

# Strunowy system pomiarowy do badań odkształceń posadzki hangaru lotniczego

ADAM KANCIRUK

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

## Streszczenie

Obecnie na terenie Międzynarodowego Portu Lotniczego Katowice w Pyrzowicach trwa przebudowa hangaru lotniczego. Wymianie ulega m in. część jego posadzki. W związku z tym, zaproponowano zainstalowanie w jej strukturze kilku ekstensometrów strunowych do pomiaru odkształceń. Ekstensometry zostaną połączone z urządzeniem pomiarowo - rejestrującym, zamontowanym w dogodnym ze względu na dostęp miejscu. W opracowaniu przedstawiono opis wyżej wymienionych przyrządów, ich charakterystyki oraz plan instalacji.

**Słowa kluczowe:** elektronika, miernictwo, geotechnika

## 1. Wstęp

W sprawozdaniu z prac badawczych wykonanych w roku 2003 [1] autor przedstawił możliwość zastosowania przetworników strunowych do pomiarów odkształceń o charakterze statycznym i dynamicznym nawierzchni dróg kołowych. Odkształcenia o charakterze statycznym wymuszane były procesami wolno-zmiennymi, takimi jak np. osiadanie drogi, starzenie materiału nawierzchni lub sezonowe zmiany rozszerzalności cieplnej. Odkształcenia o charakterze dynamicznym wymuszane były procesami zachodzącymi w czasie normalnej eksploatacji nawierzchni, a zwłaszcza ruchem pojazdów o znacznym tonażu. Problem ten powrócił w roku 2010, w nieco innym charakterze i skali.

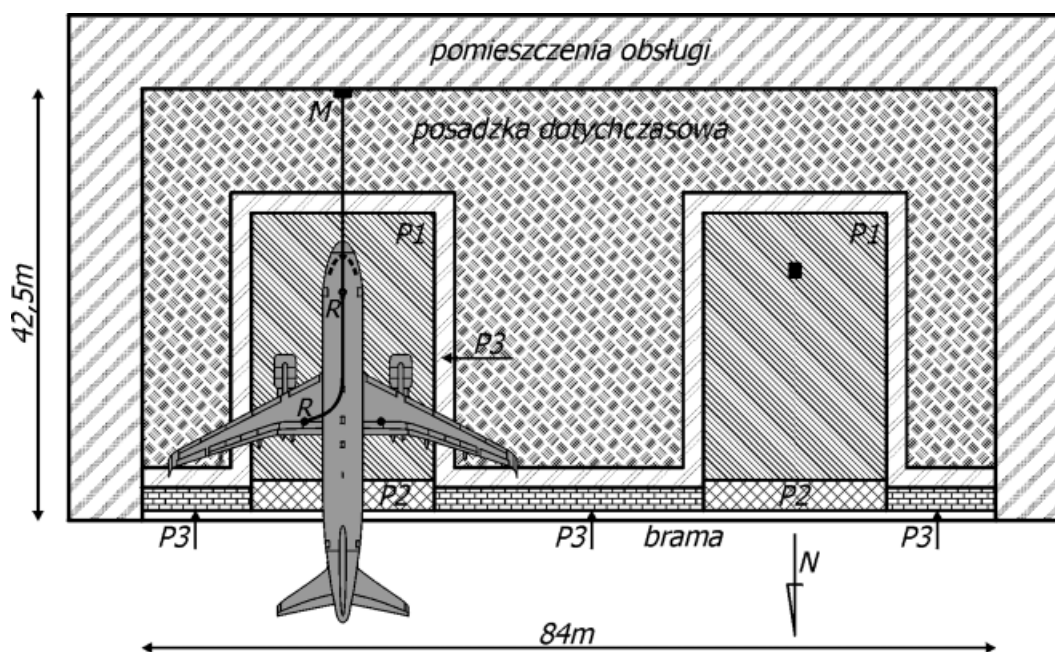
W czasie drugiej wojny światowej niemieckie władze okupacyjne wybudowały w rejonie wsi Pyrzowice – Mierzęcice – Zendeck, w północnej części obecnego województwa śląskiego, wojskowe lotnisko zapasowe [2]. W roku 1945 zostało ono przejęte przez armię radziecką, która je odbudowała po zniszczeniach wojennych. W tym czasie najprawdopodobniej został wybudowany duży, stojący do dziś hangar. Następnie, w latach 1949-1987 lotnisko było eksploatowane przez polski 39 Pułk Lotnictwa Myśliwskiego. W latach 90-tych XX wieku lotnisko przekazano władzom cywilnym i na jego bazie zbudowano Międzynarodowy Port Lotniczy Katowice w Pyrzowicach.

Wspomniany hangar zbudowany został dla samolotów myśliwskich o masie startowej nie przekraczającej 9000 kg. Obecnie poddawany jest on pracom modernizacyjnym, w wyniku których będzie mógł przyjmować samoloty pasażerskie typu Airbus A320, o masie ok. 42400 kg (bez pasażerów, ładunku i paliwa, maksymalna masa startowa to 77000 kg) [2]. Dotychczasowa posadzka okazała się dla A320 zbyt mało wytrzymała, dlatego postanowiono ją częściowo wymienić.

W związku ze wspomnianymi pracami modernizacyjnymi Instytut Mechaniki Górotworu PAN (dalej w skrócie: IMG PAN) w Krakowie zaproponował zarządcy i głównemu właścicielowi MPL Katowice Górnośląskiego Towarzystwa Lotniczego SA (dalej w skrócie: GTL SA) zainstalowanie w hangarze systemu pomiarowego do badań odkształceń posadzki o charakterze statycznym i dynamicznym. System ten składałby się z pewnej ilości ekstensometrów strunowych, również strunowych termometrów i urządzenia pomiarowo-rejestrującego. Zarząd GTL SA pozytywnie rozpatrzył propozycję IMG PAN i dnia 19.05 wystosował stosowne pismo, w wyniku którego zawarto porozumienie.

## 2. Plan posadzki hangaru

Rysunek 1 przedstawia uproszczony plan posadzki hangaru po jego modernizacji. Został on sporządzony na podstawie dokumentacji udostępnionej przez GTL SA. Jak wspomniano, wymiary hangaru są znaczne, a płyta postojowa – posadzka żelbetowa ma długość 84 m, a szerokość – 42.5 m. Bez trudu może ona pomieścić 2 samoloty typu Airbus A320. Niestety hangar jest zbyt niski dla ich usterzenia pionowego, dlatego tylna część samolotów będzie musiała pozostawać na zewnątrz. Posadzka z trzech stron otoczona jest pomieszczeniami obsługi.



Rys. 1. Plan posadzki hangaru po modernizacji

Projektant zaproponował tylko częściową wymianę posadzki, w miejscach narażonych na duże obciążenia. Są to 2 płyty *P1*, o wymiarach  $26.35 \times 18$  m, 2 płyty *P2* o wymiarach  $18 \times 4$  m i 4 płyty *P3*: jedna o szerokości 2 m, buforowa pomiędzy płytami *P1* i płytą już istniejącą oraz 3 prostokątne płyty w strefie bram hangaru. Do budowy wszystkich płyt jest używany taki sam beton. Ich podbudowa jest też taka sama. Płyty różnią się tylko zbrojeniem i rozmieszczeniem szczelin dylatacyjnych.

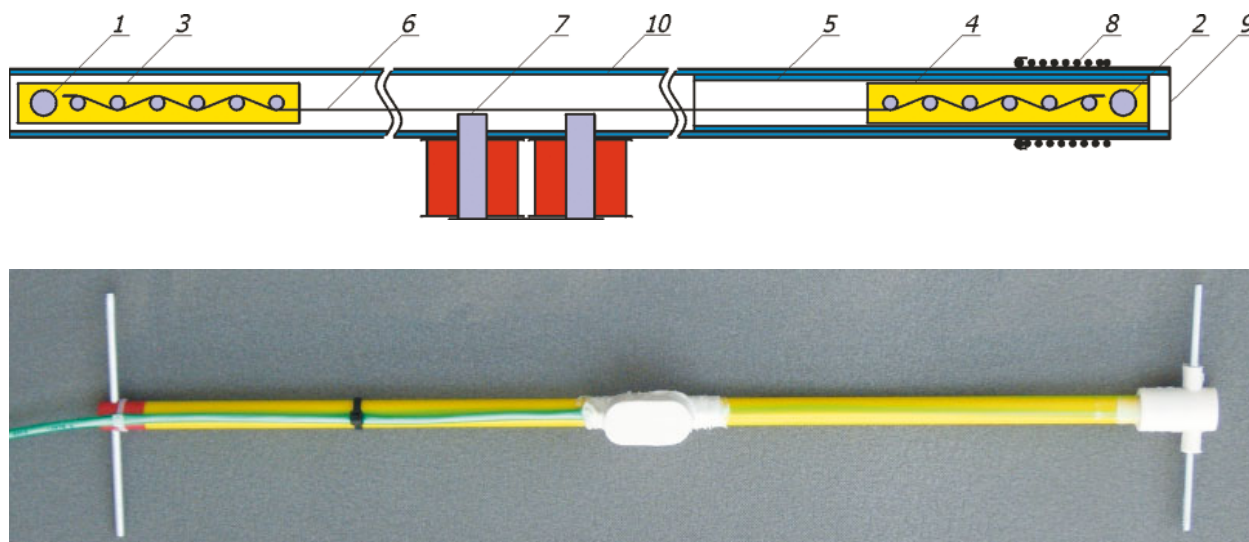
Na uwagę zasługują małe kwadraty o boku 1.3 m usytuowane w przedniej części płyt *P1* (na rysunku uwidoczniony tylko w prawej płycie). Oznaczają one „skrzynie żelbetowe na elementy obsługi statków powietrznych”. Wtaczany do hangaru samolot powinien zająć takie położenie, aby jego przednia goleń podwozia znalazła się ok. 2.5 m za skrzynią.

Jest oczywiste, że największe odkształcenie posadzki będzie miało w miejscach, w których opierać się będą o nią koła goleni samolotu. Dlatego, ze strony IMG PAN zaproponowano zainstalowanie 2 trójkątnych równobocznych rozet pomiarowych: jednej w miejscu kół goleni przedniej, drugiej – jednej z goleni bocznych. Miejsce kół goleni bocznej określono na podstawie wymiarów A320, choć można to zrobić tylko w przybliżeniu. Nie jest wymagane, aby oś kadłuba wtaczanego samolotu pokrywała się z osią płyty *P1*.

## 3. Konstrukcja ekstensometru

Do budowy rozet pomiarowych zaprojektowano i wykonano 6 sztuk ekstensometrów strunowych o bazie 500 mm. Ekstensometry te mają prostą budowę, bazują na tanich, popularnych materiałach, a do ich wykonania wystarczy użycie podstawowych narzędzi ślusarskich. Hermetyczna budowa ekstensometrów pozwala na zatapianie ich w półpłynnej masie betonowej (rys. 2). Po jej związaniu, odkształcenie betonu przenoszone jest za pośrednictwem 2 kotwi: 1 i 2 i zacisków 3 i 4 na strunę pomiarową 6 o średnicy ok. 0.3 mm.

Jeden z zacisków zamocowany jest sztywno w korpusie, który stanowi rurka aluminiowa o średnicy 12 mm i ściance 1 mm 10. Drugi zacisk zamocowany jest też w rurce 5, ale o średnicy 10 mm. Wraz z nią może przemieszczać się osiowo w rurce – korpusie na odcinku ok. 2 mm. Czynna długość struny wynosi 410 mm. Wstępne jej naprężenie do 700-750 MPa (odpowiada ono odkształceniu struny ok. 3.3‰) zapewnia spiralna sprężyna 8 opierająca się poprzez zaczep 9 o koniec korpusu i kotew 2. W połowie długości czynnej struny znajduje się dwucewkowy elektromagnes 7. Aby korpus 10 nie przywierał do betonu pokrywany jest koszulką termokurczliwą, a elektromagnes 7 i sprężyna 8, grubą warstwą gumy silikonowej. W ten sposób ekstensometr po zatopieniu związany jest z betonem „na sztywno” tylko kotwami 1 i 2.



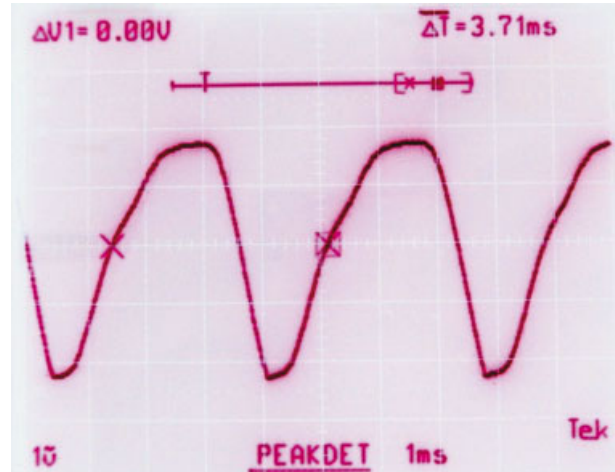
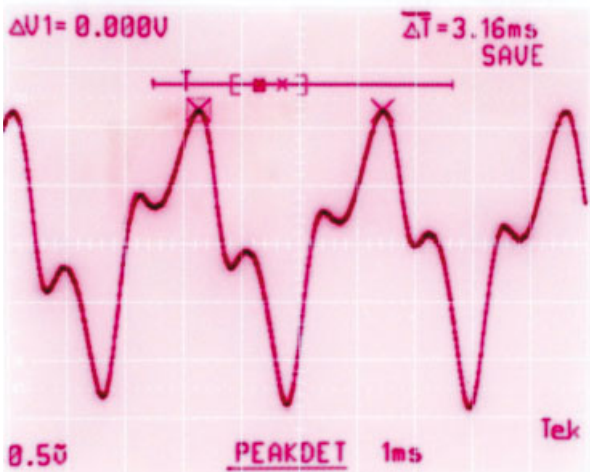
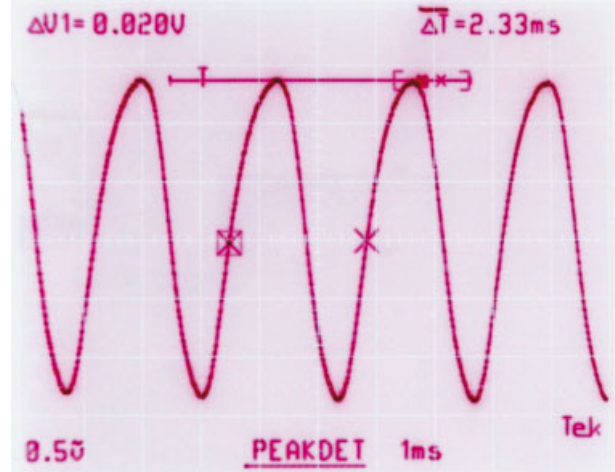
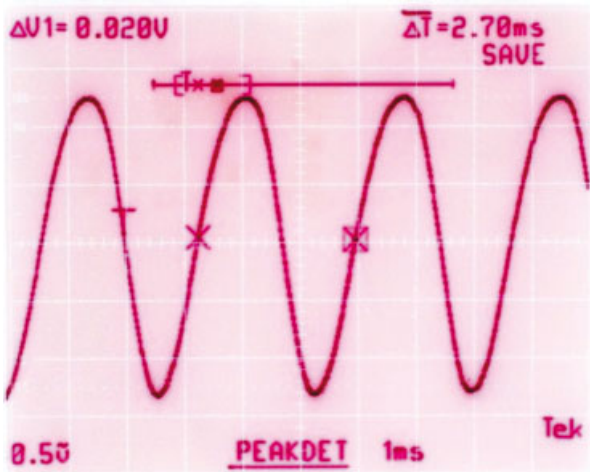
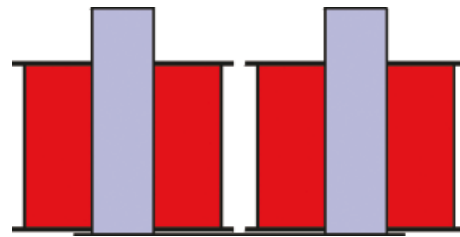
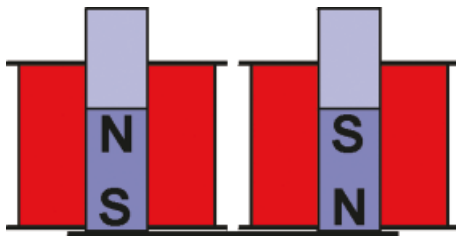
Rys. 2. Ekstensometr o bazie 500 mm: budowa, gotowy egzemplarz

Konstrukcja ekstensometru jest więc bardzo podobna do konstrukcji wcześniej opracowanego ekstensometru o bazie 200 mm [3]. Przyrząd ten z powodzeniem stosowany był w pracach doświadczalnych prowadzonych na Politechnice Krakowskiej [4]. Długość czynna jego struny jest równa 130 mm, pracuje ona poprawnie przy jej odkształceniach w granicach 1÷3‰. W całym tym zakresie otrzymywany z zacisków elektromagnesu sinusoidalny sygnał jest słabo tłumiony, a poziom jego wyższych harmonicznych jest nieistotny dla pomiaru. Wydaje się, że przejście z bazy 200 mm do bazy 500 mm przyrządu nie powinno być problematyczne.

Niestety, dla odkształceń struny mniejszych niż 2.5‰ sygnał otrzymywany z elektromagnesu „500-tki” był nie do przyjęcia. Zawierał wyższe harmoniczne o zbyt dużym poziomie, poza tym był silnie tłumiony (rys. 3). Pomiar okresu drgań struny (a właściwie czasu trwania 200 kolejnych okresów) jakimkolwiek miernikiem strunowym konstrukcji autora był niemożliwy, lub obarczony dużymi błędami (rzędu 10%). Radykalnym rozwiązaniem problemu okazało się wyeliminowanie z rdzenia elektromagnesu magnesów trwałych, choć „200-tka” z tymi magnesami pracuje poprawnie (rys. 4).

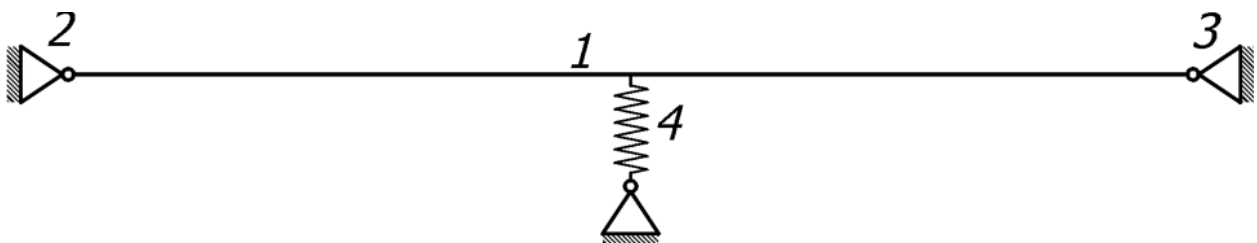
Wydaje się, że jedynym sensownym wytłumaczeniem tego zjawiska jest fakt, że elektromagnes, którego rdzeń wytwarza stałe pole magnetyczne, przyciągając stalową strunę staje się dla niej dodatkowym, (po zaciskami) trzecim więzem (4 rys. 6). Zmienia on charakter drgań struny, działając na nią tłumiąco. Przyczynia się też zapewne do wzrostu poziomu wyższych harmonicznych drgań. Poprawna praca ekstensometru „200-tki” o ponad trzykrotnie krótszej strunie, zawierającego elektromagnes z magnesami trwałymi, może być wytłumaczona większą sztywnością poprzeczną struny, eliminującą częściowo wpływ stałego pola elektromagnesu.

Brak stałego pola elektromagnesu w „500-tce” nie wpływa znacząco na poziom sygnału otrzymywanego z elektromagnesu. W czasie pobudzenia struny do drgań silnym impulsem elektrycznym przykładanym do końcówek elektromagnesu, trwale magnesuje się sama struna. Poziom tego namagnesowania, wraz ze zwiększoną - w porównaniu ze struną „200-tki” amplitudą drgań daje kilkumiliwoltowy sygnał wyjściowy, wystarczający do wysterowania wejścia dowolnego miernika strunowego.



Rys. 4. Elektromagnes z magnesami.  
 Sygnał wyjściowy dla:  $\epsilon_{str} = 3.3$  i  $2.4\%$

Rys. 5. Elektromagnes bez magnesów.  
 Sygnał wyjściowy dla:  $\epsilon_{str} = 4.4$  i  $1.7\%$



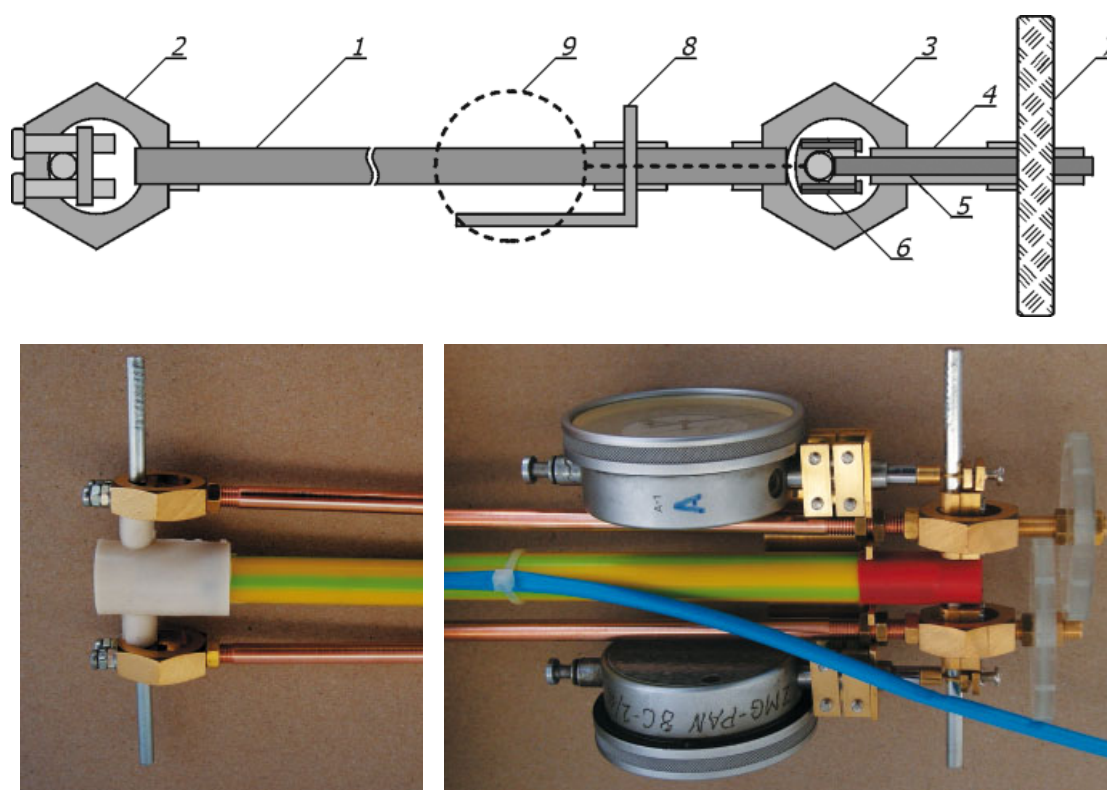
Rys. 6. Wpływ stałego pola magnetycznego na strunę 1 rozpiętą pomiędzy zaciskami 2 i 3



#### 4. Tester do wzorcowania ekstensometru o bazie 500 mm

Wieloletnie doświadczenie autora pokazało, że struna pomiarowa pracuje najbardziej zadowalająco, gdy jej odkształcenie zawiera się między  $1 \pm 1.2\%$  i  $3 \pm 3.5\%$ . Przy odkształceniu większym, istotne staje się czasowe płynięcie struny, przy mniejszym – wzrost poziomu wyższych harmonicznych jej drgań. Zatem użyteczny zakres pracy ekstensometru o bazie 500 mm jest bardzo niewielki, wynosi tylko niespełna 1 mm. Dlatego do jego wzorcowania konieczne jest użycie specjalnego testera.

Rysunek 7 przedstawia tester wykonany przez autora. Składa się on z 2 jednakowych części połączonych elementem wsporczym dla czujników zegarowych przemieszczenia. Każda część złożona jest z 2 uchwytów kotwi ekstensometru 2 i 3 i łączącego je miedzianego pręta 1. Uchwyt 2 jest stały, uchwyt 3 – regulowany. Zmiana odległości pomiędzy kotwami uzyskiwana jest przez wkręcanie i wykręcanie nagwintowanego wałka 4, w który wkręcony jest również gwintowany wałek 5. Różnica skoków gwintów obydwu wałków (odpowiednio 0.75 mm i 0.5 mm) daje przesuw zacisku 6 o 0.25 mm na pełny obrót wałka 4. Wałek ten, wyposażony jest w tarczę-pokrętło ze skalą 7. Wałek ten, wyposażony jest w tarczę-pokrętło ze skalą 7.



Rys. 7. Tester do wzorcowania ekstensometrów: schemat i fotografie

Element wsporczy dla czujników zegarowych przemieszczenia składa się z odcinka kątownika 8 z odpowiednimi wycięciami na pręty 1 i korpus ekstensometru, do którego zamocowane są 2 zaciski czujników zegarowych. Na schemacie, dla uproszczenia, zaciski te nie zostały uwzględnione, ale są wyraźnie widoczne na prawej fotografii. Czujniki zegarowe 9 o zakresie 1 mm i rozdzielczości 1  $\mu\text{m}$  każdy pokazane są tylko schematycznie, linią przerywaną. Opierają się one stopkami swoich popychaczy nie bezpośrednio o kotew, ale poprzez zaciśnięte na niej elementy gwarantujące punktowy kontakt. Czujniki ‘Somet’ zostały wyprodukowane w latach 70-tych XX wieku w ówczesnej Czechosłowacji i od tego czasu były wielokrotnie używane. Dlatego przed użyciem ich do przyrządu zostały starannie sprawdzone z użyciem płytek wzorcowych w zakresie pomiarowym 1 mm, ze skokiem 0.1 mm, nie wykazały błędów odczytu większych niż 2  $\mu\text{m}$ .

Tak skonstruowany tester został użyty do wyznaczenia charakterystyki jednego z ekstensometrów. Dla 36 różnych jego nastaw odczytano wskazania czujników zegarowych i 3 kolejne wyniki pomiaru okresu drgań struny pomiarowej z rozdzielczością 0.01  $\mu\text{s}$ . Po każdym cyklu pomiarowym zmieniano nastawę i ze względu na relaksację struny, następny cykl przeprowadzano dopiero po 15 minutach. Wszystkie pomiary

przeprowadzono w temperaturze zmieniającej się w granicach 19.4÷21.2°C, którą również mierzono z rozdzielczością 0.1°C.

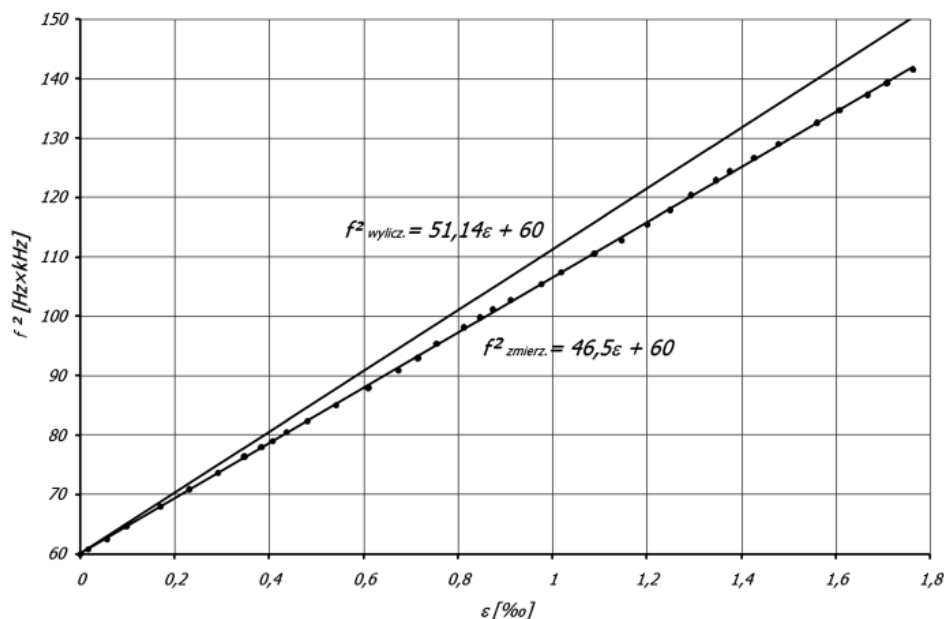
Uzyskana na podstawie pomiarów charakterystyka: kwadrat częstotliwości drgań struny jako funkcja odkształcenia ekstensometru jest przedstawiona na rysunku 8 ( $f^2_{\text{mierz}}$ ). Odkształcenie ekstensometru wyliczono biorąc pod uwagę średnią arytmetyczną ze wskazań obydwu czujników zegarowych, a kwadrat częstotliwości drgań struny wyznaczono z uśrednionego wyniku pomiaru okresu drgań struny. Aby nie operować niewygodnie małymi lub dużymi liczbami, jako jednostkę tego ostatniego wybrano 0.001 kHz<sup>2</sup>, czyli prościej Hz×kHz.

Jak widać, charakterystyka jest w przybliżeniu liniowa, o nachyleniu 46.5. Niewielkie odchyłki od liniowości spowodowane są raczej przeszywnieniem układu tester – ekstensometr, które przejawiało się oporami przy obracaniu pokrętkami 7 (rys. 7) niż nieliniowością testera lub ekstensometru osobno. Zostanie to zweryfikowane przy wzorcowaniu innych ekstensometrów. Na rysunku przedstawiono również charakterystykę wyliczoną teoretycznie ( $f^2_{\text{wylicz}}$ ) na podstawie wzoru:

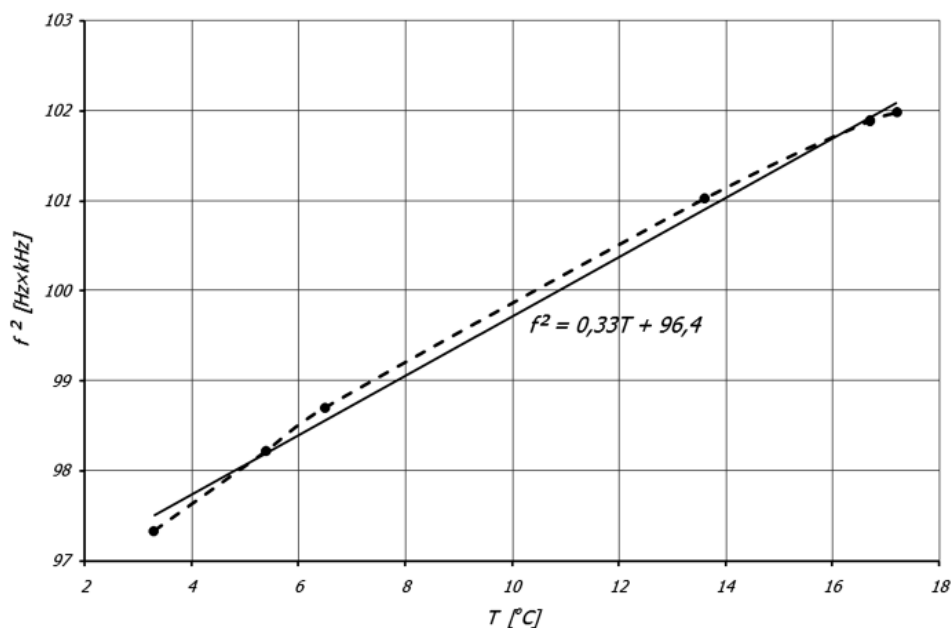
$$f^2 = \frac{1}{4l^2} \frac{E}{\gamma} \varepsilon$$

i parametrów ekstensometru i przy założeniu, że struna jest wykonana z ‘typowej’ stali [5] o gęstości  $\gamma = 7860 \text{ kg/m}^3$  i module Younga  $E = 220 \text{ GPa}$ . Widać, że jej nachylenie jest o niemal 10% większe, niż charakterystyki otrzymanej z pomiarów. Nie uwzględnia ona wprawdzie skończonej sztywności elementów testera i ekstensometru (poza struną), ale biorąc pod uwagę parametry tych elementów nie powinien to być wpływ znaczący. Wydaje się, że zdecydowanie większe znaczenie ma fakt, że struna pomiarowa nie jest jednolita, ale pokryta galwanicznie powłoką cyny (lub cynku) o nieznannej grubości. Zatem jej średnia gęstość, a zwłaszcza moduł Younga są mniejsze niż wyżej przytoczono i wartości częstotliwości drgań są też mniejsze niż wyliczone z powyższego wzoru.

Struna pomiarowa ekstensometru 7 (rys. 2) jest typową struną gitarową, wykonaną ze stali o nieznannej wartości współczynnika rozszerzalności cieplnej. Nie można zatem, biorąc pod uwagę tę wartość oszacować wpływ temperatury na wskazania ekstensometrów. Uchwyty testera 2 i 3 (rys. 7) połączone są prętem miedzianym  $l$ . Półfabrykaty z miedzi są jedynymi powszechnie dostępnymi w handlu wyrobami nie zawierającymi dodatków stopowych. Wartość współczynnika rozszerzalności termicznej miedzi można odczytać z tablic, np. [6]. Wynosi on  $16.2 \times 10^{-6}/\text{K}$ . Dlatego przyrząd ten może dodatkowo służyć do określania charakterystyki temperaturowej ekstensometrów, z uwzględnieniem w/w współczynnika. Na rysunku 9 pokazano charakterystykę temperaturową zestawu tester – ekstensometr uzyskaną dla jednej nastawy testera, w przybliżeniu w połowie zakresu ekstensometru i temperaturze zmieniającej się w granicach 3.3÷17.2°C.



Rys. 8. Charakterystyka ekstensometru

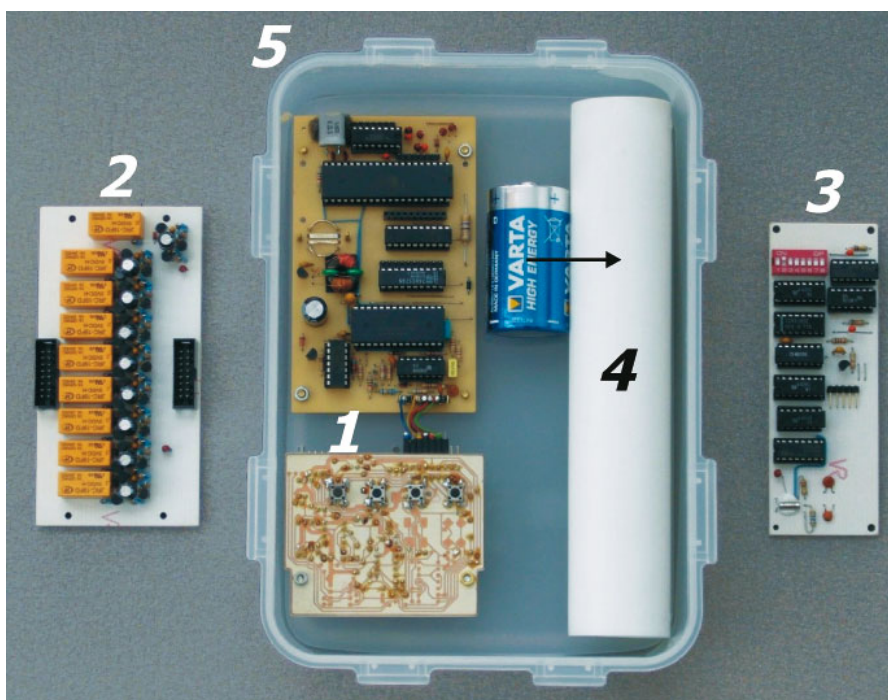


Rys. 9. Charakterystyka temperaturowa zestawu tester – ekstensometr

Jest ona w przybliżeniu liniowa. Wyznaczony z niej współczynnik nachylenia posłużył do korekty charakterystyki (rys. 8), choć ze względu na dość stabilne warunki termiczne nie jest ona znacząca.

## 5. Urządzenie pomiarowo-rejestrujące

Urządzenie pomiarowo-rejestrujące pokazane jest na rysunku 10. Jego zasadniczy podzespół 1 stanowi zmodernizowany miernik strunowy typu KA-7D opisany m in. w [6]. Miernik ten jest urządzeniem wielokrotnie stosowanym do automatycznej rejestracji przemieszczeń i temperatury gruntu na obszarze poddanych wpływom podziemnej eksploatacji górniczej [7]. Modernizacja jego polega na zwiększeniu



Rys. 10. Podzespoły urządzenia pomiarowo-rejestrującego

rozdzielczości pomiarów i zastosowaniu pamięci wyników o większej pojemności, oraz dostosowania go do zasilania napięciem niestabilizowanym z baterii 4 o napięciu 4.5 V.

Dla wydłużenia czasu pracy baterii wykonano energooszczędny układ zegara 3 włączający zasilanie miernika tylko na czas pomiaru. Współpraca tego ostatniego z większą liczbą przetworników strunowych (do 8) umożliwi przekąźnikowy multiplekser 2. Nominalne napięcie przełączające przekąźnik wynoszące 5 V dzięki dodatkowym układom elektronicznym może być obniżone nawet do 3 V, co jest istotne ze względu na sposób zasilania urządzenia. Jako obudowę zaproponowano sprawdzony w różnych warunkach, (m in. zakopywany w gruncie) niedrogi, hermetyczny pojemnik 5.

## 6. Wnioski

Według wstępnego harmonogramu, dostarczonego przez GTL SA, prace budowlane wschodniej płyty PI (rys. 1) powinny być przeprowadzone w drugiej połowie grudnia ubiegłego roku. W tym okresie miał być zamontowany opisany wyżej system pomiarowy. Okazało się, że ze względu na zimową pogodę w/w płyta zostanie wykonana w terminie późniejszym.

Należy podkreślić, że instalacja systemu w hangarze jest inicjatywą ze strony IMG PAN, nie GTL SA, a wyniki pomiarowe według porozumienia, zostaną wykorzystane do celów naukowych. Zostaną też udostępnione GTL SA. Autor ma nadzieję, że ich wartość, jak i nowatorski sposób prowadzenia badań zainteresują zarząd GTL SA, co w przyszłości przyczyni się do dalszej współpracy przy innych inwestycjach prowadzonych na terenie Międzynarodowego Portu Lotniczego Katowice w Pyrzowicach.

Praca została wykonana w roku 2010 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

## Literatura

1. Adam Kanciruk *Możliwości wykorzystania przetworników strunowych do pomiarów dynamicznych*. (w:) Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, tom 5, nr 2, Kraków 2003, s.
2. [www.pl.wikipedia.org](http://www.pl.wikipedia.org)
3. Adam Kanciruk *Opracowanie i konstrukcja nowych przetworników strunowych do pomiarów przemieszczeń gruntu, odkształceń obiektów budowlanych i betonu*. (w:) Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, tom 7, nr 3-4, Kraków 2005, s. 179-187.
4. Adam Kanciruk, Andrzej Seruga *Opracowanie i konstrukcja nowego przetwornika strunowego do pomiaru odkształceń betonu. Przykłady zastosowania*. Polskie Towarzystwo Badań Nieniszczących i Diagnostyki Technicznej Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Polskich. Zeszyty Problemowe. Badania Nieniszczące. nr 12, (2007), s. 176-181.
5. *Tablice fizyczno – astronomiczne*. Wydawnictwo Adamantan, Warszawa 1995
6. Adam Kanciruk, *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
7. Adam Kanciruk. *Telemetryczny miernik strunowy TMS-1 i przykład jego zastosowania do pomiaru przemieszczeń gruntu*. Przegląd Górniczy, nr 1, (2007), s. 54-57.

## **System for measuring the deformations of a concrete floor in a hangar building. Double-range extension meter**

### **Abstract**

The international airport Katowice-Pyrzowice has a hangar building which is currently being modernised and the concrete floor is going to be partly replaced. Deformations measurements are to be taken in the newly repaired floor section. For that purpose a special measurement system was designed, incorporating six wire extension meters with the base of 0.5 m, two thermometers and a measuring and recording device. Extension meters, in the configuration of two triangular (equilateral) rosettes, and thermometers are placed in the floor, at the points of the highest expected deformations. These points coincide with the positions of the front and one of the side undercarriage legs of planes to be serviced there in the future. Extension meters and thermometers will be connected to the automatic measuring and recording device, enabling the monitoring of deformations – both slow-changing (due to hydration shrinkage or thermal expansion) and fast-changing ones (experienced when a plane is rolled on the floor).

Keywords: surveying, electronics, geotechnics