

Geofony w sejsmice inżynierskiej

An overview of technical parameters of geophones used in seismic engineering



Dr hab. inż. Zenon Pilecki, prof. IGSMiE PAN.)*



Mgr inż. Paulina Harba)*



Inż. Andrzej Adamczyk)*



Mgr inż. Krzysztof Krawiec)*



*Dr hab. inż. Elżbieta Pilecka, prof. PK**)*

Treść: W sejsmice inżynierskiej czujniki służą jako rejestratory drgań mechanicznych ośrodka geologicznego. W pracy przedstawiono ich klasyfikację. Do najbardziej powszechnych należą geofony, które stosuje się do badań geologiczno-inżynierskich, hydrogeologicznych, geotechnicznych, geomechanicznych oraz w górnictwie. Prawidłowy dobór ich parametrów technicznych ma znaczący wpływ na jakość uzyskanych danych oraz rozdzielczość metody. Najważniejszymi parametrami, które należy wziąć pod uwagę to: częstotliwość własna, czułość, tłumienie, zniekształcenia harmoniczne i oporność cewki. Bardzo istotny jest również sposób przytwierdzenia geofonu do podłoża, ponieważ może on znacząco wpływać na odpowiedź impulsową układu pomiarowego. Światowi producenci geofonów oferują szeroki zakres urządzeń o różnych wartościach parametrów technicznych do jak najlepszej akwizycji danych w konkretnych zastosowaniach sejsmicznych. Dodatkowo, nowoczesne geofony trójskładowe mogą rejestrować jednocześnie w trzech kierunkach, co ułatwia identyfikację fal sejsmicznych i opis pola falowego. W artykule dokonano możliwie szerokiego przeglądu podstawowych parametrów technicznych geofonów czołowych producentów na świecie. Sformułowano kryteria doboru geofonów do badań sejsmicznych.

Abstract: Sensors are used in seismic engineering to record mechanical oscillations of geological medium. This paper presents a classification of the applied detectors. The most common are geophones which used in geological engineering, hydrogeology, geotechnical engineering and mining. Proper choice of the geophone technical parameters is essential for the obtained data quality and seismic resolution. The most important parameters are natural frequency, sensitivity, damping, harmonic distortion and coil resistivity. Geophone coupling to the ground is crucial because of its great impact on impulse response. The global producers of geophones offer a wide range of devices with different technical parameters in order to obtain the best seismic acquisition. Moreover, the newest three-component geophones record in three dimensions simultaneously. It simplifies wave identification and characterization of the wave field. This paper presents a possibly wide overview of geophone basic technical parameters produced by the leading geophysical companies worldwide. Criteria of their selection were formulated as well.

*) IGSMiE, Kraków **) Politechnika Krakowska

Słowa kluczowe:

sejsmika inżynierska, klasyfikacja czujników sejsmicznych, sejsmometr, geofon, akcelerometr, czujniki trójskładowe, parametry techniczne geofonów, odpowiedź impulsowa, tłumienie

Key words:

seismic engineering, seismic sensor classification, seismometer, geophone, accelerometer, three-component sensors, geophone technical parameters, impulse response, damping

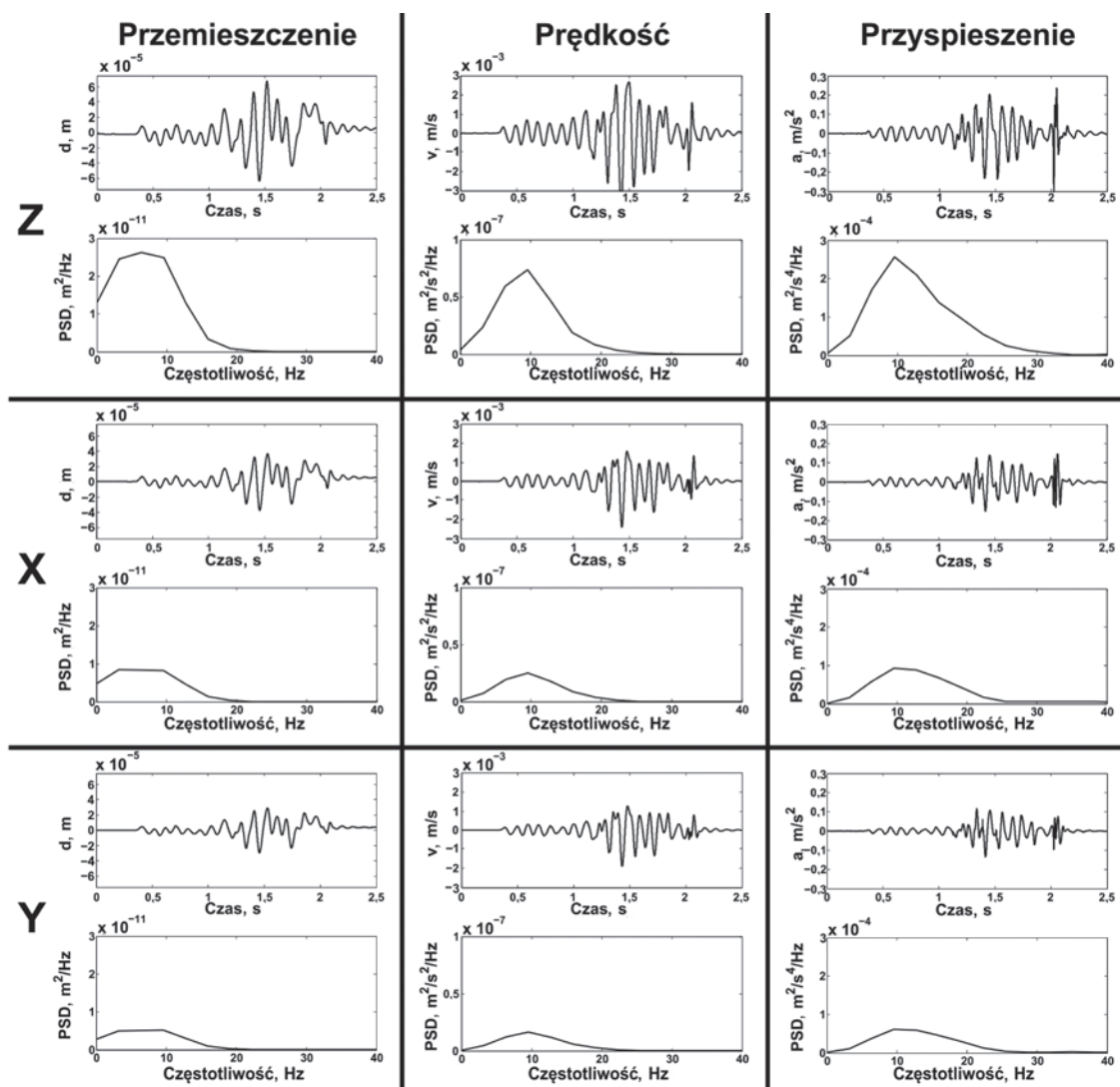
1. Wprowadzenie

Zakres badań sejsmiki inżynierskiej obejmuje wiele zagadnień m.in. geologiczno-inżynierskie, hydrogeologiczne, geotechniczne, geomechaniczne, a także górnicze. W przypadku zastosowania metod sejsmicznych w górnictwie, obejmujących również zagadnienia tunelowania czy budowy obiektów podziemnych, wyodrębniła się specjalność nazywana geofizyką górniczą [3, 8, 12].

W sejsmice inżynierskiej czujniki służą do rejestracji drgań mechanicznych w ośrodku geologicznym w miejscu pomiaru. W literaturze angielskojęzycznej używa się różnych terminów

na określenie czujnika, najczęściej *detector*, *transducer*, *receiver*, lub konkretnie stosuje się nazwę czujnika. Czujniki rejestrują drgania wzbudzone przez źródła tzw. aktywne i pasywne [13].

W ogólnym ujęciu, czujniki sejsmiczne zamieniają drgania mechaniczne rejestrowane w czasie na sygnał elektryczny, zapisywany najczęściej w postaci cyfrowej i coraz rzadziej w postaci analogowej. W praktyce wyróżnia się trzy rodzaje czujników: sejsmometry, geofony i akcelerometry. Czujniki te pozwalają rejestrować różne wielkości opisujące drgania: przemieszczenie, prędkość i przyspieszenie (rys. 1).

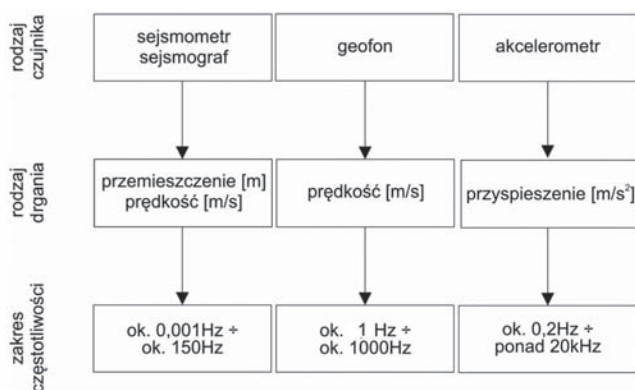


Rys. 1. Syntetyczne sejsmogramy składowych drgań: pionowej (Z), poziomych wzajemnie prostopadłych (X, Y) dla wstrząsu pochodzenia górniczego i ich widma amplitudowe zarejestrowane na powierzchni terenu w jednym punkcie w postaci przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia drgań

Fig. 1. Synthetic seismogram of vibration components: vertical (Z), horizontal, perpendicular (X, Y) for mining-origin tremor and their amplitude spectra recorded on the ground surface at the same point as tremor, velocity and acceleration of vibration

W literaturze angielskojęzycznej przez pojęcie sejsmometr (ang. *seismometer*) często określa się każdy rodzaj czujnika sejsmicznego. Na przykład [16] przyjmuje, że o rodzaju mierzonej wielkości decyduje układ elektryczny czujnika, a zasada działania układu mechanicznego sejsmometru, geofonu i akcelerometru może być analogiczna.

Autorzy, mając na uwadze obecnie stosowane konstrukcje układów mechanicznych i elektrycznych czujników sejsmicznych oraz stosowaną w praktyce terminologię, proponują używać nazwy czujnika w zależności od rodzaju mierzonej wielkości sejsmicznej i zakresu częstotliwości sygnału (rys. 2). W dalszej części pracy scharakteryzowano wszystkie rodzaje czujników oraz szerzej omówiono geofon jako najbardziej rozpowszechniony czujnik stosowany w sejsmice inżynierskiej.



Rys. 2. Klasyfikacja czujników wykorzystywanych w sejsmice inżynierskiej ze względu na rodzaj drgania i zakres rejestrowanych częstotliwości

Fig. 2. Sensors used in seismic engineering classified by vibration type and frequency range

2. Charakterystyka czujników sejsmicznych

W zależności od celu zadania badawczego i oczekiwanego zakresu pomiarowego częstotliwości sygnału użytecznego,

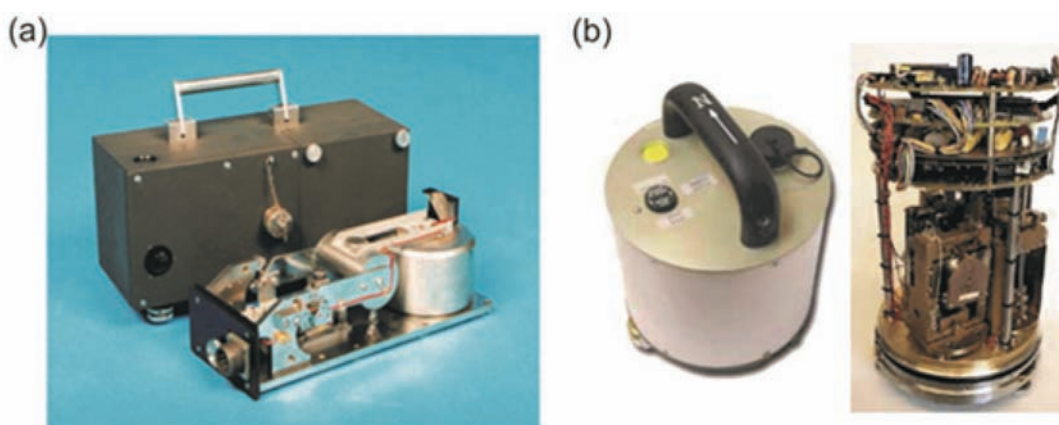
stosuje się konkretny rodzaj czujnika. Obecnie, coraz szersze zastosowanie mają czujniki trójskładowe w jednej obudowie, które pozwalają rejestrować pełne pole falowe w kierunku pionowym oraz dwóch poziomych i prostopadłych do siebie kierunkach, na ogół zorientowanych w kierunkach geograficznych. Istotnym elementem pomiaru drgań jest sposób instalacji czujnika, który równocześnie powinien zapewniać dobry kontakt z ośrodkiem, ograniczający straty energii sejsmicznej i zniekształcenie sygnału.

2.1. Sejsmometr

Jest to przyrząd zamieniający drgania mechaniczne na zmienny w czasie sygnał elektryczny w zakresie częstotliwości od ok. 0,001 Hz (okresie 100s) (rys. 2).

Sejsmometr ze względu na konstrukcję układu mechanicznego i elektrycznego rejestruje amplitudy składowej przemieszczenia lub prędkości drgań ośrodka (np. SPI-70, Guralp CMG, Willmore Mk). Dla nowoczesnych sejsmometrów odpowiedź zmian napięcia elektrycznego jest w przybliżeniu proporcjonalna do zmian składowej prędkości drgań wymuszających w ośrodku. Pierwsze sejsmometry o konstrukcji całkowicie mechanicznej, nazywane sejsmografami generowały odpowiedź w postaci składowej przemieszczenia. Sejsmografy, oprócz układu mechanicznego rejestrującego i równocześnie powiększającego niewielkie drgania ośrodka, posiadały układ mechaniczny do zapisu zmian amplitudy przemieszczenia na specjalnych bębnach z taśmą zaczernioną sadzą, a później na papierze światłoczułym lub termoczułym. Przykładem takiego urządzenia jest sejsmograf skonstruowany przez prof. Mainkę znajdujący się w Obserwatorium Geofizycznym Polskiej Akademii Nauk w Raciborzu (rys. 3).

W Polsce, sejsmometry znajdują zastosowanie w zagadnieniach inżynierskich, głównie jako czujniki drgań w ośrodku geologicznym wywołane wstrząsami pochodzenia górniczego. Dane pomiarowe są wykorzystywane do oceny zagrożenia sejsmicznego w kopalniach oraz w zagadnieniach ochrony powierzchni terenu górniczego. Ostatnio sejsmometry znalazły zastosowanie w metodzie interferometrii sejsmicznej bazującej na rejestracji niskoczęstotliwościowego szumu sejsmicznego [9].



Rys. 3. Sejsmometr SPI-70 stosowany powszechnie w polskich kopalniach węgla kamiennego [21] (a) oraz sejsmometr Guralp CMG, jeden z najnowocześniejszych obecnie sejsmometrów przenośnych z elektronicznym systemem gromadzenia danych [18] (b)

Fig. 3. SPI-70 seismometer commonly used in Polish coal mines [21] (a) and Guralp CMG seismometer which is one of the most modern portable seismometers with electronic data acquisition system [18] (b)



Rys. 4. Sejsmograf Mainki znajdujący się w Obserwatorium Geofizycznym Polskiej Akademii Nauk w Raciborzu [19]

Fig. 4. Mainki seismograph in Geophysical Observatory of Polish Academy of Sciences in Racibórz [19]

2.2. Geofon

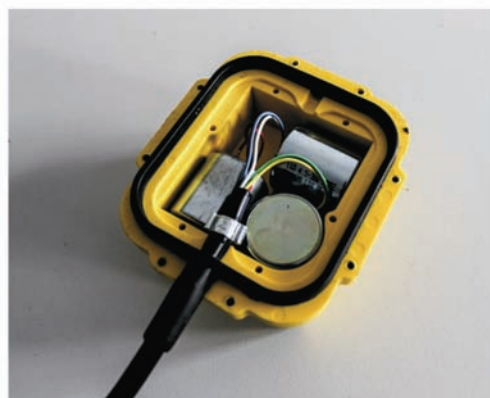
Działa na analogicznej zasadzie jak nowoczesny sejsmometr, lecz jego konstrukcja jest znacząco zminiaturyzowana (rys. 4a). Rejestruje on drgania mechaniczne ośrodka w postaci składowej prędkości drgań w zakresie częstotliwości od 1 Hz dla geofonów niskoczęstotliwościowych do ok. 1000 Hz dla geofonów wysokoczęstotliwościowych. Większość stosowanych w praktyce geofonów ma częstotliwość własną od

4,5 do 40 Hz i częstotliwości maksymalne od ok. 150 do 400 Hz. Według [1] geofony rejestrują amplitudę prędkości drgań cząsteczek ośrodka w zakresie od 0,00025 mm/s do 25 mm/s.

Geofon jest tak skonstruowany, że ruch jego układu drgającego odbywa się w jednym kierunku i w efekcie odpowiedź amplitudowa jest zorientowana wzdłuż jednej składowej prędkości drgania. W przypadku potrzeby rejestracji pełnego pola falowego stosuje się trójskładowe geofony 3C (ang. *three components*) (rys. 4b). W jednej obudowie geofonu 3C znajdują się 3 geofony zorientowane w układzie ortogonalnym. Na innej zasadzie działa hydrofon – odpowiednik geofonu stosowany w środowisku wodnym (Fot. 5). Rejestruje on zmiany ciśnienia na ogół za pomocą membrany z przymocowanymi czujnikami piezoelektrycznymi. Hydrofony mają podobny zakres częstotliwości jak geofony.



Rys. 6. Widok hydrofonu MP 24 L1 – 6Hz produkcji Geospace
Fig. 6. MP 24 L1 – 6Hz Geospace hydrophone



Rys. 5. Widok geofonu pionowego 20DM - 40Hz produkcji Geospace – a i trójskładowego produkcji 11D - 4,5Hz produkcji Geospace – b

Fig. 5. 20DM – 40Hz Geospace vertical geophone (a) and 11D – 4,5Hz Geospace three-component geophone (b)

2.3. Akcelerometr

Jest czujnikiem, którego odpowiedź impulsowa jest proporcjonalna do przyspieszenia drgań w ośrodku (rys. 6). Nowoczesne akcelerometry oparte są głównie na technologii MEMS (ang. *Micro Electro-Mechanical Systems*), w tym wykorzystującej efekt piezoelektryczny. Zakres częstotliwości wynosi od ok. 0,2 Hz do ponad 20 kHz. Akcelerometry w zagadnieniach inżynierskich pełnią rolę podobną do geofonów.



Rys. 7. Widok trójskładowego czujnika przyspieszenia drgań, skonstruowanego na bazie przetworników akcelerometrycznych z wyjściem typu DeltaTron 457-005B (0,4 Hz – 6 kHz) produkcji Brüel&Kjær

Fig. 7. Three-component sensor of vibration acceleration constructed on the basis of accelerometric converter DeltaTron 457-005B (0,4 Hz – 6 kHz) Brüel&Kjær type

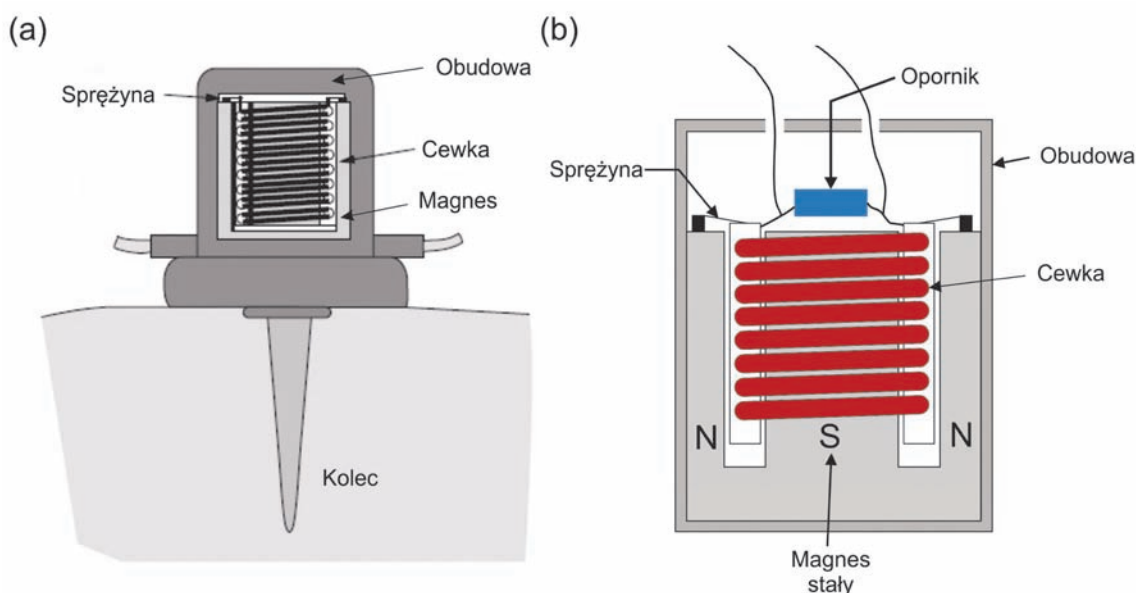
3. Budowa i zasada działania geofonu

Teoretyczny opis budowy i mechanizmu działania geofonu można znaleźć w wielu pracach i podręcznikach (np. [6, 7]).

Standardowy geofon zbudowany jest z następujących elementów głównych: obudowa, masa bezwładna, magnes, sprężyna oraz kolec (rys. 7a). Obudowa zapewnia ochronę elementów elektronicznych przed niekorzystnymi dla niego czynnikami zewnętrznymi, takimi jak wilgoć czy pyły. Elementem łączącym obudowę z podłożem jest najczęściej kolec o odpowiednio dobranej długości dla jak najlepszego odbioru energii mechanicznej. Wykorzystywane są również inne sposoby przenoszenia drgań z ośrodka geologicznego, takie jak metalowe płyty, metalowe kostki, kotwy, sondy rozporowe różnej konstrukcji lub różne sposoby klejenia [2].

Rozróżnia się dwa rodzaje konstrukcji mechanicznej geofonu, z ruchomą cewką lub ruchomym magnesem jako masą bezwładną. W standardowej konstrukcji masą bezwładną jest cewka nawinięta na rdzeń (rys. 7b). Jest ona przytwierdzona do obudowy geofonu za pomocą sprężyn, co daje jej możliwość względnego ruchu. Cewka znajduje się w polu stałego magnesu związanego sztywno z obudową geofonu. W przypadku, gdy obudowa wykonuje drgania wraz z cząsteczkami ośrodka, magnes porusza się wraz z nim, natomiast cewka zostaje wprawiona we względny ruch w stosunku do magnesu i obudowy. W wyniku tego ruchu generowane jest napięcie pomiędzy końcówkami cewki, proporcjonalne do prędkości ruchu cewki w polu magnetycznym i jednocześnie do prędkości drgań cząsteczek ośrodka.

Tłumienie w geofonach stosuje się w celu zmniejszenia czasu trwania drgań swobodnych masy bezwładnej oraz ograniczenia amplitudy drgań własnych. Zastosowanie tłumienia jest zadaniem jako odbiornik drgań gruntu. Właściwe tłumienie powoduje, że drgania własne geofonu są eliminowane. W tym celu wykorzystuje się efekt tłumienia elektromagnetycznego związanego z prądami indukcyjnymi w cewce, powstałymi podczas jej ruchu i wzajemnym oddziaływaniem wytworzonego pola elektromagnetycznego ze stałym polem magnetycz-



Rys. 8. Schemat budowy geofonu na podstawie [11] (a); model mechaniczno-elektryczny geofonu z ruchomą cewką (b)

Fig. 8. Geophone construction scheme based on [11] (a); electromechanical geophone model with moving coil (b)

nym. W celu zwiększenia tłumienia powszechnie stosuje się opornik (rezystor) bocznikowy, który odpowiada za ograniczenie przepływającego prądu przez cewkę. W pierwszych konstruowanych geofonach do tłumienia wykorzystywano ciecz lepka, w której całkowicie lub częściowo zanurzona była masa bezwładna [5]. Siły tarcia powstałe w trakcie ruchu masy bezwładnej w cieczy powodowały wytłumienie jej drgań swobodnych. Obecnie nie stosuje się tłumienia z użyciem cieczy, gdyż jest ono zależne od temperatury.

4. Charakterystyka parametrów technicznych geofonów

4.1. Parametry techniczne

Do najważniejszych parametrów technicznych geofonu należy: częstotliwość własna (inaczej rezonansowa lub naturalna), czułość, tłumienie, oporność cewki oraz zniekształcenia harmoniczne.

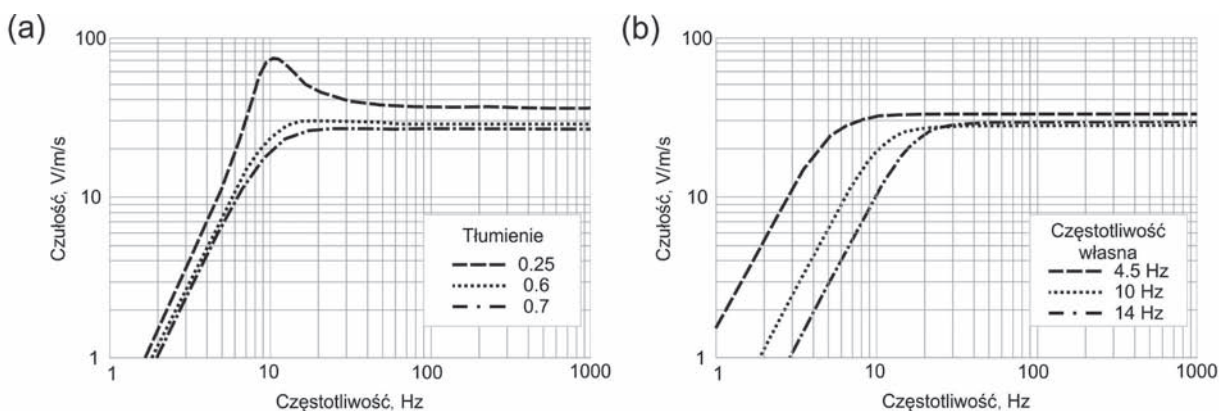
Geofon charakteryzuje się specyficzną dla niego **częstotliwością własną**, dla której układ drgający osiąga maksymalną amplitudę (rys. 8a). Dla częstotliwości mniejszych od częstotliwości własnej odpowiedź geofonu jest silnie tłumiona. Ta cecha, w przypadku większości pomiarów sejsmicznych, jest wykorzystywana do usuwania niskoczęstotliwościowego szumu. Dla częstotliwości większych od częstotliwości własnej geofonu jego odpowiedź jest zazwyczaj liniowa i na tym

odcinku profesjonalnie zaprojektowane i wykonane układy mechaniczno-elektryczne powinny przenosić częstotliwości drgań bez znaczących zniekształceń (rys. 8b).

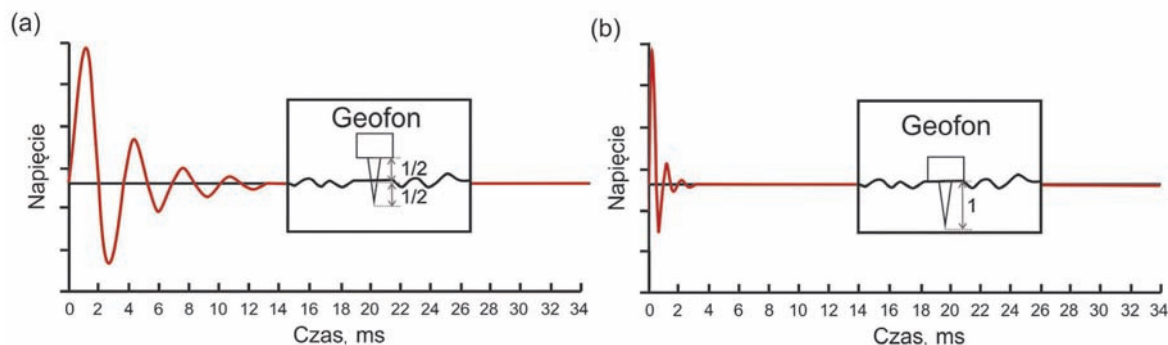
Na wartość częstotliwości własnej geofonu ma również wpływ kontakt z ośrodkiem za pomocą kolca lub płyty. Im kolec jest dłuższy lub większe rozmiary płyty, tym większa jest częstotliwość własna [15]. Średnia długość kolca w popularnych geofonach wynosi od 5-7 cm do 12 cm, a średnica jego górnej części może się zwiększać o 2 cm i więcej [4]. Niewłaściwe przytwierdzenie geofonu do podłoża skutkuje zaburzeniem odpowiedzi amplitudowej, a także skutkuje opóźnieniem czasowym sygnału rejestrowanego (rys. 9).

Czułość geofonu określona jest stosunkiem amplitudy wyindukowanego napięcia do amplitudy składowej prędkości drgań geofonu i jest opisana w V/m/s. Zależy ona od promienia oraz liczby zwojów cewki, a także od wielkości pola magnetycznego i tłumienia [17].

Maksymalna czułość geofonu jest osiągalna w przypadku, gdy os cewki jest zgodna z kierunkiem promienia fali sejsmicznej (rys. 10). Geofon jest tak skonstruowany, że układ drgający porusza się wzdłuż osi geofonu, lecz drgania wymuszające mogą być rejestrowane pod innym kątem, ze zniekształconą amplitudą. Oznacza to, że geofony są najbardziej czułe na sygnały dochodzące z określonego kierunku (geofon pionowy, poziomy), lecz są mniej czułe na sygnały dochodzące z innych kierunków. Znane są konstrukcje

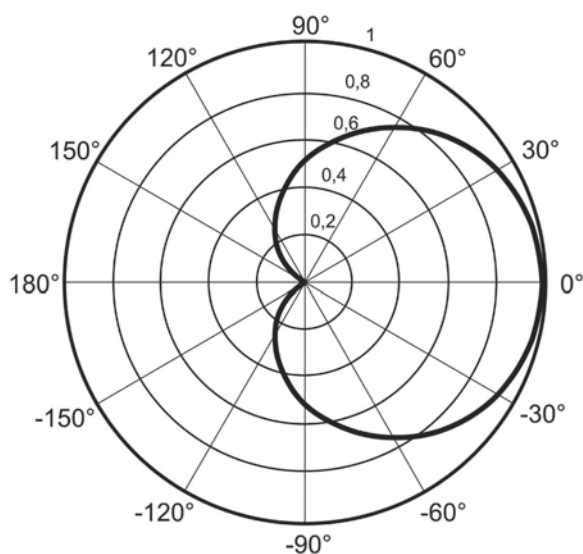


Rys. 9. Odpowiedzi amplitudowe dla geofonu o częstotliwości własnej 10 Hz dla różnych wartości współczynnika tłumienia (a); odpowiedzi amplitudowe dla geofonów o różnych wartościach częstotliwości własnej (b) na podstawie [20]
 Fig. 9. Amplitude responses of geophone with 10 Hz natural frequency for different damping factor values (a); amplitude response of geophone with different natural frequency values (b) on the basis of [20]



Rys. 9. Odpowiedź napięciowa geofonu niewłaściwie przytwierdzonego do podłoża (a) oraz geofonu prawidłowo przytwierdzonego (b) na podstawie [10]
 Fig. 10. Voltage response of geophone incorrectly coupled with the ground (a) and voltage response of geophone correctly coupled (b) on the basis of [10]

geofonu, które umożliwiają dookólną rejestrację drgań bez większych zniekształceń (ang. *omni-directional*), których koszt jest znacząco większy. Czułość geofonu zmniejsza się ze wzrostem tłumienia, zwłaszcza dla częstotliwości mniejszej od częstotliwości własnej oraz większej od częstotliwości maksymalnej (ang. *spurious frequency*). Współcześnie stosowane geofony charakteryzują się czułością z zakresu od ok. 15 do ok. 85 V/m/s.



Rys. 10. Przykład charakterystyki kierunkowej geofonu jednoelementowego

Fig. 11. Example of directional characteristics of one-component geophone

Współczynnik tłumienia jest jednym z kluczowych parametrów przy wyborze właściwego geofonu. Ma on wpływ zarówno na odpowiedź amplitudową, jak i fazową geofonu oraz wpływa na jego częstotliwość własną. W geofonach powszechnie stosowany współczynnik tłumienia wynosi od 0,5 do 0,7 [4]. Większe tłumienie powoduje spadek czułości geofonu, natomiast zbyt małe skutkuje wzmocnieniem czułości

dla częstotliwości własnej geofonu. Można to zaobserwować na wykresie zależności czułości geofonu od częstotliwości dla różnych wartości współczynnika tłumienia (rys. 8a). Dla większych wartości współczynnika tłumienia, maksymalna amplituda częstotliwości własnej zmniejsza się, aż do całkowitego zaniku [14]. Wartość tłumienia 0,7 przyjmuje się za wartość krytyczną w celu uniknięcia problemów ze zbyt zróżnicowaną czułością geofonu.

Drgania o wysokich amplitudach powodują, że cewka częściowo może się znaleźć w niejednorodnym polu magnetycznym. Skutkiem tego są **zniekształcenia harmoniczne** sygnału, zdefiniowane jako procentowy stosunek amplitud częstotliwości harmonicznych do amplitud dla podstawowej częstotliwości pracy geofonu. Z tego względu, najbardziej pożądane są jak najmniejsze wartości zniekształceń harmonicznych geofonów. Powszechnie wynoszą one 0,2% lub mniej [15].

4.2. Porównanie parametrów technicznych geofonów

Geofony mają zróżnicowane parametry techniczne w zależności od warunków pomiarowych i celu zadania badawczego. Do wiodących światowych producentów geofonów należą takie firmy jak: Sercel (Francja), DTCC Dynamic Technologies (Kanada), LONGET (Chiny), Geospace (USA), IONGEO (USA), R. T. Clark Companies Inc. (USA), Chongqing Gold Mechanical & Electrical Equipment Co.(Chiny). Firmy te produkują geofony do różnych zastosowań, od płytkiej sejsmiki lądowej po głęboką sejsmikę morską (hydrofony). Porównanie wybranych parametrów technicznych dla geofonów produkowanych przez czołowych producentów zestawiono w tabeli 1.

Producenci geofonów podają nieprecyzyjnie częstotliwość maksymalną, z jaką mogą być zarejestrowane drgania ośrodka przy pozostałych parametrach technicznych. Przyjmuje się, że geofony, które są właściwie dobrane pod względem parametrów oraz odpowiednio zamontowane w ośrodku, mogą obecnie rejestrować częstotliwości nawet do 1000 Hz [4]. Bardzo ograniczona jest informacja o badaniach dotyczących skuteczności rejestracji drgań w ośrodku. Bardzo często publikowane dane są fragmentaryczne, a najczęściej brakuje pełnych charakterystyk amplitudowych.

Tablica 1. Wybrane parametry techniczne różnych typów geofonów

Table 1. Technical parameters of different types of geophones

Producent/Typ geofonu	Częstotliwość własna, Hz	Czułość V/m/s	Oporność cewki, Ω	Współczynnik tłumienia, -	Częstotliwość maksymalna Hz
ION LF-24	$1 \pm 0,15$	15	b.d.	1,0	240
Gold CDJ+Z1/P1/S1	$1 \pm 0,1$	200	3400	0,32	-
Gold CDJ+Z1A/P1A/S1A	$1 \pm 0,1$	670	3500	0,32	-
SN4-IV	1	-	-	-	-
SN4-1H	1	-	-	-	-
Gold CDJ-Z2A/P2A/S2A	$2 \pm 0,2$	120	1600	0,7	-
Gold CDJ-Z2B/P2B/S2B	$2 \pm 0,2$	350	13000	0,7	-
Gold CDJ-Z2C/P2C/S2S	$2 \pm 0,2$	200	6040	0,7	-
SN4-2V	2	-	-	-	-
Gold CDJ-Z2.5A/P2.5A/S2.5A	$2,5 \pm 0,25$	120	1600	0,7	-
Gold CDJ-Z2.5B/P2.5B/S2.5C	$2,5 \pm 0,25$	350	13000	0,7	-
Gold CDJ-Z2.5C/P2.5C/S2.5S	$2,5 \pm 0,25$	200	6040	0,7	-
SN4-2.5V	2,5	-	-	-	-
SN4-2.5H	2,5	-	-	-	-
Gold CDJ-Z3A/P3A/S3A	3	120	1600	0,7	-
Gold CDJ-Z3B/P3B/S3B	3	350	13000	0,7	-

Gold CDJ-Z3C/P3C/S3S	3	300	6040	0,7	-
SN4-4V	4	-	-	-	-
LONGET LGT-20D	4,5 ± 0,5	23,4	395	0,7	≥180
LONGET LGT	4,5 ± 0,45	28,8	375	0,6	≥180
Sercel L28LB	4,5	31,3	395	0,38	-
Sercel sg-5	5 ± 0,375	80	1850	0,6	-
DTCC DT-20DX	4,5 ± 0,5	23,4	395	0,7	≥160
DTCC DT-HP206V	4,5 ± 0,5	28,8	375	0,6	≥140
Geospace GS-11D	4,5 ± 0,75	32	380	0,34	-
ION Sensor SM-6 Acoil/Bcoil	4,5 ± 0,5	28	375	0,265	≥140
RTC – 4,5-395 – Vertical	4,5 ± 0,5	22	395	0,7	>160
ION sm-4	8 ± 0,5	12,8	71	0,3	160
ION sm-4	8 ± 0,5	28,8	395	0,315	160
ION sm-6	8 ± 0,5	28,8	375	0,315	150
DTCC DT-20DX	8 ± 0,4	23	395	0,38	180
Geospace GS-11D	8 ± 0,75	32	380	0,39	-
RTC 10Hz	10 ± 0,25	27,5	395	0,316	250
Sercel SG10	10 ± 0,25	22,8	350	0,68	240
Sercel JF-20DX	10 ± 0,5	28	395	0,3	200
LONGET LGT-20D	10 ± 0,5	28	395	0,3	≥250
LONGET LGT-10	10 ± 0,5	27,1	375	0,271	≥200
ION SM24	10 ± 0,25	28,8	375	0,25	≥250
ION sm-4	10 ± 0,5	28,8	375	0,25	180
ION sm-4	10 ± 0,5	12,8	71	0,24	180
ION sm-6	10 ± 0,5	28,8	375	0,25	180
Geospace GS-11D	10 ± 0,75	32	380	0,32	-
Geospace GS-30CT	10 ± 0,2	27,5	395	0,316	>160
Geospace GS-20DX	10 ± 0,5	28	395	0,3	≥250
Geospace GS-20DM	10	19,7	280	0,7	300
Geospace GS-32CT	10 ± 0,25	27,5	395	0,316	≥250
Geospace GS-32CT	10 ± 0,25	34,6	635	0,316	>250
DTCC DT-20DX	10 ± 0,5	28	395	0,3	200
DTCC DT-20DXLD	10 ± 0,5	28	395	0,3	200
DTCC DT-HP101	10 ± 0,2	27,5	395	0,316	160
DTCC DT-HP102	10 ± 0,25	27,5	395	0,316	250
DTCC DT-HP103	10 ± 0,25	28,8	375	0,25	240
DTCC DT-HP104	10 ± 0,5	28,8	375	0,25	240
DTCC DT-HP201	10 ± 0,25	22,8	350	0,68	240
DTCC DT-HP301	10 ± 0,35	85,8	1800	0,48	240
Sercel JF-20DX	14 ± 0,7	28	395	0,22	200
LONGET LGT-20D	14 ± 0,7	28	395	0,22	≥300
LONGET LGT-14	14 ± 0,7	20	375	0,2	≥250
ION sm-4	14 ± 0,7	12,8	71	0,17	190
ION sm-4	14 ± 0,7	28,8	375	0,18	190
ION sm-6	14 ± 0,7	28,8	375	0,18	190
DTCC DT-20DXLD	14 ± 0,7	28	395	0,22	250
DTCC DT-20DX	14 ± 0,7	28	395	0,22	240
Geospace GS-11D	14 ± 0,75	32	380	0,23	-
RTC 14Hz	14 ± 0,7	28	395	0,22	240
Geospace GS-20DM	14	17,7	240	0,7	>400
ION SM-45	15	45,5	1800	0,55	175
ION SM-7	20	16,5	375	0,68	500
Geospace GS-20DM	28	15,1	270	0,6	>600
Sercel JF-20DX	28	39	395	0,27	>350
LONGET LGT-20D28	28	39	395	0,27	≥400
LONGET LGT-28	28	31	385	0,6	≥400
DTCC DT-20DX	28	28	395	0,27	>350
DTCC DT-20DXLD	28	28	395	0,27	>350
RTC 28Hz	28	28	395	0,27	≥350
ION SM-11	30±1,5	30	360	0,55	≥500
ION SM-7	30	12,8	370	0,65	500
DTCC DT-20DX	35	29,6	575	0,39	>350

DTCC DT-20DXLD	35	29,6	575	0,39	>350
LONGET LGT-35	35	32,5	560	0,6	≥500
Geospace GS-20DM	40	15,1	270	0,42	>850
Sercel JF-20DX	40	42	575	0,37	>380
LONGET LGT-20D40	40	42	575	0,37	≥400
DTCC DT-20DX	40	30,4	575	0,37	>380
DTCC DT-20DXLD	40	30,4	575	0,37	>380
RTC 40Hz	40	30,4	575	0,37	>380
ION SM-7	50 ± 2,5	17,2	370	0,7	570
Geospace GS-100	100 ± 10	35,8	600	0,6	600
DTCC DT-20DX	100	32	1004	0,5	>400

5. Podsumowanie

W sejsmice inżynierskiej na właściwe wyniki badań składa się wiele czynników, w tym dobór właściwych czujników. Geofony należą do najpowszechniej stosowanych czujników w sejsmice inżynierskiej. Ich duży wybór i zróżnicowane parametry techniczne pozwalają na coraz lepsze dostosowanie do konkretnych zastosowań inżynierskich. Wybór właściwego geofonu wymaga wiedzy z zakresu zasady działania i znajomości parametrów technicznych, jak również doświadczenia w stosowaniu geofonów do konkretnych zadań badawczych.

Geofony są stosowane do płytkiego rozpoznania struktury i właściwości ośrodka geologicznego oraz procesów w nim zachodzących, a zwłaszcza w badaniach osuwisk i wałów przeciwpowodziowych, stref osłabień w ośrodku, w tym zjawisk zapadliskowych na terenach górniczych i pogórnicych, skomplikowanych warunków hydrogeologicznych i tektonicznych oraz w rozpoznaniu warunków geologiczno-tektonicznych i naprężeniowo-deformacyjnych w kopalniach.

W standardowych badaniach sejsmicznych używa się geofonów jednoskładowych, które rejestrują składową pionową lub poziomą drgań. Coraz większą popularnością cieszą się geofony trójskładowe, które jednocześnie rejestrują drgania ośrodka w trzech prostopadłych do siebie kierunkach. Zastosowanie geofonu trójskładowego umożliwia szybszą i bardziej wiarygodną identyfikację różnych rodzajów fal sejsmicznych, a także pozwala zredukować dodatkowe koszty związane z użyciem większej liczby geofonów.

W przypadku badań sejsmicznych metodą refrakcyjną zaleca się geofony o częstotliwościach własnych z przedziału od 4,5 do 40 Hz. Z kolei geofony o wyższych częstotliwościach własnych są zalecane do płytkich badań sejsmiki refleksyjnej o wysokiej rozdzielczości oraz w kopalniach i do innych zastosowań górniczych. Geofony o najmniejszych częstotliwościach własnych, tzw. geofony niskoczęstotliwościowe, są między innymi stosowane do obserwacji mikrosejsmicznych. Przy doborze częstotliwości własnej geofonu, powszechnie stosowaną regułą jest to, że powinna ona wynosić minimum 10% wartości z najwyższej częstotliwości przewidywanej do zarejestrowania [15]. Geofon niskoczęstotliwościowy powinien być pozycjonowany za pomocą libelli umieszczonej na obudowie. Jest to jeden z warunków prawidłowego pomiaru.

Czułość geofonu jest dobierana w zależności od oporu cewki i współczynnika tłumienia. Im wyższy opór cewki, tym większa czułość geofonu. Do geofonów z wysokooporowymi cewkami, a jednocześnie o dużej czułości, należą m.in. Sercel sg-5 oraz geofony marki Dynamic Technologies, takie jak DT-HP301 oraz DT-20DX. Najczęściej wybierane są geofony o czułości z przedziału 30-50 V/m/s dla pojedynczych geofonów oraz 80-120 V/m/s dla grup geofonów. Zbyt mała czułość powoduje, że osłabiona zostaje zdolność geofonu do rejestrowania słabych sygnałów, natomiast zbyt duża czułość

pojedynczego geofonu skutkuje tym, że będzie ona silnie zależna od strumienia magnetycznego [4].

Obecnie geofony są udoskonalane pod kątem uzyskania jak najlepszej czułości, w tym kierunkowej, zakresu rejestrowanej częstotliwości, zwłaszcza w dolnym paśmie oraz jak najmniejszego zniekształcenia rejestrowanego sygnału.

Artykuł został opracowany w wyniku realizacji projektu nr UOD-DEM-1-303/001 o akronimie SEISMOBILE używanego w ramach Przedsięwzięcia pilotażowego Wsparcie badań naukowych i prac rozwojowych w skali demonstracyjnej DEMONSTRATOR+ dofinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Literatura

1. Alcudia A., Stewart R., Kevin W. Hall K. Gallant E.: Field comparison of 3-C geophones and microphones to high-precision blasting sensors. CREWES Research Report — Volume 20 (2008), 1-20.
2. Czech E., Kornowski J., Pilecki Z., Sokolowski H., Waśko A.: Wpływ sposobu zainstalowania geofonu na wyniki rejestracji sejsmoakustycznej. „Przeгляд Górniczy” 1990, nr 5, s. 6-9.
3. Dubiński J., Pilecki Z., Zuberek W. (red.): Badania geofizyczne w kopalniach – przeszłość, teraźniejszość i zamierzenia na przyszłość. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków 2001.
4. Guillin L., Gao Ch., Junyi Z.: Analysis of geophone properties effects for land seismic data. Applied Geophysics t. 6, nr 1, 2009, s. 93-101.
5. Gurwicz I. I.: Badania sejsmiczne. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa 1958, s. 50-54.
6. Kornowski J., Golda I.: Wybrane problemy obserwacji i estymacji energii zdarzeń sejsmicznych. Czujniki drgań i zagadnienie detekcji. „Górnictwo i Geologia” 2011, t. 6, z. 3, s. 87-113.
7. Lowrie W.: Fundamentals of Geophysics. Cambridge University Press, 2007.
8. Marcak H., Zuberek W.: Geofizyka górnicza. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice 1994.
9. Marcak H., Pilecki Z., Czarny R., Isakow Z.: Możliwości zastosowania metody interferometrii sejsmicznej w górnictwie. „Przeгляд Górniczy” 2014, nr 7 (w druku).
10. Maxwell P.W., Faber K., Edelmann H.A.K.: Modern geophones: Do they meet the demands of shallow seismic measurements? Conference papers - 1994 SEG Annual Meeting, Los Angeles, California, s. 595-597.
11. Milsom J.: Field Geophysics. Wyd. 3. Chichester, Wielka Brytania, Wiley Publishing, 2003, s. 188-189.
12. Pilecki Z. (red.): Poradnik Geofizyka Górniczego. Wyd. CPPGSMiE PAN, Kraków 1995.
13. Pilecki Z., Harba P., Czarny R., Cielesta Sz., Pszonka J.: Źródła drgań w sejsmice inżynierskiej. „Przeгляд Górniczy” 2014, nr 7 (w druku).
14. Sah S.H.: Seismic data Acquisition and Recording. Wyd. 1. Allied Publishers Ltd., 2000, s. 38-63.

15. *Sharma P.V.*: Environmental and engineering geophysics. Cambridge, Wielka Brytania, Cambridge University Press, 2002, s. 124-126.
16. *Sheriff R.E.*: Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics. Wyd. 4. Tulsa, Oklahoma, USA, Society of Exploration Geophysicists, 2011, s. 2.
17. *Trzeźniowski Z.*: Jak odkryć ropę naftową. Agencja Reklamowo-Wydawnicza Media, Kraków 2005, s. 116-120.
18. www.esands.com
19. www.igf.edu.pl
20. www.rtclark.com
21. www.zbuiand.com.pl

Przypominamy!

Na łamach Przeglądu Górniczego trwa
**KONKURS O NAGRODĘ IMIENIA PROFESORA
BOLESŁAWA KRUPIŃSKIEGO**

na

*najlepszy artykuł upowszechniający doświadczenia kopalń
podziemnych w zakresie działań skutkujących poprawą
bezpieczeństwa górniczego i ekonomicznej efektywności
eksploatacji złóż.*

Doświadczenia, które gromadzą się w kopalniach są istotnym źródłem wiedzy i postępu. Dzielimy się swymi doświadczeniami!

