

Opracowanie i konstrukcja udoskonalonego miernika-rejestratora strunowego

ADAM KANCIRUK

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

Streszczenie

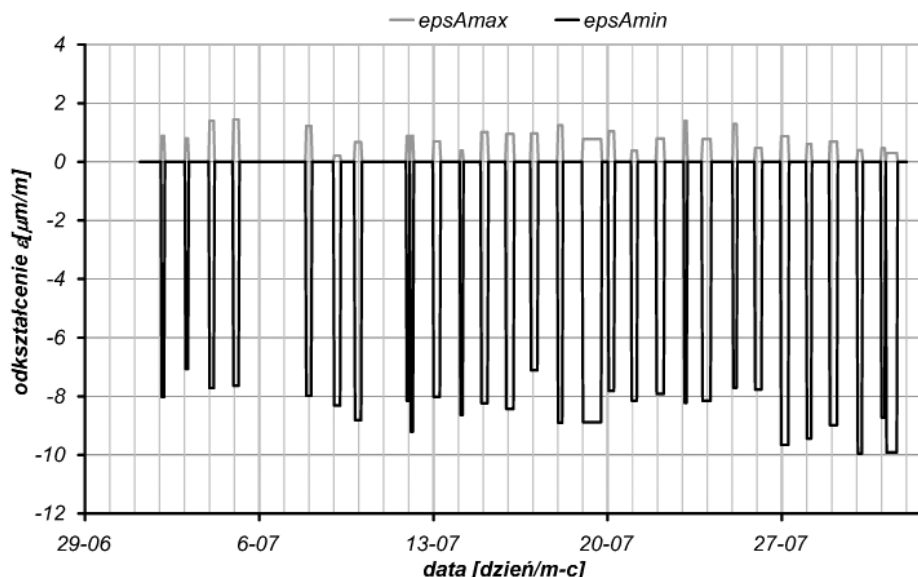
W roku 2011 w hangarze na terenie lotniska w Pyrzowicach zamontowano strunowy system pomiarowy, w skład którego weszły dwa mierniki-rejestratory. Urządzenia te podczas ponad czteroletniej pracy zarejestrowały ok. 800 000 wyników pomiarowych, przez co wykazały się znakomitą funkcjonalnością i niezawodnością. Mierniki-rejestratory są jednak urządzeniami prowizorycznymi, skonstruowanymi z zastosowaniem podzespołów pochodzących z różnych wcześniejszych opracowań. Dlatego w roku 2015 przystąpiono do opracowania oryginalnego miernika-rejestratora o poszerzonych w stosunku do wspomnianych urządzeń możliwościach i nowocześniejszej konstrukcji. Obecnie gotowy jest jego schemat montażowy i wykonana na jego podstawie płytka drukowana, na której sukcesywnie montowane są i uruchamiane poszczególne podzespoły urządzenia. Poza pracami nad nowym miernikiem-rejestratorem w roku 2015 opracowano i wykonano tensometr strunowy o wzmocnionej konstrukcji do betonu wałowanego, oraz prostą komorę termostatowaną do badań tensometrów. Ponadto kontynuowano pomiary we wspomnianym hangarze i pomiary wpływu drgań komunikacyjnych na budynek mieszkalny.

Słowa kluczowe: miernictwo wielkości nieelektrycznych, przetworniki i mierniki strunowe, elektronika

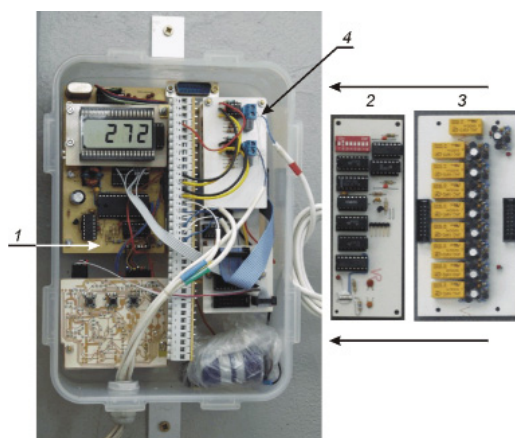
1. Wstęp

W pierwszej połowie 2011 roku w przebudowywanym hangarze na terenie lotniska w Pyrzowicach (Międzynarodowy Port Lotniczy „Katowice”) zamontowano strunowy system pomiarowy, którego celem jest monitoring odkształceń płyty posadzkowej. W skład jego weszły dwa mierniki-rejestratory, 9 tensometrów strunowych zainstalowanych w formie 3 rozet trójkątnych, równobocznych i 5 termometrów termistorowych. Od 1 czerwca 2011 roku, a więc w ponad czteroletnim okresie, system ten zarejestrował ok. 800 000 wyników pomiarowych, przez co wykazał się bardzo dobrą funkcjonalnością i niezawodnością. Na podstawie tych wyników zaobserwowano stopniowo wygasający skurcz materiału płyty posadзки, jakim jest zbrojony beton, jej odkształcenia termiczne, odkształcenia spowodowane wpływem nowych inwestycji prowadzonych na lotnisku (płyta postojowa), oraz – co jest najbardziej spektakularne – odkształcenia (Rys. 1) spowodowane przez nacisk kół hangarowanych samolotów (ogółem 1297 przypadków do 30 października br.). Z powodu ograniczeń czasowych mierniki-rejestratory skonstruowano jako urządzenia prowizoryczne, do których budowy użyto podzespoły pochodzące z opracowań pochodzących z lat 90-tych XX wieku: miernika-rejestratora KA-7D [1, str. 82], telemetrycznego systemu pomiarowego [1, str. 92], do których opracowano podzespoły uzupełniające [1, str. 90]. W ten sposób uzyskano sprawne urządzenie stanowiące logiczną całość, ale o konstrukcji mechanicznej bardzo niespójnej, gdyż większość jego podzespołów (płytek drukowanych) połączono z konieczności elastycznymi przewodami (Rys. 2).

Dlatego w roku 2015 przystąpiono do opracowania oryginalnego miernika-rejestratora o zwartej i nowocześniejszej konstrukcji mechanicznej oraz poszerzonych w stosunku do wspomnianych wyżej urządzeń możliwościach. Ponadto opracowano i wykonano tensometr strunowy o wzmocnionej konstrukcji do betonu wałowanego, oraz prostą komorę termostatowaną do badań długookresowej relaksacji wskazań tensometrów. Poza tym kontynuowano pomiary we wspomnianym hangarze i pomiary wpływu drgań komunikacyjnych na budynek mieszkalny.



Rys. 1. Odkształcenia płyty posadzkowej spowodowane przez nacisk kół hangarowych samolotów. Rozeta tensometryczna umieszczona ok. 2 m przed prawą gołonią samolotu. *epsAmax* – wartości odkształceń maksymalnych, *epsAmin* – minimalnych. Lipiec 2015



Rys. 2. Jeden z mierników-rejestratorów zainstalowanych w hangarze: 1 - układy elektroniczne miernika KA 7D, 2 - zegar (pochodzący z telemetrycznego systemu pomiarowego), 3 - multiplexer i 4 - przetworniki rezystancja-częstotliwość (opracowane na nowo)

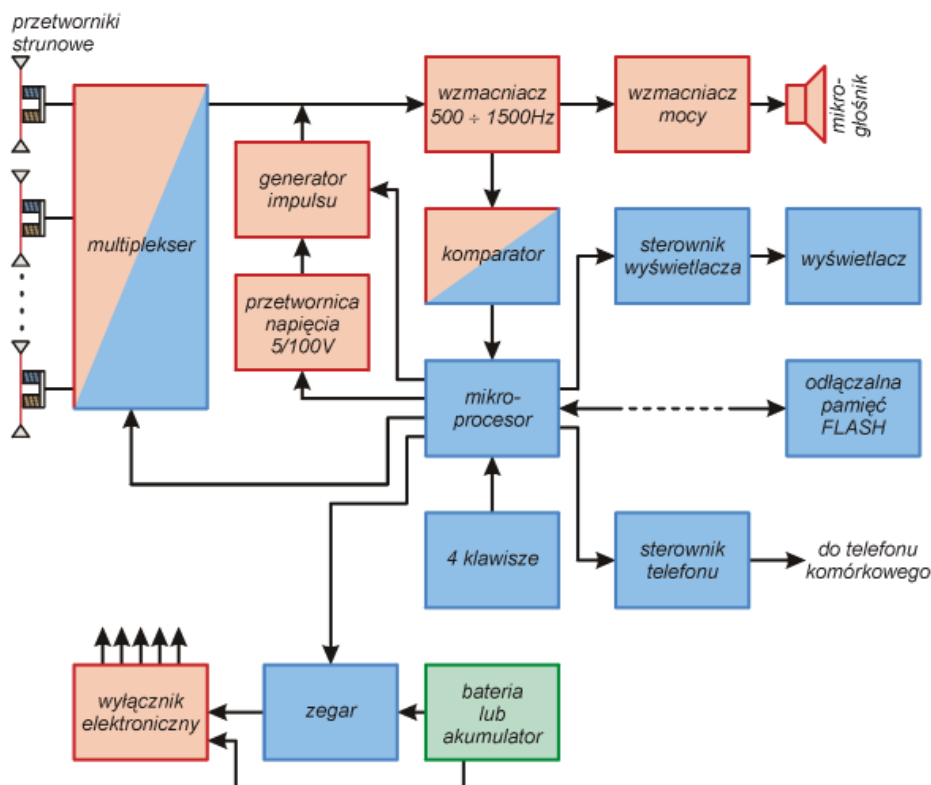
2. Schemat blokowy nowego miernika-rejestratora

Rysunek 3 przedstawia schemat nowego miernika rejestratora strunowego, który w dalszej części opracowania dla prostoty i przejrzystości będzie oznaczany skrótem „NMRS”.

Według założeń, cykl pomiarowy NMRS polegający na okresowym pobudzeniu struny przetwornika do drgań i pomiarze okresu drgań tejże struny nie ulega zmianie. Dlatego schemat blokowy NMRS jest w przeważającej części zgodny ze schematem miernika-rejestratora KA-7D [1, str. 84]. Zasadnicze zmiany polegają na dodaniu:

- układu zegara,
- wyłącznika elektronicznego,
- multiplexera analogowego,
- możliwości transmisji danych przez telefon komórkowy.

Układ zegara pochodzi z telemetrycznego systemu pomiarowego, jest podzespołem energooszczędnym (pobiera prąd ok. 60 μA), pracującym po załączeniu zasilania bez przerwy. W porównaniu z pierwowzorem, w którym programowanie okresu repetycji pomiarów dokonywano tylko ręcznie, wprowadzono dodatkową



Rys. 3. Schemat blokowy NMRS. Podzespoły cyfrowe zaznaczono kolorem niebieskim, analogowe – różowym

możliwość jego programowania również przez układ mikroprocesora. Najkrótszy okres repetycji pomiarów to 11 minut 15 sekund (1/128 doby), najdłuższy – 24 h, każdy następny jest dłuższy od poprzedniego 2 razy. Układ zegara steruje wyłącznikiem elektronicznym załączającym zasilanie pozostałych układów NMRS. 16-kanalowy multiplekser analogowy jest sterowany przez układ mikroprocesora, składa się ze scalonego multipleksera cyfrowego, do którego wyjść są dołączone poprzez wzmacniacze miniaturowe przekaźniki DPDT (*dual pole, dual throw*), dołączające dwubiegunowo do układu wzmacniacza poszczególne przetworniki strunowe. Zamiast prostego, o słabej tłumienności sygnałów pasożytniczych wzmacniacza zastosowanego w KA-7D zastosowano bardziej złożony wzmacniacz z czterobiegunowym filtrem Bessela, sprawdzonym w uniwersalnym modułu strunowego UMS-3 [1, str. 103]. W układzie mikroprocesora dodano możliwość transmisji danych pomiarowych przez telefon komórkowy wyposażony w łącze RS232C, oraz w miejsce pamięci *static RAM* zastosowano odłączalną pamięć typu *Flash* o wielokrotnie większej pojemności. Dzięki temu, zrezygnowano z łącza RS232C do transferu danych pomiarowych do komputera. Również zaniechano stosowanie w NMRS układu diagnostycznego, który w przypadku urządzenia stacjonarnego jest praktycznie nieprzydatny.

3. Schemat montażowy NMRS

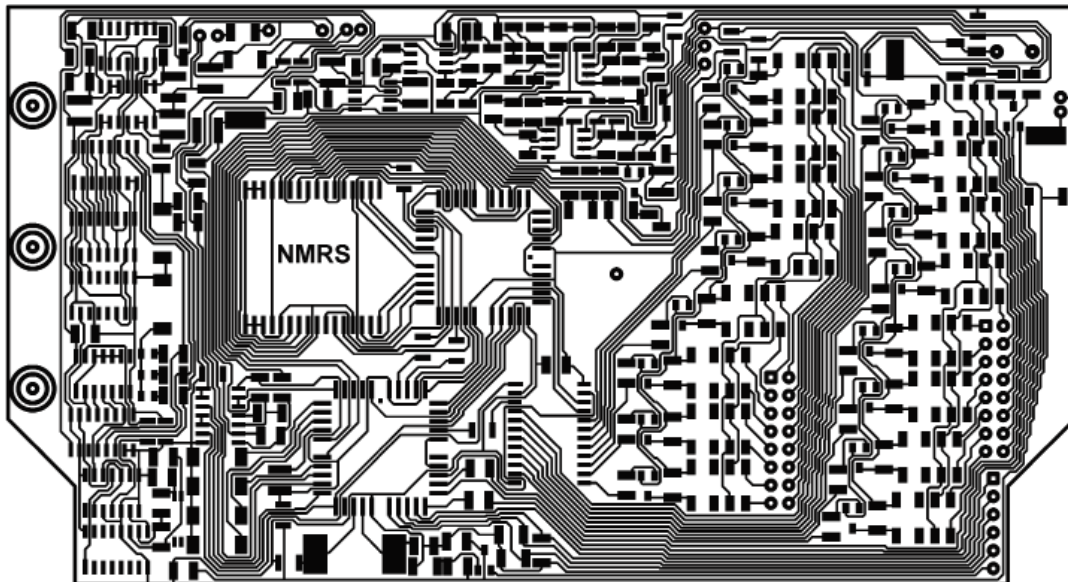
Dla prostoty konstrukcji i zmniejszenia czasochłonności wykonania gotowego urządzenia, dla wszystkich podzespołów elektronicznych NMRS przewidziano jedną, wspólną płytkę drukowaną. Dla jej miniaturyzacji zdecydowano się na użycie elementów montowanych powierzchniowo – jedynie nieliczne elementy (głównie złącza) są typu tradycyjnego („przewlekane”). Rysunek 4 przedstawia schemat połączeń płytki wraz z polami lutowniczymi.

Płytkę ma wymiary 152×83 mm i jest dostosowana do montażu w prostopadłościenną obudowie o zewnętrznych wymiarach 160×120×90 mm, wraz z akumulatorem 6 V, 5 Ah i telefonem komórkowym. Dla uproszczenia procesu przygotowania płytki zdecydowano się zaprojektować ją jako jednostronną. Mimo tego, osiągnięto zadowalający stopień upakowania elementów elektronicznych na płycie. Znajduje się na niej:

- 15 układów scalonych małej i średniej skali integracji,
- 2 układy scalone wielkiej skali integracji (w tym jeden na podstawie),
- wyświetlacz LCD,
- 21 tranzystorów małej i średniej mocy,

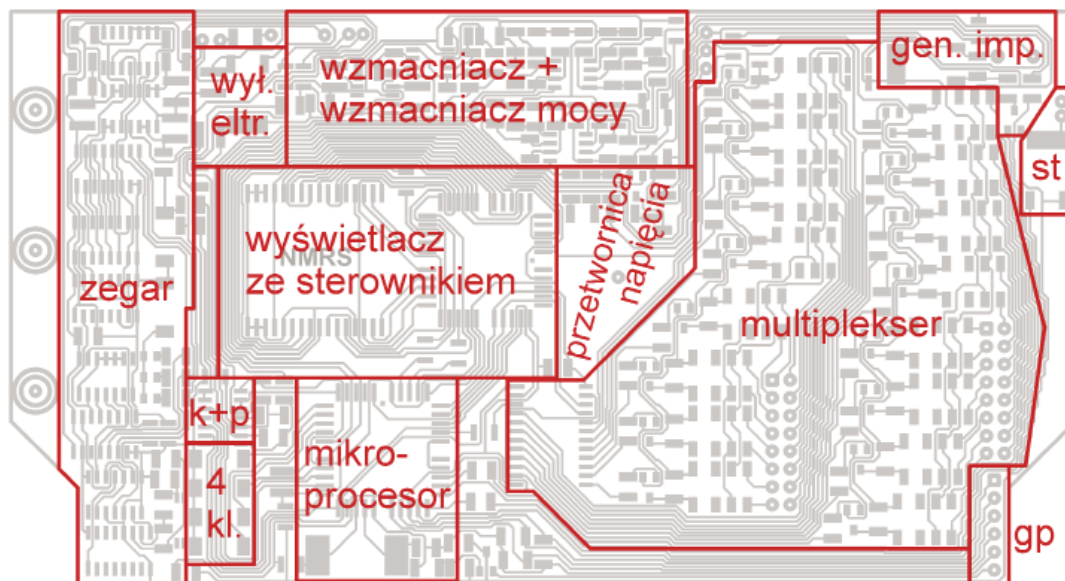
- ok. 140 elementów dwukońcówkowych: rezonatorów kwarcowych, rezystorów, kondensatorów, diod,
- 16 przełączników miniaturowych,
- 6 przycisków elektrycznych,

oraz transformator przetwornicy napięcia i złącza do przetworników strunowych, pamięci, źródła zasilania i mikrogłośnika. Wśród elementów dwukońcówkowych są rezystory o oporności 0Ω , pełniących rolę „mostków” montowanych w miejscach krzyżowania się ścieżek. Tych elementów na płytce jest 14. Wielkość pól lutowniczych i ich rozmieszczenie odpowiada oczywiście cechom montowanych na nich elementów, standardową szerokość ścieżek ustalono na 0.32 mm, minimalne między nimi odstępów są szerokości 0.16 mm.



Rys. 4. Płytką drukowaną NMRS w oryginalnej skali

Na rysunku 5 widnieje schemat połączeń tej samej płytki, z naniesionym na nią schematem blokowym NMRS. Wszystkie podzespoły uwidocznione na tym rysunku odpowiadają schematowi ideowemu - rysunek 3. Sterownik telefonu komórkowego jest w istocie zredukowany do klucza załączającego elektromagnes, który z kolei w sposób mechaniczny włącza i wyłącza telefon. Złącza RS232C mikroprocesora i telefonu są ze sobą kompatybilne.



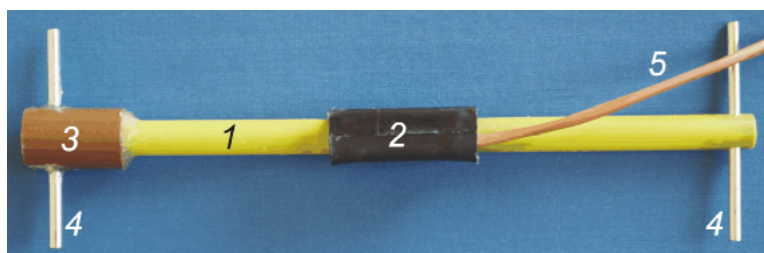
Rys. 5. Płytką drukowaną NMRS wraz z zaznaczonymi podzespołami. *wyl. eltr.* - wyłącznik elektroniczny, *k+p* - komparator i część przetwornicy, *gen. imp.* - generator impulsów, *st* - sterownik telefonu, *gp* - gniazdo pamięci

Projektowanie płytki drukowanej dla dowolnego urządzenia elektronicznego, na podstawie jego wcześniej opracowanego schematu ideowego jest pracą w zasadzie techniczną. Jednak zastosowanie w układzie NMRS mikroprocesora jednocukłowego, który jest podzespołem uniwersalnym, o działaniu zależnym od wpisanego do jego pamięci programu, stwarza możliwość modyfikowania połączeń na płycie. Celem tego działania jest uproszczenie połączeń, dzięki czemu uzyskuje się większy stopień upakowania elementów i zmniejszenie liczby kolidujących ze sobą ścieżek, co pozwala na użycie mniejszej ilości rezystorów „mostkowych”. Uproszczenie połączeń prowadzi też do zwiększenia niezawodności pracy gotowego urządzenia. Modyfikowanie połączeń na płycie wymaga dokładnej znajomości założeń funkcjonowania urządzenia, gdyż jego skutkiem jest konieczność wprowadzenia zmian do schematu ideowego i w szczególności daleko idących korekt oprogramowania mikroprocesora.

4. Tensometr TBW 250

Do monitoringu odkształceń płyty posadzkowej hangaru zastosowano tensometry TB 500 o bazie 500 mm, o korpusie wykonanym z rurki aluminiowej o zewnętrznej średnicy 12 mm [1, str. 64], materiału niedrogiego, łatwego do obróbki. Tensometr o takiej konstrukcji jest przyrządem delikatnym, wymagającym ostrożnej instalacji. Przykładowo, podczas zalewania mieszanką betonową płyty, na miejsce posadowienia tensometrów [1, str. 174] nie kierowano bezpośrednio strumienia mieszanki z pompy, lecz ostrożnie nasunięto ją za pomocą wibratora. Obecnie rysuje się możliwość poszerzenia współpracy Instytutu z Wojskową Akademią Techniczną w Warszawie, w zakresie pomiarów odkształceń nawierzchni wykonywanych z betonu wałowanego [2]. Jest to niskokosztowa, o wysokiej szybkości realizacji technologia układania nawierzchni z użyciem mieszanek betonowych o małej zawartości wody zarobowej, zagęszczanych za pomocą walca drogowego. Jest oczywiste, że w tym przypadku tensometr zatapiany w mieszance musi mieć wzmocnioną konstrukcję, tak aby nie uległ uszkodzeniu podczas zagęszczania.

Rysunek 6 przedstawia fotografię tensometru TBW 250 (Tensometr do Betonu „Wojskowy” o bazie 250 mm). Jego konstrukcja jest zgodna z tensometrami do betonu wykonywanymi wcześniej, w tym wspomnianego wyżej TB 500. Korpus tensometru 1 wykonano z rurki ze stali nierdzewnej, wytrzymałej, choć trudnej w obróbce, do którego przylutowano mocną, U-kształtną blaszaną obudowę elektromagnesu 2, a sprężynę napinającą wstępnie strunę zabezpieczono rurką z PCW 3. Korpus pokryto igielitową koszulką, elektromagnes wraz z obudową warstwą gumy, a rurkę 3 wypełniono szczelnie gumą silikonową, tak aby jedynymi elementami tensometru związanymi sztywno z masą betonową były jego zakotwienia 4. Przewód przyłączeniowy tensometru 5 zabezpieczono przed jego przerwaniem stalową linką. Obecnie tensometr TB 250 jest testowany m in. w komorze termostatowanej, w celu określenia jego długookresowej relaksacji.

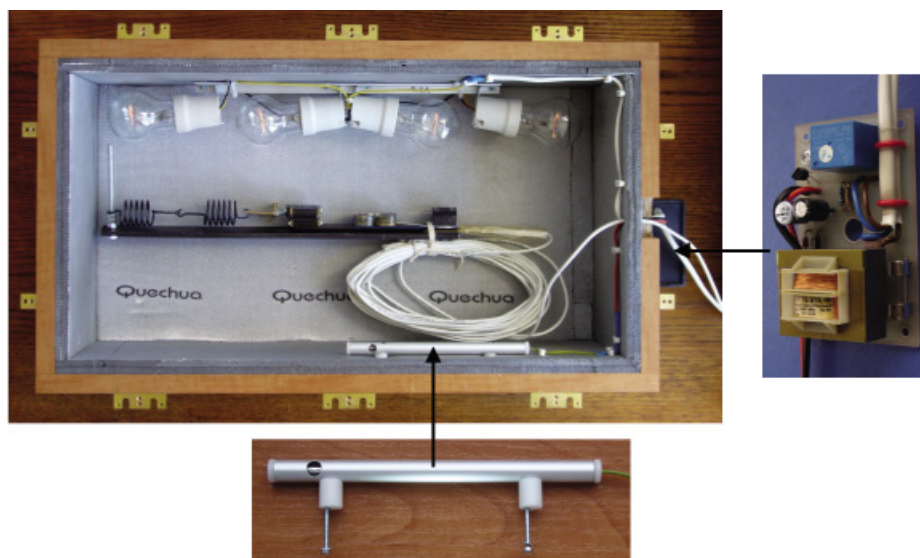


Rys. 6. Tensometr TBW 250, szczegóły konstrukcji

5. Komora termostatowana

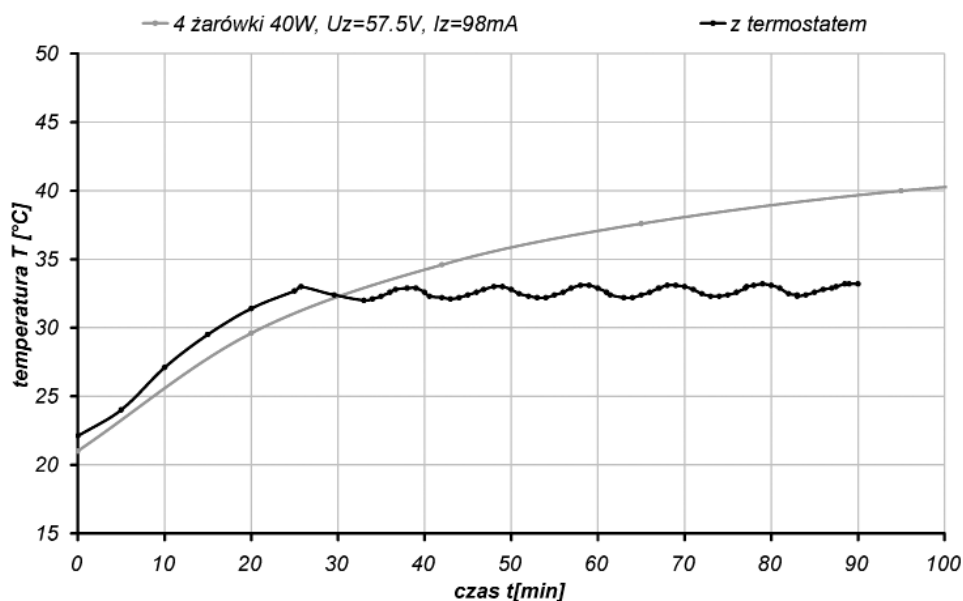
W [1] rozdziale 7.4 (str. 127) przedstawiono próby określenia parametrów relaksacji długookresowej różnych tensometrów strunowych zarówno konstrukcji autora, jak też i produkowanych przez wytwórców o międzynarodowym zasięgu. Próby te prowadzono w warunkach z założenia zbliżonych do stałotemperaturowych, w istocie roczny zakres zmian temperatury otoczenia badanych tensometrów wynosił 8°C. Stąd uzyskane wyniki dotyczące badań w okresach ponadmiesięcznych nie były jednoznaczne. Tensometry strunowe montowane są w monitorowanych konstrukcjach na stałe (przykładowo we wspomnianej wyżej płycie

posadzkowej hangaru funkcjonują już ponad 4 lata), poza procesem pomiarowym nie ma do nich dostępu, dlatego znajomość ich parametrów metrologicznych, w tym długookresowej relaksacji wskazań jest istotna dla określenia błędów pomiarowych. Dostępne w handlu komory klimatyzowane nie są ze względu na kształt dogodne do badań tensometrów, dlatego postanowiono skonstruować prostą komorę termostatowaną we własnym zakresie. Rysunek 7 przedstawia fotografię wnętrza gotowego urządzenia.



Rys. 7. Komora termostatowana oraz jej części składowe: termometr kontaktowy (z dołu) i sterownik grzejnika (z prawej).
Widoczne jest żarzenie się żarników żarówek, spełniających rolę grzejnika

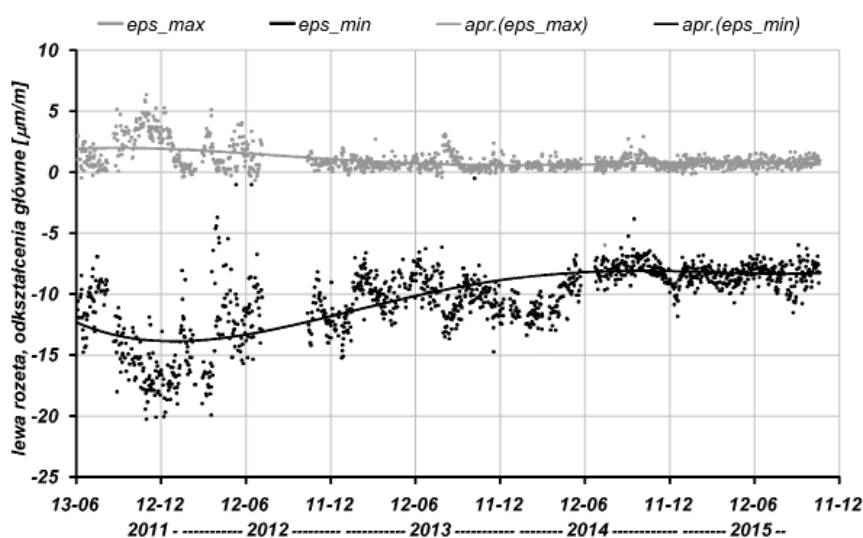
Komorę wykonano głównie z materiałów odpadowych. Stanowi ją skrzynia z płyt wiórowych, wyłożona od wewnątrz warstwą gąbki poliuretanowej. Grzejnikiem są 4 połączone szeregowo żarówki 230 V, 40 W, dające sumaryczną moc grzewczą ok. 22 W. Moc ta pozwala na ogrzanie wnętrza komory do temperatury ok. 45°C w czasie 5 godzin, przy temperaturze otoczenia 21°C. Komora jest zatem urządzeniem bezpiecznym, nawet w przypadku awarii termostatu. Termostatem jest termometr kontaktowy o stałej temperaturze zwarcia swych wyprowadzeń, wynoszącej 34°C, wyposażony w sterownik włączający i wyłączający grzejnik. Rysunek 8 przedstawia charakterystykę nagrzewania i stabilizacji temperatury wewnątrz komory. Wykres w kolorze popielatym przedstawia wzrost temperatury wewnątrz komory bez jej regulacji, a wykres w kolorze czarnym – z regulacją dwupołożeniową.



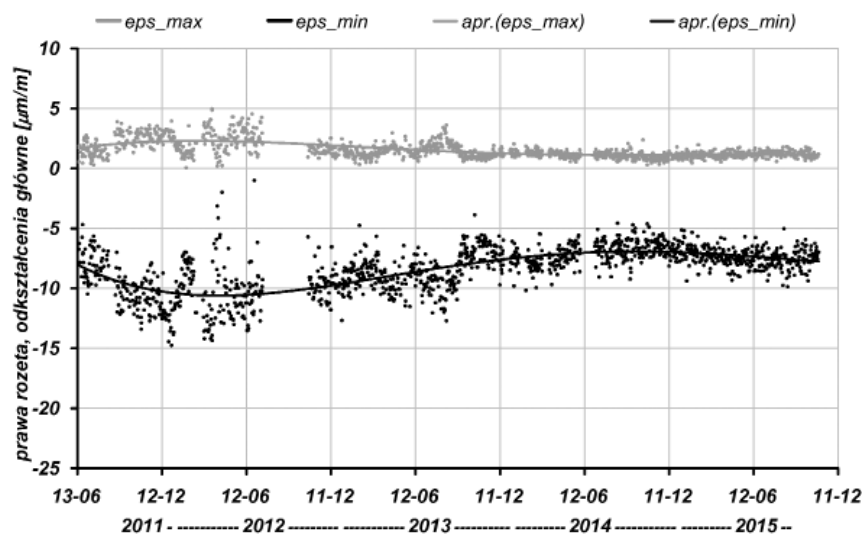
Rys. 8. Charakterystyka komory. Temperatura otoczenia - 21-22°C

6. Kontynuacja badań prowadzonych w latach poprzednich. Pomiary odkształceń płyty posadzkowej hangaru

W roku 2015 kontynuowano pomiary odkształceń płyty posadzkowej hangaru znajdującego się na terenie lotniska w Pyrzowicach (Międzynarodowy Port Lotniczy „Katowice”). W roku 2011 w płycie tej, kilka centymetrów ponad jej dolną płaszczyznę [1, str 171-175], zainstalowano 3 strunowe rozety tensometryczne. Według założeń miały się one znajdować dokładnie pod kołami goleni samolotów typu Airbus A 320 (najczęściej hangarowanych), faktycznie po zmianie regulaminowego położenia samolotu w hangarze znajdują się one w odległości 2÷3 m w kierunku jego nosa. Stąd wykazują one odkształcenia mniejsze i przeciwnego znaku (co to modułu największe jest odkształcenie ściskające, a nie rozciągające). Od początku br. do 30 października pomiary przeprowadzano 25 razy na dobę, bez przerw. Wykryto 294 przypadki odkształceń płyty wskutek nacisku kół hangarowanych samolotów. Wartości tych odkształceń stabilizują się w porównaniu z wartościami zarejestrowanymi w latach 2011-2012, co sugeruje umocnienie się podbudowy płyty. Na rysunkach 9 i 10 zobrazowano wartości odkształceń głównych (maksymalnego



Rys. 9. Wartości odkształceń głównych płyty posadзки wywołanych przez nacisk kół lewych goleni hangarowanych samolotów.
 eps_max i eps_min – wartości odkształceń odpowiednio: maksymalnych i minimalnych,
 $apr.(eps_max)$ i $apr.(eps_min)$ – przybliżenie wielomianami 4 stopnia czasowych zmian wartości odkształceń głównych.
 Znaczniki na osi czasu są rozmieszczone co pół roku

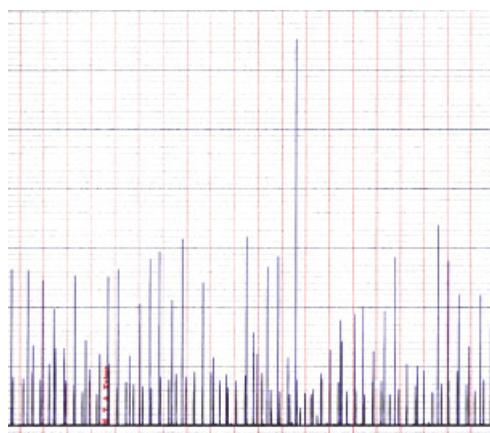


Rys. 10. Wartości odkształceń głównych płyty posadзки wywołanych przez nacisk kół prawych goleni hangarowanych samolotów.
 eps_max i eps_min – wartości odkształceń odpowiednio: maksymalnych i minimalnych,
 $apr.(eps_max)$ i $apr.(eps_min)$ – przybliżenie wielomianami 4 stopnia czasowych zmian wartości odkształceń głównych.
 Znaczniki na osi czasu są rozmieszczone co pół roku

– rozciągającego i minimalnego – ściskającego) wyliczone ze wskazań rozet zarejestrowanych w okresie 13.06.2011-30.10.2015. Każda para punktów (jeden w kolorze czarnym, drugi – popielatym) przedstawia odkształcenia płyty podczas jednego przypadku hangarowania samolotu, trwającego zwykle kilka godzin. Od 13 czerwca 2011 roku takich przypadków zarejestrowano 1290.

7. Pomiary wpływu drgań komunikacyjnych na budynek mieszkalny

Szczegółowy opis zasadności prowadzenia obserwacji wpływu drgań komunikacyjnych (pochodzących od pobliskiej linii tramwajowej) na budynek mieszkalny, zastosowanej do tego celu aparatury, jej instalacji i przykładowych wyników przedstawiono w artykule [3]. Aparatura składa się z akcelerometru górniczego wyposażonego w odpowiedni układ elektroniczny i rejestrator z taśmą papierową. Fragment wykresu – zarejestrowanych przyspieszeń przedstawia rysunek 11.



Rys. 11. Maksymalne przyspieszenia towarzyszące drganiom ściany budynku wywołanych przez ruch tramwajów (przykład)

Wspomniane w [3] wyniki zostały opracowane na podstawie pierwszego, 22-dniowego okresu rejestracji drgań, który rozpoczął się 19 lutego 2015 roku. Drugi okres rejestracji drgań, od 16 lipca do 11 sierpnia br. charakteryzuje się mniejszą intensywnością oddziaływania ruchu tramwajów na budynek, dotyczy on jednak w całości okresu wakacyjnego, o mniejszym średnim obciążeniu komunikacji miejskiej. Trzeci okres rejestracji – od 20.08 do 25.09 cechuje ponowny wzrost intensywności wstrząsów pochodzących od linii tramwajowej. Od 6.10 aparatura pracuje znowu, obecnie trwa rejestracja. Wybrane wyniki wpływu ruchu tramwajów na drgania budynku przedstawiają tabele 1 i 2.

Tab. 1. Charakterystyka 3 okresów rejestracji drgań

Lp.	Okres rejestracji	Liczba dób	Ogólna liczba wstrząsów		Średnia liczba wstrząsów na dobę	
			0.3÷0.4 m/s ²	powyżej 0.4 m/s ²	0.3÷0.4 m/s ²	powyżej 0.4 m/s ²
1.	19.02-13.03	22	5	15	0.23	0.68
2.	16.07-11.08	26	34	0	1.31	0
3.	20.08-25.09	36	49	9	1.36	0.25

Tab. 2. Zarejestrowane wstrząsy o największym maksymalnym przyspieszeniu

Lp.	Data	Przyspieszenie [m/s ²]
1	2	3
1.	2.03.2015	0.54
2.	2.03.2015	0.57
3.	11.08.2015	0.39
4.	4.09.2015	0.55

1	2	3
5.	7.09.2015	0.55
6.	9.09.2015	0.53
7.	14.09.2015	0.54
8.	21.09.2015	0.54
9.	21.09.2015	0.55
10.	24.09.2015	0.48
11.	24.09.2015	0.54
12.	24.09.2015	0.54

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

Literatura

- [1] Kanciruk A., 2012. *Metody tensometryczne w badaniach przemieszczeń, deformacji i zjawisk dynamicznych w gruncie i obiektach budowlanych*. Archiwum Górnicztwa, Seria: Monografia, Kraków.
- [2] http://www.drogibetonowe.pl/page/beton_walowany/ (dostępny 12.11.2015)
- [3] Kanciruk A., 2015. *Badanie intensywności wstrząsów pochodzenia komunikacyjnego w budynku mieszkalnym*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, T. 17, nr 1-2, s. 49-53.

New concept of a vibrating-wire measurement data logger. Long-term measurements started last years – continued researches

Abstract

In 2011 a vibration-wire measurement system was installed in a hangar situated in area of Pyrzowice airport. The system contains 2 data loggers. In spite of it, that the loggers are not modern, temporary instruments, they function faultless for more than 4 years, providing approx. 800 000 measurement results. Basing on the loggers functioning features, in 2015 a new vibrating wire measurement data logger was designed. The new instrument is not only the modernized copy of the mentioned above loggers, but contains much innovations and additional units as well. At the end of the 2015 year its schematic diagram, layout artwork and printed circuit board are ready. Also in 2015 strains of above mentioned hangar floor slab recording was continued, as well as measurements of rail traffic induced vibrations in an apartment building. Additionally a new, solid vibrating wire strain transducer for installing in roller-compacted concrete mass was designed and constructed as well as a simple low-cost thermostatic cell, necessary for further research.

Keywords: measurement of nonelectric quantities, vibration-wire transducers and meters, electronics