

Sonda do pomiaru prędkości kątovej drgań rotacyjnych w podziemnych wyrobiskach górniczych

Seismic probe for measuring rotational velocity in underground mine workings



Inż. Hubert Logiewa^{*)}



Dr hab. inż. Grzegorz Mutke^{*)}



Dr hab. inż. Adam Lurka^{*)}

Treść: W ciągu ostatniej dekady temat rotacyjnych drgań gruntu stał się istotny w zakresie badań sejsmologicznych, a szczególnie inżynierii sejsmicznej. Do tej pory nie prowadzono jednak obserwacji drgań rotacyjnych w podziemnych wyrobiskach kopalnianych, ze względu na brak odpowiednich czujników pomiarowych. W Głównym Instytucie Górnictwa opracowano prototyp sondy rotacyjnej LMLROT do pomiaru prędkości kątovej drgań gruntu w warunkach zagrożenia wybuchowego. Sonda może współpracować z systemami obserwacji sejsmologicznej SOS oraz innymi urządzeniami odbierającymi sygnały prądowe z linii transmisyjnej. Trójskładowa sejsmiczna sonda rotacyjna LMLROT umożliwi pomiar prędkości kątovej drgań w zakresie do 100 mrad/s dla częstotliwości od 2 do 200 Hz. Sonda LMLROT może być wykorzystana między innymi do badań dotyczących wpływu wstrząsów sejsmicznych na stateczność wyrobisk górniczych.

Abstract: Over the last decade, the subject of rotational vibrations has become important in the field of seismological research, and in particular earthquake engineering. Until now, however, no rotational vibration observations have been carried out in underground mine workings, due to the lack of appropriate measuring sensors. At the Central Mining Institute, a prototype of the LMLROT rotary probe was developed to measure the angular velocity of ground vibrations in explosive conditions. The probe can cooperate with SOS seismological observation systems and other devices receiving current signals from the transmission line. The three-component seismic LMLROT rotary probe measures angular velocity up to 100 mrad/s for frequencies from 2 to 200 Hz. The LMLROT probe can be used, inter alia, for studies on the impact of mining seismic quakes on the stability of mining excavations.

Słowa kluczowe:

drgania rotacyjne, sejsmiczność indukowana, monitoring sejsmiczny, sonda do pomiaru prędkości kątovej drgań, certyfikat UE ATEX

Key words:

rotational vibrations, induced seismicity, seismic monitoring, angular velocity measurement probe, EU ATEX certificate

1. Wprowadzenie

Zjawiska sejsmiczne indukowane podziemną eksploatacją generują pole falowe, które jest monitorowane przez podziemne i powierzchniowe stacje sejsmiczne oparte na czujnikach drgań translacyjnych (sejsmometry, geofony, akcelerometry). Pełny opis ruchu falowego wymaga jednak pomiaru zarówno przemieszczenia wzdłuż trzech osi prostopadłych X, Y i Z, jak również pomiaru obrotu α_x , α_y , α_z wokół osi X, Y i Z. Brak pełnego pomiaru ruchu falowego wynikał głównie z powodu trudności technicznych z wykonaniem odpowiednich czujników. W ostatnich latach w sejsmologii globalnej związanej z trzęsieniami Ziemi oraz w sejsmologii górniczej zajmującej się zjawiskami sejsmicznymi indukowanymi przez działalność górnictwa kopalń ma miejsce szybki rozwój rejestracji i monitorowania drgań rotacyjnych z zastosowaniem mierników nowej

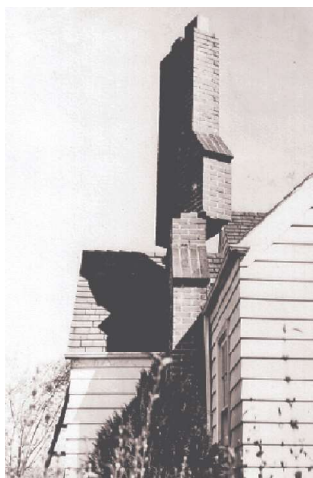
generacji, tj. czujników rotacyjnych. Obserwacje sejsmiczne fal prowadzone na stacjach powierzchniowych dowodzą występowania w polu falowym dodatkowych istotnych efektów drgań rotacyjnych (Nigbor 1994, Lee i in. 2009, Kalab, Knejzlik 2012, Igel 2005, Zembaty i in. 2017). Prędkość kątovej drgań sejsmicznych mierzona na powierzchni może mieć istotny wpływ na oddziaływanie na obiekty budowlane o dużych rozmiarach liniowych, np. wysokie kominy, mosty itp. (Zembaty 2009, Bonkowski i in. 2018). Do tej pory nie prowadzono jednak systematycznego monitoringu sejsmicznych drgań rotacyjnych w obszarze bliskiego pola falowego, indukowanych eksploatacją górnictwa. Przyczyną takiego stanu był brak mobilnych iskrobezpiecznych czujników rotacyjnych, które mogłyby być stosowane w podziemnych sieciach sejsmologicznych i w warunkach występującego zagrożenia metanowego. Efekty rotacyjne mogą mieć swój istotny wpływ na stateczność wyrobisk podziemnych i na zachowanie się obudów chodnikowych. W tym celu została opracowana nowa

^{*)} Główny Instytut Górnictwa, Katowice

konstrukcja sondy pomiarowej, która umożliwia badanie górniczych zjawisk sejsmicznych w podziemnych wyrobiskach kopalnianych, z uwzględnieniem kątowej prędkości drgań. W konstrukcji założono, że będzie to sonda iskrobezpieczna, posiadająca certyfikat badania typu UE i dopuszczona do stosowania w podziemnych zakładach górniczych w atmosferze zagrożonej wybuchem metanu lub pyłu węglowego.

2. Przegląd badań w zakresie monitorowania sejsmicznych drgań rotacyjnych

Jedną z pierwszych informacji opisujących sejsmiczne ruchy obrotowe w przypadku trzęsień ziemi i ich skutki w zabudowie (rys. 1) pochodzi z początków XX wieku (Hobbs 1907).



Rys. 1. Skutki wywołane w budynku drganiami rotacyjnymi w strefie epicentralnej trzęsienia ziemi (Hobbs, 1907)

Fig. 1. Rotational effect in the near earthquake zone area (Hobbs, 1907)

Natomiast historia rozwoju pomiarów przemieszczenia drgań gruntu przy użyciu sejsmografów rozpoczęła się już w drugiej połowie XVIII wieku. W dalszych latach nastąpił dynamiczny rozwój translacyjnych pomiarów sejsmicznych – począwszy od sejsmografów mechanicznych, poprzez analogowe i cyfrowe oraz mierniki drgań przemieszczeniowe, prędkościowe i akcelerometryczne. Jednak dopiero od około 15 lat następuje dynamiczny rozwój sejsmometrii rotacyjnej (Teisseyre i in. 2003; Bulletin of the Seismological Society of America; May 2009; v. 99; no. 2B - całe wydanie jest poświęcone sejsmologii drgań rotacyjnych).

W Polsce pierwsze sejsmometry rotacyjne wykonano modyfikując poziome sejsmometry typu elektromagnetyczne SM3 i Vegik (Wiszniowski 2006). Wykorzystanie efektu Sagnac'a pozwoliło na konstrukcję żyroskopowych czujników rotacyjnych (Jaroszewicz i in. 2012, 2016). Obecnie funkcjonują stanowiska sejsmologiczne wyposażone w sejsmometry rotacyjne, które działają w oparciu o technikę laserowych pomiarów przemieszczeń kątowych i są wykorzystywane do rejestracji zjawisk o charakterze telesejsmicznym (Igel i in. 2007, Belfi i in. 2012). Rozwój technologiczny pozwolił na stworzenie komercyjnych czujników rotacyjnych elektrochemicznych (Abramovitch, Kharlamov 2001) i opatentowanie czujników pojemnościowych (Štrunc, Dado 2008) oraz stworzenie precyzyjnych czujników mechanicznych (Brokešová

i in. 2012). Znane są także przypadki wykorzystania określonych układów konwencjonalnych sejsmometrów celem rejestracji sygnału rotacyjnego (Knejzlík i in. 2012).

W konsekwencji rozwój czujników umożliwiających pomiary przemieszczenia kątowego spowodował pojawienie się w publikacjach naukowych sejsmogramów prezentujących drgania rotacyjne wywołane zjawiskami sejsmicznymi. Uzyskane zapisy dotyczą zarówno rejestracji wstrząsów indukowanych (Kalab, Knajzlik 2012, Grzebyk i in. 2015, Zembaty i in. 2017), jak i zjawisk naturalnych (Igel i in. 2005, Lee i in. 2009), a także detonacji ładunków wybuchowych (Nigbor 1994, Lin i in. 2009). Wszystkie wymienione rodzaje sejsmogramy drgań rotacyjnych rejestrowane były dotychczas na powierzchni ziemi.

Największe dotychczas zarejestrowane prędkości kątowe drgań:

- podziemna eksplozja ładunku chemicznego która wyzwoliła energię sejsmiczną $E=4.2 \cdot 10^{12} \text{J}$, zarejestrowana z odległości epicentralnej 1000 m (Nigbor 1994): prędkość kątowa wokół osi X, $\omega_x=38 \text{ mrad/s}$ przy prędkości drgań translacyjnych, $\text{PGV}=17 \text{ cm/s}$;
- eksplozja ładunku wybuchowego $Q=3044 \text{ kg}$ zarejestrowana z odległości epicentralnej 362 m (Brokešová i Málek, 2013): prędkość kątowa wokół osi X, $\omega_x=4.5 \text{ mrad/s}$ przy prędkości drgań translacyjnych, $\text{PGV}=3.5 \text{ mm/s}$;
- naturalne trzęsienie ziemi na Tajwanie o magnitudzie 5.7 w odległości epicentralnej względem stanowiska równej 51.1 km (Liu i in. 2009): prędkość kątowa wokół osi Z, $\omega_z=0.65 \text{ mrad/s}$;
- sejsmiczność indukowana podziemną eksploatacją węgla w GZW - wstrząs o magnitudzie 2.7 z odległości epicentralnej 1000 m (Zembaty i in. 2017): prędkość kątowa wokół osi NS, $\omega_{NS}=0.8 \text{ mrad/s}$;
- naturalne trzęsienie ziemi na wyspie Kefalonia o magnitudzie 5.0 w odległości hipocentralnej względem stanowiska równej 20.2 km (Perron i in. 2018): prędkość kątowa wokół osi EW, $\omega_{EW}=6.2 \text{ mrad/s}$, przy prędkości drgań translacyjnych, $\text{PGV}=18.4 \text{ cm/s}$.

Przytoczone powyżej parametry prędkości kątowej drgań rejestrowane w polu dalekim oraz w strefie epicentralnej nie wydają się duże, jednak mogą wywoływać określone skutki na powierzchni w wybranych typach budowli o dużych rozmiarach liniowych (Bońkowski i inni 2018).

Z opisu matematycznego wynika wyraźna korelacja pomiędzy prędkością kątową drgań gruntu a odpowiednim wektorem pochodnej po czasie przemieszczenia drgań gruntu (Igel 2015)

$$\boldsymbol{\omega} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z) = \frac{1}{2} \nabla \times \dot{\mathbf{u}} = \frac{1}{2} \nabla \times \mathbf{v} = (\partial_y v_z - \partial_z v_y) \hat{x} + (\partial_x v_z - \partial_z v_x) \hat{y} + (\partial_x v_y - \partial_y v_x) \hat{z} \quad (1)$$

gdzie:

- $\boldsymbol{\omega} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ – wektor prędkości kątowej,
- $\dot{\mathbf{u}}$ – pochodna po czasie z wektora przemieszczenia drgań,
- \mathbf{v} – wektor translacyjnej prędkości drgań,
- $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ – wektor jednostkowy w kierunku osi X, Y i Z.

Ze wzoru (1) wynika, że powinna istnieć liniowa zależność pomiędzy prędkością translacyjną a prędkością kątową, co empirycznie potwierdzają wyniki badań przedstawione w artykule Zembaty i in. (2017). Oznacza to, iż należy oczekiwać dużo większych wartości prędkości kątowych w przypadku rejestracji w strefie bliskiego pola falowego i od zjawisk sejsmicznych o wysokich magnitudach.

Budowa sondy rotacyjnej do pomiaru prędkości kątowej w wyrobiskach podziemnych ma trzy podstawowe cele:

- poznanie parametrów drgań rotacyjnych w strefie bliskiego pola falowego,

- próbę empirycznego potwierdzenia/zaprzeczenia istnienia fal rotacyjnych, których źródło powstania jest związane z mechanizmem ogniska zjawiska sejsmicznego,
- ocenę wpływu drgań rotacyjnych na stateczność wyrobisk podziemnych, które są wektorem pochodnej po czasie przemieszczenia drgań cząstek.

Dzięki sondzie LMLROT będzie można zbliżyć się z rejestracjami drgań rotacyjnych do ognisk wstrząsów i przedłużyć relację skalowania drgań o strefę bliskiego pola falowego oraz uzyskać informacje na wymienione powyżej cele badawcze.

3. Ogólny opis nowej sondy rotacyjnej LMLROT

Konstrukcja sondy rotacyjnej LMLROT, która służy do pomiaru prędkości kątowej drgań rotacyjnych w podziemnych wyrobiskach kopalnianych w atmosferze zagrożonej wybuchem metanu lub pyłu węglowego, wywołanych przez wstrząsy górnicze, wykorzystuje zestaw czujników translacyjnych. Jest ona wyposażona w trzy pary niskoczęstotliwościowych czujników elektromechanicznych (geofony), z których dana para dokonuje pomiaru prędkości kątowej drgań rotacyjnych wokół osi jednego z trzech kierunków translacyjnych X, Y, Z. Sonda łączy w sobie cechy czujnika i nadajnika do przesyłania informacji teletechnicznymi liniami transmisyjnymi w postaci prądowej.

Współpracuje z odbiornikami „Boss” systemu transmisji „Tss”, odbiornikami „OS” systemu transmisji „DLM-SO” lub innymi urządzeniami odbierającymi określone sygnały prądowe z linii transmisyjnej, a spełniającymi warunki iskrobezpieczeństwa.

Sonda zbudowana jest z następujących elementów składowych:

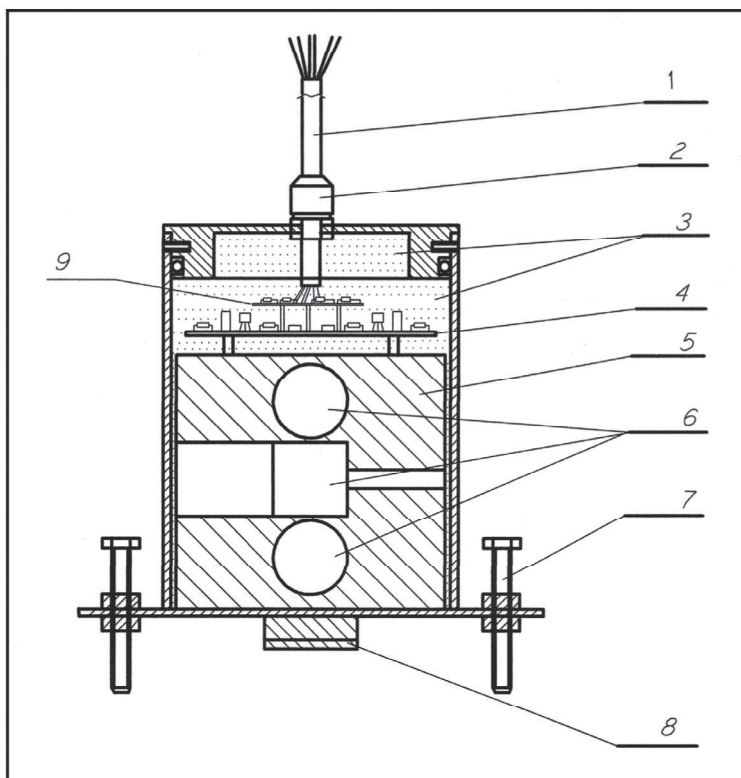
- obudowy,
- czujników pomiarowych,
- płytki obwodu drukowanego zespołów ochronnych,
- płytki obwodu drukowanego elektroniki,
- kabla transmisyjno-zasilającego.

Obudowa sondy została wykonana ze stali nierdzewnej i służy zabezpieczeniu czujników i układów elektroniki przed atmosferą zewnętrzną, a także umożliwia mocowanie jej do podłoża. Czujniki pomiarowe (geofony) umieszczono w specjalnie wykonanym wkładzie. Całość wnętrza sondy wypełniona jest zalewą Polastosil M-2000, która wypełnia wszystkie podzespoły elektroniczne, czujniki i szczelinę pomiędzy wkładem a korpusem.

Przekrój sondy wraz z zamontowanymi podzespołami przedstawia rys.2.

Centralnie w środku obudowy sondy znajduje się zaczepek montażowy 8, który służy do zaczepienia łba wcześniej zamontowanej śruby M8. Do naprężenia zaczepu i regulacji poziomu zastosowano trzy śruby regulacyjne 7. Sonda może być montowana na wszelkiego rodzaju płaskich utwardzonych powierzchniach, cokoły oraz wylewki betonowe dobrze związane z podłożem.

Jako czujniki pomiarowe zastosowano 3 pary elektromechanicznych czujników do pomiaru prędkości drgań (geofony) typu GS-11D firmy „GeoSpace”. Dwie pary geofonów poziomych do pomiaru prędkości kątowej rotacji drgań wokół osi X i Z, a wokół osi Y zastosowano parę czujników pionowych.



Rys. 2. Przekrój sondy rotacyjnej LMLROT (1 - kabel transmisyjno-zasilający, 2 - zacisk kablowy, 3 - zalewa elektroizolacyjna, 4 - płytki obwodu drukowanego elektroniki, 5 - wkład, 6 - geofony g1 do g6, 7 - śruba regulacyjna, 8 - zaczep montażowy, 9 - płytki obwodu drukowanego zespołów ochronnych)

Fig. 2. Cross section of the LMLROT rotary probe (1 - transmission-power cable, 2 - cable clamp, 3 - electro-insulating flooding, 4 - circuit printed circuit board, 5 - insert, 6 - geophones g1 to g6, 7 - regulating screw, 8 - mounting assembly, 9 - circuit board of protective units)

Na płytce obwodu drukowanego zespołów ochronnych umieszczono trzy diodowe zespoły ochronne rozdzielone galwanicznie, ograniczające napięcia i zabezpieczające układy elektroniki przed odwrotną polaryzacją.

Na płytce obwodu drukowanego elektroniki umieszczono wszystkie elementy układu elektronicznego, w tym układ kompensatora charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej geofonów, filtry i układ nadajnika do transmisji sygnału liniami teletechnicznymi. Nadajnik do prądowej transmisji sygnału wykonano jako sterowane napięciowo źródło prądowe wymuszające zmianę prądu w linii transmisyjnej proporcjonalnie do prędkości kątowej drgań rotacyjnych podłoża.

Układ kompensatora charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej pary geofonów pomiarowych służy do przesunięcia ich charakterystyk w stronę niskich częstotliwości, a także do zestrojenia ich pod względem tłumienia, czułości i częstotliwości rezonansowej.

Kabel transmisyjno-zasilający stanowi połączenie pomiędzy wnętrzem sondy a zewnętrzną siecią pomiarową i służy do zasilania i transmisji sygnałów elektrycznych do stacji odbiorczej. Sonda po zamontowaniu i połączeniu liniami kablowymi nie wymaga późniejszej obsługi i może pracować w trudnych warunkach środowiskowych. Sonda LMLROT stanowi bardzo wygodne urządzenie do prowadzenia obserwacji drgań rotacyjnych górotworu w sieciach pomiarowych prowadzonych przez kopalniane stacje geofizyki.

Dane znamionowe każdego kanału pomiarowego:

- parametr mierzony - prędkość kątowa drgań podłoża,
- rodzaj transmisji - prądowa,
- czułość - dobierana od 5 ÷ 50 mA/rad/s,
- zakres rejestrowanych częstotliwości - od 2.5 ÷ 250 Hz (dobierany),
- zakres napięć zasilających - od 18 ÷ 40 V,
- pobór prądu - 12 mA,
- głębokość modulacji prądowej w linii transmisyjnej - ± 5 mA.

4. Metodyka pomiarowa

Na rys. 3 pokazano sposób zamontowania w sondzie czujników pomiarowych. Do pomiaru rotacji drgań wokół osi Z i X zastosowane zostały pary geofonów poziomych odpowiednio g1, g2 i g5, g6, natomiast do pomiaru rotacji wokół osi Y para geofonów pionowych g3 i g4.

Reakcję czujnika geofonowego wraz z układem kompensacji dla każdej z par kierunkowych X, Y, Z na pobudzenie zewnętrzne opisuje się niejednorodnym równaniem różniczkowym drugiego rzędu. Przykładowo dla pomiaru rotacji α_z wokół składowej Z gdzie wpływ przechyłu α_y składowej Y na wynik pomiaru jest największy, równania przyjmują następującą formę (Graizer 2009, 2010) :

geofon g1

$$y_1'' + 2D_1\omega_1 y_1' + \omega_1^2 y_1 = -x_1' + g\alpha_y - L_1 \alpha_z'' \quad (2)$$

geofon g2

$$y_2'' + 2D_2\omega_2 y_2' + \omega_2^2 y_2 = -x_2' + g\alpha_y - L_2 \alpha_z'' \quad (2a)$$

gdzie:

ω_1, ω_2 - częstotliwość rezonansowa skompensowanych geofonów,

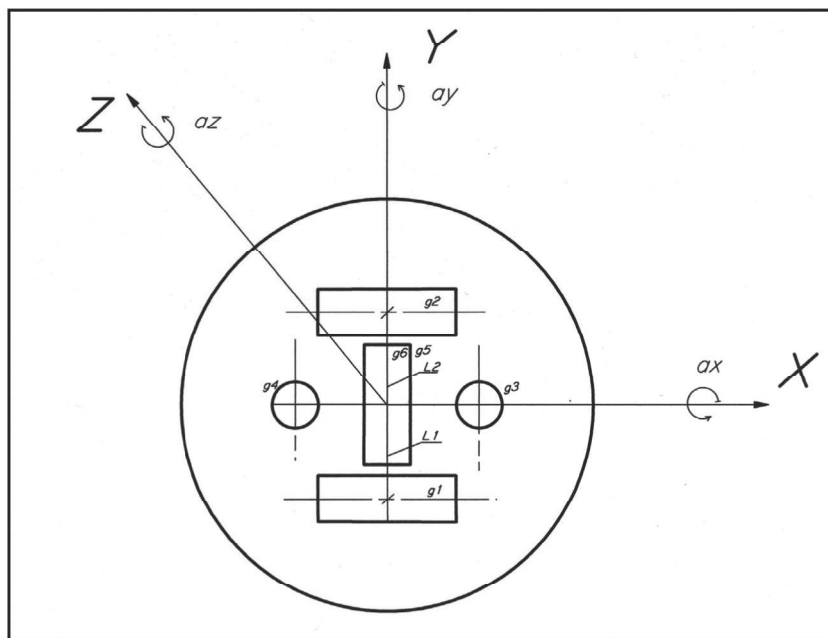
D_1, D_2 - współczynnik tłumienia względnego,

L_1, L_2 - ramię geofonu g1 i g2.

Lewa strona równań (2) i (2a) opisuje reakcję czujnika pomiarowego (geofonu) na sygnały wejściowe. Natomiast prawa strona opisuje:

x_1', x_2' - przyspieszenia kierunkowe wchodzące na obudowy geofonów,

$g\alpha_y$ - przyspieszenie pochodzące od przechyłu α_y składowej Y, zwanego tilterem (Graizer 2005),



Rys. 3. Rozmieszczenie czujników pomiarowych we wnętrzu obudowy (g1 i g2 - geofony poziome w osi Y równoległe do osi X; g3 i g4 - geofony pionowe w osi X równoległe do osi Z; g5 i g6 - geofony poziome w osi Z równoległe do osi Y; L1 i L2 - odległość geofonów g1 i g2 od środka obrotu)

Fig. 3. Arrangement of measurement sensors inside the housing (g1 and g2 - horizontal geophones in the Y axis parallel to the X axis; g3 and g4 - vertical geophones in the X axis parallel to the Z axis; g5 and g6 - horizontal geophones in the Z axis parallel to Y axis, L1 and L2 - distance between geophones g1 and g2 from the center of rotation)

$L_1 \alpha_z''$, $L_2 \alpha_z''$ – przyspieszenie bezwładności rotacji drgań o kąt α_z .

Przekształcając powyższe równania ruchu czujników pomiarowych i zakładając, że mamy do czynienia z dwoma tak samo skompensowanymi geofonami: $\omega_1 = \omega_2 = \omega_0$ i $D_1 = D_2 = D_0$, to różnicę napięć $\Delta U(j\omega)$ indukowanych w cewkach geofonów g_2 i g_1 można opisać wzorem w dziedzinie częstotliwości następująco:

$$\Delta U(j\omega) = K \cdot d \cdot \frac{-\omega^2 \theta_z(\omega)}{\omega_0^2 - \omega^2 + j\omega 2D_0 \omega_0} \quad (3)$$

gdzie:

K – czułość skompensowanych czujników pomiarowych (V·s/m),

$d = L_1 + L_2$ – odległość między środkami geofonów g_1 i g_2 (m),

$\theta_z(j\omega)$ – prędkość kątowa rotacji wokół składowej Z (rad/s).

Z kolei amplituda napięcia różnicowego opisanego wzorem (3) przyjmuje postać:

$$|\Delta U(\omega)| = K \cdot d \cdot \frac{\theta_z(\omega)}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2\right)^2 + \left(2D_0 \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}} \quad (4)$$

Napięcie $|\Delta U(\omega)|$ jak widać jest proporcjonalne do prędkości kątowej $\theta_z(\omega)$ w określonym paśmie częstotliwości i zależy tylko od czułości K i odległości d między geofonami. Na rys.4 przedstawiono wykres czułości sondy $K(V,f) = |\Delta U(f)| / \theta_z(f)$ dla idealnie skompensowanych czujników.

Dobranie i zestrojenie dwóch geofonów na te same parametry tłumienia D i częstotliwości rezonansowej ω_0 jest

trudne, ale jeżeli założymy pewną dokładność zestrojenia tych parametrów to można, stosując filtrację niepożądanych sygnałów, uzyskać poprawną charakterystykę czułości sondy na prędkość kątową rotacji θ_z .

Poniżej przedstawiono stosowne zależności obliczeniowe.

Zależność na różnicę sygnałów w dziedzinie częstotliwości dla geofonów o różnych parametrach tłumienia i częstotliwości rezonansowej ma postać:

$$\Delta U(j\omega) = K \left[\frac{\omega^2 v(\omega) + g \theta_y(\omega) - L_2 \omega^2 \theta_z(\omega)}{\omega_2^2 - \omega^2 + j\omega^2 D_2 \omega_2} - \frac{\omega^2 v(\omega) + g \theta_y(\omega) + L_1 \omega^2 \theta_z(\omega)}{\omega_1^2 - \omega^2 + j\omega^2 D_1 \omega_1} \right] \quad (5)$$

gdzie:

$v(\omega)$ – amplituda prędkości drgań wzdłuż osi X o określonej częstotliwości wchodząca na czujnik geofonowy,

g – przyspieszenie ziemskie, natomiast amplitudę napięcia różnicowego proporcjonalną do prędkości kątowej drgań opisuje zależność:

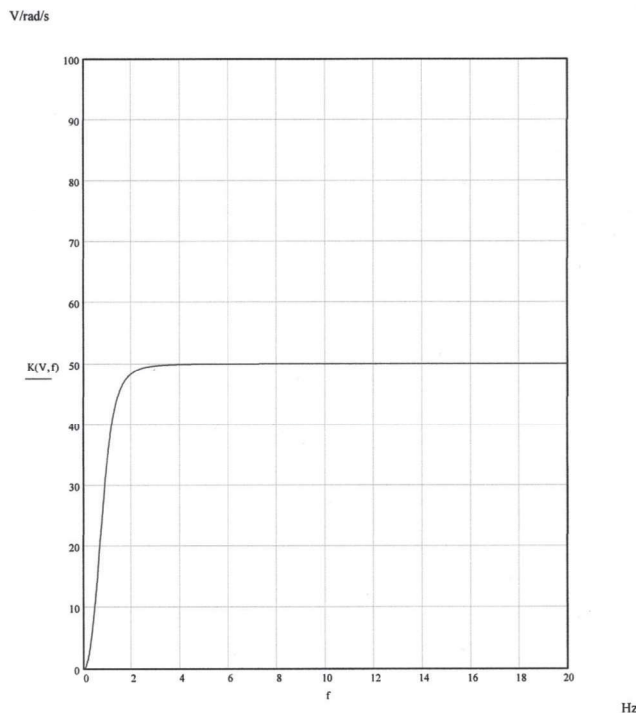
$$|\Delta U(\omega)| = K \cdot d \cdot \theta_z(\omega) \sqrt{\frac{A^2(\omega) + B^2(\omega)}{\left(\left(\left(\frac{\omega_2}{\omega}\right)^2 - 1\right) + \left(\frac{2D_2 \omega_2}{\omega}\right)^2\right) \cdot \left(\left(\left(\frac{\omega_1}{\omega}\right)^2 - 1\right) + \left(\frac{2D_1 \omega_1}{\omega}\right)^2\right)}} \quad (6)$$

gdzie:

$$A(\omega) = 1 - \left(\frac{\omega_2}{\omega}\right)^2 - \left(\frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{\omega^2}\right) \cdot \left(\frac{v}{d \cdot \theta_z} - \frac{L_2}{d} + \frac{g \theta_y}{\omega^2 d \cdot \theta_z}\right) \quad (7)$$

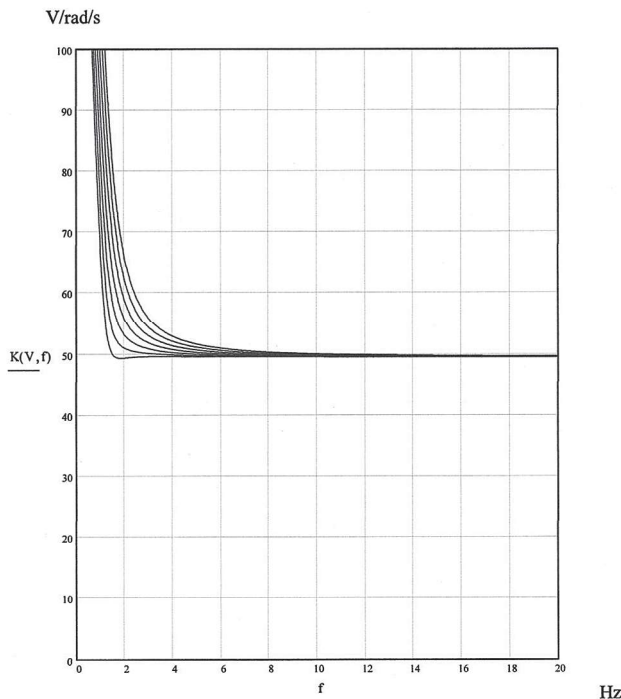
$$B(\omega) = \frac{2D_2 \omega_2}{\omega} + \frac{2D_2 \omega_2 - 2D_1 \omega_1}{\omega \left(\frac{v}{d \cdot \theta_z} - \frac{L_2}{d} + \frac{g \theta_y}{\omega^2 d \cdot \theta_z}\right)} \quad (8)$$

Na rys. 5 przedstawiono wykres czułości sondy $K(V,f) = |\Delta U(f)| / \theta_z$ dla różnych parametrów prędkości kierunkowej wzdłuż osi x i częstotliwości.



Rys. 4. Wykres czułości sondy sejsmicznej $K(V,f) = |\Delta U(f)| / \theta_z$ dla idealnie skompensowanych czujników

Fig. 4. Seismic probe sensitivity chart $K(V,f) = |\Delta U(f)| / \theta_z$ for ideally compensated sensors

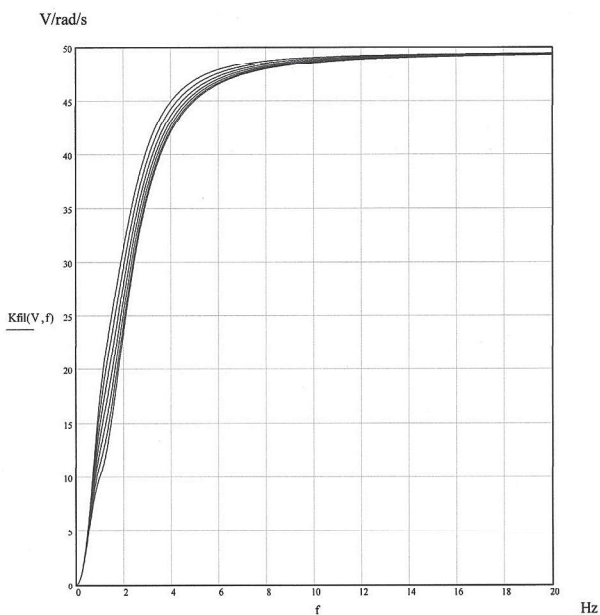


Rys. 5. Wykres czułości sondy seismicznej $K(V, f) = |\Delta U(f)| / \theta_z$ dla różnych parametrów prędkości kierunkowej wzdłuż osi x i częstotliwości

Fig. 5. Seismic probe sensitivity chart $K(V, f) = |\Delta U(f)| / \theta_z$ for different directional speed parameters along the x-axis and frequency

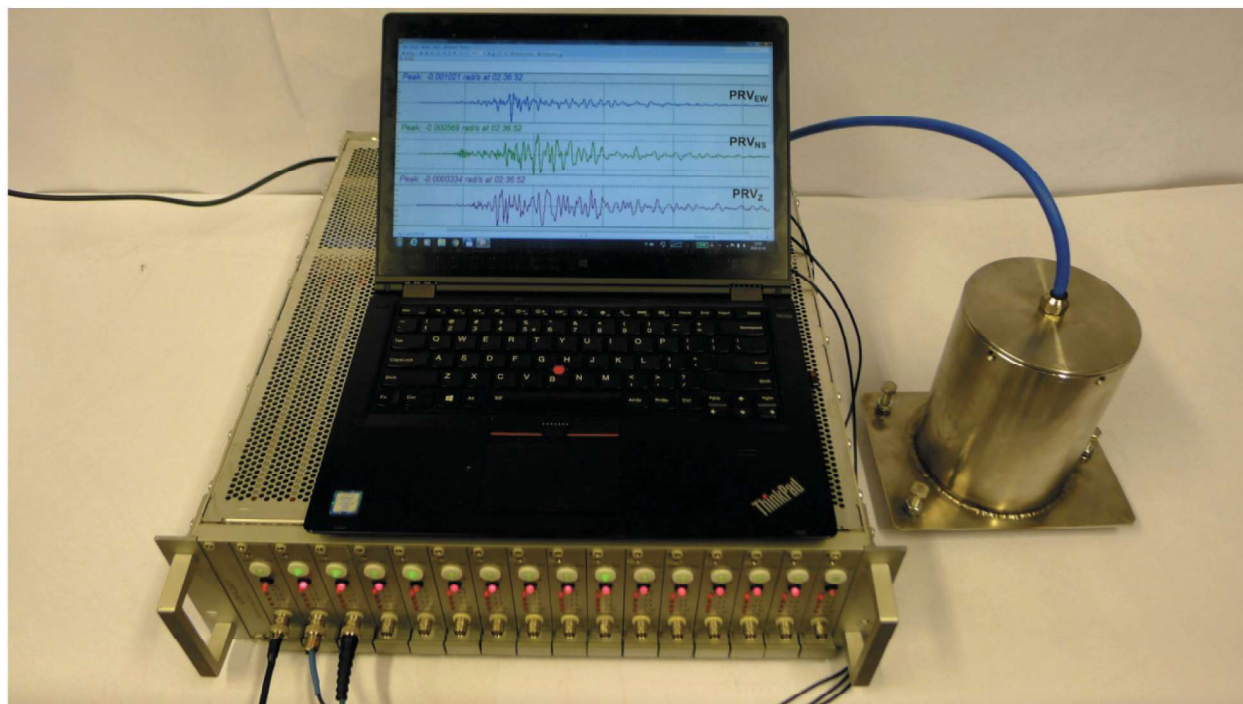
Jak widać na rys. 5, czułość sondy zmienia się w zależności od prędkości kierunkowej, a także jest mocno podbita dla niskich częstotliwości. Przyczyną tego jest wpływ tiltu α_y dla składowej Y, który silnie rośnie dla niskich częstotliwości wzory (7) i (8). W celu pozbycia się wpływu tiltu składowej Y zastosowano filtrację napięcia różnicowego opisanego wzorem (6).

Wynik filtracji przedstawia rys. 6. Jak widać, wpływ prędkości kierunkowej x jeszcze jest widoczny, ale uzyskano znaczny spadek efektu podbitcia charakterystyki dla niskich częstotliwości. Można powiedzieć, że wyeliminowano wpływ tiltu składowej Y (tilt) na wyniki pomiarów prędkości kątowej rotacji θ_z wokół osi Z.



Rys. 6. Wynik filtracji napięcia różnicowego w celu pozbycia się 'tiltu'

Fig. 6. Result of differential voltage filtration in order to get rid of tilt



Rys. 7. Widok sejsmicznej sondy rotacyjnej LMLROT podłączonej do stacji odbiorczej OS systemu sejsmologicznego SOS i komputera do interpretacji zapisów

Fig. 7. View of the LMLROT rotary seismic probe connected to the OS receiving station of the SOS seismological system and the computer for the interpretation of records

Na rys. 7 przedstawiono zdjęcie sondy rotacyjnej LMLROT podłączonej do stacji odbiorczej OS systemu sejsmologicznego SOS oraz do komputera interpretacyjnego.

5. Podsumowanie

W Głównym Instytucie Górnictwa opracowano sejsmiczną sondę LMLROT do pomiaru prędkości kątowej drgań rotacyjnych w warunkach metrologicznych podziemnych wyrobisk górniczych. Do tej pory w wyrobiskach górniczych mierzono wyłącznie składowe translacyjne drgań gruntu dla składowych pionowych i poziomych, które są aktualnie wykorzystywane do oceny zagrożenia stateczności wyrobisk górniczych pod wpływem obciążeń dynamicznych (tzw. „kryterium PPV” opisane w Instrukcji GIG nr. 22 w Załączniku 2 pn. *Metoda sejsmologii górniczej oceny stanu zagrożenia sejsmicznego i tąpnięmi*). Pomiary drgań rotacyjnych pozwolą w przyszłości na zbadanie wpływu obciążeń rotacyjnych pochodzących od wstrząsów sejsmicznych na wyrobiska górnicze i na elementy obudowy wyrobisk.

Sonda rotacyjna LMLROT charakteryzuje się transmisją analogową i może być podłączana do linii kablowych przeznaczonych w kopalniach na potrzeby sejsmologii kopalnianej i podobnie jak sondy DLM i DLMPPV może być podłączana do pracy z systemami obserwacji geofizycznych typu SOS produkcji GIG oraz z innymi urządzeniami odbierającymi sygnały prądowe z linii transmisyjnej. Trójskładowa sejsmiczna sonda rotacyjna LMLROT umożliwi pomiar prędkości kątowej drgań w zakresie do 100 mrad/s dla częstotliwości od 2 do 200 Hz.

* * *

W dniu 25.10.2018 r. do Urzędu Patentowego RP zgłoszono wynalazek pn. „Sonda do pomiaru prędkości kątowej drgań rotacyjnych w wyrobiskach kopalnianych, w atmosferze

zagrożonej wybuchem metanu lub pyłu węglowego” i zgłoszenie otrzymało nr: P.427534, w związku z powyższym sonda rotacyjna LMLROT uzyskała ochronę patentową.

Wyniki badań i prac projektowych przedstawione w niniejszym artykule zostały wykonane w ramach działalności statutowej GIG o nr. 11050617-120, pt. „Sonda do pomiaru efektów rotacyjnych w kopalniach podziemnych”, finansowanej przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego

Literatura

- ABRAMOVICH I.A., KHARLAMOV A.V. 2001- Electrochemical transducer and a method for fabricating the same, PMD Scientific, Inc., US Patent No. 6576103.
- BELFIJ., BEVERINI N., BOSI F., CARELLI G., DI VIRGILIO A., KOLKER D., MACCIONI E., ANTONELLO O., PASSAQUUIETI E., STEFANI F. 2012 - Performance of “G-Pisa” ring laser gyro at the Virgo site. *Journal of seismology*, 16(4), 757-766.
- BOŃKOWSKI P.A., ZEMBATY Z., MINCH M. 2018 - Time history response analysis of a slender tower under translational-rocking seismic excitations. *Engineering Structures*. Vol. 155, 387-393. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.11.042.
- BROKEŠOVÁ J., MÁLEK J., KOLÍNSKÝ P. 2012 - Rotaphone, a mechanical seismic sensor system for field rotation rate measurements and its in situ calibration. *Journal of seismology*, 16(4), 603-621.
- BROKEŠOVÁ J., MÁLEK J. 2013 - Rotaphone, a self-calibrated six-degree-of-freedom seismic sensor and its strong-motion records. *Seismological Research Letters*, 84(5), 737-744.
- GRZEBYK W., MERTUSZKA P., STOLECKI L. 2015 - Charakterystyka ruchu drgającego o charakterze translacyjnym i rotacyjnym od kopalnianych wstrząsów sejsmicznych. *„Wiadomości Górnicze”*, 66(2), 97-103.
- GRAIZER V. M. 2005 - Effect of tilt on strong motion data processing. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 25, 197-204.

- GRAIZER V.M. 2009 - Tutorial on Measuring Rotations Using Multipendulum System. Bull. Seism. Soc. Am. 99, 2B, 1064-1072. doi: 10.1785/0120080145.
- GRAIZER V.M. 2010 - Strong motion recordings and residual displacements: What are we actually recording in strong motion seismology?. Seismological Research Letters, 81(4), 635-639.
- HOBBS W.H. 1907 - Earthquakes. An Introduction to Seismic Geology, Appleton and Co., New York
- IGEL H., SCHREIBER U., FLAWS A., SCHUBERTH B., VELIKOSELTSEV A., COCHARD A. 2005 - Rotational motions induced by the M8.1 Tokachi-oki earthquake, September 25, 2003. Geophysical research letters, 32(8).
- IGEL H., COCHARD A., WASSERMANN J., FLAWS A., SCHREIBER U., VELIKOSELTSEV A., & PHAM DINH N. 2007 - Broad-band observations of earthquake-induced rotational ground motions. Geophysical Journal International, 168(1), 182-196.
- IGEL, HEINER, MARTIN KÄSER, MARCO STUPAZZINI 2015- Simulation of Seismic Wave Propagation in Media with Complex Geometries (revised 2nd edition), Encyclopedia of Complexity and Systems Science, Springer Verlag New York.
- JAROSZEWICZ L.R 2006 - Absolute Rotation Measurement Based on the Sagnac Effect, w Teisseyre R., Takeo M., Majewski E. as Eds. (2006), Earthquake Source Asymmetry, Structural Media and Rotation Effects, Springer, ISBN: 3540313362, pp. 413-438.
- JAROSZEWICZ L. R., TEISSEYRE K. P., KRAJEWSKI Z. 2012 - Fibre-Optic Sagnac Interferometer as Seismograph for Direct Monitoring of Rotational Events. INTECH Open Access Publisher.
- KNEJZLÍK J., KALÁB Z., RAMBOUSKÝ Z. 2012 - Adaptation of the S-5-S pendulum seismometer for measurement of rotational ground motion. Journal of seismology, 16(4), 649-656.
- KALÁB Z., KNEJZLIK J. 2012 - Examples of rotational component records of mining induced seismic events from Karviná region. Acta Geodyn. Geomater., 9(2), 166, 173-178.
- LEE W. H., HUANG B. S., LANGSTON C. A., LIN C. J., LIU C. C., SHIN T. C., TENG T. C., WU C. F. 2009 - Review: Progress in rotational ground-motion observations from explosions and local earthquakes in Taiwan. Bulletin of the Seismological Society of America, 99(2B), 958-967.
- LIN C. J., LIU C. C., & LEE W. H. 2009 - Recording rotational and translational ground motions of two TAIGER explosions in northeastern Taiwan on 4 March 2008. Bulletin of the Seismological Society of America, 99(2B), 1237-1250.
- NIGBOR R. L. 1994 - Six-degree-of-freedom ground-motion measurement. Bulletin of the Seismological Society of America, 84(5), 1665-1669.
- PERRON V., HOLLENDER F., MARISCAL A., THEODOULIDIS N., ANDREOU C., BARD P-Y-2018 - Accelerometer, Velocimeter Dense-Array, and Rotation Sensor Datasets from the Sinaps@ Postseismic Survey (Cephalonia 2014–2015 Aftershock Sequence). Seismological Research Letters. 89, 678–87. doi:10.1785/0220170125.
- STRUNC J., DADO S. 2008 - Capacitive Sensor for Rotational Seismology, 16th IMEKO TC4 International Symposium, "Exploring New Frontiers of Instrumentation and Methods for Electrical and Electronic Measurements", September 22 - 24, 2008, Florence, Italy, ISBN 978-88-903149-3-3, p. 513-516.
- TEISSEYRE R., SUCHCICKI J., TEISSEYRE K.P., WISZNIOWSKI J., PALANGIOP. 2003 - Seismic rotation waves: basic elements of theory and recording, Annals of Geophysics, Vol. 46, N.4.
- WISZNIOWSKI J. 2006 - Rotation and Twist Motion Recording - Couple Pendulum and Rigid Seismometers System, w Teisseyre R., Takeo M., Majewski E. as Eds. (2006), Earthquake Source Asymmetry, Structural Media and Rotation Effects, Springer, ISBN: 3540313362.
- ZEMBATY Z. 2009 - Rotational Seismic Load Definition in Eurocode 8, Part 6 for Slender Tower-shaped Structures Bulletin of the Seismological Society of America, 99, 1483-1485.
- ZEMBATY Z., MUTKE G., NAWROCKI D., BOBRA P. 2016 - Rotational Ground-Motion Records from Induced Seismic Events. Seismological Research Letter, 88(1), 13-22.

Artykuł wpłynął do redakcji – maj-czerwiec 2019
Artykuł akceptowano do druku – 29.11.2019



LUBELSKI WĘGIEL
„BOGDANKA”
SPÓŁKA AKCYJNA

KOPALNIA
INTELIGENTNYCH
ROZWIĄZAŃ

jesteśmy notowani w indeksach:
mWIG40, WIG-GÓRNICTWO, InvestorMS oraz Respect Index

www.lw.com.pl