

21

MOŻLIWOŚCI TECHNICZNE ZASTOSOWANIA SZEROKOPASMOWEJ ANALIZY WIDMOWEJ W PREDYKCJI WSTRZĄSÓW I TĄPNIĘĆ

21.1 WSTĘP

Odpowiednio wczesne wykrycie wstrząsów lub tąpnięć pozwala na ewakuację załogi oraz minimalizację strat finansowych z uszkodzeniami maszyn i urządzeń znajdujących się nie tylko w wyrobiskach. Zagadnienie to jest tym bardziej interesujące gdyż występują istotne podobieństwa pomiędzy podziemnymi wstrząsami a trzęsieniem ziemi [3, 6, 7]. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że liczne gatunki zwierząt potrafią „przewidzieć” te zagrożenia nawet na wiele godzin lub dni przed ich zaistnieniem, przy czym niewyjaśniony pozostaje dotychczas dokładny mechanizm w jaki one tego dokonują. Większość gryzoni oraz psy i koty posiadają niezwykle czuły zmysł słuchu i są zdolne do wychwytywania ultradźwięków w zakresie częstotliwości do ponad 100 kHz. Jednocześnie posiadają one bardzo czułe wibrysy, których jedną z funkcji jest detekcja drgań o ultraniskiej częstotliwości (rzędu od ułamka Herca) i małej amplitudzie. W warunkach górniczych, w materiale skalnym szczególnie dobrze propagują się fale mechaniczne o niskiej częstotliwości (co wynika z częstotliwościowej zależności współczynnika tłumienia).

Niezwykle istotnym etapem planowanych badań będzie zweryfikowanie hipotezy czy głównie ten zakres pasma pozwala szczerom na wcześniejsze wykrycie zagrożenia i ucieczkę. Poważnym ograniczeniem technicznym w budowie przyrządu pomiarowego zdolnego do wykrywania drgań w szerokim paśmie od infradźwięków do ultradźwięków, jak ma to miejsce u szczurów, stanowi pomiar drgań o bardzo niskiej amplitudzie w zakresie niskich i ultraniskich częstotliwości. Dodatkowy negatywny czynnik związany jest z pracą maszyn górniczych, które generują silne wibracje propagujące się w skale jak również w powietrzu. Utrudnia to znacznie wyselekcjonowanie z sygnału pomiarowego drgań związanych bezpośrednio ze zbliżającym się wstrząsem lub tąpnięciem.

21.2 DETEKTORY DRGAŃ

Obecnie stosowane rozwiązania detekcji drgań w górotworze lub innych ośrodkach skalnych bazują przede wszystkim na geofonach, których trzpienie są wbijane w skałę. Przykładem takiego rozwiązania są systemy ARAMIS oraz ARES opracowane w Instytucie Technik Innowacyjnych EMAG. Zadaniem tych systemów jest przetwarzanie przy pomocy elektrodynamicznych sond pomiarowych mocowanych na kotwach w ociosie chodników przygotowawczych drgań mechanicznych górotworu, a następnie przesyłanie tych sygnałów do kopalnianej stacji geofizyki [10]. Układy elektroniczne tych systemów umożliwiają rejestrację sygnałów od 0 Hz do kilkuset Hz, jednakże elektrodynamiczny detektor stanowi istotne ograniczenie w zakresie ultraniskich częstotliwości.

Inne dostępne w handlu systemy geofizyczne wykorzystują również geofony o dolnej użytecznej częstotliwości granicznej rzędu kilku Herców i masie własnej do jednego kilograma lub większej. Trzpienie geofonów w większości aplikacji są wbijamy w badany materiał lub wkładane do specjalnie przygotowanego otworu i następnie zalewane cementem. Pomimo dobrego kontaktu mechanicznego elementu detekcyjnego z materiałem skalnym, nie udaje się dokonać detekcji i wyodrębnienia sygnałów o małej amplitudzie i o częstotliwościach rzędu setnych lub dziesiątych części Herca. Ograniczenie to związane jest przede wszystkim z częstotliwościową zależnością amplitudy indukowanego napięcia elektrycznego. Jego wartość opisana ogólnym równaniem (21.1).

$$U = k \frac{d\phi}{dt} \quad (21.1)$$

gdzie:

- U – napięcie elektryczne indukowane w cewce geofonu,
- ϕ – strumień magnetyczny,
- t – czas,
- k – parametr konstrukcyjny związany przede wszystkim z liczbą zwojów.

Strumień magnetyczny w geofonie związany jest z obecnością magnesu stałego, który może się w pewnym stopniu przemieszczać (drgać) wzdłuż osi cewki i zmieniać wartość strumienia magnetycznego przenikającego przez jej przekrój poprzeczny. Jeżeli zostanie przyjęty najprostszy przypadek, w którym wartość modułu wektora indukcji magnetycznej związanej z przemieszczającym się cyklicznie magnesem stałym będzie zmieniała się sinusoidalnie w czasie (21.2), to na podstawie równań (21.2), (21.3) i (21.1), napięcie indukowane w cewce będzie reprezentowane równaniem (21.4).

$$B(t) = B_o \sin(\omega t) \quad (21.2)$$

$$\phi(t) = s \cdot B(t) \quad (21.3)$$

$$U(t) = k \cdot s \cdot \omega \cdot B_o \cos(\omega t) \quad (21.4)$$

gdzie:

- B – chwilowa wartość modułu wektora indukcji magnetycznej,

- B_0 – amplituda modułu wektora indukcji magnetycznej zmiennego pola magnetycznego,
- s – pole przekroju poprzecznego cewki geofonu,
- ω – pulsacja sygnału, która po podzieleniu przez 2π jest równa jego częstotliwości

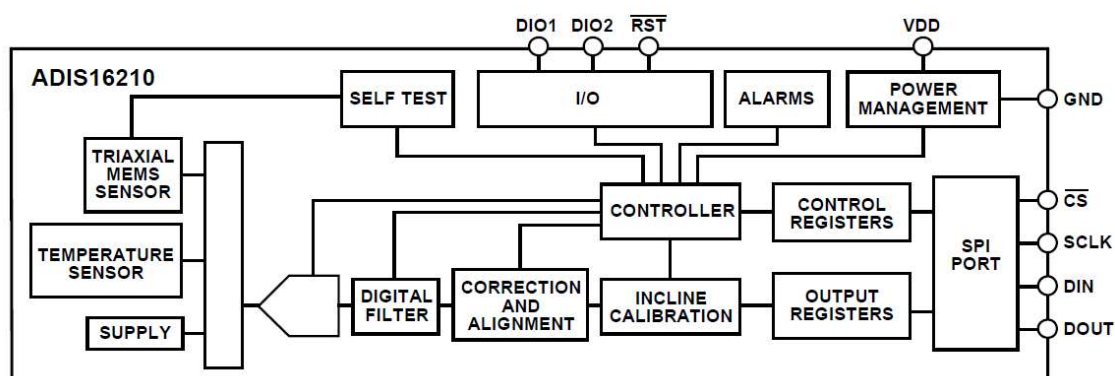
Napięcie elektryczne indukowane w cewce geofonu jest w przybliżeniu proporcjonalne do częstotliwości drgań (21.4) w określonym zakresie częstotliwości, w zależności od częstotliwości rezonansowej geofonu i jest przeliczane na m/s^2 . Ma to swoje konsekwencje przy opracowywaniu kryteriów zagrożenia. Złożenie charakterystyk widmowych związanych z układem mechanicznym oraz elektrycznym daje całkowitą charakterystykę widmową czułości geofonu. Niemniej jednak, dla bardzo niskich częstotliwości (rzędu setnych lub dziesiątych części Herca) dominującym czynnikiem wpływającym na zdolność detekcyjną geofonu jest ograniczenie wynikające z równania (21.4). Powoduje to nieprzydatność powszechnie stosowanych w pomiarach seismologicznych geofonów do wykrywania drgań o ultraniskiej częstotliwości, zwłaszcza gdy ich amplituda jest bardzo mała.

Na szczególną uwagę zasługuje fakt, iż szczerze wibrysy dokonują detekcji bardzo słabego nacisku (naprężenia wibrysu) [1], co może umożliwić im wykrywanie drgań o małej amplitudzie i częstotliwości. Następuje to pomimo braku sztywnego mechanicznego połączenia ze skałą jak ma to miejsce w przypadku geofonów – jedyny kontakt odbywa się poprzez sierść, łapy i wibrysy dotykające swobodnie napotykanym obiektów. Świadczy to o niezwykle rozwiniętych zmysłach tych zwierząt.

21.3 ZINTEGROWANE AKCELEROMETRY MEMS

Rozwiązaniem problemów związanych z ograniczeniami fizycznymi i technicznymi geofonów w zakresie bardzo niskich częstotliwości może okazać się zastosowanie dostępnych od kilku lat nowej generacji akcelerometrów w postaci zintegrowanych scalonych czujników pomiarowych typu MEMS (microelectromechanical system). Akcelerometry w systemach górniczych były dotychczas wykorzystywane m.in. w systemie SOS z sondami typu DLM opracowanym Głównym Instytucie Górnictwa w Katowicach [9]. W zdecydowanej większości przypadków układy MEMS wykorzystują w swojej zasadzie działania zjawisko piezoelektryczne. Elementy te teoretycznie mogą pracować począwszy od częstotliwości 0 Hz dokonując przykładowo pomiaru przyspieszenia grawitacyjnego – poprzednikami detektorów MEMS w tym zakresie były wykorzystywane w badaniach geofizycznych grawimetry [2]. Dodatkowym atutem tej technologii jest możliwość pomiaru w jednym układzie przyspieszenia w trzech wzajemnie prostopadłych osiach i następnie obliczenia na tej podstawie zwrotu, kierunku i długości wektora przyspieszenia od tysięcznych części m/s^2 do kilkudziesięciu m/s^2 . Pozwoli to na przeprowadzenie badań w bardzo szerokim zakresie amplitudy drgań. Pomiar wielkości mierzonej wykonywany jest najczęściej wewnątrz sensora

z współudziałem dedykowanego mikrokontrolera. Na rysunku nr 21.1 przedstawiono schemat blokowy przykładowego akcelerometru ADIS 16210 firmy Analog Devices [11] stanowiącego zintegrowany czujnik pomiarowy typu MEMS o wymiarach modułu 15 mm × 24 mm × 15 mm. Masa własna tego komponentu wynosi 7,2 grama. Po zabudowaniu układu na dedykowanej płytce drukowanej zgodnie z zaleceniami producenta, całość zawiera się na prostokątnej podstawie o wymiarach 37 x 44 mm i ma masę w zależności od wersji od kilkunastu do kilkudziesięciu gramów.

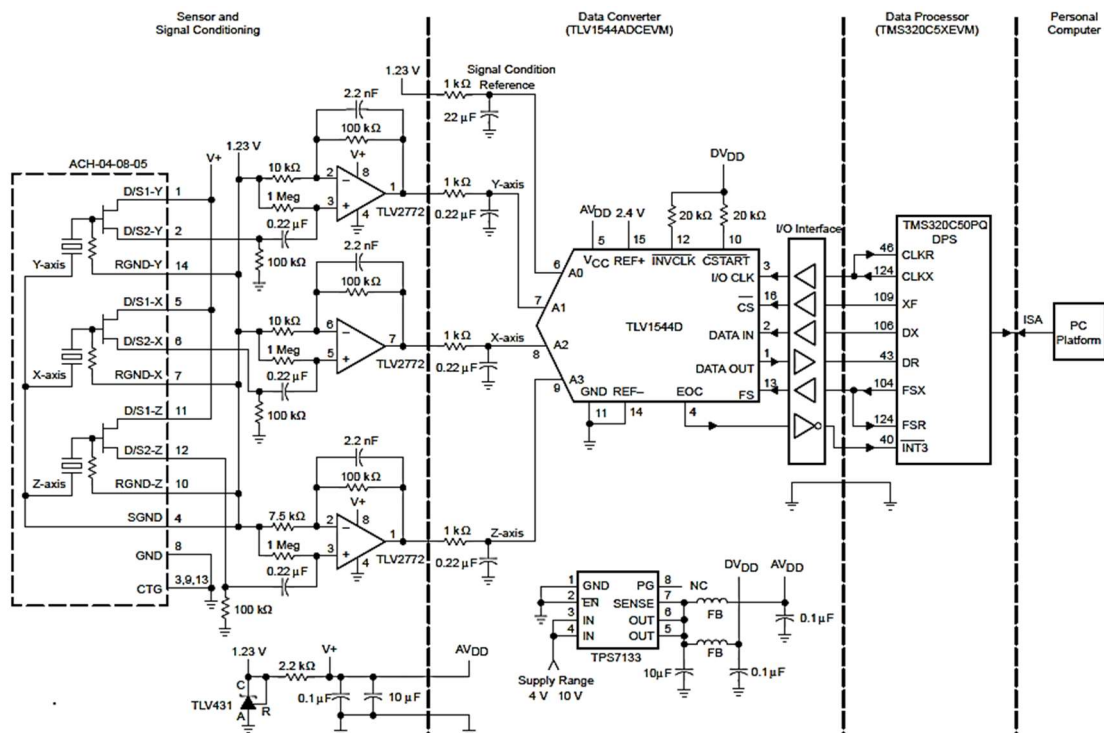


Rys. 21.1 Schemat blokowy akcelerometru ADIS 16210 firmy Analog Devices

Powyższy zintegrowany czujnik pomiarowy posiada wbudowany wewnętrzny układ pomiaru temperatury, który kompensuje jej wpływ na pracę czujnika przyspieszenia. Moduł kalibracyjny oraz autotestu zapewniają wieloletnią poprawność mierzonych wartości. Zbliżony poziom technologiczny prezentuje urządzenie SEISMIC ICP ACCELEROMETER firmy PCB Piezotronic [12]. Pozwala ono na pomiary w zakresie częstotliwości od 0.02 Hz do 1700 Hz przy rozdzielczości 0.00003 m/s² wartości skutecznej (dla częstotliwości powyżej 1 Hz) w szerokim zakresie amplitudy przyspieszenia od tysięcznych części m/s² do kilkudziesięciu m/s². Układ jest zdolny do przetrwania uderzenia 2950 m/s² wartości szczytowej. Kolejnym przykładem zintegrowanego akcelerometru jest przedstawiony na rysunku nr 21.2 układ pomiaru wibracji opracowany przez firmę Texas Instruments [13], wykorzystujący do kondycjonowania i wzmacniania sygnału z piezoelektrycznych czujników ACH-04-08-05 wzmacniacze operacyjne TLV2772.

Przedstawiony układ pozwala na wykrywanie drgań o częstotliwości od ułamka Herca do ok. 5 kHz, co pokrywa najbardziej „newralgiczny” zakres widma. Precyzyjne wzmacniacze operacyjne TLV2772 wzmacniają i kondycjonują sygnał elektryczny z piezoelektrycznego trójosiowego czujnika ACH-04-08-05. Następnie sygnał elektryczny wprowadzony zostaje do przetwornika analogowo-cyfrowego TLV1544D współpracującego z jednokładowym mikrokontrolerem. Szczególnie istotne jest odpowiednie zaprojektowanie i skonstruowanie układu wzmacniającego kondycjonującego sygnał elektryczny z przetworników piezoelektrycznych. Blok ten ma kluczowe znaczenie dla uzyskania wysokiej wartości stosunku sygnał/szum,

który ma fundamentalne znaczenie w detekcji fal akustycznych o bardzo niskiej amplitudzie.



Rys. 21.2 Uproszczony schemat elektryczny detektora drgań opracowanego przez firmę Texas Instruments

Urządzenia oparte o scalony zintegrowane czujniki pomiarowe MEMS są stosowane od kilku lat coraz częściej przez różne zespoły badawcze na świecie. W pracy [14] autorzy w badaniach sejsmicznych poświęconych lokalizacji i detekcji opadających skał zastosowali w zakresie infradźwięków akcelerometr Fretek RT 131A 02/03. Układ ten pozwala na pomiar wibracji w zakresie częstotliwości od 0 Hz do 500 Hz. Do wiodących ośrodków naukowych prowadzących badania naukowe nad konstrukcją nowej generacji zintegrowanych akcelerometrów należy NCPA (National Center for Physical Acoustics) mieszcząca się na University of Mississippi w Oxfordzie (w Mississippi) [4]. Szczególnie duże nadzieje w tym obszarze wiążane są z nowymi materiałami piezoelektrycznymi charakteryzującymi się wysoką wartością współczynnika sprzężenia elektromechanicznego.

Z punktu widzenia konstrukcji urządzenia o czułości i szerokości pasma porównywalnym z możliwościami zmysłów szczura, niezbędne jest połączenie w jeden system pomiarowy czujników z zakresu niskich i ultraniskich częstotliwości oraz czujników z zakresu średnich i wysokich częstotliwości. Pomiar sygnałów akustycznych w zakresie ultradźwięków jest generalnie znacznie prostszy w realizacji technicznej od pomiarów niskoczęstotliwościowych – obecnie w podziemnej części kopalni powszechnie stosowane są anemometry ultradźwiękowe (np. AS-3 produkcji EMAG). Zastosowane w nich są przetworniki

piezoelektryczne pracujące w paśmie częstotliwości kilkudziesięciu kiloherców. Pomimo potencjalnych niebezpieczeństw, które rodzi stosowanie materiałów piezoelektrycznych (możliwość wyidukowania napięcia elektrycznego rzędu dziesięciu kilowoltów), w pełni opanowane są metody dostosowania tego typu przyrządów do wymogów standardu ATEX. Poza górnictwem, technologia detekcji ultradźwięków w oparciu o przetworniki piezoelektryczne jest dobrze znana od dziesięcioleci i wykorzystywana np. w diagnostyce medycznej w ultrasonografach. Obecnie opracowywane są nowe materiały na bazie polimerów umożliwiające detekcję bardzo słabych sygnałów o częstotliwości prawie do 100 megaherców [5]. Na szczególną uwagę zasługują również optyczne wysokoczułe detektory ultradźwiękowe [8].

21.4 PODSUMOWANIE

W ciągu ostatnich lat nastąpił znaczący postęp i wzrost zainteresowania zintegrowanymi czujnikami pomiarowymi akcelerometrycznymi typu MEMS. Pozwalają one na pomiary bardzo słabych drgań w zakresie ultraniskich częstotliwości. Jednocześnie powszechnie dostępne są od dziesięcioleci techniki pomiarów akustycznych w obszarze ultradźwięków. Postęp technologiczny, który dokonał się w ostatniej dekadzie, pozwala dziś na ponowne podjęcie tematu konstrukcji szerokopasmowego układu detekcji fal mechanicznych w materiale skalnym lub powietrzu. W ten sposób powstanie urządzenie naśladujące zmysły szczurów. Na podstawie przeprowadzonej analizy widmowej uzyskanego sygnału oraz innych cech charakterystycznych, które nie są na tym etapie jeszcze znane, „elektroniczny szczur” powinien umożliwić dokonanie predykcji wstrząsów i tąpnięć w górnictwie podziemnym z odpowiednio dużym wyprzedzeniem. W zakresie drgań o bardzo niskich częstotliwościach i szukania ich związku z mechanizmem wstrząsów górniczych istotne wydają się amplitudy przemieszczenia i odkształcenia. Takie badania są prowadzone zarówno w trzęsieniach ziemi jak i dla sejsmiczności indukowanej eksploatacją górniczą. Prace w tym zakresie będą miały charakter interdyscyplinarny obejmującym badania podstawowe (geofizyka i geologia), przemysłowe (elektronika, automatyka) oraz wdrożeniowe. Dotychczasowe niepowodzenie w opracowaniu powyższego systemu predykcji mogło być związane z ograniczeniami technologicznym w zakresie detekcji sygnałów o ultraniskich częstotliwościach. Skonstruowanie nowego systemu pomiarowego opartego o układy typu MEMS otworzy nowe możliwości i rozstrzygnie o istotności rejestrowanych infradźwięków w predykcji zagrożeń sejsmicznych.

LITERATURA

1. C.C. Burn. „What is it like to be a rat? Rat sensory perception and its implications for experimental design and rat welfare.” *Applied Animal Behaviour Science*, vol. 112, issues 1-2, pp. 1-32, 2008.

2. Z. Fajkiewicz , C. Ostrowski. „Badania grawimetryczne terenów naruszonych eksploatacją górnictwem,” WARSZTATY 2012 z cyklu: Zagrożenia naturalne w górnictwie, Mat. Symp., 2012, pp. 115-131.
3. W. Gałązka. „Co różni wstrząsy górnicze od trzęsienia ziemi?” Internet: <http://nettg.pl/news/120359/co-rozni-wstrzasy-gornicze-od-trzesienia-ziemi> [02.2017]
4. <http://ncpa.olemiss.edu> [02.2017]
5. S.-W. Huang et al. „Low-noise wideband ultrasound detection using polymer microring resonators.” *Appl Phys Lett.*, no. 92(19), 193509, 2008. doi: [DOI 10.1063/1.2929379]
6. K. Kuźmiar, E. Maciąg, T. Tatara. „Unormowane spektra odpowiedzi od drgań powierzchniowych wzbudzanych wstrząsami górniczymi.” *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury. Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, JCEEA*, t. XXXI, z. 61 (2/14), pp. 69-80, 2014.
7. E. Maciąg. „Ocena wpływów wstrząsów górniczych na budynki,” WARSZTATY 2000 Zagrożenia naturalne w górnictwie, Kraków, 2000, pp. 297-317.
8. A. Rosenthal , S. Kellnberger, M. Omar, D. Razansky, V. Ntziachristos. „Wideband Optical Detector of Ultrasound for Medical Imaging Application.” *Journal of Visualized Experiments*, no. 87, 50847, 2014. doi: [DOI 10.3791/50847]
9. „System Obserwacji Sejsmologicznej SOS w ZG Sobieski.” Internet: <http://warsztatygornicze.pl/wp-content/uploads/2010-4.pdf> [02.2017]
10. www.cttemag.pl [02.2017]
11. www.analog.com [02.2017]
12. www.pcb.com [02.2017]
13. www.ti.com [02.2017]
14. V. L. Zimmer, N. Sitar. „Detection and location of rock falls using seismic and infrasound sensors.” *Engineering Geology*, no. 193, pp. 49-60, 2015. doi: [<http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.04.007>]

Data przesłania artykułu do Redakcji: 10.2016

Data akceptacji artykułu przez Redakcję: 03.2017

dr inż. Andrzej Nowrot

Politechnika Śląska

Wydział Górnictwa i Geologii

Katedra Elektryfikacji i Automatykacji Górnictwa

ul. Akademicka 2A, 44-100 Gliwice, Polska

e-mail: andrzej.nowrot@polsl.pl

MOŻLIWOŚCI TECHNICZNE ZASTOSOWANIA SZEROKOPASMOWEJ ANALIZY WIDMOWEJ W PREDYKCJI WSTRZĄSÓW I TĄPNIĘĆ

Streszczenie: Do powszechnych zjawisk występujących w górnictwie podziemnym należą wstrząsy i tąpnięcia, które stanowią istotne zagrożenie dla znajdujących się pod ziemią ludzi oraz mogą spowodować znaczne straty finansowe. Odpowiednio wczesne wykrycie nadchodzącego zagrożenia zdecydowanie poprawiłoby bezpieczeństwo załogi jak również pozwoliłoby ograniczyć straty ekonomiczne. Niestety nie zostały dotychczas opracowane dostatecznie skuteczne systemy predykcji tych zjawisk. Niemniej jednak szczury, które żyją w podziemnej części kopalni, wykrywają zbliżające się zagrożenie dużo wcześniej w stosunku do zainstalowanej aparatury. Nadzwyczajne umiejętności tych gryzoni wynikają w znacznej mierze z możliwości ich zmysłów pozwalających na rejestrowanie drgań mechanicznych w szerokim zakresie od infradźwięków do ultradźwięków. Istotnym problemem technicznym w opracowaniu aparatury naśladującej zmysły szczura jest uzyskanie odpowiedniej czułości i rozdzielczości detektora w zakresie niskich częstotliwości przy jednoczesnym zapewnieniu odpowiedniego stosunku sygnał szum. W artykule przedstawiono koncepcję konstrukcji szerokopasmowego detektora mikrodrgań jako elementu systemu predykcji zagrożeń sejsmicznych.

Słowa kluczowe: predykcja, MEMS, analiza szerokopasmowa

THE TECHNICAL CAPACITY OF THE WIDE-BAND ANALYSIS APPLICATION TO PREDICTION OF ROCK BURST AND MINING TREMOR

Abstract: The underground rock burst and mining tremor are well-known phenomenon, which are a serious threat to beneath the underground people and can cause significant economical losses. The early enough detection of approaching dangerous would significantly improve the safety of the crew and it would reduce economic losses. Unfortunately, they have not yet developed sufficiently effective systems for prediction of these phenomena. However, the rats that live in the underground of the mine can detect the coming dangerous much earlier in relation to so far used equipments. unique ability of these rodents largely due to the possibility of their senses for the registration of mechanical vibrations in a wide range of infrasound to ultrasound. An important technical problem in the development of devices mimicking the senses rat to obtain adequate sensitivity and resolution of the detector in the low frequency range while ensuring appropriate the signal to noise ratio. The paper presents the concept of construction wideband micro-vibrations detector as a part of the seismic hazards prediction system.

Key words: prediction, MEMS, wide-band analysis