

Urządzenie do pomiarów wielkości mechanicznych i temperatury przy pomocy przetworników strunowych

ADAM KANCIRUK

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

Streszczenie

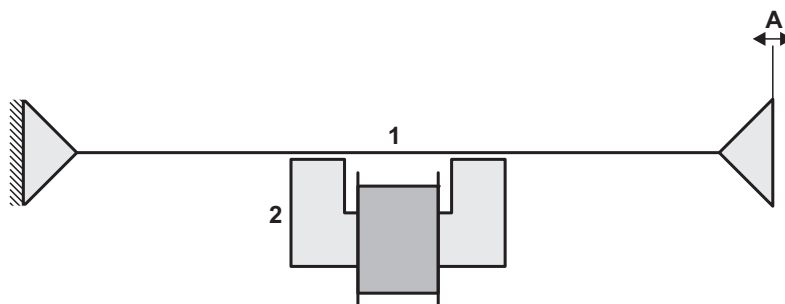
W opracowaniu przedstawiono prototypowe urządzenie do pomiaru wielkości mechanicznych przy użyciu przetwornika strunowego i temperatury z wykorzystaniem uzwojenia elektromagnesu przetwornika jako termorezystora. Wykazano też przydatność podzespołów urządzenia do synfazowego pobudzania struny pomiarowej do drgań ciągłych. Metoda ta pozwala na prowadzenie pomiarów wielkości mechanicznych nie tylko statycznych i wolnozmiennych, ale też i szybkozmiennych.

Słowa kluczowe: metrologia, elektronika geotechnika

Wstęp

Na początku lat 70-tych XX wieku w Pracowni Odkształceń Skał zaprojektowano i zbudowano kilkadziesiąt przetworników typu TTCS-4000.3 do pomiarów przemieszczeń gruntu np. na terenach objętych podziemną eksploatacją górnictwem. Przetworniki te stosowane są do dziś, niektóre wykorzystywane są nieprzerwanie od ponad 30 lat. Doświadczenia zebrane w tak długim czasie dowodzą wysokiej stabilności ich parametrów metrologicznych.

Zasadniczymi elementami przetwornika strunowego jest stalowa struna 1 i elektromagnes 2, jak schematycznie przedstawiono na rysunku 1. Elektromagnes służy do wzbudzania drgań struny i przekształcania ich w sygnał elektryczny. Przemieszczenie gruntu poprzez układ dźwigniowy przetwornika powoduje przemieszczenie jednego z końców struny 'A'. Powoduje to zmianę jej napięcia i w konsekwencji zmianę częstotliwości jej drgań własnych. Przetwornik strunowy przemieszczenia jak i większość przetworników pomiarowych jest wrażliwy na temperaturę. Zmiana jej o 1°C indukuje pozorne przemieszczenie gruntu o około 0.05 mm. Dla bazy pomiarowej równej 4 m daje to odkształcenie ok. 12×10^{-6} . Dlatego, każdy przetwornik przemieszczenia wyposażony został w termometr strunowy, przy pomocy którego możliwy jest nie tylko pomiar temperatury gruntu w miejscu instalacji przyrządu, ale też i kompensacja temperaturowa wskazań przetwornika przemieszczenia.



Rys. 1. Podstawowy układ funkcjonalny przetwornika strunowego

Konstrukcja termometru strunowego jest bardzo prosta. Struna jak na rys. 1 zamocowana jest końcami do belki wykonanej najczęściej z mosiądzu. Różny współczynnik temperaturowej rozszerzalności liniowej stali i mosiądzu powoduje, że wraz za zmianą temperatury zmienia się naciąg struny. Zatem pomiar przemieszczenia i pomiar temperatury możliwy jest przy pomocy tego samego miernika strunowego jak np. zaprezentowanego w pracy [1].

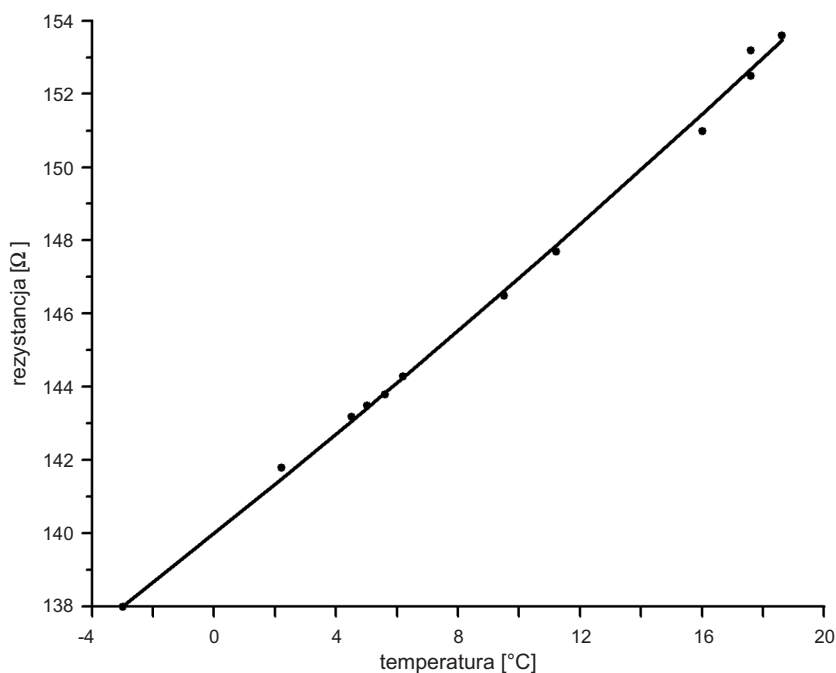
Tymczasem sam przetwornik przemieszczenia zawiera element, który może służyć jako przetwornik temperatury – termorezystor. Jest nim uzwojenie elektromagnesu 2 (rys. 1) wykonane z miedzianego drutu. Rezystancja tego uzwojenia w temperaturze pokojowej wynosi zazwyczaj około 150 Ω . Konduktancja właściwa σ czystej miedzi w temperaturze $T_0 = 25^\circ\text{C}$ jest równa 58.47 MS/m, a jej współczynnik temperaturowy α wynosi $3.9 \times 10^{-3}/\text{K}$ [2]. Konduktancja właściwa σ w temperaturze T wynosi:

$$\sigma(T) = \sigma(T_0)[1 - \alpha(T - T_0)]$$

Z tego prostego wzoru można wyliczyć, że w zakresie temperatur w jakich stosowane są przetworniki strunowe przemieszczeń gruntu, a więc w granicach $0 \div 20^\circ\text{C}$ rezystancja uzwojenia w/w elektromagnesu może zmieniać się w granicach $136.5 \div 147 \Omega$. Stosując układ mostkowy i 8-bitowy przetwornik analogowo-cyfrowy do pomiaru zmian tej rezystancji można z powodzeniem uzyskać rozdzielczość pomiaru 0.1°C lub nawet lepszą, co dla temperaturowej kompensacji wskazań przetwornika przemieszczenia jest w zupełności wystarczające. Należy jednak pamiętać, że w czasach gdy projektowano przetworniki TTCS-4000.3 nie były dostępne tanie urządzenia do pomiaru tak niewielkich zmian rezystancji w warunkach polowych. Zatem wyposażanie każdego przetwornika przemieszczenia w termometr strunowy było całkowicie uzasadnione.

1. Rzeczywista charakterystyka temperaturowa uzwojenia elektromagnesu

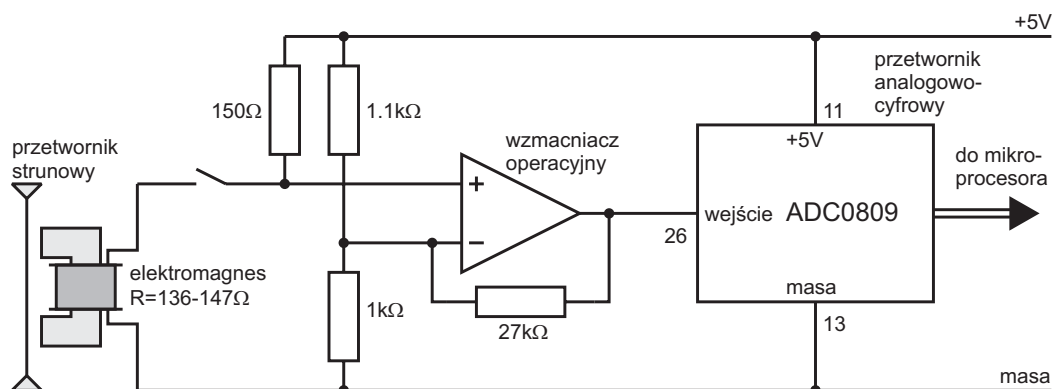
Do zbadania rzeczywistej charakterystyki temperaturowej uzwojenia elektromagnesu przetwornika strunowego zastosowano izolowany cieplnie pojemnik. Umieszczono w nim oprócz przetwornika dokładny termometr rtęciowy o rozdzielczości 0.1°C i zamrożone wkłady chłodzące. Uzyskano zakres temperatur $-3 \div 19^\circ\text{C}$. Rezystancję mierzono multimetrem z rozdzielczością 0.1Ω . Rysunek 2 przedstawia wyniki pomiaru wraz z teoretyczną krzywą.



Rys. 2. Charakterystyka temperaturowa uzwojenia

2. Urządzenie do pomiarów wielkości mechanicznych i temperatury przy użyciu przetwornika strunowego

W dalszej części opracowania urządzenie do pomiarów wielkości mechanicznych przy użyciu przetwornika strunowego nazywane będzie skrótowo ‘miernik strunowy’. Rezygnacja z termometru strunowego wymusza rozszerzenie możliwości miernika strunowego o podzespół do pomiaru temperatury. W przypadku przyrządu wyposażonego w mikroprocesor dołączenie takiego podzespołu nie jest skomplikowane. Stosownie do programu mikroprocesora może on automatycznie uwzględniać wpływ temperatury na pomiar. Proponowany schemat podzespołu do pomiaru temperatury przedstawia rysunek 3. Zawiera on mostek pomiarowy złożony z 3 rezystorów plus uzwojenie elektromagnesu, wzmacniacz o wzmacnieniu ok. 50 i popularny, a zatem i tani 8-bitowy kompensacyjny przetwornik analogowo-cyfrowy ADC0801. Jego wyjście jest połączone z wejściem mikroprocesora. Generuje on też sygnały sterujące dla przetwornika ADC. Przetwornik strunowy nie może być jednak podłączony do wejścia podzespołu w czasie podawania na jego wejście wysokonapięciowego sygnału wzbudzającego drgania struny. Okresowe podłączanie może być realizowane przy użyciu miniaturowego przekaźnika również sterowanego przez mikroprocesor. Rezystancja przejścia jego styku nie ma znaczącego wpływu na pomiar temperatury.



Rys. 3. Podzespół do pomiaru temperatury

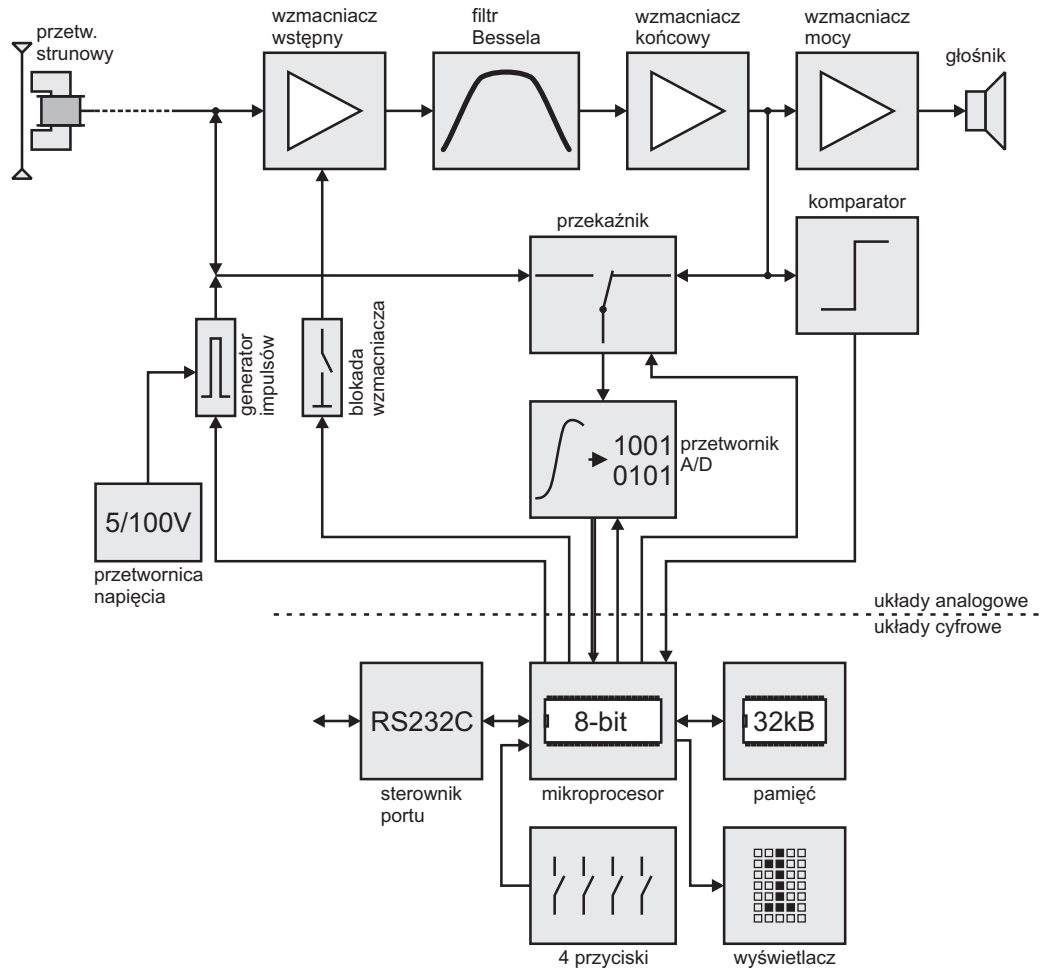
3. Schemat blokowy miernika strunowego

Na rysunku 4 przedstawiony jest schemat blokowy miernika, którego układy elektroniczne zmontowano na dwóch płytkach drukowanych. Jedna zawiera układy cyfrowe, druga – analogowe i analogowo-cyfrowe.

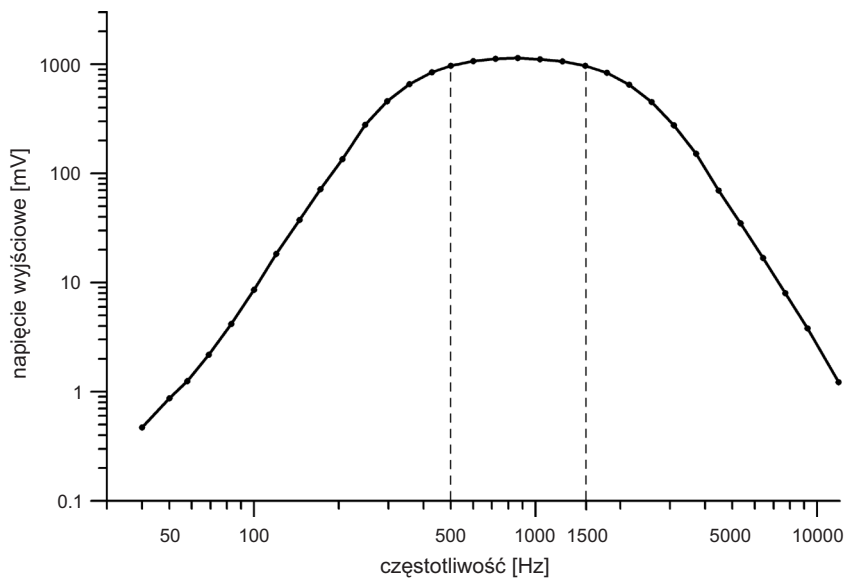
Układy cyfrowe to typowy zestaw złożony z mikroprocesora Intel 87C51FA, pamięci danych RAM o pojemności 32 kB, 32-znakowego wyświetlacza alfanumerycznego, sterownika transmisji danych RS232C i zestawu przycisków. Magistrala danych mikroprocesora i kilka jego linii wejścia/wyjścia doprowadzona jest do płytki analogowej.

Sinusoidalny eksponencjalnie zanikający sygnał z przetwornika strunowego o napięciu skutecznym w granicach $0.1\div 0.3$ mV jest dostarczany na wejście wzmacniacza wstępnego, skąd po przejściu przez aktywny filtr jest wzmacniany jeszcze raz we wzmacniaczu końcowym do napięcia $0.7\div 2$ V. Przetworniki strunowe pracują najczęściej w granicach częstotliwości $700\div 1100$ Hz, i dlatego zastosowano filtr pasmowo-przepustowy $500\div 1500$ Hz. Ze względu na konieczność silnego tłumienia zakłóceń pochodzących przede wszystkim z sieci zasilającej 50 Hz zdecydowano się na filtr czterobiegunowy, a ze względu na potrzebę aperiodycznej odpowiedzi na skok jednostkowy filtr typu Bessela. Dobór elementów filtra dokonano kierując się wskazówkami zawartymi w [3]. Charakterystyka amplitudowa całego toru wzmacniającego jest przedstawiona na rysunku 5. Została ona wyznaczona przy użyciu precyzyjnego generatora RC Tesla BM492 i cyfrowego miernika napięć przemiennych. Wzmocnienie w paśmie przepustowym wynosi ok. 3300 V/V, dla częstotliwości 50 Hz – tylko 3 V/V, a dla częstotliwości 10 kHz – ok. 4 V/V.

Sygnał z wyjścia wzmacniacza końcowego podawany jest na wejście komparatora i wzmacniacza mocy połączonego z małym głośnikiem. Jak wykazały wieloletnie doświadczenia słuchowa ocena jakości sygnału pochodzącego od drgającej struny jest bardzo pomocna w diagnostyce przetwornika.



Rys. 4. Schemat blokowy miernika strunowego



Rys. 5. Charakterystyka amplitudowa toru wzmacniającego

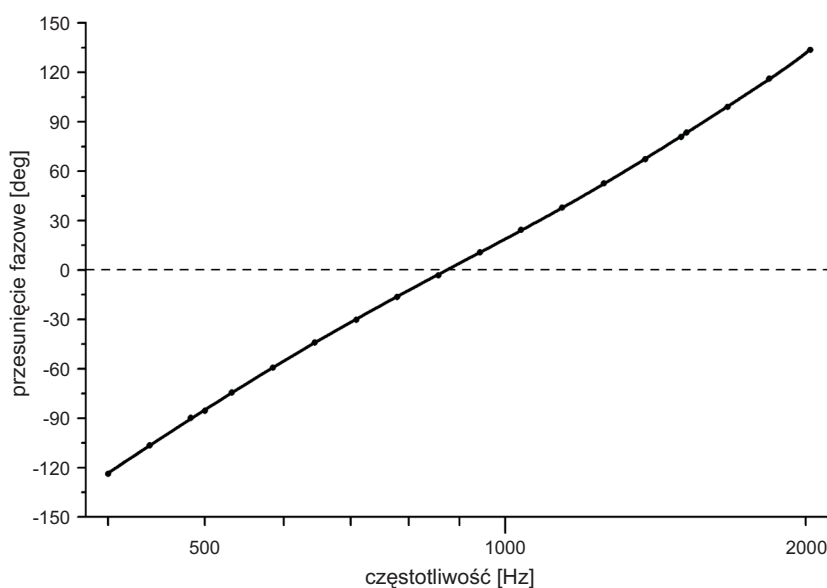
Sygnal z komparatora podawany jest na jedno z wejść licznikowych mikroprocesora. Z kolei jego 5 wyjść steruje pracą generatora impulsów, układu blokady wzmacniacza, przetwornika analogowo-cyfrowego i przełącznika.

Generator impulsów to układ skonstruowany na wysokonapięciowych tranzystorach zasilany z przetwornicy napięcia. Jego zadaniem jest podawanie na końcówki elektromagnesu przetwornika strunowego impulsu wzbudzającego drgania struny. Amplituda impulsu wynosi ok. 100 V, szerokość – w granicach 1 ms, jest regulowana przez mikroprocesor. Ponieważ dysproporcja tej amplitudy i sygnału wyjściowego z przetwornika jest ogromna (ponad 1 : 100 000), wzmacniacz wejściowy jest blokowany na czas trwania impulsu i jeszcze przez 2 ms po jego wygaśnięciu. Zapobiega to jego uszkodzeniu i znacznie redukuje przebiegi nieustalone wywołane przez impuls. Sterowanie przetwornika analogowo-cyfrowego jest realizowane przy użyciu 2 linii – jedna doprowadza sygnał startu przetwarzania, druga – sygnał odczytu wyniku pomiaru. 8-bitowe wyjście przetwornika jest bezpośrednio podłączone do magistrali danych mikroprocesora. Przetwarzanie przetwornika, czyli pomiar rezystancji uzwojenia elektromagnesu jest dokonywany po podłączeniu jego wejścia do końcówek elektromagnesu za pomocą przekaźnika również sterowanego przez mikroprocesor.

4. Możliwości dalszego rozszerzenia funkcji pomiarowych miernika strunowego

Zastosowanie dość szybkiego przetwornika analogowo-cyfrowego w układzie stwarza możliwość dodatkowego rozszerzenia funkcji pomiarowych miernika strunowego. W opracowaniu [4] przedstawiono przeprowadzanie pomiarów wielkości mechanicznych nie tylko statycznych i wolnozmiennych, ale też i szybkozmiennych z częstotliwością próbkowania sygnału z przetwornika około 100 Hz. Przedstawiony tam układ ma jednak zasadniczą wadę. Jest zdolny do przeprowadzania serii 100 pomiarów, po których musi nastąpić kilkusekundowa przerwa na wygaśnięcie drgań struny. Dlatego jest przewidziany do pomiarów inicjowanych z zewnątrz. Podanie impulsu wzbudzającego w czasie, gdy drgania struny mają jeszcze znaczącą amplitudę jest niecelowe. W zależności od fazy tych drgań energia impulsu i drgającej wciąż struny mogą nie tylko dodawać się, ale też i odejmować. Otrzymany przebieg nie jest powtarzalny, możliwa jest jego zbyt niska amplituda.

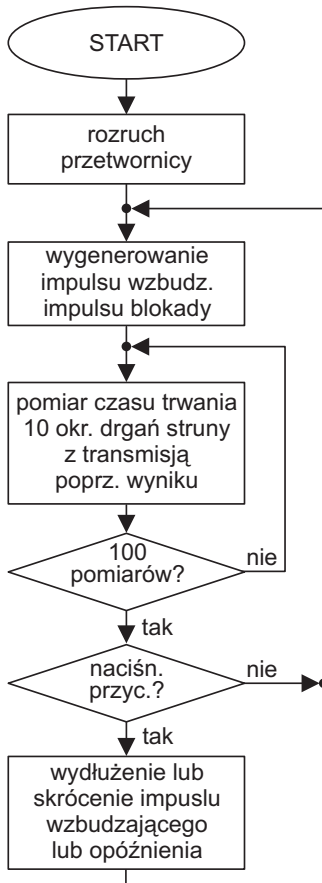
Wspomniane dodatkowe rozszerzenie możliwości miernika to synfazowe pobudzenie struny do drgań ciągłych, lub prawie ciągłych o okresowo zmieniającej się amplitudzie. Pozwala na to też zastosowanie wzmacniacza o ściśle określonej charakterystyce fazowej przedstawionej na rysunku 6. Charakterystykę tę wyznaczono przy użyciu wspomnianego generatora i dwukanałowego oscyloskopu cyfrowego Tektronix 2230 z możliwością pomiaru czasu i napięcia. Przełącznik w czasie gdy nie jest dokonywany pomiar temperatury może na wejście przetwornika ADC0801 podawać napięcie ze wzmacniacza wyjściowego. W ten sposób, mikroprocesor dysponuje kompletem informacji potrzebnych do wygenerowania właściwego impulsu wzbudzającego. Jego szerokość, a więc i energia powinna uwzględniać poziom napięcia z wyjścia wzmacniacza, a opóźnienie względem sygnału z komparatora – charakterystykę fazową całego toru wzmacniającego.



Rys. 6. Charakterystyka fazowa toru wzmacniającego

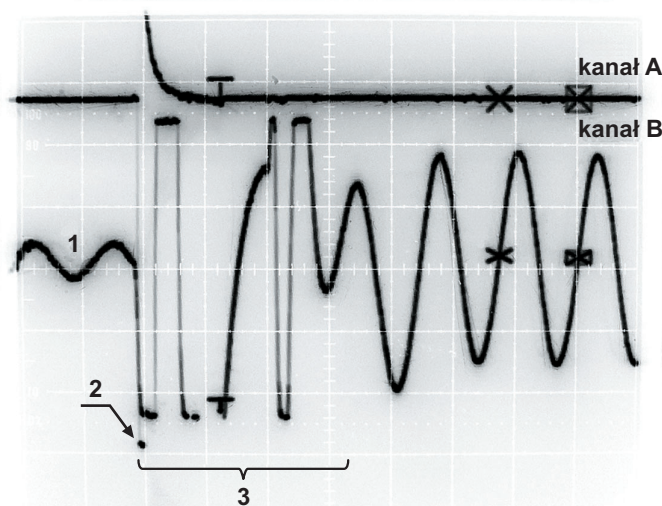
5. Próba synfazowego pobudzenia struny pomiarowej przetwornika do drgań

Aby sprawdzić możliwość synfazowego pobudzenia struny pomiarowej do drgań opracowano krótki program (609 bajtów) napisany w języku maszynowym mikroprocesora 87C51FA. Algorytm tego programu przedstawia rysunek 7. Należy zwrócić uwagę na możliwość ustawiania szerokości impulsu wzbudzającego drgania struny i ustawiania jego opóźnienia względem zbocza opadającego sygnału na wyjściu komparatora (rys. 4). Regulacja ta przeprowadzana jest manualnie przy pomocy 4 przycisków.

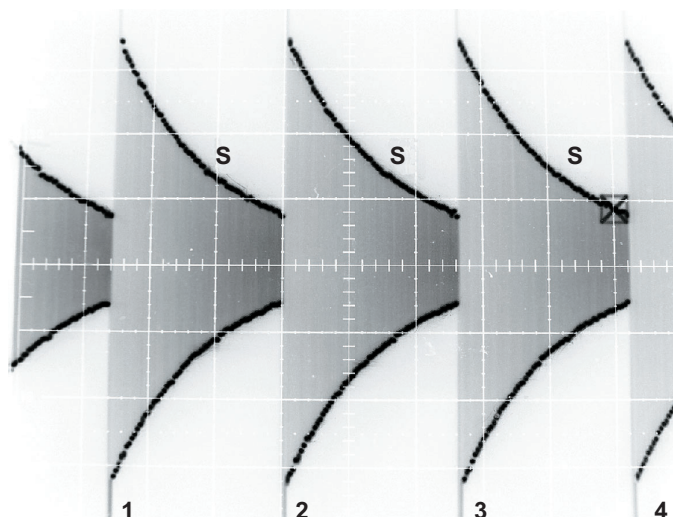


Rys. 7. Algorytm programu

Rysunki 8 i 9 przedstawiają negatywno sfotografowane przebiegi na ekranie oscyloskopu pracującego z włączonym trybem pamięciowym. W pierwszym przypadku wykorzystano jego obydwa kanały A i B. Podstawę czasu ustawiono na 1 ms/cm. Do kanału A, synchronizującego rejestrację podłączono wyjście generatora impulsów, do B – wyjście wzmacniacza (rys. 4). Dodane do fotografii opisy oznaczają kolejno: 1 – wzmocniony sygnał z przetwornika przed podaniem impulsu wzbudzającego, 2 – impuls wzbudzający, 3 – odpowiedź wzmacniacza na przebiegi nieustalone wywołane przez impuls, 4 – wzmocniony sygnał z przetwornika po podaniu impulsu. Widać, że mimo wprowadzenia do układu (rys. 4) podzespołu blokady wzmacniacza jest pewien przedział czasu 3, w którym wzmacniacz wskutek przebiegów nieustalonych na jego wejściu okresowo nasycy się. Oczywiście, do pomiaru ten przedział jest beużyteczny. Trwa on jednak dość krótko – 5 okresów drgań struny. W przyjętej metodzie pomiaru po każdym pobudzeniu następuje 100 pomiarów czasu trwania kolejnych 10 okresów drgań struny (rys. 7). Zatem przedział w którym pomiar nie jest możliwy obejmuje tylko niespełna 1% całego przebiegu. Na rysunku 9 widoczny jest tylko przebieg z wyjścia wzmacniacza. Podstawa czasu jest ustawiona na 0.5 s/cm. Widoczne są kolejne (1, 2, 3, 4) nasycenia się wzmacniacza w odpowiedzi na impulsy wzbudzające i wzmocnione drgania struny eksponencjalnie zanikające oznaczone literą ‘S’. Poziom tych drgań, mimo tymczasowego braku kontroli ich napięcia przy użyciu przetwornika analogowo – cyfrowego jest zależny od szerokości impulsu wzbudzającego, ale stabilny. Zatem w przypadku stałej współpracy miernika z jednym przetwornikiem strunowym kontrola napięcia sygnału może okazać się zbędna. Jednak celem miernika jest współpraca z różnymi przetwornikami o różniących się parametrach. Stąd pomiar poziomu napięcia dla ustalenia właściwej szerokości impulsu wzbudzającego może być konieczny.



Rys. 8. Pobudzenie struny do drgań. Podstawa czasu – 1 ms/cm

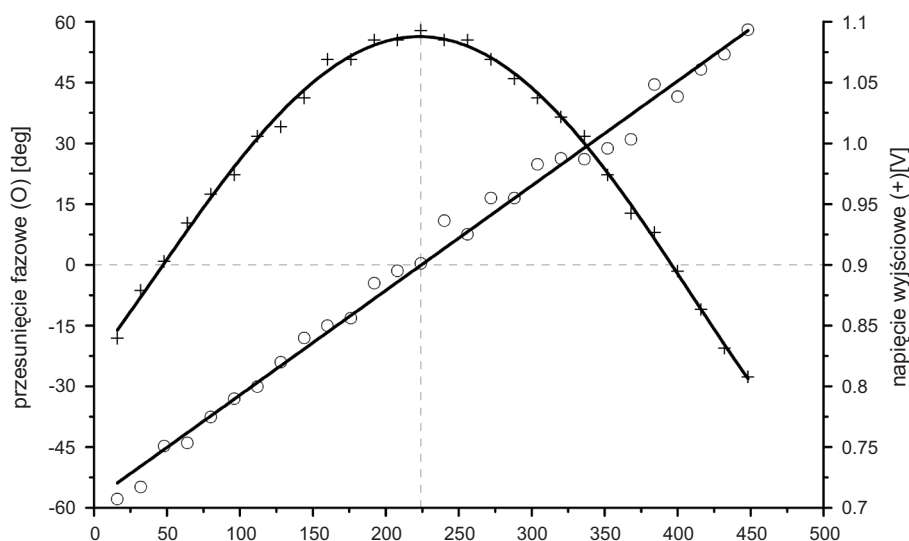


Rys. 9. Pobudzenie struny do drgań. Podstawa czasu – 0.5 s/cm

Obserwując przebiegi jak na rysunku 8 można optymalizować szerokość impulsu wzbudzającego i jego opóźnienie względem np. narastającego zbocza sygnału w miejscu '1' tak, aby przy jak najmniejszej szerokości impulsu '2' amplituda sygnału w miejscu '4' była jak największa. Na rys. 8 widoczne są kursory – dwa ukośne krzyżyki, które można przemieszczać wzdłuż wyświetlanych przebiegów. Możliwy jest też pomiar opóźnienia czasowego między nimi (w poziomie) i różnicy napięcia (w pionie). Ta opcja oscyloskopu pozwala na przybliżony pomiar np. przesunięć fazowych i amplitud.

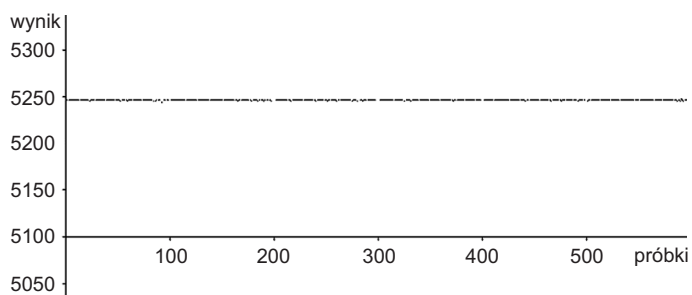
Rysunek 10 przedstawia wyniki testu, w którym mierzono przesunięcie fazowe pomiędzy sygnałem w miejscu '1' i w miejscu '4' (zbocza narastające) oraz amplitudę sygnału w miejscu '4'. Szerokość impulsu wzbudzającego ustalono na 80 μ s. Regulowane opóźnienie (na osi odciętych) ma charakter tylko kontrolny i reprezentuje tylko zmienną część rzeczywistego opóźnienia. Z wykresów wynika, że istnieje optymalna wartość tego opóźnienia wynosząca ok. 220 μ s. Dla tej wartości amplituda sygnału w miejscu '4' jest największa, a przesunięcie fazowe – zerowe. Zatem cała energia impulsu wzbudzającego zostaje zużyta na wzrost amplitudy drgań struny pomiarowej, a nie na zmianę ich fazy.

Tak obiecujące wyniki powyższych testów dowodzą, że synfazowe pobudzenie struny do drgań ciągłych jest realne, i że układ złożony z miernika strunowego i przetwornika do pomiarów wielkości statycznych może być przydatny do ciągłych pomiarów wielkości szybkozmiennych. Układ z rysunku 4 i opisany próbny program mikroprocesora umożliwiają transmisję każdego wyniku pomiarowego. Wyniki te, odebrane przez

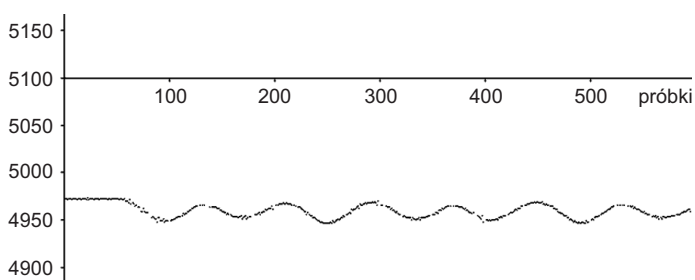


Rys. 10. Optymalizacja nastaw opóźnienia

komputer osobisty mogą posłużyć do ich graficznej reprezentacji. Rysunki 11 i 12 przedstawiają wykresy skopiowane z ekranu monitora. Przedstawiają one wyniki pomiarowe uzyskane podczas 6-cio krotnego pobudzenia struny. W obydwu przypadkach na osi odciętych są numery kolejnych próbek pomiaru czasu trwania 10 okresów drgań struny pomiarowej (100 na jedno pobudzenie struny), a na osi odciętych – wynik pomiaru. Częstotliwość taktu czasomierza wynosi 500 kHz, zatem jednostką jest 2 μ s. Na rysunku 11 przetwornik jest stale w pozycji spoczynkowej, natomiast na rysunku 12 – poddany jest wymuszeniu w przybliżeniu sinusoidalnie zmiennemu o częstotliwości ok. 1 Hz. Niewielkie fluktuacje wyników pomiarowych na rys. 11 spowodowane są najprawdopodobniej zakłóceniami. Niewidoczne są natomiast tendencje do okresowych zmian wyników spowodowane wahaniami amplitudy sygnału z przetwornika.



Rys. 11. Wyniki pomiarowe. Przetwornik w pozycji spoczynkowej



Rys. 12. Wyniki pomiarowe. Wymuszenie odkształcenia sinusoidalnie zmiennego

Podsumowanie

Zaprojektowany i skonstruowany prototypowy miernik strunowy spełnia postawione we wstępie założenie pomiaru temperatury przy użyciu uzwojenia elektromagnesu przetwornika strunowego jako termorezystora. Pomiar taki jest bardzo prosty, nieskomplikowane jest też wyposażenie miernika w podzespół do jego realizacji. Podzespół ten, którego wejście może być podłączane też do wyjścia toru wzmacniającego miernika może być użyty do kontroli procedury wzbudzenia drgań struny. Przez dobór energii impulsu wzbudzającego i momentu jego wygenerowania realizowane jest wzbudzenie synfazowe i generowanie przez strunę drgań ciągłych. Pozwala to na użycie zestawu miernik – przetwornik do pomiaru mechanicznych wielkości szybkozmiennych z częstotliwością próbkowania rzędu 100 Hz.

Prototypowy układ nie jest doskonały, jego wadą są fluktuacje wyników pomiarowych wywołanych najprawdopodobniej zakłóceniami (rys. 11). Układy analogowe miernika zmontowane zostały w wersji próbnej na płytce uniwersalnej. Brak w nich jakiegokolwiek ekranowania, niektóre podzespoły zakłócają inne (choćby przetwornica). Celem takiego montażu było jednak sprawdzenie działania nowo zaprojektowanego układu. Z pewnością montaż na specjalnie do tego zaprojektowanej płytce drukowanej i ekranowanie zwłaszcza wzmacniaczy zmniejszy poziom zakłóceń. Konieczne jest też opracowanie programu dla mikroprocesora umożliwiającego wykorzystanie wszystkich zalet zaprojektowanego układu elektronicznego. Opracowanie tego programu przewidziane jest na 2007 rok.

Stosowanie przetworników strunowych do ciągłych pomiarów wielkości mechanicznych szybkozmiennych nie jest pomysłem nowym. W latach 70-tych XX wieku w ofercie firm o zasięgu międzynarodowym takich jak niemiecki 'Maihak' czy francuski 'Telemac' znajdowały się analogowe urządzenia do pomiarów wielkości szybkozmiennych. Urządzenia te jednak bazowały na specjalnych przetwornikach wyposażonych w dwa elektromagnesy, które wraz z układem elektronicznym stanowią analogowy generator strunowy. Jest oczywiste, że taki przetwornik jest bardziej złożony i kosztowny w produkcji. Obecnie nie wydaje się, aby podobne urządzenia były produkowane. W ofercie znanych firm [5] brak jest przyrządów do pomiarów wielkości szybkozmiennych z wykorzystaniem przetworników strunowych.

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

Literatura

1. Kanciruk A. *Urządzenie do pomiaru wielkości fizycznych przy użyciu przetwornika strunowego* (komunikat). (w:) *Metrologia*. XXVI Międzyuczelniana Konf. Metrologów MKM '94. Opole-Jarnołtówek, 20-23 wrzesień 1994. Zesz. Nauk. Wyższ. Szkoły Inżynierskiej w Opolu nr 203; *Elektryka*, z. 40, T. 1, (1994), s. 173-178.
2. *Tablice fizyczno-astronomiczne*. Wydawnictwo Adamantan Warszawa 1995.
3. Horowitz P., Hill W. *Sztuka elektroniki*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności Warszawa 1997.
4. Kanciruk A. *Możliwości wykorzystania przetworników strunowych do pomiarów dynamicznych*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN 2003, t. 5, nr 2, s. 289-298.
5. www.slopeindicator.com, www.rstinstruments.com, www.geokon.com, www.roctest.com.

A prototypic instrument for measuring mechanical quantities and temperature

Abstract

In the paper a new instrument for measuring mechanical quantities and temperature is presented. It cooperates with a typical vibrating-wire transducer. Temperature can be measured by means of the transducer electromagnet. Its coil is made of copper wire and can function as a thermoresistor. The instrument subunits make it possible to invoke wire vibrations in a special, in-phase way. Thus, the vibrations are continuous and suitable for measuring fast changing quantities.

Keywords: metrology, electronics, geotechnical engineering

Recenzent: Prof. dr hab. *Jan Kielbasa*, AGH, IMG PAN