

Uniwersalny strunowy system pomiarowy

ADAM KANCIRUK

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

Streszczenie

Uniwersalny strunowy system pomiarowy to prototypowy przyrząd badawczy. Składa się on z aparatury elektronicznej i przetworników strunowych. Aparatura podzielona jest na 6 zasadniczych modułów. Cztery z nich, bezpośrednio współpracujące z przetwornikami strunowymi stanowią modyfikację uniwersalnego modułu strunowego opracowanego w latach 2006-2007. Ich zadaniem jest niezależny pomiar i rejestracja czterech wielkości mechanicznych, takich jak np. przemieszczenie. Uzupełniającym je modułem jest czterokanałowy miernik temperatury. Szósty moduł – nadrzędny obecnie jest w fazie projektowej. Umożliwi on koordynację rejestracji danych pomiarowych pozostałych modułów i transmisję ich do miejsca przeznaczenia. Opracowano również prototyp dźwigniowego ekstensometru strunowego do pomiarów przemieszczeń gruntu. Mimo zastosowania do jego budowy powszechnie dostępnych materiałów i półfabrykatów cechuje się on zadowalającymi parametrami metrologicznymi.

Słowa kluczowe: metrologia, elektronika, geotechnika

Wstęp

Podziemna eksploatacja górnicza powoduje deformacje powierzchni i tym samym oddziałuje niekorzystnie na środowisko naturalne i gospodarke człowieka [1]. Ze względów ekonomicznych nie jest możliwe wyeliminowanie jej z życia. Konieczne jest zatem minimalizowanie jej skutków. Do tego celu korzystna jest stała obserwacja stanu powierzchni na terenach górniczych przez prowadzenie odpowiednich pomiarów. Powszechnie stosowane pomiary geodezyjne, wykonywane najczęściej ręcznie, można uzupełnić pomiarami tensometrycznymi. Przy mniejszych bazach pomiarowych zapewniają one wyższą dokładność pomiarów przemieszczeń gruntu, a w wersji zautomatyzowanej również nieporównanie wyższą częstotliwość ich przeprowadzania. Zastosowanie odpowiedniej aparatury z pewnością pozwoli na ocenę wpływu na stan powierzchni zjawisk towarzyszących podziemnej eksploatacji zarówno o charakterze wolnozmennym (powolne osiadanie), jak też i dynamicznym (wstrząsy).

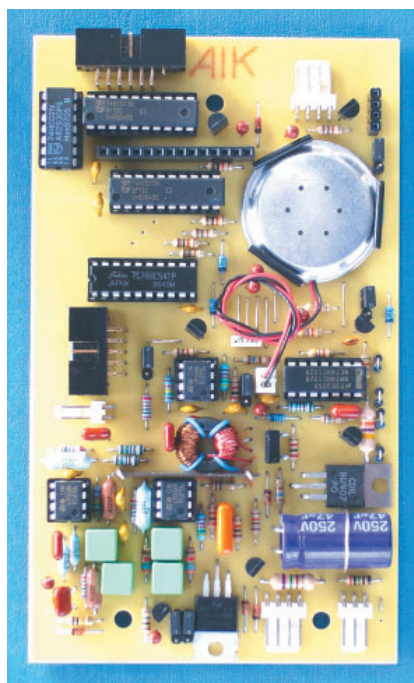
Dotychczas prowadzone w Pracowni Odkształceń Skał Instytutu Mechaniki Górotworu PAN w Krakowie pomiary tensometryczne prowadzone na terenach objętych podziemną eksploatacją górnictwem miały na celu określenie wpływu zjawisk o charakterze wyłącznie wolnozmennym. Do pomiarów wykorzystywana była aparatura własnej konstrukcji, składająca się ze znakomych przetworników strunowych przemieszczenia – ekstensometrów typu TTCS 4000.3 i TTCS 2000 [2] i elektronicznych przyrządów odczytowych, zarówno analogowego jak i cyfrowych. Przyrząd analogowy, zawierający lampę oscyloskopową, przy pomocy której porównywano częstotliwości drgań strun wykorzystując kreślone na jej ekranie figury Lissajous ma obecnie znaczenie historyczne i od wielu lat nie jest używany. Jego następcy – cyfrowe mierniki strunowe zbudowane w oparciu o układy scalone małej i średniej skali integracji czyniły pomiary dokładniejszymi, choć nadal wykonywanymi ręcznie, a zatem i sporadycznie. Dopiero pierwsze mierniki zbudowane z wykorzystaniem układów mikroprocesorowych pozwoliły na prowadzenie obserwacji zmian przemieszczeń gruntu z powtarzaniem pomiarów częściej niż raz na dobę [3]. Ich wyniki gromadzone były w wewnętrznej pamięci i w okresach ok. 1-miesięcznych przepisywane do komputera typu lap-top. W 2004 roku wykonano, a następnie zainstalowano miernik, który wykorzystując sieć telefonii komórkowej GSM przekazuje dane pomiarowe na bieżąco do komputera stacjonarnego, gdzie bezpośrednio są wykorzystywane do obliczeń [4].

Uzyskane dotychczas zadowalające wyniki pomiarowe potwierdzają przydatność opracowanej aparatury, dlatego jest ona rozwijana nadal. W latach 2006 i 2007 nakreślono ogólny zamysł modułowego strunowego urządzenia do monitorowania stanu powierzchni na terenach górniczych i opracowano jego podstawowy moduł, bezpośrednio współpracujący z przetwornikiem strunowym. W roku bieżącym moduł ten zmodyfikowano, zbudowano jego 4 egzemplarze. Ponadto dostosowano opracowany wcześniej moduł MPR [5] do pomiaru temperatury w miejscu posadowienia ekstensometrów. Skonstruowano również prototypowy dźwigniowy ekstensometr.

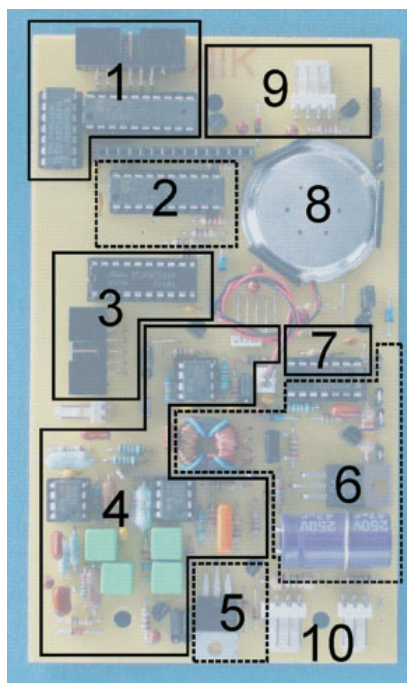
1. Uniwersalny moduł strunowy UMS-3

Jak wspomniano we wstępie, 4 egzemplarze uniwersalnego modułu strunowego zostały wykonane na bazie modułu opracowanego wcześniej, nieco tylko zmodyfikowanego. Zmieniono układy niektórych podzespołów poprawiając ich parametry, a także umożliwiając wykonanie płytki analogowej (rys. 1) w dalej opisanej wersji uproszczonej. Płytkę w wersji pełnej zawiera następujące podzespoły (rys. 2): 1 – port procesora nadrzędnego, 2 – układ sterowania, 3 – port modułu pomiaru temperatury, 4 – wzmacniacz z filtrem pasmowo – przepustowym, 5 – układ blokady wejścia, 6 – przetwornica napięcia i wzmacniacz impulsu wzbudającego, 7 – komparator, 8 – sygnalizator akustyczny, 9 – układy zasilania. Liczbą 10 oznaczono złącza przetwornika strunowego. Zachowano możliwość pracy w trzech trybach: z pobudzaniem struny przetwornika (ekstensometru) do drgań gasnących pojedynczym impulsem, z pobudzaniem synfazowym i pobudzaniem ciągłym. Do pomiaru zmian przemieszczenia gruntu o charakterze zarówno wolnozmiennym jak i dynamicznym szczególnie korzystny jest tryb ostatni. Wymaga jednak zastosowania przetworników dostosowanych do pobudzania ich strun do drgań ciągłych, a więc zawierających po 2 elektromagnesy. Przełączenie pomiędzy trybem z pobudzaniem ciągłym a pozostałymi trybami jest obecnie realizowane przy pomocy 6 zworek. W przypadku planowanego zastosowania przetworników jw., takie podzespoły płytki analogowej jak przetwornica napięcia, wzmacniacz impulsów wzbudających, blokada wejścia i sterowanie nie będą używane. Podzespoły te na rysunku 2 oznaczone są obwiednią z linii przerywanej.

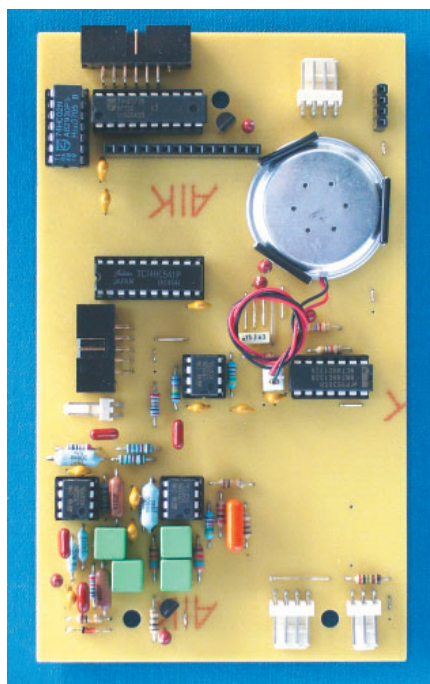
Możliwe jest zatem ich pominięcie, tak jak obrazuje rysunek 3, co czyni urządzenie prostszym i tańszym. Rysunek 4 przedstawia płytkę cyfrową – mikroprocesora modułu. Jest ona zaadoptowana z wcześniej opracowanych urządzeń – modułów typu MPR lub MTD [5]. Pozbawiona jest zespołu 4 przycisków elektrycznych i wyświetlacza, choć zawiera łączówkę do opcjonalnego jego dołączenia. Przy pomocy połączeń drutowych zmieniono przyporządkowanie niektórych końcówek portów mikroprocesora.



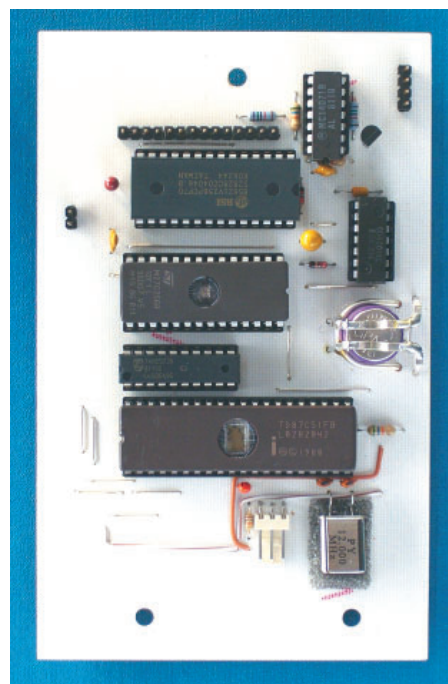
Rys. 1. Płytkę analogową „pełną”



Rys. 2. Podzespoły płytki analogowej

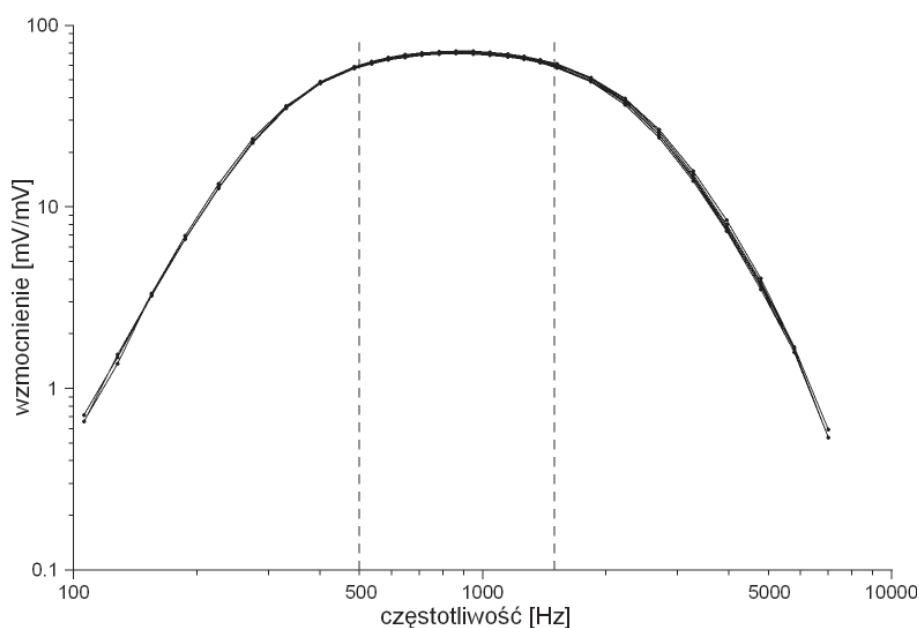


Rys. 3. Uproszczona płytka analogowa

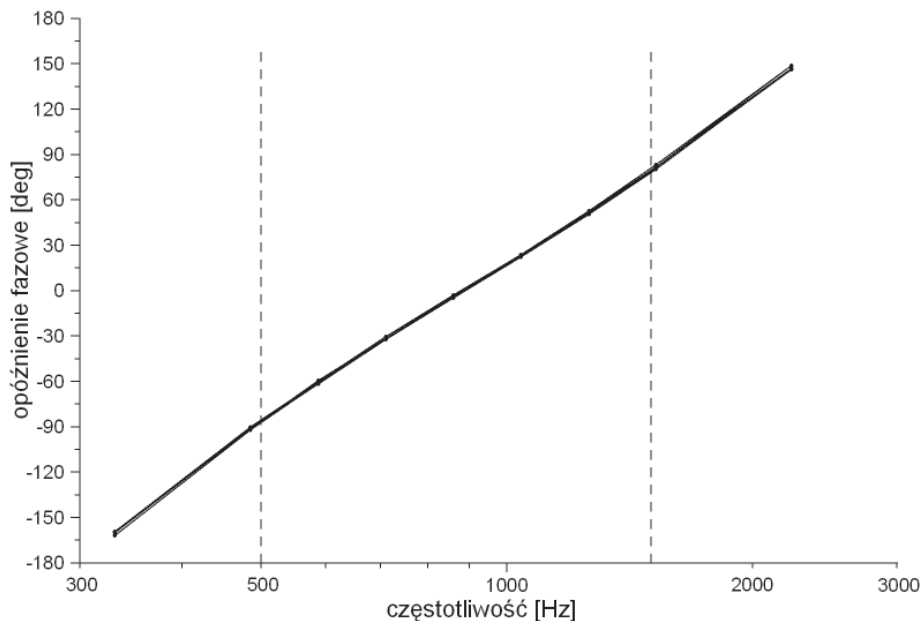


Rys. 4. Płytkę mikroprocesora

Podstawowym podzespołem płytki analogowej jest wzmacniacz z czterobiegunowym pasmowo – przepustowym filtrem Bessela. Ze względu na typowe częstotliwości drgań strun pomiarowych ustalono granice pasma przepustowego na 500÷1500 Hz. Zastosowano elementy filtra z tolerancją 1% (rezystory) i 5% (kondensatory). Przeprowadzono badanie parametrów wzmacniacza z zablokowanym układem automatycznej regulacji wzmocnienia. Mimo zaniechania dokładniejszej selekcji elementów, parametry wszystkich 4 nowoskonstruowanych wzmacniaczy są bardzo zbliżone do parametrów wzmacniacza wykonanego w roku ubiegłym, w którym elementy dobrano bardzo rygorystycznie (z tolerancją poniżej 0.5%). Rysunek 5 przedstawia charakterystyki amplitudowe wszystkich 5 wzmacniaczy, a rysunek 6 – ich charakterystyki fazowe. Wykresy niemal pokrywają się. Dokładna selekcja elementów nie jest zatem konieczna.



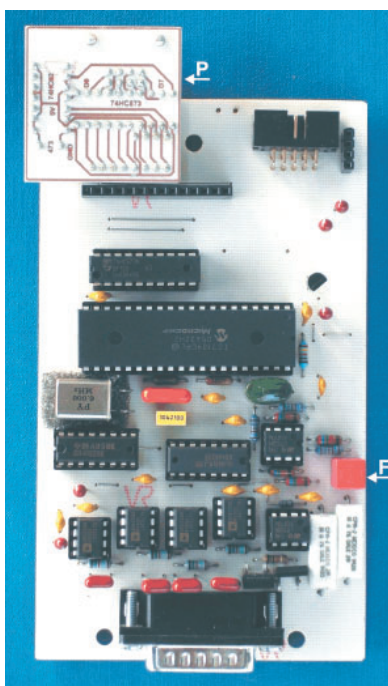
Rys. 5. Charakterystyki amplitudowe wzmacniaczy



Rys. 6. Charakterystyki fazowe wzmacniaczy

2. Moduł pomiaru temperatury MT

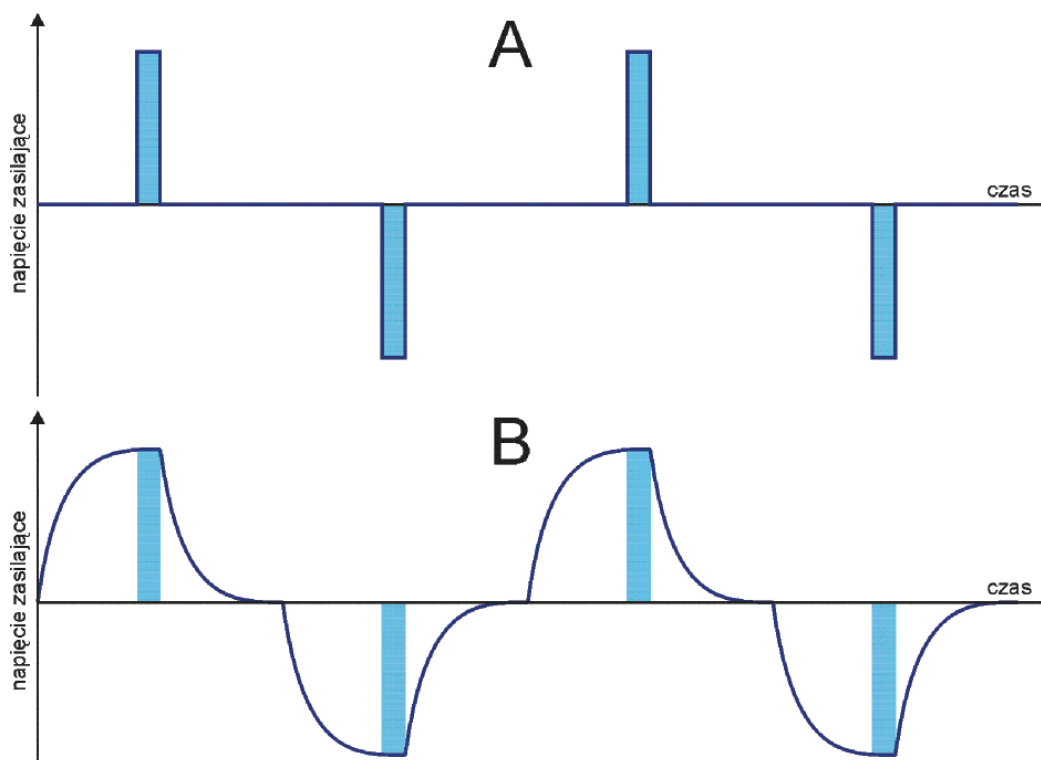
Sygnały wyjściowe urządzeń elektromechanicznych jakimi są ekstensometry, nie są niezależne od ich temperatury otoczenia. Jej pomiar zatem może być dodatkowo wykorzystywany do termicznej korekty wskazań ekstensometrów. Każdy z nich zawiera swoisty termorezystor – jest nim nawinięta miedzianym drutem cewka wzbudzająca drgania struny. W przypadku ekstensometrów dostosowanych do pracy z drganiami ciągłymi rezystancja każdej podwójnej cewki (odbierającej drgania i wzbudzającej) w temperaturze 20 °C jest równa ok. 2 kΩ. Współczynnik temperaturowy konduktancji czystej miedzi wynosi $3.9 \cdot 10^{-3}$ 1/K [6]. Zatem rezystancja cewki w temperaturze -20°C zmniejszy się do ok. 1.8 kΩ, a w temperaturze 60°C wzrośnie do ok. 2.3 kΩ. Gdyby cewkę uzupełnić 3 rezystorami po 2 kΩ niewrażliwymi na temperaturę do układu mostka Wheatstone’a, to przy zasilaniu go napięciem o wartości 2 V jego napięcie wyjściowe w zakresie temperatur jw. zmieniłoby się w granicach 0.945 V i 1.063 V, a więc o ok. 0.12 V. Zmiany tego rzędu z powodzeniem może zmierzyć zmodyfikowany moduł MPR [5].



Rys. 7. Płytką analogową modułu MT

Rysunek 7 przedstawia płytkę analogową modułu MT. Wprowadzone modyfikacje w porównaniu z modułem MPR polegają na dodaniu portu łączności z modułami UMS-3 „P” (jest to wprowadzie podzespół cyfrowy, ale ze względów konstrukcyjnych zamontowany na tej płytce) i prostego filtra RC napięcia zasilającego mostki pomiarowe „F”.

W modułach MPR mostki pomiarowe zasilane są napięciem stałym, ale o zmieniającej się okresowo polaryzacji (rys. 8a). W module MT tę zasadę zachowano, ale przebieg napięcia zasilającego, to sygnał prostokątny po przejściu przez filtr dolnoprzepustowy RC o stałej czasowej ok. 0.2 s (rys. 8b). W ten sposób, przebieg ten został pozbawiony stromych zboczy i zawiera tylko harmoniczne o bardzo niskiej częstotliwości (kilka Hz). Dzięki temu w sposób niezauważalny zakłóca odbywający się w tym samym czasie pomiar okresu drgań struny pomiarowej dokonywany przez moduł UMS-3. Zatem pomiar temperatury może być przeprowadzany bez konieczności zawieszania pracy modułu UMS-3.



Rys. 8. Zasilanie mostka pomiarowego w module MPR (a) i MT (b).
Zacienione prostokąty oznaczają okresy wykonywania pomiarów

Wykonane 4 moduły UMS-3 i moduł pomiaru temperatury MT stanowią elementy składowe systemu do monitoringu deformacji terenu (rys. 9), którego idea została nakreślona w pracy [6].

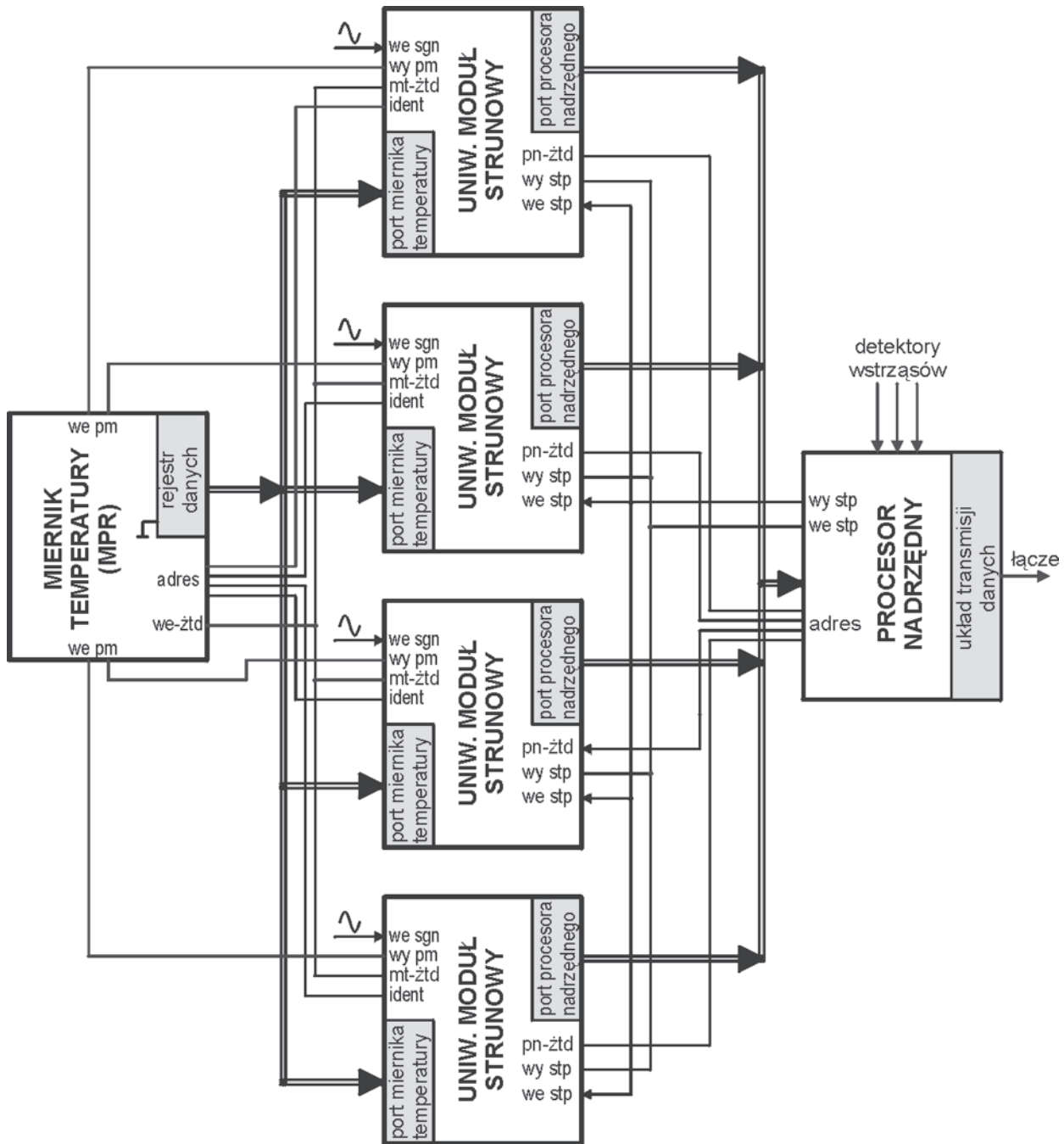
3. Prototyp dźwigniowego ekstensometru gruntowego

Jakość całego toru pomiarowego jest w zasadniczy sposób zależna od użytego przetwornika wejściowego. Dokonuje on konwersji wielkości nieelektrycznej, na mierzoną przez dalsze układy wielkość elektryczną. Nawet najstaranniej dopracowana część elektroniczna toru nie zapewni jego zadowalającej jakości, gdy użyty zostanie przetwornik o niedostatecznych parametrach metrologicznych. Jak wspomniano we wstępie, w latach 70-tych XX wieku opracowano w Pracowni Odkształceń Skał IMG PAN bardzo dobre ekstensometry typu TTCS 4000.3 i TTCS 2000, które w ilości ok. 50 sztuk zostały wyprodukowane przez jeden z nieistniejących już, wiodących zakładów przemysłowych Krakowa. Ich konstrukcja nie była skomplikowana, jednakże wykonanie poszczególnych elementów ze względu na ich kształt było pracochłonne i wymagało użycia m.in. precyzyjnych tokarek i frezarek. Przyrządy te przeszły niejednokrotnie kilka cykli instalacji w gruncie i deinstalacji i obecnie są zbyt mocno zużyte i skorodowane, aby mogły służyć nadal.

Obecnie w handlu powszechnie dostępne są materiały i półfabrykaty, które umożliwiają konstrukcję różnych urządzeń, bez konieczności angażowania specjalistycznego parku maszynowego. Są one produkowane masowo, dlatego koszt ich zakupu jest niski. Mimo przeznaczenia do powszechnego użytku wykonane są wystarczająco dokładnie, nawet z precyzją wystarczającą do budowy przetworników pomiarowych.

Rysunek 10 obrazuje wykonany z wykorzystaniem różnych profili (kątowniki, płaskowniki, gwintowane szpilki budowlane), śrub, kawałków blachy i płaskich sprężyn, magnesów, drutu nawojowego oraz struny gitarowej prototypowy przetwornik przemieszczenia. Jest on typu dźwigniowego (wychyłowego) podobnie jak przetworniki TTCS 4000.3. Dzięki prostej konstrukcji, jedynymi obrabiarkami użytymi do jego budowy były wiertarka kolumnowa i elektryczna piła tarczowa.

Zasadniczymi elementami przetwornika są: korpus 1, przegub 2, dźwignia 3, zaciski struny 4, elektromagnes (lub ich para) 5 i struna 6. Korpus złożony jest z czterech szpilek (gwintowanych prętów) *s6* połączonych sztywno 3 jarzmami z blachy *jk*. Do środkowego jarzma przykręcony jest przegub 2, który stanowią 2 płaskie sprężyny zaciśnięte w 4 odcinkach kątownika. Do dolnej części przegubu przymocowany

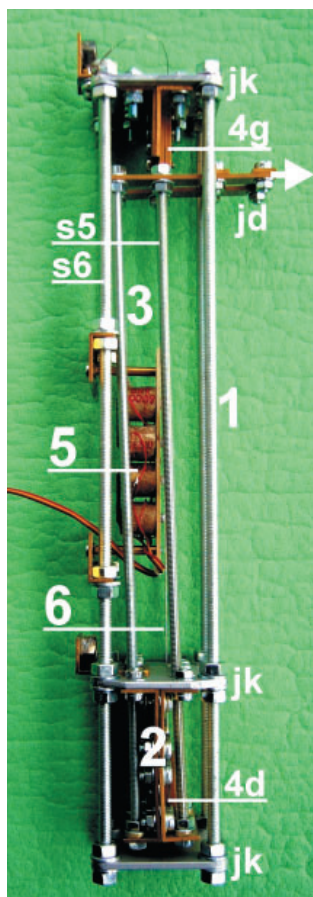


Rys. 9 Schemat blokowy systemu do monitoringu deformacji terenu

jest dolny zacisk struny 4*d* i dźwignia 3 o przełożeniu 1:40. Jest ona wykonana podobnie jak korpus z czterech szpilek 5*s*, połączonych jarzmem 4*jd*. Górny zacisk 4*g* struny przymocowany jest do górnego jarzma korpusu. Elektromagnes 5 przykręcony jest do 2 szpilek korpusu za pośrednictwem 2 odcinków kątownika.

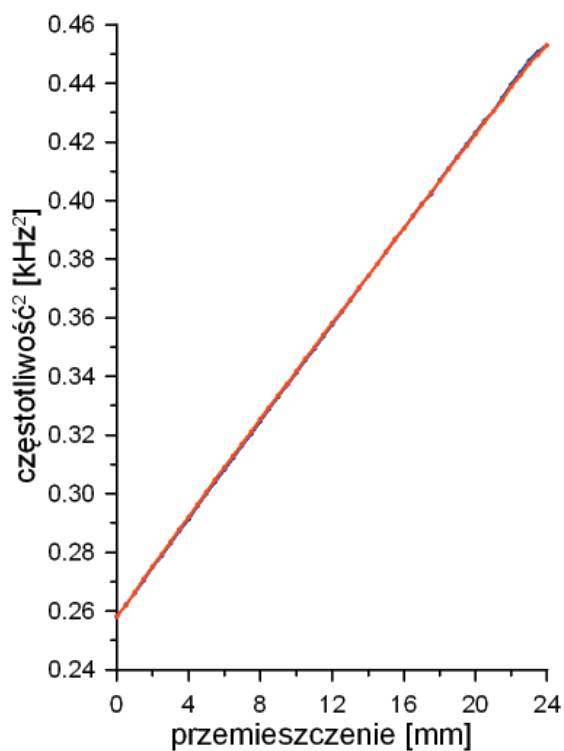
Jarzmo 4*jd* ma możliwość przemieszczania się w kierunku wskazanym strzałką o 24 mm, powodując wychył dźwigni i w konsekwencji zmianę napięcia struny 6 i zmianę częstotliwości jej drgań własnych. Drgania te zamieniane są na sygnał elektryczny, ciągły w przypadku zastosowania pary elektromagnesów jak na rysunku, lub eksponencjalnie zanikający przy użyciu pojedynczego elektromagnesu.

Wymiary prototypowego ekstensometru dźwigniowego dobrane są tak, aby mógł być on zamontowany w obudowie złożonej z typowych elementów (trójnik, rura, mufa) używanych w instalacjach wodno-kanalizacyjnych. Wykonane są one z bardzo odpornego na korozję w gruncie winiduru i posiadają fabryczne uszczelnienia. Przedstawiona konstrukcja może być zatem tania, odporna na wpływ środowiska i w zupełności zadowalająca pod względem parametrów metrologicznych do prac badawczych.

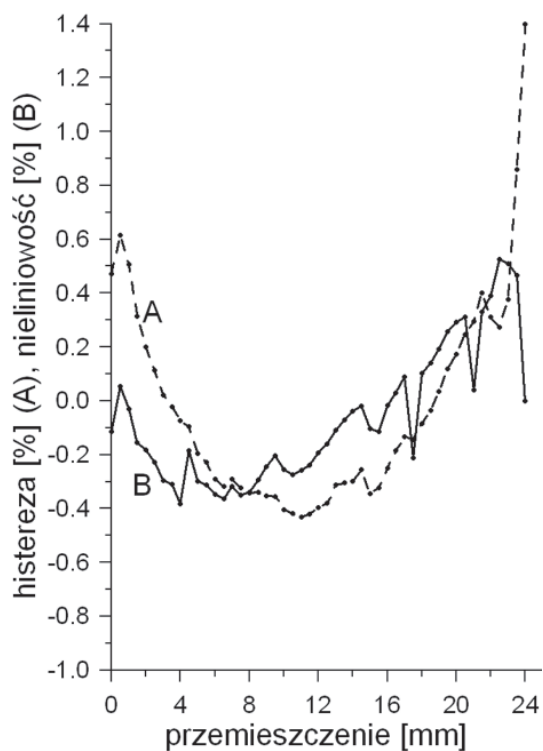


Rysunek 11 przedstawia charakterystykę przetwornika. Została ona zdjęta przy użyciu tymczasowego zestawu wykorzystującego śrubę mikrometryczną. Przemieszczenie zmieniano od 0 do 24 mm i z powrotem, ze skokiem 1 mm. Charakterystyka jest w przybliżeniu liniowa. Dla lepszego zobrazowania histerezy i nieliniowości sporządzono rysunek 12. Obydwie te wielkości w zasadzie nie przekraczają +0.6% i -0.4%. Jedynie przy końcu zakresu nieliniowość wyraźnie wzrasta.

Rys. 10. Układ proto-typowego ekstensometru dźwigniowego



Rys. 11. Charakterystyka przetwornika



Rys. 12. Histereza i nieliniowość przetwornika

4. Podsumowanie

Wykonane w roku bieżącym moduły uniwersalnego strunowego systemu pomiarowego stanowią znaczny postęp prac mających na celu możliwość automatycznego monitoringu stanu powierzchni lub budowli na terenach objętych podziemną eksploatacją górnictwem. W następnym roku planowane jest uzupełnienie systemu o moduł procesora nadrzędnego, oraz wykonanie kompleksowego oprogramowania systemu. Przewidziana jest też pierwsza instalacja systemu wraz z rozetą tensometryczną na terenie Górnego Śląska.

Praca została wykonana w roku 2008 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

1. S. Szpetkowski: *Pomiary deformacji na terenach górniczych*. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice 1968.
2. J. Gustkiewicz i inni: *Some advancements in soil strain measurement methods with special reference to mining subsidence*. Mining Science and Technology, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, The Netherlands.
3. J. Rogowska i inni: *Wpływ przestojów frontu eksploatacji podziemnej na przebieg przemieszczeń i deformacji terenu*. Instytut Mechaniki Górniczej PAN, seria: rozprawy, monografie, Kraków 2004.
4. A. Kanciruk: *Telemetryczny miernik strunowy TMS-1 i przykład jego zastosowania do pomiaru przemieszczeń gruntu*. Przegląd Górniczy, Nr 1, 2007.
5. A. Kanciruk: *Modułowa aparatura do pomiaru i rejestracji wielkości fizycznych charakterystycznych dla badań próbek skalnych*. Prace Instytutu Mechaniki Górniczej PAN, t. 1, nr 3-4, s. 281 (1999)
6. A. Kanciruk: *Uniwersalny strunowy moduł pomiarowy i jego oprogramowanie*. Prace Instytutu Mechaniki Górniczej PAN, t. 9, nr 1-4, s. 113 (2007).

Universal vibrating-wire system

Abstract

The universal vibrating-wire system is a prototype research instrument. It consists of electronic apparatus and four transducers. The apparatus can be divided into 6 main modules. Four of them cooperate directly with the transducers. They can perform independent measurements and recording of four mechanical quantities, like for example displacement. The fifth module is a four-channel temperature meter. The last one, coordinating functioning of all the above mentioned modules is in project phase at present. A prototype model of a lever-type transducer was also constructed. In spite of using cheap, popular materials it has good metrological parameters.

Keywords: metrology, electronics, geotechnics

Recenzent: Prof. dr hab. *Jan Kielbasa*, Instytut Mechaniki Górniczej PAN