

Możliwości komutacyjne przełączników tranzystorowych i elektromechanicznych w referencyjnej metodzie pomiaru odkształceń czujnikiem indukcyjnym

JANUSZ NURKOWSKI

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

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki testów użycia przełączników elektromechanicznych jako klucza łączącego na przemian do oscylatora indukcyjne czujniki: pomiarowy i odniesienia w referencyjnej metodzie pomiaru odkształcenia. Szczególnie dotyczy to pomiarów odkształceń skał w komorze ciśnieniowej. Testy te wykazały, że stosowanie przełączników zamiast tranzystorów jest w pełni możliwe. Ich rezystancja w stanie włączenia i pojemność w stanie wyłączenia są kilkadziesiąt razy mniejsze niż tranzystorów. Wprawdzie szybkość przełączania przełączników jest nieporównanie mniejsza (milisekundy), ale wystarczająca, aby pomiary wykonywać z częstotliwością nawet 2 Hz, co jest w pełni zadowalające.

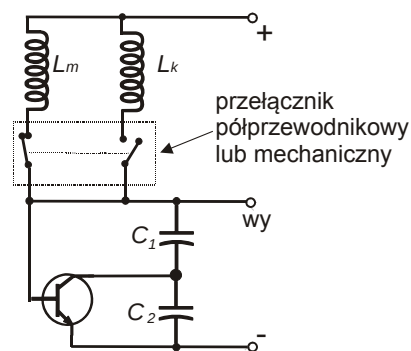
Przedstawiono również wyniki pomiarów charakterystyk wyjściowych niektórych bipolarnych tranzystorów małej i średniej mocy, w celu znalezienia typu o jak najmniejszej rezystancji w stanie włączenia, tak, aby można go było zastosować do przełączania czujników.

Słowa kluczowe: indukcyjny czujnik odkształcenia, referencyjny pomiar odkształceń, rezystancja w stanie włączenia przełącznika i tranzystora bipolarnego

1. Wstęp

Pomiar małych odkształceń, rzędu jednego promila, próbek skał w komorze ciśnieniowej aparatu GTA-10 czujnikiem indukcyjnym, w postaci jednowarstwowej bezrdzeniowej cewki, wykonywany jest zazwyczaj w układzie porównawczym. W metodzie tej stosowany jest czujnik referencyjny L_k zamocowany na materiale o znanej ściśliwości i rozszerzalności cieplej, identycznie wykonany jak czujnik pomiarowy L_m . Oba czujniki są naprzemiennie podłączane do tego samego obwodu rezonansowego tranzystorowego oscylatora za pomocą przełącznika (klucza), jak na Rys. 1. Odkształcenie próbki powoduje zmianę długości cewki czujnika, więc i jego indukcyjności, co przestraża obwód rezonansowy. Mierząc i rejestrując częstotliwość drgań uzyskujemy informację o odkształceniu próbki [1]. Pomiar z udziałem czujnika referencyjnego pozwala kilkadziesiąt razy zmniejszyć wpływ ciśnienia (do 400 MPa) i towarzyszące temu zmiany temperatury (kilkanaście, a nawet kilkadziesiąt °C) na czujnik pomiarowy oraz wpływu napięcia zasilania na oscylator [2]. W efekcie błąd pomiaru jest rzędu kilku mikrometrów, przy rozdzielczości kilkuset nanometrów.

Przełącznik czujników powinien mieć możliwie małą rezystancję w stanie włączenia, a w stanie wyłączenia małą pojemność i dużą rezystancję. W szczególności, gdy przełącznik wykonany jest z tranzystorów bipolarnych, ich pasożytnicza pojemność, zwana bocznikującą, może wynosić kilkadziesiąt pF, co w porównaniu z pojemnością obwodu



Rys. 1. Czujnik pomiarowy L_m i kompensacyjny L_k łączony naprzemiennie do oscylatora

rezonansowego w zakresie kilku nF jest wartością znaczącą. Przełączniki mechaniczne (przełączniki) mają wprawdzie mniejszą rezystancję włączenia i mniejszą pojemność w rozłączeniu, ale w porównaniu do przełączników półprzewodnikowych ich trwałość i szybkość działania są nieporównywalnie mniejsze. Ponadto rezystancja włączenia przełączników, chociaż niewielka, może być niestabilna.

Mała rezystancja klucza włączonego umożliwia osiągnięcie większej dobroci obwodu rezonansowego, co poprawia stabilność oscylacji, natomiast mała pojemność klucza wyłączanego zmniejsza przenikanie sygnału z obwodu czujnika pomiarowego do obwodu czujnika referencyjnego. Realizacja tego jest możliwa jeśli zastosować przełączniki elektromechaniczne, stąd ich potencjalna atrakcyjność.

W opracowaniu przedstawiono wyniki pomiaru rezystancji w stanie włączenia tranzystorów bipolarnych małej i średniej mocy oraz tranzystorów bipolarnych przełączających. Pokazano również efekty zastosowania przełączników elektromechanicznych w postaci przełączników miniaturowych.

2. Rezystancja klucza włączonego a dobroć i pojemność obwodu rezonansowego

Problem dotyczy głównie rezystancji klucza w stanie włączenia, która powinna być jak najmniejsza, a ponadto stała w czasie. Rezystancja klucza w stanie wyłączenia jest w omawianej metodzie pomiaru pomijalna, gdyż jest ona wystarczająco duża, tak dla klucza tranzystorowego (dziesiątki MΩ) jak i elektromechanicznego (dziesiątki GΩ).

Do generacji drgań o odpowiedniej amplitudzie i stabilności obwód rezonansowy powinien mieć jak największą dobroć [3], która określona jest wzorem:

$$Q = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{L}{C}} \approx \frac{1}{r_s + r_k} \sqrt{\frac{L_s + L_p}{C_c + C_p}} \approx \frac{1}{r_s + r_k} \sqrt{\frac{1}{C_c + C_p}} \sqrt{\frac{\mu_o z^2 S_s}{l_s} + L_p} \quad (1)$$

gdzie:

- r – suma strat obwodu rezonansowego dla prądu zmiennego (naskórkowość)
- r_s, r_k – rezystancja: czujnika (cewki) i klucza,
- L, L_s, L_p – indukcyjność: całkowita obwodu rezonansowego, czujnika i połączeń,
- C, C_c, C_p – pojemność: całkowita obwodu rezonansowego, kondensatorów i połączeń,
- μ_o – przenikalność magnetyczna próżni,
- z – ilość zwojów czujnika,
- S_s – pole przekroju czujnika,
- l_s – długość czujnika.

Dobroć jednowarstwowej cewki powietrznej o stałej gęstości uzwojenia maleje z pierwiastkiem jej długości (a zatem jej indukcyjności lub ilości zwojów). Po n -krotnym zwiększeniu otrzymamy:

$$\frac{Q_n}{Q_1} \approx \frac{\frac{\sqrt{L_n}}{r_1}}{\frac{\sqrt{L_1}}{r_1}} \approx \frac{1}{\frac{nz\rho}{z\rho} \sqrt{\frac{\eta}{z}}} \approx \frac{1}{\sqrt{n}}, \text{ dla } l_s = z\eta, r_s = z\rho, S, \eta \text{ i } \rho = \text{const oraz } C_p = L_p = 0 \quad (2)$$

gdzie:

- Q_1, Q_n – dobroć obwodu: początkowa i po n -krotnym zwiększeniu długości cewki,
- L_1, L_n – indukcyjność czujnika: początkowa i po n -krotnym zwiększeniu długości cewki
- r_1, r_n – rezystancja czujnika: początkowa i po n -krotnym zwiększeniu długości cewki
- ρ – rezystancja jednego zwoju,
- η – gęstość nawinięcia cewki.

Dla uzyskania większej dobroci cewka nie może być zbyt krótka, bo będzie miała za małą indukcyjność w stosunku do indukcyjności połączeń, co powoduje zmniejszenie czułości czujnika i niestabilność oscylacji. Można zwiększyć dobroć obwodu przez minimalizację rezystancji klucza w stanie włączenia. Umożliwia to zwiększenie pojemności skupionych obwodu (kondensatorów) w stosunku do rozproszonych pojemności połączeń cewki-czujnika z oscylatorem, co zwiększa stabilność oscylacji.

Rezystancja bipolarnych tranzystorowych kluczy, zastosowanych w istniejącym układzie pomiarowym, w stanie włączenia r_k wynosi około 3Ω . Jest to niewiele w porównaniu do czujników ze wysokorezystywnej stali sprężynowej o rezystancji 20Ω do 30Ω , które cechują się dużą rozciągliwością i odpornością na uderzenia mechaniczne, oraz umożliwiają kompensację termiczną czujnika. Zastępując tranzystory kluczem elektromechanicznym (krótko przekaźnikiem) o zaniedbywalnej rezystancji można zwiększyć pojemność jedynie o około 20% ze względu na nieznaczne zwiększenie dobroci obwodu rezonansowego. Znaczne zwiększenie pojemności można uzyskać w przypadku czujnika z drutu manganinowego o rezystancji ponad dwukrotnie mniejszej od czujnika stalowego wynoszącej około 9Ω . Pozwala to na wzrost pojemności prawie 2,5 razy, z 1 nF do $2,5 \text{ nF}$, przy pojemności połączeń około $0,1 \text{ nF}$ (głównie jest to pojemność ciśnieniowych przepustów w ścianie komory [4]).

Uzyskanie mniejszej rezystancji włączonego tranzystora niż 3Ω jest problematyczne, gdyż wymaga forsowania tranzystora dużym prądem bazy. Wykonano pomiary tej rezystancji dla wielu typów tranzystorów bipolarnych, małej i średniej mocy oraz przełączających. Okazało się, że najlepsze z nich to popularne tranzystory małej mocy. Tranzystory średniej mocy, mimo większych dopuszczalnych przenoszonych prądów mają większą rezystancję przewodzenia od tranzystorów małej mocy, w zakresie prądów występujących w urządzeniu. Podobnie tranzystory przełączające, które wprawdzie mają dużą szybkość przełączania, co nie jest istotne w niemal statycznych pomiarach odkształcenia (jeden pomiar na sekundę), ale większą rezystancję włączenia.

3. Klucze tranzystorowe

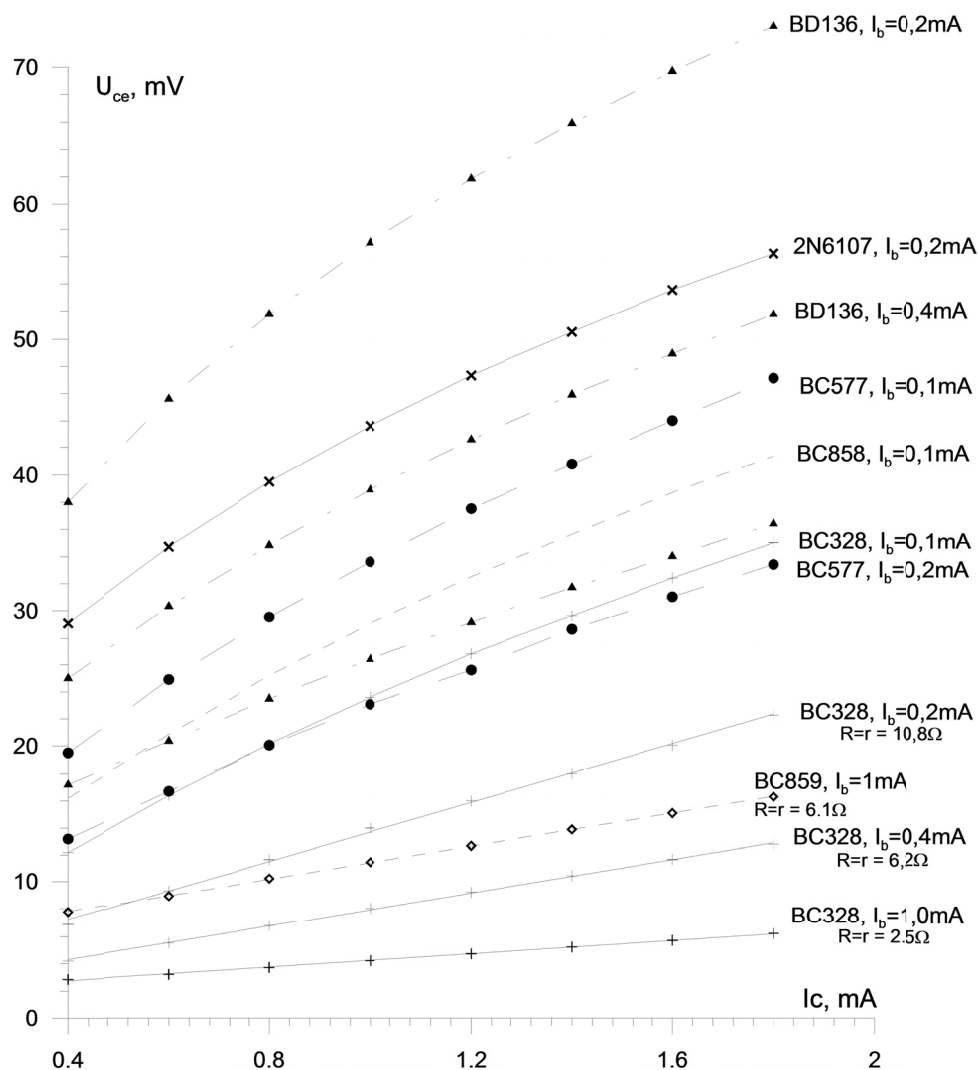
Tranzystorowe klucze, mimo że są niewielkie, zwłaszcza w wykonaniu miniaturowym (SMD) i mogą wykonać praktycznie nieograniczoną liczbę przełączeń, jednak mają dwie podstawowe wady: dużą rezystancję dynamiczną w stanie włączenia r_{on} (kilka Ω) i dużą pojemność w stanie wyłączenia (do kilkunastu pF). (Problem pojemności klucza wyłączanego omówiony zostanie w dalszej części.) Rezystancja wyjściowa tranzystora maleje, jeśli forsuje się go dużym prądem bazy, wprowadzając go w stan głębokiego nasycenia. Maleje wtedy szybkość wyłączania, ale nie jest to istotne w statycznych pomiarach [5]. Rezystancja w nasyceniu jest nieliniowa, zależna od prądu, więc należy ją określić dla konkretnych warunków pracy, w tym przypadku w otoczeniu prądu kolektora około 2 mA , na który nakłada się zmienny prąd oscylacji o wartości około $0,2 \text{ mA}$, stąd konieczność posłużenia się rezystancją dynamiczną. Tranzystory o małej rezystancji r_{on} , mają dużą pojemność, co wynika z ich konstrukcji i zasady działania, podczas gdy dobry przełącznik powinien mieć zarówno małą r_{on} jak i C_{bk} . W tabeli przedstawiono wyniki pomiaru rezystancji dynamicznej r_{on} tranzystorów małej mocy dla prądu $I_c = 2 \text{ mA}$, $I_b = 1 \text{ mA}$ oraz pojemność baza-kolektor C_{bk} podaną przez producenta dla $U_{kb} = -5 \text{ V}$.

Tab. 1.

Tranzystor	BC369	BC638	BC328	BC859	BC857	2N3905
h_{21e}	300	120	300	300	300	120
r_{on}, Ω	0,83	2,4	3,1	6,1	7,7	7,9
C_{bk}, pF	27	13	12	4,5	4,5	4,5

Tranzystory do pomiarów selekcionowano wybierając egzemplarze o jak największym wzmocnieniu prądowym h_{21e} , a także sterowano dużym prądem bazy, co sprzyja dobremu nasyceniu złącza i uzyskaniu małej rezystancji wyjściowej. (Autor opracowania stwierdził niemożność nabycia tranzystorów o zbliżonej do maksymalnej wartości współczynnika wzmocnienia deklarowanej przez producenta, gdyż np. przebadane przez niego tranzystory z grupy $200 < h_{21e} < 400$ miały wzmocnienie nie większe niż 300).

W efekcie do komutacji wysokorezystancyjnych czujników stalowych zdecydowano zastosować tranzystor typu BC638 lub BC328, jako kompromis między małą rezystancją włączenia a małą pojemnością wyłączenia. Tranzystory polowe MOSFET mają jeszcze mniejszą rezystancję w stanie włączenia, bo ułamek Ω , ale pojemność w stanie wyłączenia zbyt dużą, bo kilkaset pF, co praktycznie wyklucza ich zastosowanie. Poniżej pokazano charakterystyki wyjściowe tranzystorów, na podstawie których wyliczono rezystancję, jako styczną do krzywej w punkcie pracy tranzystora włączonego. Tranzystory w tym zastosowaniu forsowane są dużym prądem bazy, przeważnie nie stosowanym, stąd brak ich charakterystyk dla takich warunków pracy w katalogach.



Rys. 2. Charakterystyki wyjściowe wybranych bipolarnych tranzystorów małej i średniej mocy

4. Klucze elektromechaniczne

Zamiast dwóch tranzystorów można zastosować jeden miniaturowy przełączny przekaźnik elektromechaniczny. Przekaźniki takie mają w porównaniu do tranzystorów wielokrotnie mniejszą rezystancję w stanie włączenia (poniżej 0.1Ω) i mniejszą pojemność w stanie wyłączenia (poniżej 1 pF) oraz wystarczającą szybkość przełączania (poniżej 10 ms). Ponadto ich rezystancja w stanie włączenia praktycznie nie zależy od temperatury przekaźnika, w przeciwieństwie do tranzystorów.

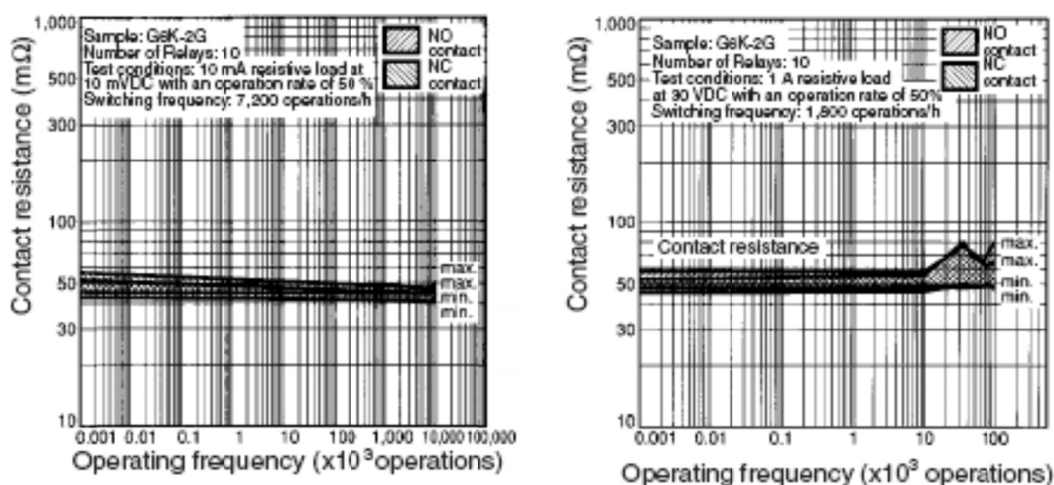
Niestety przekaźniki mają kilka niedogodności:

- dłuższy czas ustalania się rezystancji po włączeniu (wibracja styków),
- niestabilna w czasie rezystancja (zużycie i korozja styków),
- stosunkowo mała liczba bezawaryjnych przełączeń (kilkaset tysięcy do kilku milionów),
- duże rozmiary.

Na pozór wydaje się, że kilkaset tysięcy przełączeń to całkiem dużo, ale zakładając częstotliwość pomiaru odkształcenia raz na sekundę, daje czas bezawaryjnej pracy około 300 godzin.

Stosowanie przekaźników miniaturowych wynika z konieczności minimalizacji indukcyjności połączeń czujnika poprzez klucz do oscylatora, gdyż indukcyjność ta zmniejsza czułość czujnika i stabilność oscylacji. Obecnie w trakcie pomiarów odkształceń w komorze ciśnieniowej, oscylator wraz z kluczami tranzystorowymi jest umieszczony w obudowie korka komory ciśnieniowej, wewnątrz osłony zabezpieczającej. Użycie przekaźnika o objętości powyżej 1 cm^3 spowodowałoby konieczność wyniesienia oscylatora poza osłonę, co zwiększyłoby indukcyjność połączeń co najmniej dwukrotnie.

Na przykład japońska firma *OMRON*, jedna z wiodących firm produkująca elementy automatyki przemysłowej, oferuje subminiaturowe przekaźniki z serii G6K (Rys. 6), o rezystancji w stanie włączenia 50 mΩ, deklarowanej trwałości elektrycznej 10 mln przełączeń przy prądzie 10 mA i szybkości przełączenia 3 ms. Ma wymiary 10×6×5 mm. (Cat. No. K106-E1-3A). Moc tracona w cewce wynosi 100 mW. (za <http://www.omron.com/ecb/products/pdf/en-g6k.pdf>). Podana trwałość została odczytana z wykresu zamieszczonego na internetowej stronie producenta (Rys. 3), do wykresu brak komentarza, dlaczego linie wykresu urywają się przy 10 mln przełączeń. Nie wiadomo też jak wzrasta prawdopodobieństwo nieprawidłowego połączenia dla większej liczby przełączeń, a w szczególności jak definiowana jest nieprawidłowość działania. Dla prądu 1 A płynącego przez styki trwałość elektryczna spada znacznie, bo do 10⁵ przełączeń. Producent podaje, że trwałość mechaniczna jest lepsza niż 50 mln zadziałań (przy 36.000 przełączeniach na godzinę). Można oczekiwać, że dla prądu przełączanego kilka mA, jaki płynie w czujniku, trwałość elektryczna będzie większa od 10 mln cykli, podanych dla prądu o wartości 10 mA.

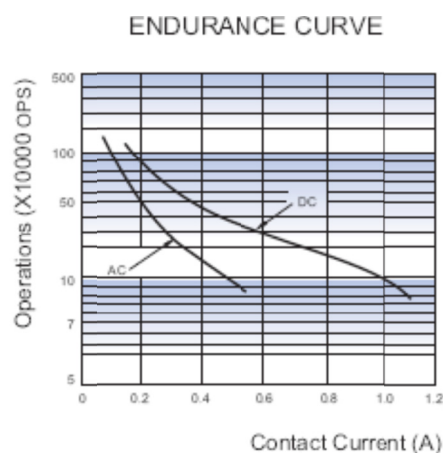


Rys. 3. Trwałość przełącznika firmy OMRON serii G6K

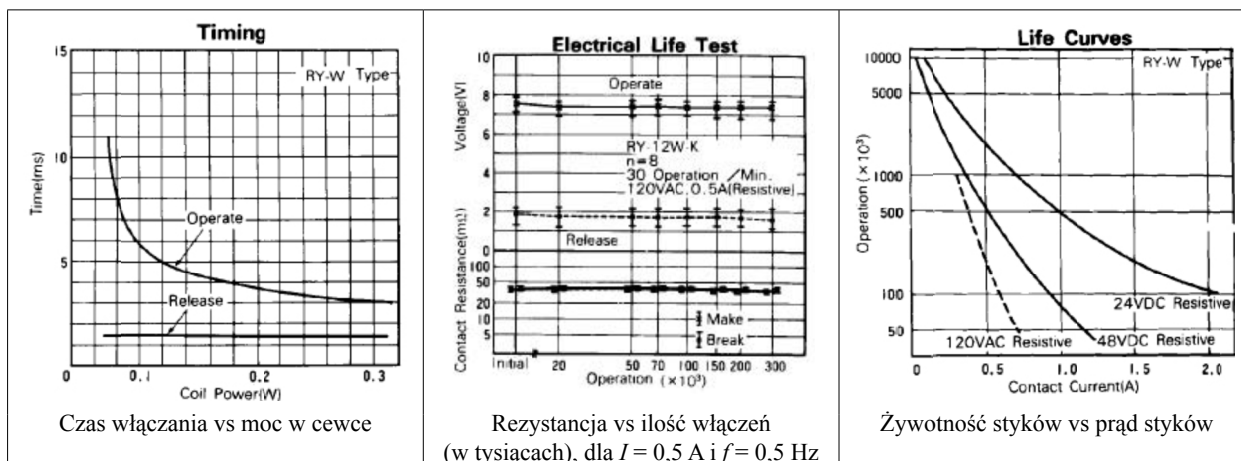
Dla porównania przełącznik miniaturowy firmy TELEDYNE o symbolu SPDT RF331 w obudowie TO5 (walcowej, o średnicy 9 mm i wysokości 10 mm), ma $R_{on} < 150$ mΩ, moc traconą w cewce 200 mW, pojemność styków rozłączonych 0,4 pF. Typową trwałość (Contact Live Ratings) podano jako 10mln cykli, bez określenia warunków pomiaru. (za: <http://www.teledynereleys.com/pdf/electromechanical/RF311.pdf>). Przełącznik ten jest jednak prawie dwa razy większy od poprzedniego i trzeba dwukrotnie większej mocy do jego włączenia.

Jeszcze inna firma HONGFA TECHNOLOGY posiada w ofercie miniaturowy przełącznik oznaczony symbolem HFD23 o wymiarach 12,5×7,5×10 mm i R_{on} 100 mΩ, oraz mocy traconej 150 mW. Deklarowana trwałość elektryczna styków to około 10⁶ włączeń dla prądu 100 mA, (Rys. 4). Trwałość mechaniczna to 10⁷ cykli (za: http://www.hongfa.com/product/pdf/HFD23_en.pdf).

Nieco większy przełącznik firmy Jujitsu FUJITSU serii RY*W-K o wymiarach 20×12×8 mm, przy znamionowej mocy traconej w cewce 0,45 W ma czas włączenia i wyłączenia 3 ms (przy mocy 0,1 W czas włączenia wzrasta do 6 ms). Powierzchnię styków wykonano ze stopu złota srebra i palladu, uzyskując rezystancję nie większą niż 0,1 Ω przy 300 tys. przełączeniach (Rys. 5).



Rys. 4. Trwałość przełącznika firmy HONGFA serii HFD

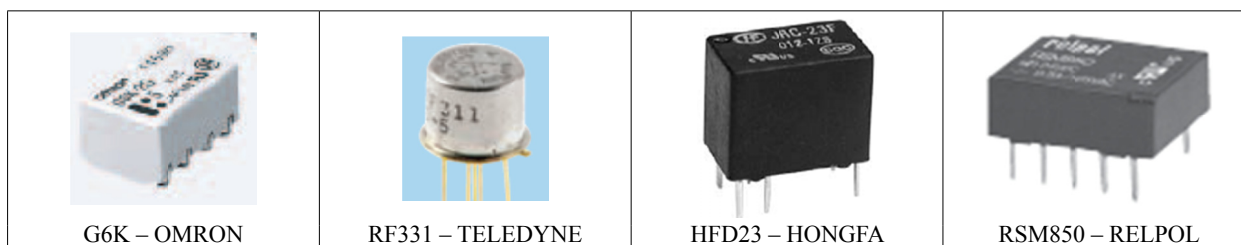


Rys. 5. Czas przełączania i trwałość przekaźnika firmy FUJITSU serii RY*W-K

Na koniec dane najmniejszego przekaźnika polskiej firmy RELPOL o symbolu RSM850: trwałość łączeniowa 10^5 przy prądzie 500 mA, R_{on} 50 mΩ, wymiary: $14 \times 9 \times 5 \text{ mm}$, moc tracona 140 mW (za: http://www.relpol.com.pl/data/products/pl_PL/240/RSM850_pl.pdf).

Trudno jednoznacznie wypowiadać się o trwałości styków różnych przekaźników, bowiem producenci określają ją przy różnych warunkach pracy, w szczególności dla prądów kilkuset mA, podczas gdy prąd przełączany w cewkach czujnika to kilka mA. Dostępna w internecie dokumentacja sporządzona przez firmę OMRON jest najbardziej szczegółowa.

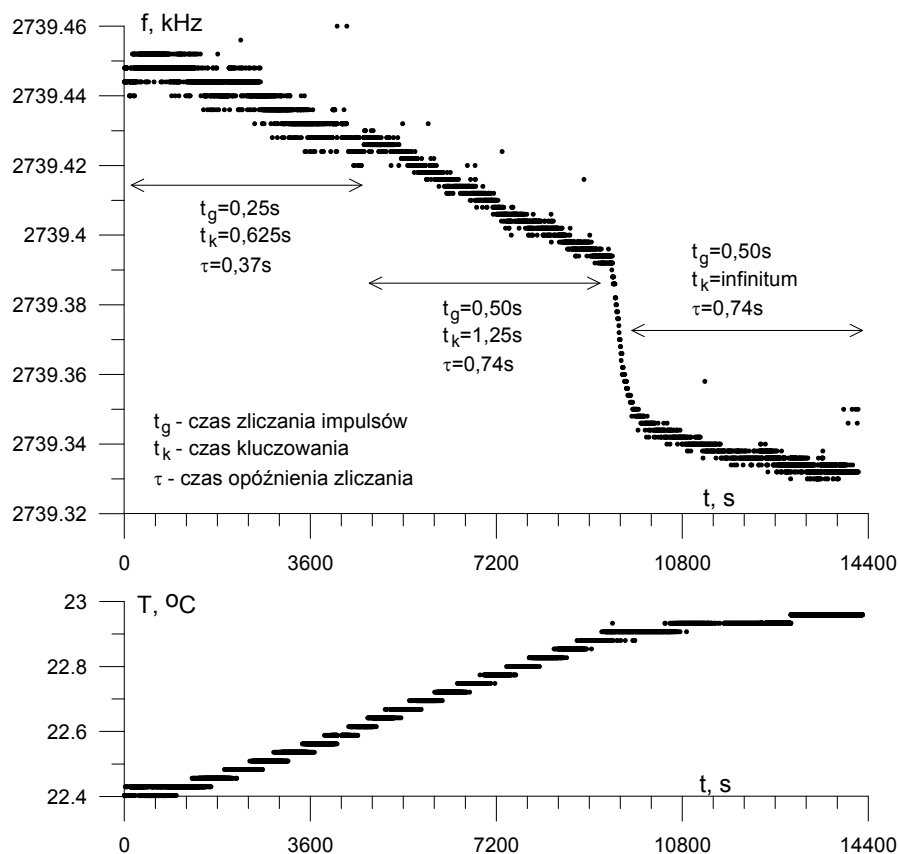
Opisany powyżej przekaźnik firmy OMRON wydaje się być w obecnej chwili najlepszy do roli przełącznika czujników, głównie ze względu na najmniejsze wymiary i najmniejszą moc potrzebną doysterowania.



Rys. 6. Fotografia kilku przekaźników miniaturowych, skala około 2:1

Należy eksperymentalnie ocenić stabilność oscylacji przy przełączaniu czujników przekaźnikiem, która może być mniejsza niż w wypadku kluczy tranzystorowych, ze względu na potencjalną niestabilność rezystancji przejścia zwartych styków. Na rysunku pokazano wyniki testów przekaźnika OMRON. Przedstawia on wynik pomiaru częstotliwości dla czujnika łączonego z oscylatorem z okresem 1,25 i 2,5 s oraz bezpośrednio, poprzez zwarte i nieruchome styki przekaźnika. Po przełączeniu w stan przewodzenia pomiar następował po pewnym czasie opóźnienia τ , aby oscylacje generatora ustabilizowały się po zaburzeniu jego pracy. Jak widać, rozrzut mierzonych częstotliwości wynika tylko z rozdzielczości jej pomiaru, która manifestuje się na rysunku trzema wartościami (poziomami) w wybranym czasie. Odstęp między poziomami wynosi początkowo 4 Hz i maleje dwukrotnie do 2 Hz przy wydłużeniu czasu zliczania impulsów (bramkowania) z $t_g = 0,25 \text{ s}$ do 0,5 s. Po upływie około 9000 s przekaźnik wyłączono, więc jego styki pozostały nieruchome, włączając na stałe tylko jeden z czujników. Rozrzut pomiaru częstotliwości dla przekaźnika nieruchomego pozostał bez zmian. Tendencja nieznacznego spadku wartości częstotliwości obserwowana od początku pomiaru wynika ze wzrostu temperatury spowodowanego działaniem urządzeń i przekaźnika zamontowanego kilkanaście milimetrów od czujników. Po wyłączeniu przekaźnika temperatura przestała rosnąć, co spowodowało skok częstotliwości a następnie jej stabilizację. W referencyjnym pomiarze odkształcenia tego rodzaju wahania częstotliwości są korygowane i nie wpływają praktycznie na jego dokładność.

W ten sam sposób przebadano przekaźnik firmy Fujitsu FUJITSU serii RY*W-K, uzyskując bardzo podobne rezultaty.



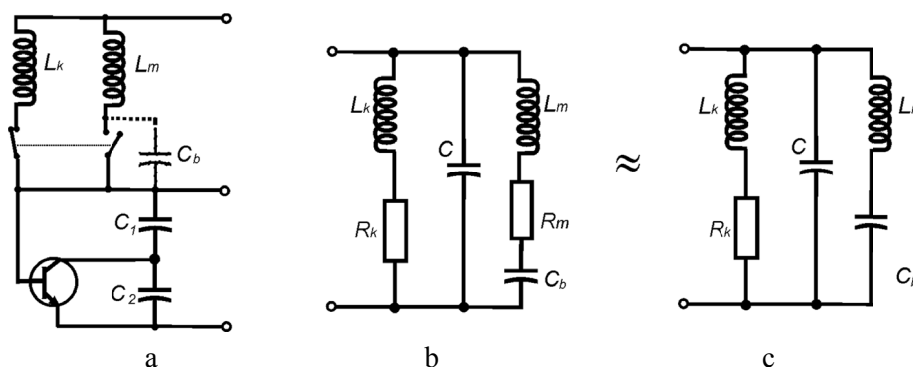
Rys. 7. Częstotliwość z czujnika włączanego przełącznikiem OMRON dla $t_{on} = t_{off} = 0,25; 0,5$ s i nieruchomego oraz temperatura w otoczeniu czujnika

Wydaje się, że miniaturowy przełącznik OMRON serii G6K można z powodzeniem zastosować zamiast tranzystorów dla uzyskania radykalnego zmniejszenia rezystancji przełączania. Będzie to szczególnie istotne w przypadku czujników wykonanych z manganianu o rezystancji około 8Ω . Szeregowa rezystancja klucza tranzystorowego 3Ω stanowi w tym przypadku znaczny udział, obniżając nadmiernie dobroć obwodu rezonansowego [6]. Mała rezystancja styków przełącznika pozwoli na wzrost pojemności kondensatorów w obwodzie rezonansowym prawie 2,5 krotnie, z 1 nF do $2,5 \text{ nF}$, poprawiając tym samym stabilność oscylacji. Niestabilności te spowodowane są głównie przez pojemność ciśnieniowych przepustów w ścianie komory. Pojemność ta (około 100 pF) zmienia się o nieco różną wartość, dla danego przepustu, przy zmianach ciśnienia i temperatury.

5. Wpływ pojemności klucza na dokładność pomiaru czujnikiem indukcyjnym

Konsekwencją istnienia pasożytniczej pojemności bocznikującej przełącznik jest oddziaływanie jej na obwód rezonansowy, nawet jeśli jego klucz jest w stanie wyłączenia. To niekorzystne oddziaływanie może być przyczyną błędu pomiarowego, przy dostatecznie dużej wartości pojemności bocznikującej. Na Rys. 8 przedstawiono ideę działania układu pomiarowego, gdzie C_b to pojemności pasożytnicze bocznikujące przełącznik, a C_1 i C_2 to kondensatory oscylatora. Na schemacie zastępczym (Rys. 8b) R_m to rezystancja reprezentująca straty w obwodzie czujnika pomiarowego, R_k czujnika kompensacyjnego, a C pojemność zastępcza oscylatora. Przedstawiono stan, w którym włączony jest klucz czujnika kompensacyjnego, zaś klucz czujnika pomiarowego jest wyłączony, więc do oscylatora czujnik pomiarowy jest podłączony przez niewielką pojemność bocznikującą klucz. Ponieważ rezystancja czujnika jest wielokrotnie mniejsza od reaktancji pojemnościowej bocznikującej C_b , można zaniedbać rezystancję czujnika $R_m \ll X_{Cb}$ (Rys. 8c). Jeśli czujnik pomiarowy np. wydłuży się razem z materiałem mierzonym, spowoduje to spadek jego indukcyjności, więc i indukcyjności obwodu rezonansowego, gdyż mimo wyłączonego klucza czujnik ten będzie nadal połączony poprzez pojemność bocznikującą do generatora. Wywoła to zmianę częstotliwości oscylacji

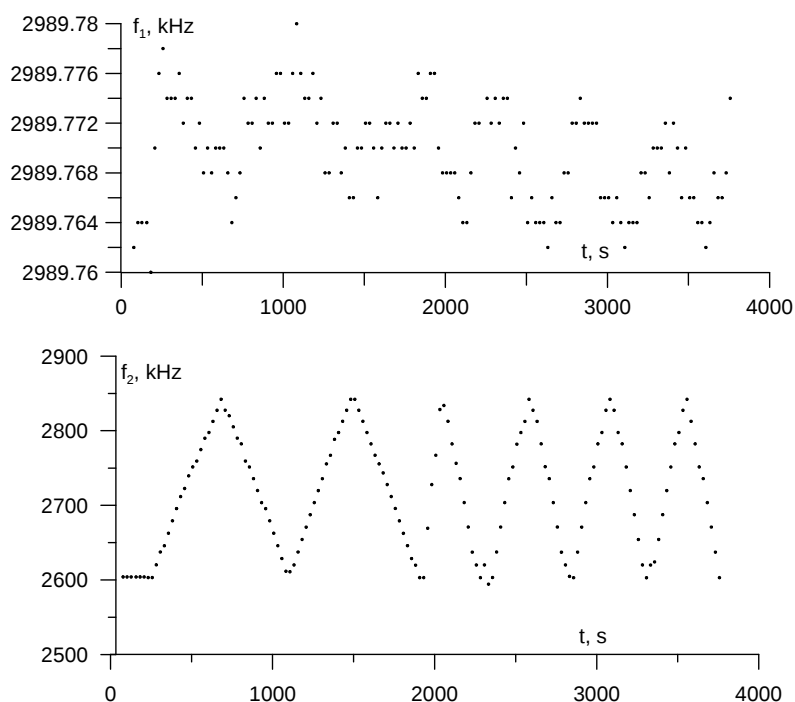
z obwodu z włączonym czujnikiem kompensacyjnym, nawet, gdy jego długość pozostanie bez zmian. Będzie to fałszywie interpretowane jako np. oddziaływanie temperatury bądź ciśnienia na oba czujniki i o taką zmianę częstotliwości będzie skorygowany odczyt z czujnika pomiarowego, gdy w następnym cyklu to on będzie włączony w obwód rezonansowy oscylatora. Skutkiem tego, wyliczone odkształcenie badanego materiału będzie obarczone błędem. Im pojemność bocznikująca będzie większa, tym oddziaływanie czujnika pomiarowego na kompensacyjny będzie większe.



Rys. 8. Schemat ideowy i zastępczy oscylatora wraz z kluczami i czujnikami

Opisany efekt można zaobserwować podczas wzorcowania czujnika (Rys. 9). Zmiany częstotliwości pracy obwodu z czujnikiem wzorcowanym o 200 kHz powodują zmiany częstotliwości pracy obwodu z drugiego czujnika o około 20 Hz.

W większości przypadków to właśnie pojemność klucza czujnika pomiarowego będzie powodem błędu, gdyż czujnik kompensacyjny nie podlega odkształceniom, z wyjątkiem pomiaru ściśliwości, podczas którego na oba czujniki oddziałuje ciśnienie. W tym przypadku, jeśli czujnik kompensacyjny jest zamocowany na wsporniku stalowym, będzie on z reguły znacznie mniej odkształcany niż pomiarowy ze względu na mniejszą ściśliwość stali w stosunku do większości skał.



Rys. 9. Zmiany częstotliwości czujnika referencyjnego i temperatury w otoczeniu czujników w czasie wzorcowania

Można wykazać [7], że względny błąd pomiaru wynikały ze wzajemnego pojemnościowego oddziaływania czujników będzie określony wzorem:

$$\delta = \frac{d\left(\frac{f_k}{f_{k0}}\right)}{dl_m} \cdot \frac{1}{s_{Rk}} \cdot \frac{1}{l_k} \approx \frac{\frac{l_k}{l_m}}{2\left(\frac{C}{C_b} - \frac{l_k}{l_m}\right)^2} \cdot 2l_k \cdot \frac{1}{l_k} \approx \frac{\frac{l_k}{l_m}}{\left(\frac{C}{C_b} - \frac{l_k}{l_m}\right)^2} \approx 2 \frac{d\left(\frac{f_k}{f_{k0}}\right)}{dl_m} \quad (3)$$

Ponieważ warunkiem dobrej redukcji wpływu ciśnienia i temperatury przez czujnik kompensacyjny jest identyczność parametrów toru pomiarowego i kompensacyjnego, więc i długość obu czujników powinna być taka sama. Wtedy powyższy wzór upraszcza się (pomijając składnik mianownika -1) do postaci:

$$\delta \approx \left(\frac{C_b}{C}\right)^2 \quad (4)$$

Błąd względny ma w przybliżeniu wartość stałą, gdyż czujnik pomiarowy zwiększając swą długość przyczynia się do wzrostu oddziaływania na czujnik kompensacyjny, więc i wzrostu błędu bezwzględnego. Zachodzi to jednakże przy wzroście mierzonej długości i stąd wynika stałość błędu względnego.

Pojemność bipolarnych tranzystorowych kluczy, zastosowanych w istniejącym układzie pomiarowym, w stanie wyłączenia C_b dochodzi do 10 pF a pojemność obwodu rezonansowego jest w przybliżeniu równa 1000 pF, stąd względny błąd pomiaru ze względu na C_b jest równa około 0.1 promila. Może być on istotny w pomiarze ściśłości twardych skał, jak np. granit. Natomiast pojemność w stanie wyłączenia przekaźnika elektromechanicznego jest około 1 pF, więc błąd ten jest około 100-krotnie mniejszy i może być całkowicie pominięty, przy tej samej pojemności obwodu rezonansowego. Ponieważ rezystancja w stanie włączenia przekaźnika jest kilkakrotnie mniejsza od rezystancji tranzystorowego klucza, to pojemność obwodu rezonansowego może być większa, a tym samym błąd ze względu na C_b przekaźnika może być jeszcze mniejszy.

6. Wnioski

Wykonane testy komutacyjnych możliwości przekaźników elektromechanicznych wykazały ich pełną przydatność do przełączania indukcyjnych czujników w referencyjnej metodzie pomiaru odkształcenia, szczególnie próbek skał badanych w wysokim ciśnieniu hydrostatycznym, do 400 MPa. (Podczas pomiarów odkształcenia w komorze ciśnieniowej, czujniki są wewnątrz niej, a przełącznik czujników poza nią). Przede wszystkim przekaźniki mają małą rezystancję w stanie włączenia, poniżej 0,1 Ω , czyli około 30-krotnie mniej w porównaniu do klucza tranzystorowego. Ma to szczególnie istotne znaczenie w przypadku czujnika wykonanego z drutu manganinowego, gdyż jego rezystancja (8 Ω) jest niewiele większa od rezystancji włączonego tranzystora (3 Ω). Zastosowanie w tym przypadku przekaźnika zwiększy dobroć obwodu rezonansowego, co pozwoli dwukrotnie zwiększyć jego pojemność. Zmniejszy to niestabilność częstotliwości oscylacji spowodowanej wpływem niestabilnych pojemności połączeń czujnika z oscylatorem, szczególnie elektrycznych przepustów ciśnieniowych w ścianie komory. W efekcie niepewność pomiaru odkształcenia będzie mniejsza. Dodatkowo niepewność ta, choć w mniejszym stopniu, zmniejszy się ze względu na mniejszą pojemność klucza elektromechanicznego (0,1 pF) i jej niezależność od temperatury w stanie wyłączenia, w porównaniu do klucza tranzystorowego (3 do 10 pF). Opóźnienie przejścia przekaźnika ze stanu wyłączenia do włączenia wynosi kilka ms. Należy zatem wprowadzić opóźnienie rozpoczęcia pomiaru częstotliwości po przełączeniu czujników o około 100 ms, aby zanikły drgania styków. Ograniczy to szybkość pomiaru do około 2 Hz, przy rozdzielczości 150 nm, wynikającej z rozdzielczości pomiaru częstotliwości.

Przedstawione wyniki testów uzyskano dla czujników pracujących w normalnym ciśnieniu. Konieczne więc będą dodatkowe testowe pomiary odkształcenia z wykorzystaniem przekaźników, wykonane w przypadku czujników umieszczonych w komorze ciśnieniowej i poddanych zmiennemu ciśnieniu, tak by wykazać większą przydatność przekaźników w porównaniu do tranzystorów.

Literatura

- [1] Nurkowski J.: *Indukcyjny przetwornik odkształcenia w układzie różnicowym*. Krajowy kongres Metrologii, Gdańsk 1998, s. 223-230.
- [2] Nurkowski J.: *Skompensowany termicznie, bezdrzewiowy indukcyjny czujnik przemieszczenia w równoległym układzie mechanicznym*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN. vol. 9, nr 1-4 (2007), s. 123-136.
- [3] Pawłowski J.: *Wzmacniacze i generatory*. WKŁ, W-wa 1980, s. 723-797.
- [4] Nurkowski J.: *Błędy w pomiarach odkształcenia wykonywanych w komorze ciśnieniowej czujnikiem indukcyjnym*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, Vol. 7, (2005), s. 11.
- [5] Kuta G. Krajewski J. Jasielski J.: *Układy elektroniczne cz. II*. AGH, Kraków 2000.
- [6] Nurkowski J.: *Termiczne właściwości indukcyjnego, bezdrzewiowego czujnika odkształceń – teoria i praktyka*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, Vol. 7, (2005), s. 61-80.
- [7] Nurkowski J.: *Błąd pomiaru odkształcenia czujnikiem indukcyjnym spowodowany pojemnością przełącznika w metodzie porównawczej*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, Vol. 10, nr 1-4 (2008), s. 33-44.

Switching capabilities of transistors and electromechanical keys in the reference method for measuring deformation by means of inductive sensor

Abstract

The paper shows some results of tests carried out to demonstrate the usability of electromechanical relays for switching inductive sensors, instead of the previously used transistors, in the reference measuring deformation method. This is particularly important in strain measurements of rock samples in high hydrostatic pressure (up to 400 MPa). The completed tests showed full usability of electromechanical relays.

First of all these relays have a low resistance in the “on” state (less than $0,1\ \Omega$) which is about thirty times smaller than the resistance of a transistor key. This is particularly important in case of using the deformation sensor made of manganin wire. Resistance of such a sensor is $8\ \Omega$ and is not much greater than the resistance in “on” state of the transistor key, which is $3\ \Omega$. An application of an electromechanical relay will increase the quality factor of the resonant circuit and will increase capacity of capacitors (double for manganin sensor). Then the instability of oscillation caused by impact of unstable capacitance of connections between the sensor and the oscillator will be reduced, mainly for the electrical seals in the cell wall. This will reduce the uncertainty of measurement of deformation.

Similarly works, although to a lesser extent, relatively low capacity of the electromechanical relay equal to $0,1\text{ pF}$ (in comparison to the capacity of transistor key, which is $3\text{--}10\text{ pF}$) and its independence from the temperature in the “off” state. Switching time of the electromechanical relay from the “off” to the “on” state (few milliseconds) and the extinction of vibrations contacts after switching (which lasts tens of milliseconds), are so short-lived that it is possible to carry out measurements with frequency of about 2 Hz.

Keywords: inductive deformation sensor, the reference measurement of deformation, on-state resistance of the relay and bipolar transistor