jej odkształcenia. Podczas testu próbka jest zgniatana tłokiem prasy połączonym z siłownikiem hydraulicznym, a pomiar ciśnienia cieczy w siłowniku jest podstawą do wyliczenia naprężenia w próbce. Pomiar odkształcenia jest realizowany przez pomiar ruchu tłoka, wykorzystując dźwignię przymocowaną prostopadle do tłoka i wyprowadzoną poza osłonę urządzenia, tak by możliwe było sprzęgnięcie jej z urządzeniem pomiarowym. Pomiar ten wiąże się z koniecznością uzyskania dużej rozdzielczości rzędu kilku mikronów, a zarazem zakres mierzonych przemieszczeń powinien sięgać kilku centymetrów.

Tak duże zmiany pozycji tłoka wynikają z różnej długości badanych próbek i użytych kowadeł a także konieczności przetłaczania wzmacniacza hydraulicznego służącego do wywoływania ciśnień okólnych. Podczas obciążania próbki, nierzadko zniszczenie skały następuje dla odkształceń tylko kilku promił, co dla kilkucentymetrowych próbek odpowiada przemieszczeniom tłoka rzędu kilkudziesięciu mikrometrów.

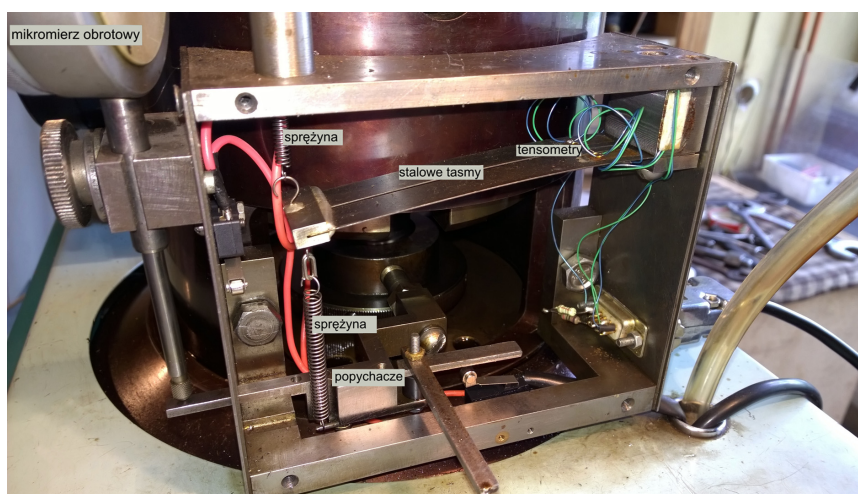
Problem pojawił się również podczas wyliczania prędkości ruchu tłoka na podstawie zróżniczkowania po czasie zmierzonych przemieszczenia. Różniczkowanie wzmacniało chwilowe fluktuacje wskazań czujnika przemieszczenia, co w konsekwencji dla dotychczas stosowanego czujnika potencjometrycznego dawało wartość rozrzutu wyznaczonej prędkości około dwudziestu mikrometrów na sekundę, podczas gdy przeważnie próbka obciążana jest z prędkością około 5 $\mu\text{m/s}$. Pomiar prędkości przemieszczania tłoka konieczny jest do jej stabilizowania. Pomiar, a najlepiej stabilizacja prędkości jest pożądana ze względu na zależność siły tarcia uszczelki siłownika hydraulicznego prasy od prędkości przemieszczania tłoka. Ponieważ naprężenie w próbce wyliczane jest z pomiaru ciśnienia pod tłokiem siłownika hydraulicznego, więc naprężenie to jest

rezultatem sumy siły działającej na próbkę i siły tarcia uszczelek. Poprawki na siłę tarcia możliwe są tylko na podstawie znajomości prędkości ruchu tłoka. Poprawki te są bezwzględnie konieczne w wyznaczaniu wytrzymałości skał o jej małej wartości (mułowce), bowiem w takim przypadku obie siły są porównywalne.

Problemy związane ze stosowaniem dotychczasowych czujników zmusiły do skonstruowania nowego czujnika, łączącego duży zakres mierzonych przemieszczeń z wystarczającą rozdzielczością umożliwiającą zarówno zadawałający pomiar przemieszczenia tłoka jak i jego prędkości. Czujnik taki wykonano modyfikując indukcyjny, bezrdzeniowy czujnik przemieszczenia wykorzystywany do bezpośredniego pomiaru odkształcenia próbek skał w komorze ciśnieniowej (Nurkowski, 2007). Modyfikacja polegała na umieszczeniu rdzenia ferrytowego wewnątrz liniowej cewki. Uzyskano dzięki temu niemal liniową charakterystykę czujnika, zwiększenie jego czułości i zwiększenie stabilności pracy oscylatora LC, z którym współpracuje. Okazał się on zdecydowanie lepszy od poprzednio stosowanych. Poniżej omówiono konstrukcję tego czujnika i efekty jego pracy.

2. Czujniki pomiaru ruchu tłoka stosowane dotychczas w urządzeniu GTA-10

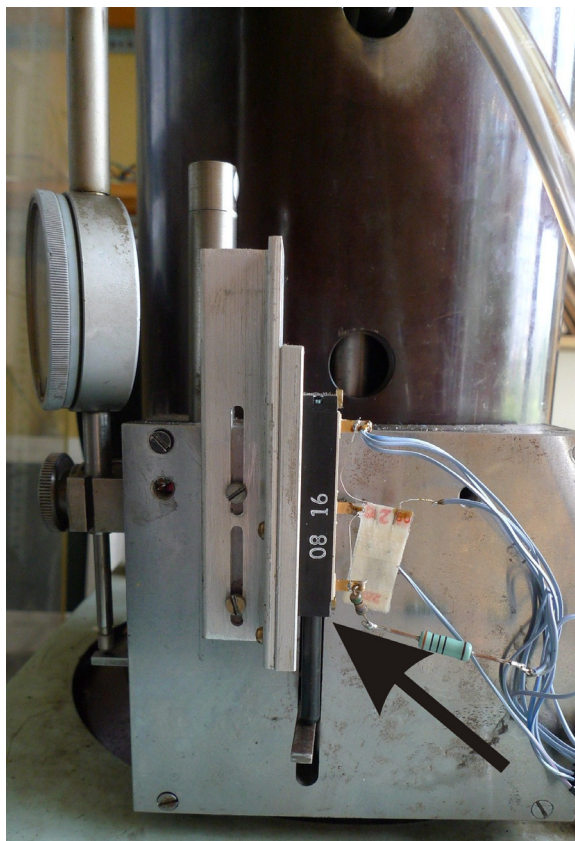
Najstarszym czujnikiem był mechaniczny mikromierz obrotowy (por. Długosz i in., 1981a, 1981b), którego wskazania notowane były ręcznie. Następnie w Pracowni wykonano tensometryczny (elektrorezystancyjny) czujnik z przetwornikiem A/C i rejestratorem danych (Kanciruk, 2009, s. 28-43). Mostek tensometryczny naklejony był na stalową sprężystą taśmę, która odkształcana była dźwignią tłoka (popychaczem) poprzez dodatkowy układ sprężyn (rys. 1). Taśma i sprężyny tworzyły podwójny układ reduktora odkształceń, sprzęgnięty z popychaczem na stałe. W ten sposób zredukowano kilkucentymetrowe przemieszczenie tłoka do maksymalnego dopuszczalnego zakresu pomiarowego tensometru wynoszącego kilka mikronów. Tak znaczna redukcja odkształceń powodowała, że możliwe były tylko szacunkowe pomiary położenia tłoka, ze względu na małą czułość czujnika.



Rys. 1. Tensometryczny przetwornik przemieszczenia tłoka prasy. Tensometry naklejone z prawej strony stalowych taśm, tworzących ze sprężynami dolną i górną (po lewej) reduktor odkształceń

Wykonano zatem podobny czujnik, który nie był na stałe sprzężony z dźwignią tłoka, ale możliwe było jego wstępne przesuwanie, umożliwiając dostosowanie jego początkowej pozycji do zmiennej długości próbek. W ten sposób zakres mierzonych przemieszczeń tłoka ograniczono z kilku centymetrów do kilku milimetrów, co pozwoliło podnieść czułość czujnika mniej więcej dziesięciokrotnie. Nadal jednak czułość ta nie była zadawalająca w przypadku odkształceń próbek mniejszych niż 1% i do pomiaru prędkości tłoka. Ponadto w tej wersji czujnika pojawiały się dodatkowe zakłócenia będące skutkiem występowania tarcia w układzie prowadzenia trzpienia atakującego sprężyny z naklejonymi tensometrami.

Kolejnym rozwiązaniem, które okazało się nieco lepsze, był czujnik potencjometryczny. Jego czułość była trochę większa od poprzedniego. Zasadą działania było przemieszczanie ślizgacza po liniowej ścieżce rezystancyjnej, a więc był to układ definitywnie tarciový (Nowakowski i in., 2011).



Rys. 2. Czujnik potencjometryczny zamocowany przesuwnie, sprzęgnięty z popychaczem (u dołu)

Występowanie tarcia nie było nadmiernie dokuczliwe w pomiarze przemieszczenia, gdyż punkty pomiarowe układały się w okół w miarę gładkiej krzywej, lecz dawały duży rozrzut wyznaczanej prędkości.

2. Zasada działania i charakterystyka czujnika indukcyjnego z rdzeniem

Indukcyjny, bezrdzeniowy czujnik używany jest od lat w Pracowni przede wszystkim w pomiarach małych zmian długości próbki podczas wyznaczania ściśliwości skał (poniżej 1%), w komorze ciśnieniowej (do 400 MPa). Czujnik w postaci jednowarstwowej i liniowej cewki indukcyjnej jest mechanicznie połączony bezpośrednio z próbką. Stanowi on indukcyjną część obwodu rezonansowego oscylatora LC. Zmiana długości próbki przekłada się na zmianę długości cewki, a więc jej indukcyjności, co wpływa na częstotliwość drgań oscylatora. Cewka wraz z oscylatorem tworzy przetwornik długość-częstotliwość. Ponieważ częstotliwość ta jest proporcjonalna do pierwiastka z długości cewki charakterystyka przetwornika jest nieliniowa. Pomijając rezystancję strat można to przedstawić następująco:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_R L_R}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_R}} \frac{1}{\sqrt{L_s + L_p}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_R}} \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu z^2 S}{l_s} + L_p}} \quad (1)$$

$$\text{dla } L_p = 0 \quad f = \frac{\sqrt{l_s}}{2\pi\sqrt{C_R \mu z^2 S}} = \frac{\sqrt{l_s}}{\pi z D \sqrt{\pi \mu C_R}} = k \sqrt{l_s}$$

gdzie:

- f – częstotliwość oscylacji.
- L_R, C_R – całkowita indukcyjność i pojemność obwodu rezonansowego,
- L_s – indukcyjność czujnika,
- L_p – pasożytnicza indukcyjność połączeń czujnika z obwodem rezonansowym,
- l_s – długość czujnika,
- μ – przenikalność magnetyczna,
- z – ilość zwojów czujnika,
- S – pole przekroju cewki (czujnika),
- D – średnica cewki (czujnika).

Dla małych odkształceń nieliniowość ta nie była zbyt istotna. Zasadniczym problemem była mała indukcyjność czujnika (kilka mikrohenrów) i zależność jej od temperatury. Indukcyjność takiego czujnika jest ograniczona stosunkowo niewielką ilością zwojów cewki, limitowaną przez długość próbki, na której jest zamocowany, a gęstość uzwojenia nie może być zbyt duża, by zwoje nie stykały się ze sobą. Negatywną konsekwencją małej indukcyjności czujnika jest konieczność stosowania niewielkiej pojemności obwodu rezonansowego, aby zapewnić wystarczająco dużą dobroć tegoż obwodu $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$ do uzyskania stabilnych

oscylacji (R to rezystancja strat obwodu rezonansowego, głównie rezystancja cewki). Mała indukcyjność czujnika i pojemności obwodu rezonansowego skutkuje znaczącym wpływem zmian pasożytniczych indukcyjności i pojemności połączeń czujnika z oscylatorem, na jego częstotliwość drgań. Zmiany te spowodowane są głównie oddziaływaniem zmian ciśnienia cieczy w komorze, w której zanurzona jest badana próbka i w konsekwencji zmian jej temperatury. Ponadto indukcyjność połączeń, których wartość może stanowić kilkanaście a nawet kilkadziesiąt procent indukcyjności czujnika, zmniejsza czułość czujnika. Biorąc pod uwagę względne zmiany częstotliwości to z równania (1) można otrzymać, że czułość względna czujnika s_R określona będzie wzorem:

$$s_R = \frac{df}{dl_s} \cdot \frac{1}{f} = \frac{1}{2l_s \left(1 + \frac{L_p}{L_s}\right)} \quad \text{dla } L_p = 0 \quad s_R = \frac{1}{2l_s} \quad (2)$$

Ciśnienie zmienia pojemność przepustów elektrycznych w ścianie komory a temperatura indukcyjność czujnika. Zadawalającą kompensację wpływu ciśnienia i temperatury na wskazania czujnika osiągnięto stosując czujnik referencyjny, tak samo wykonany jak pomiarowy i zamocowany na materiale o znanych właściwościach mechanicznych i termicznych. Czujnik referencyjny pozwalał również na praktyczną eliminację wpływu napięcia zasilania i temperatury otoczenia na oscylator (Nurkowski, 2008).

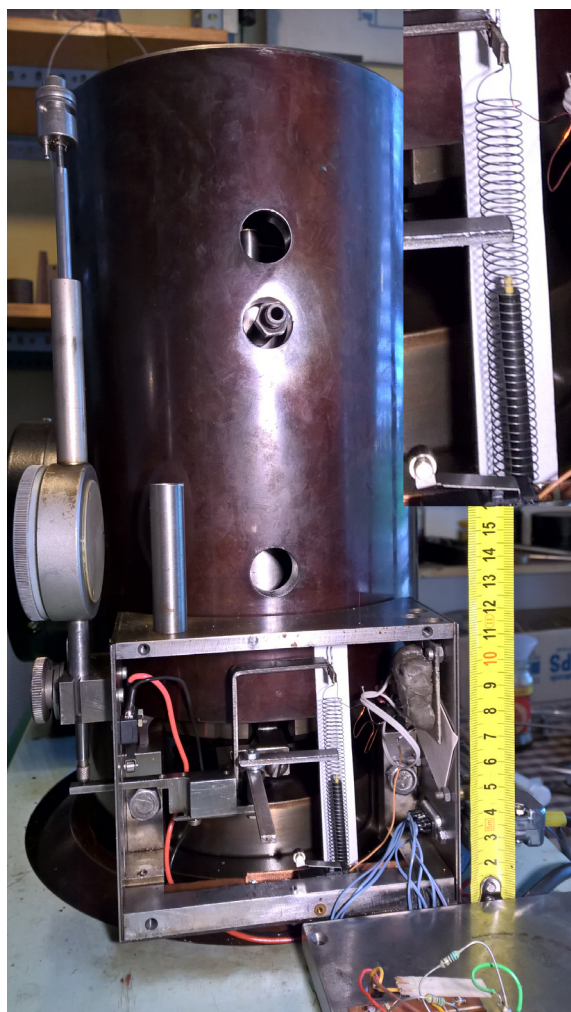
Wprowadzenie rdzenia ferrytowego do środka cewki-czujnika spowodowałoby pożądane zwiększenie jego indukcyjności, a zatem i możliwość zwiększenia pojemności obwodu rezonansowego poprawiając stabilność pracy oscylatora. Podczas pomiaru odkształcenia wewnątrz komory względy praktyczne powodują rezygnację z tego sposobu. Cewka musi mieć małą, około 3 mm średnicę, aby próbka z zamocowanym na

niej czujnikiem zmieściła się w niewielkiej komorze ciśnieniowej, więc cienki rdzeń musiał by być bardzo precyzyjnie wprowadzony i zamocowany w cewce, by nie tarł o zwoje cewki. Procedura ta musiała by być powtarzana w każdym eksperymencie.

Czujnik indukcyjny z rdzeniem można jednak z powodzeniem zastosować do pomiaru przemieszczania tłoka. Pomiar dokonywany jest na zewnątrz komory ciśnieniowej, więc nie występują zmiany ciśnienia, a zmiany temperatury są ograniczone do zmian temperatury otoczenia i tak samo wpływają na czujnik i oscylator. Czujnik może mieć większą średnicę, ułatwiając umieszczenie rdzenia w środku i jest mocowany jednorazowo między popychaczem tłoka a korpusem urządzenia.

Umieszczenie czujnika wraz z oscylatorem w metalowej obudowie zabezpiecza go przed oddziaływaniem zakłócających zewnętrznych pól elektrycznych i częściowo magnetycznych, a także przed zmianami pojemności rozproszonych oscylatora i czujnika.

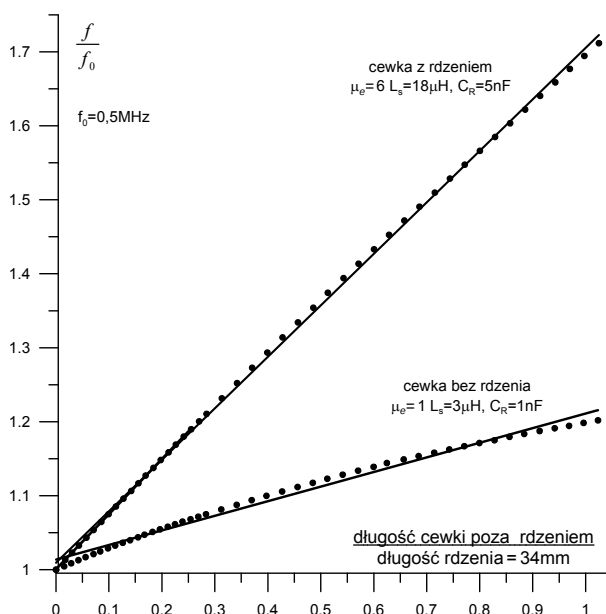
Fotografia na rys. 3 przedstawia osłonę komory ciśnieniowej urządzenia GTA-10, w jej dolnej części, w metalowej obudowie (ze zdjętą pokrywą) zamontowano cewkę czujnika indukcyjnego z rdzeniem ferrytowym w środku. Cewka zamocowana jest od dołu do korpusu osłony, a od góry do jednej z dźwigni popychacza sprzęgniętego tłokiem. Powiększenie cewki z rdzeniem zamieszczono na górze po prawej stronie fotografii. Pozostałe popychacze przekazują ruch tłoka na zegarowy mikromierz mechaniczny (po lewej), czujnik potencjometryczny (niewidoczny na zdjęciu) i wyłączniki krańcowe silnika pompy. Białe



Rys. 3. Czujnik zamocowany na urządzeniu GTA-10 (na tle białego paska), u góry jego powiększenie

pasek z tyłu czujnika indukcyjnego umieszczono chwilowo dla lepszego uwidocznienia czujnika. Oscylator połączony z czujnikiem znajduje się kilka centymetrów po prawej stronie od niego, w tej samej obudowie.

Rdzeń ferrytowy, oprócz zwiększenia indukcyjności powoduje zwiększenie czułości czujnika, gdyż zmiany jego indukcyjności wynikają nie tylko ze zmian jego długości, ale też z przemieszczania się zwojów względem rdzenia. Dodatkowo uzyskuje się wtedy zmniejszenie nieliniowości charakterystyki przetwornika. Koniecznym do tego jest, aby zakres pracy czujnika spełniał warunek, że długość cewki jest większa od rdzenia. W praktyce, w zakresie początkowym tylko nieznaczna część zwojów cewki jest poza rdzeniem, a w końcowym zakresie nawet połowa zwojów jest poza nim, czyli długość cewki może być dwukrotnie większa niż rdzenia. W miarę rozciągania cewki coraz większa ilość jej zwojów znajduje się poza oddziaływaniem rdzenia, co powoduje dodatkowy, poza zwiększaniem jej długości, spadek indukcyjności. W efekcie charakterystyka przetwornika zamiast pierwiastkowej jest niemal liniowa. Charakterystykę taką, dla rdzenia o efektywnej przenikalności magnetycznej $\mu_e = 6$, przedstawiono na rys. 4. Przy podwojeniu długości cewki nieliniowość z 4% dla cewki bez rdzenia spada do 0.8%, dla cewki z rdzeniem. Jeśli maksymalne odkształcenie czujnika ograniczyć do 20%, to nieliniowość charakterystyki wyniesie tylko 0,1%. Nadmierne wydłużenie cewki poza rdzeń nie jest korzystne, gdyż jej indukcyjność maleje do tego stopnia, że znacząco maleje dobroć obwodu rezonansowego. W konsekwencji spada amplituda oscylacji, więc wzrasta wpływ zakłóceń na sygnał wyjściowy, a także powodując zmniejszenie stabilności pracy obwodu rezonansowego na skutek spłaszczenia jego charakterystyki fazowej w otoczeniu częstotliwości rezonansowej. Z tych powodów najlepszą stabilność przetwornik ma dla małego rozciągnięcia cewki, czyli minimum zakresu pomiarowego. Magnetowód prezentowanego prototypowego czujnika, dla uproszczenia konstrukcji, ograniczono do rdzenia umieszczonego wewnątrz cewki. W przypadku zamkniętego magnetowidu od nieruchomej strony cewki, obejmującego cewkę również na zewnątrz, stabilność oscylatora i liniowość przetwornika była by jeszcze lepsza. Ideę czujnika zgłoszono do Urzędu Patentowego RP (Nurkowski, 2015).

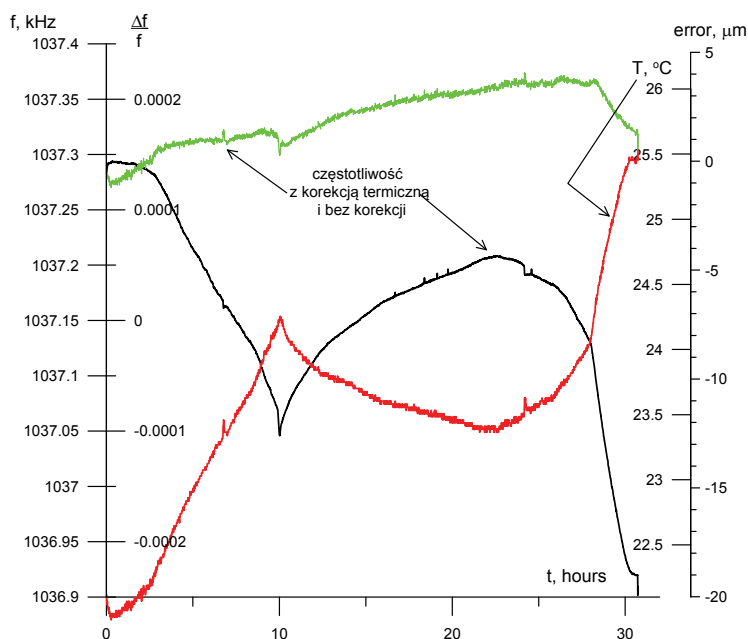


Rys. 4. Charakterystyka przetwornika z czujnikiem bez i z rdzeniem ferrytowym o przenikalności $\mu_e = 6$

3. Wpływ temperatury na wskazania przetwornika

Wpływ ten wynika głównie z rozszerzalności termicznej drutu, z którego wykonano cewkę, co zmienia jej indukcyjność oraz termicznych zmian wartości pojemności elementów oscylatora (tranzystor, kondensatory) (Nurkowski, 2011). Destabilizujący wpływ obu tych czynników można ograniczyć włączając w obwód rezonansowy kondensator o odpowiednio dobranej pojemności i termicznym współczynnikiem pojemności oraz bezwładności cieplnej. Kompensację taką ułatwia fakt, że czujnik i oscylator znajdują się w tym samym środowisku o praktycznie identycznej temperaturze. (W przeciwieństwie do pomiarów w komorze ciśnieniowej, gdzie czujnik jest w jej wnętrzu, a oscylator na zewnątrz). Efekty takiej kompensacji

termicznej przedstawia rys. 5. Pokazano na nim zmiany częstotliwości (bezwzględna i względna – lewa oś pionowa) wywołane zmianą temperatury otoczenia i odpowiadający temu błąd pomiaru odkształceń (prawa oś pionowa). Rejestrację wskazań przyrządów prowadzono przez 30 godzin, podczas których temperatura pomieszczenia zmieniała się od 22°C do 25,5°C. Powodowało to względne zmiany częstotliwości około $4 \cdot 10^{-4}$ w przypadku braku kompensacji termicznej, co odpowiadało błędowi pomiaru przemieszczenia 20 μm . Po wykonaniu kompensacji odpowiednim kondensatorem zmiany częstotliwości zmalały pięciokrotnie, poniżej $1 \cdot 10^{-4}$, a błędy do kilku mikrometrów w czasie 30 godzin obserwacji. Efektywność takiej kompensacji jest ograniczona różną bezwładnością termiczną: kondensatora kompensującego, czujnika i elementów oscylatora (pozostałe kondensatory, głównie w obwodzie rezonansowym i tranzystor). Analizując rys. 5, można wnioskować, że graniczną prędkością zmian temperatury dla skutecznej kompensacji jest w tym przypadku około 1°C/h.



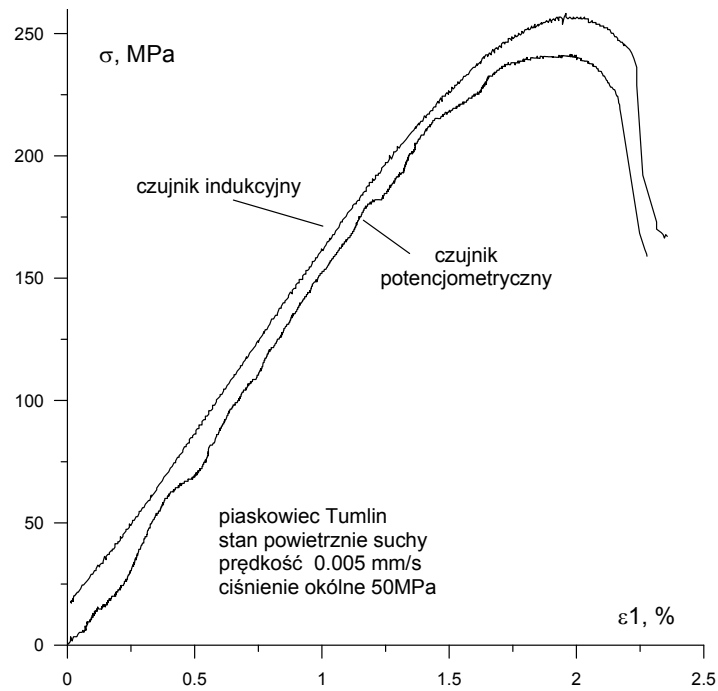
Rys. 5. Zmiany częstotliwości przetwornika skompensowanego i nieskompensowanego termicznie pod wpływem zmian temperatury otoczenia oraz błąd pomiaru z tym związany

Jeśli czas trwania pomiaru jest krótszy od godziny, jak w przypadku badania wytrzymałości skał w urządzeniu GTA-10, to zmiany temperatury ograniczone będą, z dużym prawdopodobieństwem, do ułamka stopnia, a wtedy błędy pomiaru ze względu na niestabilność oscylacji będą mniejsze od mikrona. W konsekwencji dla próbek skał o typowej wielkości 44 mm względny błąd pomiaru odkształcenia będzie około $2 \cdot 10^{-5}$. W razie konieczności większą stabilność czasową i temperaturową może zapewnić zastosowanie czujnika referencyjnego. Błąd tej wartości jest porównywalny z rozszerzalnością cieplną metali (stal $1,2 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$).

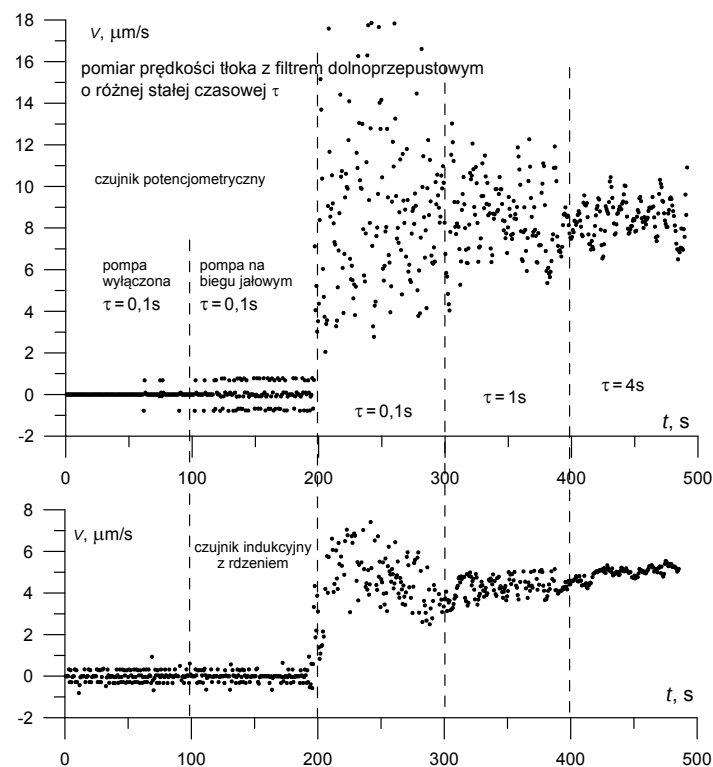
3. Efekty pracy czujnika z rdzeniem

Sprawdzenie przydatności nowego czujnika wykonano przeprowadzając eksperyment obciążania próbki piaskowca, podczas którego pomiar odkształcenia wykonywany był dotychczasowym czujnikiem potencjometrycznym i czujnikiem indukcyjnym z rdzeniem, efekty widoczne są na rys. 6.

Widać wyraźnie, że krzywa naprężenie-odkształcenie otrzymana z czujnika indukcyjnego jest niemal idealnie gładka, w porównaniu do czujnika potencjometrycznego. Krzywe uzyskiwane dotychczas z czujnika potencjometrycznego były trudne do interpretacji, gdyż nie wiadomo było, z całą pewnością, czy zafalowania są faktycznym wynikiem własności skały, zmiennym tarcim uszczelki tłoka prasy hydraulicznej, czy też po prostu niestabilnymi wskazaniami czujnika potencjometrycznego. Po konfrontacji ze wskazaniami z czujnikiem indukcyjnym bez wątplenia przyczyną był czujnik potencjometryczny.



Rys. 6. Krzywa odkształcenie-napięcie próbki piaskowca uzyskana czujnikiem indukcyjnym i potencjometrycznym



Rys. 7. Prędkość ruchu tłoka na podstawie pomiaru przemieszczenia czujnikiem potencjometrycznym (u góry) i indukcyjnym (u dołu) z użyciem filtra dolnoprzepustowego o różnej stałej czasowej τ

Innym testem był pomiar prędkości ruchu tłoka dotychczasowym czujnikiem potencjometrycznym i czujnikiem indukcyjnym z rdzeniem. Jak już wspomniano prędkość ta jest wyliczana przez różniczkowanie zmierzonego przemieszczenia po czasie, a to wzmacnia szumy i niestabilności wskazań czujnika przemieszczenia. Aby przeciwdziałać temu, pomiary przemieszczenia są uśredniane, np. filtrem dolnoprzepustowym o stałej czasowej odpowiednio dobranej do bezwładności maszyny hydraulicznej, tak aby uzyskać skuteczną stabilizację prędkości ruchu tłoka. Na rys. 7 pokazano efekty takich pomiarów dla stałej czasowej filtra

dolnoprzepustowego $\tau = 0,1$ s oraz 1 s i 4 s w przypadku czujnika potencjometrycznego i indukcyjnego. Przez pierwsze 100 s tłok pozostawał nieruchomy, przy wyłączonym silniku pompy, aby sprawdzić stabilność wskazań czujników, a przez następne 100 s silnik był uruchomiony, także przy nieruchomym tłoku, aby sprawdzić wpływ drgań maszyny na wskazania. Następnie tłok przemieszczał się z prędkością około $7 \mu\text{m/s}$ przez 100 sekundowe interwały, kolejno z filtrem 0,1 s oraz 1 s i 4 s. Także w tym przypadku czujnik indukcyjny okazał się lepszy od potencjometrycznego, bowiem prędkości rejestrowane były z większą rozdzielczością i mniejszymi rozrzutami. W przypadku czujnika potencjometrycznego wskazania względnie stabilne były tylko dla stałej czasowej filtra 4 s, ale wtedy reakcja automatyki stabilizującej ruch tłoka była stanowczo za wolna.

4. Krótki przegląd stanu techniki w odniesieniu do przedstawionej problematyki

W niniejszym opracowaniu wyniki osiągnięte przy użyciu indukcyjnego czujnika odniesiono do czujnika potencjometrycznego. Jest on chyba najpowszechniej używanym czujnikiem w takich okolicznościach, jest tani i łatwo dostępny, o w miarę dobrej rozdzielczości, a ponadto można go było podłączyć do istniejącej aparatury rejestrującej bez większych przeróbek.

Poniżej zamieszczono jednak, dla porównania, dane czujników działających w oparciu o różne zjawiska fizyczne, potencjalnie przydatnych, podając ich maksymalny zakres pomiarowy i rozdzielczość. Dane te są w pełni aktualne i pochodzą z ofert zamieszczonych w internecie.

1. Indukcyjne

- prądy wirowe, np. eddyNCDT 3300 firmy Micro-Epsilon Messtechnik; zakres 80 mm, rozdzielczość 0,005 % ($4 \mu\text{m}$) i nieliniowość 0,2% FS
- transformator liniowy z ruchomym rdzeniem (LVDT), np. *Honeywell* SPS-L075-HALS: zakres 75 mm, rozdzielczość $50 \mu\text{m}$ i nieliniowość 0,4%. Miniaturowy czujnik firmy *MTC* typ1901: zakres 8 mm, rozdzielczość $10 \mu\text{m}$ (brak danych o nieliniowości). Miniaturowe czujniki firmy *Singer Instruments*: zakres od 2 do 10 mm, nieliniowość 2% (brak danych o rozdzielczości).

2. Magnetostrykcyjne (położenie magnesu względem nadajnika), np. MDS-45 firmy Micro-Epsilon Messtechnik: zakres 45 mm, rozdzielczość 0,05 % ($22 \mu\text{m}$) i nieliniowość 3% FS

3. Pojemnościowe np. capaNCDT 6500 firmy Micro-Epsilon Messtechnik; zakres 10 mm, rozdzielczość 0,0006 % (60 nm) i nieliniowość 0,05% FS

4. Rezystancyjne – potencjometryczne np. MM10-301 firmy Megatron; zakres od 10 do 80 mm w zależności od typu, rozdzielczość 0,001 mm i nieliniowość 0,05% FS

5. Optoelektroniczne – inkrementalne enkodery liniowe (szklana płytka z naniesioną podziałką z nadajnikiem i odbiornikiem światła (LED)) np. MSL-50: zakres 50 mm, rozdzielczość $10 \mu\text{m}$, nieliniowość nie podana

Wniosek z danych zamieszczonych powyżej taki, że dostępne czujniki do pomiaru zmian położenia mają zbyt małą rozdzielczość dla pomiarów przemieszczenia i prędkości tłoka w urządzeniu GTA-10, w szczególności wtedy, gdy mają działać w zakresie zmian położenia większym niż 10 mm. W najlepszym przypadku rozdzielczość jest wtedy ograniczona do około 10 mikrometrów. Wyjątkiem może być czujnik pojemnościowy o rozdzielczości 60 nm (nanometrów), ale jego głowica pomiarowa ma średnicę aż 60 mm, cała aparatura ma pokaźne rozmiary, a łączny jej koszt to 28 tys zł. Zatem prace zmierzające do zaprojektowania i wykonania opisywanego czujnika indukcyjnego z rdzeniem wydają się w pełni zasadne.

5. Podsumowanie

Przedstawiony powyżej indukcyjny czujnik z rdzeniem okazał się w pełni przydatnym do pomiaru przemieszczenia tłoka prasy i jego prędkości. Jest urządzeniem zdecydowanie lepszym od dotychczas stosowanych w Pracowni. Wydaje się, że takie jego parametry jak rozdzielczość poniżej mikrona, nieliniowość poniżej procenta i wielkość zakresu pomiarowego kilka centymetrów lub więcej, nie ustępują parametrom, a nawet są lepsze od dostępnych czujników produkowanych przez światowe firmy. Czujnik jest prosty i tani w wykonaniu. Aparatura odczytująco-rejestrująca w postaci częstotściomierza powszechnie dostęp-

na, a przetwornik analog-cyfra zbędny. Wprowadzenie rdzenia ferrytowego do wnętrza cewki zwiększyło kilkakrotnie jej indukcyjność, co pozwoliło zwiększyć również pojemność obwodu rezonansowego. Oba te czynniki wraz z kompensacją termiczną obwodu odpowiednim kondensatorem umożliwiły, tak stabilne oscylacje, że zrezygnowano z czujnika referencyjnego, upraszczając konstrukcje urządzenia. Magnetowód prezentowanego prototypowego czujnika, dla uproszczenia konstrukcji, ograniczono do rdzenia umieszczonego wewnątrz cewki. W przypadku zamkniętego magnetowidu od nieruchomej strony cewki, obejmującego cewkę również na zewnątrz, stabilność oscylatora i liniowość przetwornika była by jeszcze lepsza. Ideę czujnika zgłoszono do Urzędu Patentowego.

Praca została wykonana w roku 2015 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- Długosz M., Gustkiewicz J., Wysocki A., 1981a: *Apparatus for investigation of rocks in a triaxial state of stress. Part I. Characteristics of the apparatus and of the investigation method*. Archiwum Górnictwa, t. XXVI, z. 1, s. 17-28.
- Długosz M., Gustkiewicz J., Wysocki A., 1981b: *Apparatus for investigation of rocks in a triaxial state of stress. Part II. Some investigation results concerning certain rocks*. Archiwum Górnictwa, t. XXVI, z. 1, s. 29-41.
- Kovári K., Tisa A., Einstein H.H., Franklin J.A., 1983: *Suggested Methods for Determining the Strength of Rock Materials in Triaxial Compression: Revised Version*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 20, No. 6, p. 283-290.
- Kanciruk A., 2009: *Urządzenia do pomiarów wielkości mechanicznych i temperatury przy użyciu przetworników rezystancyjnych i przykłady ich zastosowania*. Inst. Mech. Górniczo-Geologiczny PAN, Kraków, 165 s. 28-43
- Nowakowski A., Nurkowski J., Lizak Z., 2011: *Wpływ prędkości obciążania na wartości pewnych stałych materiałowych uzyskiwanych w teście konwencjonalnego trójosiowego ściskania*. Prace IMG PAN, T. 13, Nr 1-4, s. 45-60.
- Nurkowski J., 2007: *The coreless inductive sensor for strain measurement of rock samples in a pressure cell – some advantages and disadvantages in relation to the electrical resistance strain gauges*. Arch. Min. Sci., Vol. 52, No 3, p. 311-330.
- Nurkowski J., 2008: *A referential method strain measurements in a high-pressure cell using an inductive coreless sensor*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech., 45:103-110.
- Nurkowski J., 2011: *Termiczne właściwości indukcyjnego, bezrdzeniowego czujnika odkształceń – teoria i praktyka*. Prace IMG PAN, r. s. 69.
- Nurkowski J., 2015: *Sposób i urządzenie do pomiaru zmian długości obiektu za pomocą czujnika indukcyjnego*. Zgłoszenie do Urzędu Patentowego RP nr P-410608.

Modified inductive displacement sensor to measure movement of the press piston in the machine GTA-10

Abstract

Paper describes designed by author inductive sensor to measure length changes using induction coil partially surrounding a fixed ferrite core. The sensor is a linear induction coil connected to the LC oscillator, creating a strain-frequency transducer. During the measurement, coil is longer than the core. If the sensor is stretched its inductance diminishes for two reasons: increase in length and reduction of the impact of the core. This additional change in inductance is caused by decreasing core influence. Such operation principle causes both a few times increase of linearity of the length-frequency characteristic and a few times increase of the sensor sensitivity, to range below micrometer, when compared to a similar device but without a core, where the change in inductance is caused by only the change in length. After placing the core the inductance of the sensor increases several times, which in turn allows to increase the capacity of the resonant circuit, which together significantly increases the stability of oscillation of the transducer.

Keywords: measurement of displacement, displacement sensor, LC oscillator