

Źródła drgań w sejsmice inżynierskiej

An overview of vibration sources in seismic engineering



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



Mgr inż. Paulina Harba^{*)}*



Mgr inż. Rafał Czarny^{*)}*



Inż. Szymon Cielesta^{*)}*



Mgr Joanna Pszonka^{*)}*

Treść: Źródła drgań służą do wyzwania energii sejsmicznej w postaci fali sejsmicznej, która jest następnie rejestrowana przez czujniki drgań. W zastosowaniach inżynierskich korzysta się ze źródeł aktywnych i pasywnych. Spośród źródeł aktywnych najbardziej rozpowszechnione jest użycie młota, kafara, materiałów wybuchowych oraz wibratorów. W zależności od rodzaju projektowanych badań sejsmicznych wybierane jest źródło dające oczekiwany zasięg głębokościowy o odpowiedniej rozdzielczości sejsmogramu. Materiały wybuchowe generują największą energią sejsmiczną w szerokim paśmie częstotliwości spośród przedstawionych w artykule źródeł sejsmicznych. Udar młotem jest najbardziej rozpowszechniony w zastosowaniach inżynierskich. Źródłami pasywnymi w sejsmice inżynierskiej są głównie drgania spowodowane przejeżdżającymi samochodami, pracą maszyn lub człowieka. W artykule szerzej omówiono niektóre aktywne źródła sejsmiczne wytwarzane przez światowych producentów, które mogą mieć zastosowanie w badaniach inżynierskich. Porównano parametry techniczne wybranych kafarów oraz wibratorów sejsmicznych. Sformułowano kryteria wyboru właściwego źródła w badaniach sejsmicznych.

Abstract: Vibration sources are used to generate seismic energy in the form of seismic wave which is recorded by vibration sensors. Active and passive seismic sources are applied in seismic engineering. Sledgehammers, weight-drops, explosives and vibrators are the most commonly-used among active ones. They are easy to operate and transport. Depending on the geological-engineering task the appropriate energy-efficient seismic source with expected penetration depth and resolution is being chosen. Explosives have the highest generated seismic energy in broadband frequency among seismic sources presented in this paper. However, they produce permanent destructions of the tested geological medium so that they are banned in urban areas. Vibrations generated by passive seismic sources used in seismic engineering are mainly produced by heavy vehicles, working machinery and human activities. This paper presents and describes the selected active seismic sources of the world's leading geophysical companies applied in seismic engineering. A comparison of technical parameters of the selected weight drops and seismic vibrators was devised. Finally, criteria for selecting the appropriate seismic source were formulated.

^{)} IGSMiE PAN, Kraków

Słowa kluczowe:

sejsmika inżynierska, źródło sejsmiczne, udar młotem, kafar, materiał wybuchowy, sparker, wibrator

Key words:

seismic engineering, seismic source, sledgehammer, weight-drop, explosives, sparker, vibrator

1. Wprowadzenie

Źródło drgań lub źródło sejsmiczne służy do wyzwalaania energii sejsmicznej w postaci fali sejsmicznej, która jest następnie rejestrowana przez czujniki drgań, na przykład w wyniku udaru młotem, kafarem, eksplozji ładunku materiału wybuchowego lub wibracji [23]. Źródło powinno wzbudzać wystarczająco silny sygnał o określonej charakterystyce częstotliwościowej, pozwalający na uzyskanie oczekiwanego zasięgu głębokościowego badań przy jednoczesnej jak największej rozdzielczości rejestracji. Źródła sejsmiczne dzieli się na aktywne i pasywne w zależności od sposobu wyzwalaania energii.

Źródła aktywne to takie, które wyzwalaają energię sejsmiczną w sposób zamierzony i kontrolowany przez człowieka. Najpowszechniej stosowanymi źródłami aktywnymi są młot, kafar, materiał wybuchowy oraz lekkie wibratory inżynierskie.

Źródła pasywne wyzwalaają energię sejsmiczną w sposób naturalny, niekontrolowany przez osobę prowadzącą rejestrację danych sejsmicznych. Wyzwalają one drgania w postaci szumu sejsmicznego o strukturze losowej. Źródłami pasywnymi mogą być w skali regionalnej trzęsienia ziemi, działalność wulkaniczna, falowanie mórz i oceanów, a zwłaszcza oddziaływanie prądów morskich na kontynenty lub oddziaływanie gwałtownych przepływów mas powietrznych, a w skali lokalnej wstrząsy indukowane działalnością górniczą, drgania spowodowane przejeżdżaniem pojazdów, pracą maszyn i urządzeń lub człowieka [18].

Ze względu na rodzaj generowanego sygnału wyróżnia się źródła impulsowe oraz ciągłe. Źródła impulsowe generują krótki, minimalnofazowy sygnał. Należą do nich wszelkiego rodzaju materiały wybuchowe. Źródła ciągłe związane są z wibratorami, które generują sygnał długotrwały wywołany mechanicznymi oscylacjami urządzenia.

Źródła sejsmiczne można również podzielić na niszczące, których działanie skutkuje trwałymi deformacjami w ośrodku oraz nieniszczące, które nie powodują trwałych deformacji w miejscu wzbudzenia. Do źródeł niszczących zalicza się głównie materiały wybuchowe oraz pośrednio wibratory i ciężkie kafary. Do źródeł nieniszczących należy zaliczyć udar młotem, lekkimi kafarami, sparkery (iskrowniki) oraz

odpalenie spłonek czy słabych ładunków gazowych.

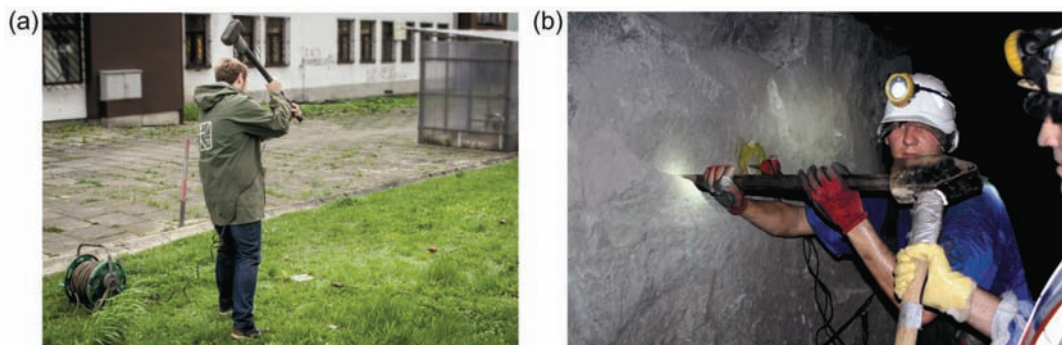
W artykule dokonano przeglądu obecnie stosowanych źródeł sejsmicznych w badaniach sejsmiki inżynierskiej. Pominięto źródła, zaawansowane technologicznie, stosowane w badaniach prospekcyjnych złóż na lądzie i na morzu. Artykuł ma na celu dostarczenie możliwie aktualnej wiedzy dla osób projektujących sejsmiczne badania inżynierskie, w tym w górnictwie. Szersze informacje na temat inżynierskich źródeł sejsmicznych można znaleźć między innymi w pracach [1, 3, 6, 16, 17, 27].

2. Charakterystyka źródeł sejsmicznych**2.1. Źródła aktywne****2.1.1. Udar młotem (ang. sledgehammer)**

Udar w płytkę metalową lub gruby, krótki pręt stalowy przyłożony do powierzchni skały jest najbardziej rozpowszechnionym źródłem aktywnym stosowanym w sejsmice inżynierskiej (rys. 1a,b). Do jego głównych zalet, oprócz niskich kosztów zakupu i użytkowania, należą łatwość transportu i obsługi oraz minimalne skutki uboczne dla środowiska. Młot współdziała z płytką metalową umieszczoną bezpośrednio na podłożu gruntowym lub prętem stalowym przyłożonym do powierzchni nieodspojonego ociosu wyrobiska górniczego. Wymuszone drgania cząsteczek ośrodka są rejestrowane przez geofony lub inne czujniki sejsmiczne (rys. 2) [19].

Masa młota, za pomocą którego wzbudzane są fale, wynosi najczęściej od 3 do 10 kg. Stosowane płytki metalowe mają różne rozmiary i mogą być wyprodukowane z różnych materiałów. Najczęściej są to stopy z udziałem aluminium, odporne na krucho pęknięcie lub tworzywo sztuczne. Przeciętny udar młotem w płytkę wyzwala wystarczającą energię, aby uzyskać około trzydziestometrowy zasięg głębokościowy [20]. W przypadku zastosowań górniczych, zasięg odległościowy w górotworze, uzyskany udarem młota w pręt stalowy wynosi do ok. 300 m w utworach karbonu, dla rejestracji ze wzmocnieniem powyżej 100 dB.

Otrzymanie sygnału o dużej częstotliwości jest uwarunkowane zarówno masą młota, jak i rodzajem płytki. Młot o niewielkiej wadze i szerszej powierzchni udaru zmniejsza



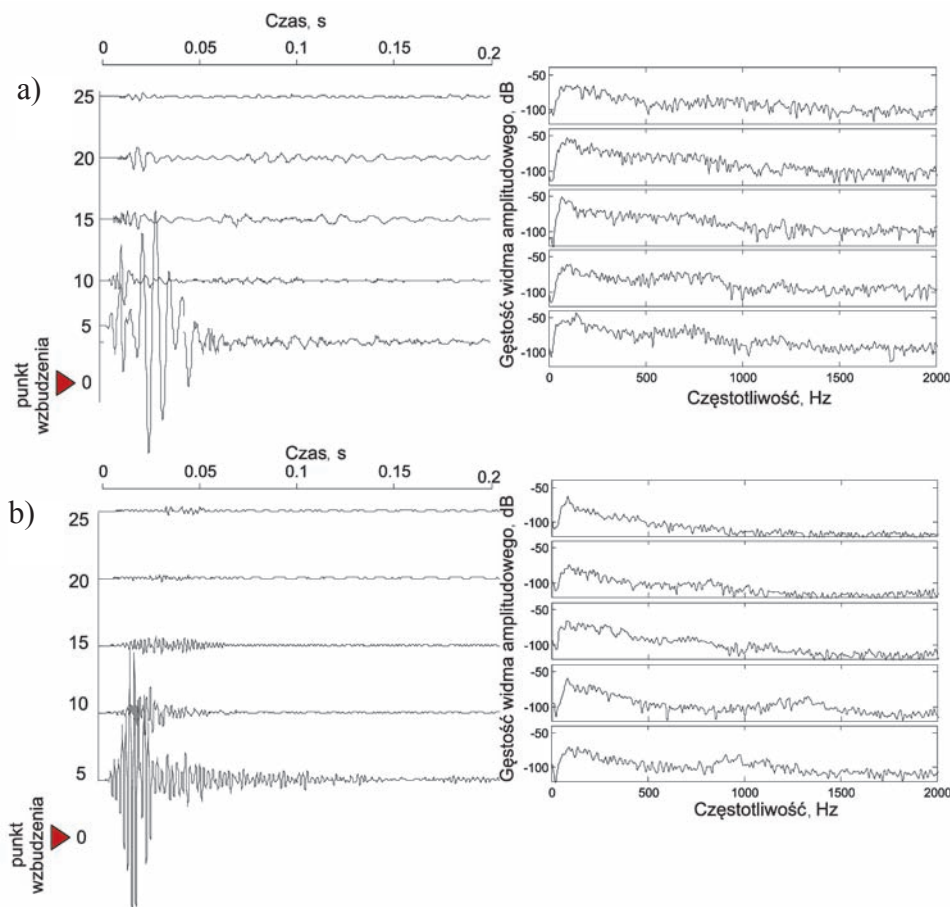
Rys. 1. Wyzwolenie energii sejsmicznej za pomocą udaru młotem w płytkę metalową – a oraz w pręt stalowy przyłożony do nieodspojonego ociosu wyrobiska górniczego – b

Fig. 1. Release of seismic energy using a sledgehammer in a metal plate (a) and steel rod applied to the side wall of excavation (b)

czas trwania sygnału, jednocześnie zmniejszając wyzwalaną energię. Czas trwania sygnału zmniejsza się w miarę wzrostu sztywności zastosowanej płytki. Powinna być ona wystarczająco lekka, aby znacząco przyspieszyć drgania wywołane uderzeniem młota [6]. Metalowa płytką zapewnia lepszy kontakt z podłożem w porównaniu z płytką plastikową, która ze względu na swoją mniejszą wagę jest na ogół niestabilna po uderzeniu w nią młotem i wykonuje dodatkowe, niepożądane

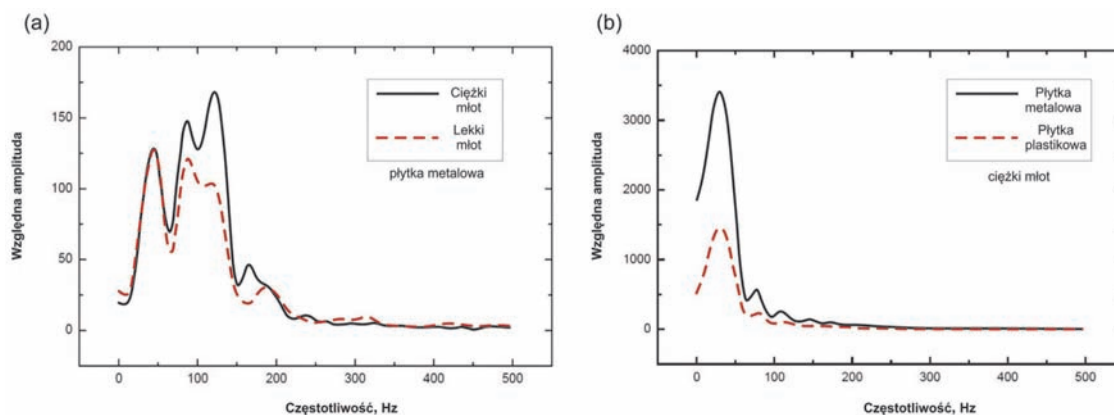
drgania. Istotna jest też masa młota. Im jest mniejsza, tym niepożądane drgania plastikowej płytki są mniejsze. Największą energię drgań uzyskuje się przy uderzeniu młotem o większej masie w płytkę metalową (rys. 3a, b).

Dodatkową zaletą uderzenia młotem jako źródła sejsmicznego jest powtarzalność sygnału. Uzyskanie sygnału o tej samej energii sejsmicznej jest jednak bardzo trudne. Należy uderzać z tą samą siłą i w to samo miejsce oraz dbać o to, aby po ude-



Rys. 2. Sejsmogram (lewa strona) oraz jego widmo amplitudowe (prawa strona) zarejestrowany w wyniku uderzenia młotem w pręt przyłożony do ociosu w wyrobisku dołowym wykonanym w warstwie piaskowca – a i w pokładzie węgla – b

Fig. 2. Seismogram (left-hand side) and its amplitude spectrum (right-hand side) recorded after using a sledghammer in a rod in a side wall of drift excavated in a sandstone layer a) and in a coal bed b)

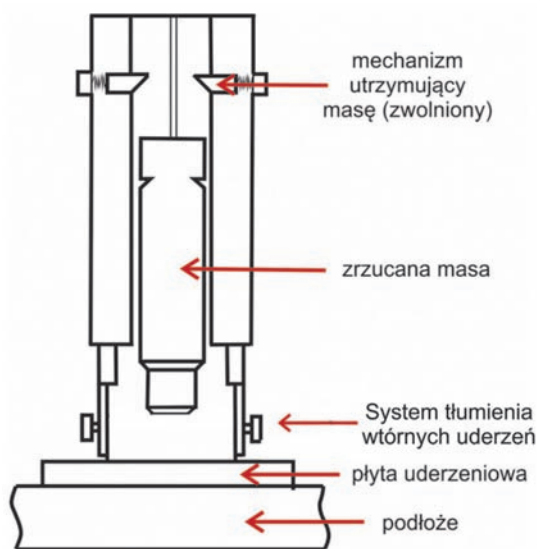


Rys. 3. Odpowiedź amplitudowa dla uderzenia młotem ciężkim i lekkim w metalową płytkę – a oraz młotem ciężkim w płytkę plastikową i metalową – b na podstawie [6]

Fig. 3. Amplitude response for using a heavy sledghammer and a light sledghammer in a metal plate (a) and a heavy sledghammer in a plastic plate and a metal plate (b), based on [6]

zeniu młot nie wykonywał powtórnych samoistnych uderzeń o płytkę. Powtórzenia uderu młotem powinna wykonywać konkretna osoba, ponieważ uderzenia innej osoby o odmiennym wzroście i budowie ciała mogą znacząco zmienić energię generowanych drgań [22]. Poprawienie stosunku sygnału do szumu, a tym samym jakości analizowanych danych, uzyskuje się poprzez składanie kolejnych rekordów otrzymanych w wyniku następujących po sobie uderzeń. Dziesięciokrotne zwiększenie stosunku sygnału do szumu wymaga w przybliżeniu stukrotnego powtórzenia uderzenia [20].

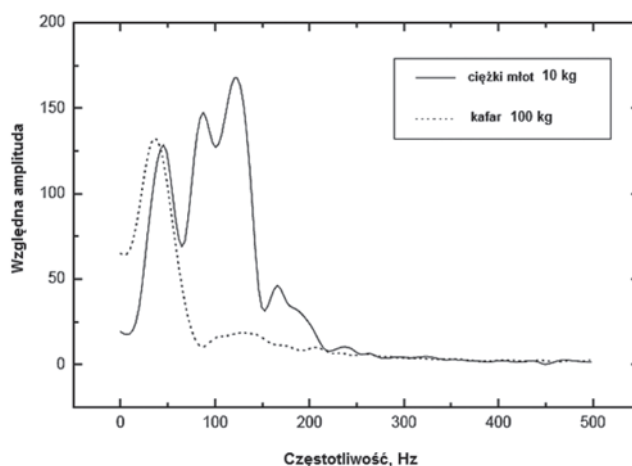
Kafar (ang. *weight-drop*) (rys. 4) działa na podobnej zasadzie jak uder młotem. Jest to urządzenie zamontowane najczęściej na specjalnie do tego przeznaczonym pojeździe lub ruchomej platformie (rys. 5). Działanie kafaru polega na swobodnym spadaniu bijaka na płytkę metalową z wysokości nawet do kilku metrów. Bijak jest podnoszony na zadaną wysokość przez suwnicę o napędzie elektrycznym lub ręcznie przez osobę obsługi kafaru. Po uderzeniu w płytkę metalową, bijak może wykonywać dodatkowe wtórne uderzenia, jeżeli



Rys. 4. Schemat budowy kafaru na podstawie [28]
 Fig. 4. Weight-drop scheme based on [28]

nie zostanie włączone urządzenie do hamowania jego ruchów. Masa bijaka, w przypadku płytkich badań sejsmicznych w zastosowaniach inżynierskich, wynosi do 100 kg [6].

Ograniczeniem w zastosowaniu kafaru może być teren o skomplikowanej topografii, jak również większe koszty związane z jego zakupem i utrzymaniem w porównaniu do młota [27]. Porównanie odpowiedzi amplitudowej w przypadku drgań wygenerowanych przez kafar do uzyskanej przy uderze młotem pokazano na rysunku 6. Natomiast na rysunkach 7 i 8 porównano odpowiedzi amplitudowe dla uderu młotem w płytkę metalową oraz w pręt stalowy przyłożony do płytki, a także uderu lekkim kafarem w płytkę metalową w identycznych warunkach pomiarowych, w odległości 4 m od źródła. Najkorzystniejszy efekt uzyskano dla uderu młotem, lecz wszystkie rejestracje i ich widma częstotliwościowe są podobne z punktu widzenia szerokości pasma częstotliwości oraz wielkości energii sygnału dla konkretnych składowych drgania.

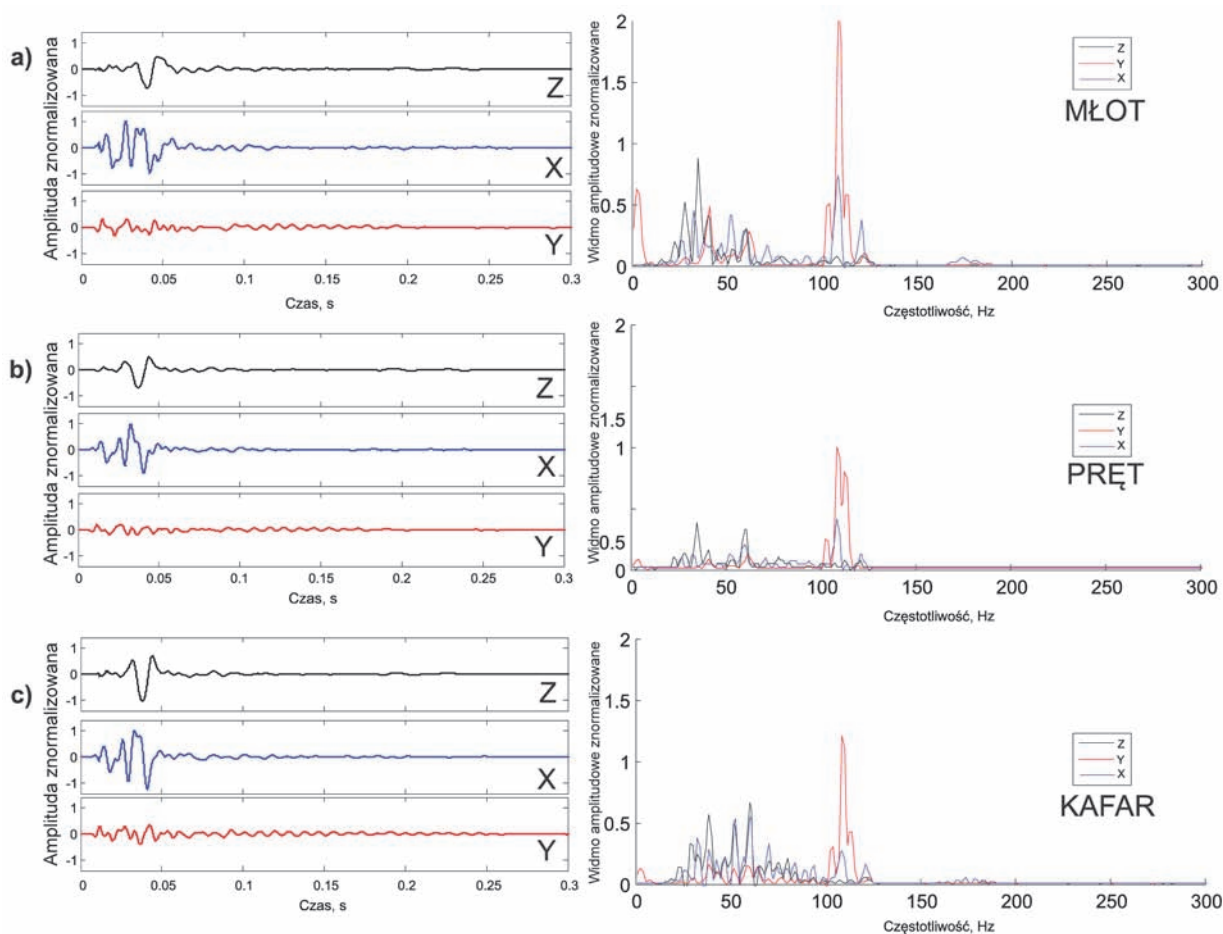


Rys. 6. Porównanie odpowiedzi amplitudowej dla uderu młotem o masie 10 kg w metalową płytkę i dla uderu kafarem o masie 100 kg bez płytki na podstawie [6]

Fig. 6. Comparison of the amplitude response for using the 10 kg sledgehammer in a metal plate to the amplitude response of 100 kg weight-drop without plate based on [6]

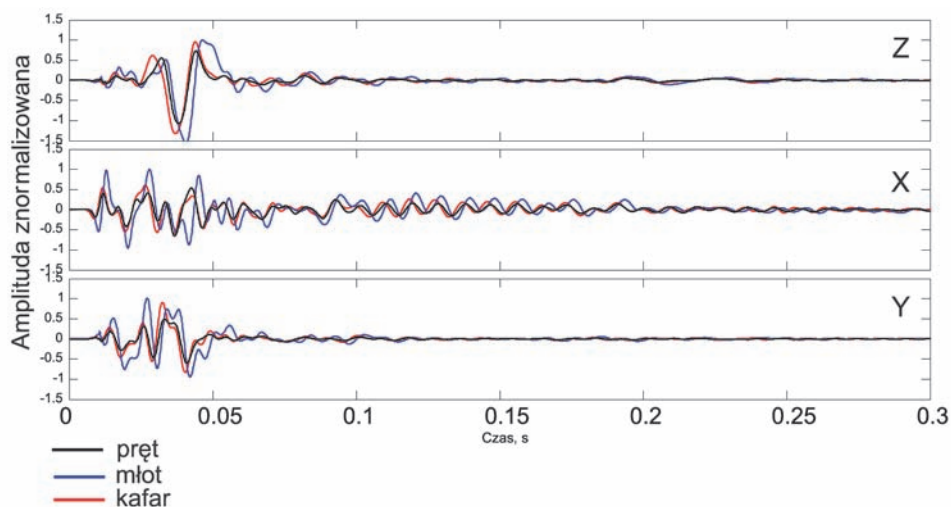


Rys. 5. Przykładowe kafary: Propped Energy Generator produkcji R.T Clark na podstawie [33] – a, ESS100 HM produkcji GISCO na podstawie [31] – b
 Fig. 5. Examples of weight-drops: Energy Generator Propped- Clark RT, based on [33] (a) and HM ESS100- GISCO, based on [31] (b)



Rys. 7. Trójskładowa rejestracja fali sejsmicznej (lewa strona) i jej widmo częstotliwościowe (prawa strona) dla uderu 4 kg młotem w płytkę metalową – a; uderu 4 kg młotem w pręt i płytkę metalową – b; uderu kafarem – c; w identycznych warunkach pomiarowych, w odległości 4 m od źródła

Fig. 7. Fig. 7. Three-component seismic wave record (left-hand side) and its frequency spectrum (right-hand side) for using a 4 kg sledgehammer in a metal plate a); using a 4 kg sledgehammer in a rod and a metal plate b); using a weight-drop c); under identical measurement conditions, at a distance of 4 m from the source



Rys. 8. Porównanie trójskładowej rejestracji fali sejsmicznej wzbudzonej źródłami jak na rysunku 5 w identycznych warunkach pomiarowych, w odległości 4 m od źródła

Fig. 8. Comparison of three-component record of seismic wave induced by sources as shown in figure 5; under identical measurement conditions, at a distance of 4 m from the source

2.1.2. Źródła wibratorowe (ang. vibrator)

Są to obecnie bardzo często stosowane urządzenia w sejsmice inżynierskiej [10]. Ich zaletą jest przede wszystkim łatwa powtarzalność sygnału. Wibrator jest najczęściej montowany na pojeździe lub ruchomej platformie (rys. 9). Głównym jego elementem jest wibrująca płytka generująca drgania ośrodka geologicznego zgodnie z zaprogramowanymi parametrami impulsów elektrycznych. Energia generowanych fali sejsmicznych zależy od masy wibratora i siły nacisku płytki wibrującej na podłoże. W badaniach inżynierskich stosuje się wibratory o masie mniejszej od 1 tony, a w sejsmice poszukiwawczej stosuje się wibratory o masie do 32 ton [26]. W przypadku, gdy nie jest możliwe zastosowanie wibratorów o dużej masie, np. na terenach z rozwiniętą infrastrukturą budowlaną lub o skomplikowanej topografii, stosuje się wielokrotne składanie sygnału.

Sygnał generowany przez wibrator nazywany jest w terminologii angielskiej *sweep*. Charakteryzuje się on ustalonym pasmem częstotliwości, czasem trwania, amplitudą, fazą oraz czasem i sposobem narastania lub zmniejszania się amplitudy. Częstotliwości w paśmie 10-100 Hz są najbardziej powszechnymi częstotliwościami sygnału generowanego przez wibrator. Czas trwania drgań płytki wibratora, czyli długość sygnału wynosi przeważnie 10-20 sekund [26]. Częstotliwość sygnału generowanego przez wibrator może być stopniowo zwiększana (tzw. ang. *upsweep*) lub zmniejszana (tzw. ang. *downsweep*) w czasie. Zmiana częstotliwości może być liniowa, czyli równomierna w trakcie jego trwania lub nieliniowa. Zaprojektowanie sygnału o odpowiednich parametrach wymaga znajomości budowy i właściwości geologicznych badanego podłoża i jest wynikiem prac testowych prowadzonych przed właściwym badaniem sejsmicznym.

Główną wadą źródła wibratorowego są znacząco większe koszty zakupu i utrzymania w porównaniu do młota lub kafaru oraz ograniczenia związane z ich stosowaniem. W przypadku skomplikowanej topografii terenu, np. na terenach grząskich i podmokłych istnieje zagrożenie zapadania się wibratora i zniszczenie przypowierzchniowej warstwy ośrodka geologicznego. Wibratory są z powodzeniem stosowane na terenach suchych, a także zurbanizowanych.

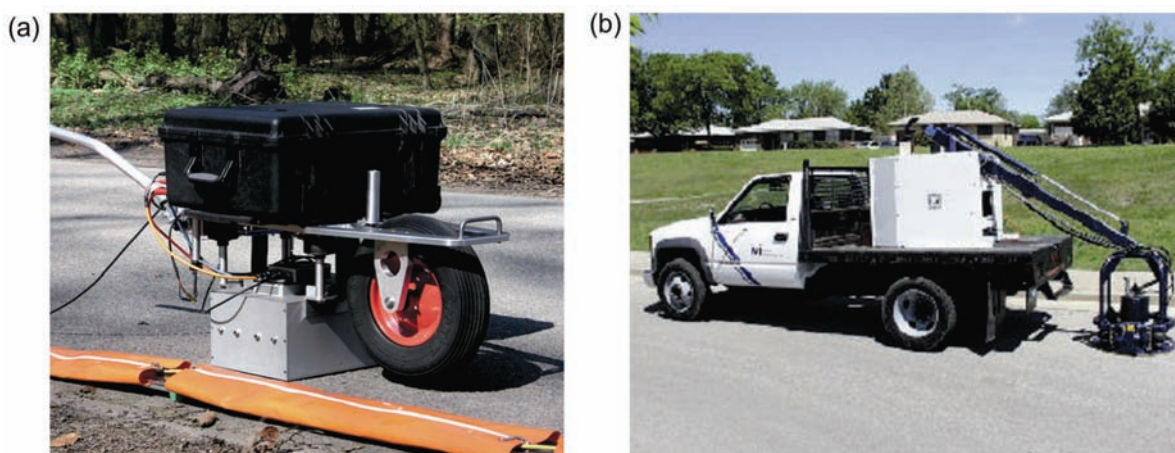
2.1.3. Materiały wybuchowe (MW) (ang. explosives)

Ze względu na swoje niszczące oddziaływanie, stosowane są jedynie w przypadkach, kiedy użycie innych źródeł jest niemożliwe oraz przy braku jakichkolwiek zastrzeżeń do ich użycia. W sejsmice inżynierskiej stosuje się niewielkie ładunki wybuchowe np. spłonkę lub kilka spłonek, lub 150 – 300 g MW, umieszczonego w krótkim otworze strzałowym. W celu lepszego kontaktu źródła z otaczającym ośrodkiem, otwory strzałowe wiercone z powierzchni terenu wypełniane są bardzo często wodą. Detonacja MW w otworach poniżej przypowierzchniowej strefy zwietrzalej w ośrodku geologicznym poprawia jakość rejestrowanych danych. Podobnie w wyrobiskach górniczych, ładunki MW należy detonować poza strefą spękań wokół wyrobiska dla uzyskania korzystniejszego stosunku sygnału do szumu. W przypadku badań prowadzonych w kopalniach podziemnych występują dodatkowe rygory związane z występującymi zagrożeniami naturalnymi i technicznymi.

Materiał wybuchowy generuje sygnał o dużej energii w szerokim paśmie częstotliwości. Zazwyczaj materiały wybuchowe stosowane w sejsmice inżynierskiej wyzwalają energię sejsmiczną w paśmie częstotliwości 100 – 200 Hz, a sporadycznie nawet powyżej 400 Hz [22]. Należy pamiętać, że częstotliwość uzyskanego sygnału zależy także od warunków geologicznych oraz sposobu instalacji geofonów.

2.1.4. Sparkery

Inaczej iskrowniki są źródłami sejsmicznymi o dużej rozdzielczości, których działanie jest uzależnione od obecności wody zmineralizowanej. Z tego względu, w zastosowaniach inżynierskich stosuje się tzw. sparkery otworowe (rys. 10). Są one zbudowane z elektrod zanurzonych w nasyconym roztworze soli w tubie ze stali nierdzewnej o średnicy około 90 mm. Elektrody są połączone metalowymi prętami z baterią kondensatora naładowaną do ponad 4 kV. Zanurzenie elektrod w elektrolicie umożliwia rozładowanie baterii kondensatora, a impuls sejsmiczny jest generowany przez powstałą iskrę pomiędzy elektrodą a metalową obudową tuby. Jedna iskra wyzwala energię do 1 kJ, a w sparkarach generujących impulsy silnie energetyczne może ona wynosić nawet do 15



Rys. 9. Przykłady inżynierskich wibratorów sejsmicznych: ElViS III S8 produkcji Geotomographie, na podstawie [30] – a oraz MiniVIB T-2500 produkcji Industrial Vehicles International Inc. – b, na podstawie [32]

Fig. 9. Examples of engineering seismic vibrators: Elvis III S8- Geotomographie based on [30] (a) and MiniVIB T-2500- Industrial Vehicles International, Inc. (b) based on [32]

kJ [24] lub 30 kJ [13]. Sygnał wyzwalany jest w szerokim paśmie częstotliwości, średnio 100 – 1600 Hz, a nawet do 3 – 5 kHz [3, 4, 9, 11, 12]. W związku z tym, że sparker nie jest trwale instalowany w badanym ośrodku, tylko nieznaczna część energii jest przekształcana w fale powierzchniowe [24].



Rys. 10. Przykład sparkera otworowego skonstruowanego przez pracowników Akademii Górniczo-Hutniczej [8]

Fig. 10. Example of borehole sparker constructed by the staff of the University of Science and Technology in Cracow [8]

Sparkery znajdują zastosowanie w badaniach o dużej rozdzielczości i zasięgu głębokościowym do około 300 m [14], a nawet większym do ponad 1000 m, przy zachowanej rozdzielczości rzędu 2 – 3 m [20]. Jako źródła impulsowe, z powodzeniem zastępują źródła eksplozywne w miejscach,

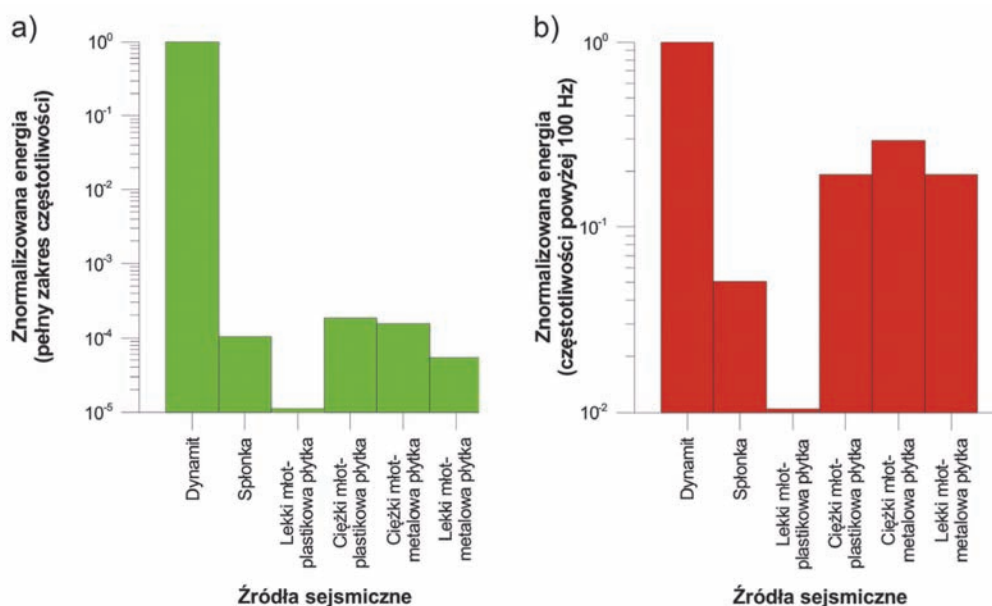
gdzie użycie materiałów wybuchowych jest zabronione. Wymagają jednak wiercenia otworów, dlatego są stosowane w otworach geologiczno-inżynierskich. Służą między innymi do rozpoznania geologicznego pod dnem jezior lub rzek przy projektowaniu tam, mostów, wiaduktów, tuneli, a także przy pogłębianiu dna w portach i kanałach [4, 9, 11].

Porównanie energii otrzymanej przy użyciu niektórych aktywnych źródeł sejsmicznych zilustrowano na rysunku 7. Przedstawiono znormalizowaną energię w pełnym paśmie częstotliwości bez użycia filtra górnoprzepustowego oraz znormalizowaną energię przy zastosowaniu filtra górnoprzepustowego powyżej 100 Hz. Zastosowanie filtra miało na celu sprawdzenie udziału dużych częstotliwości, umożliwiających większą rozdzielczość rejestracji, oczekiwanej w badaniach inżynierskich. Widać, że energia uzyskana dla dynamitu w pełnym paśmie częstotliwości jest niemal trzy razy większa od energii uzyskanej przy udarze młotem. Duża energia generowana przez dynamit zawiera się w szerokim paśmie częstotliwości i w dużej części powyżej 200 Hz, co jest jego zaletą [6]. Pozostałe źródła charakteryzują się podobną wartością generowanej energii. Wśród zastosowanych młotów, najmniejszą energię uzyskano przy udarze ciężkim młotem w plastikową płytkę.

2.2. Źródła pasywne

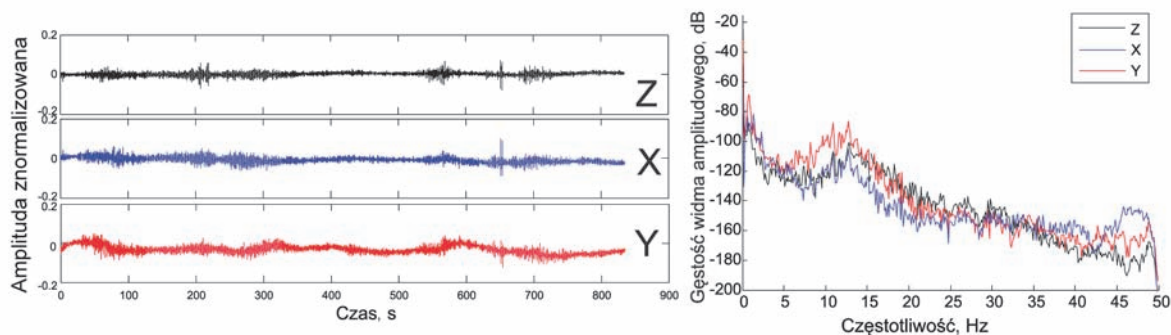
Źródła pasywne są coraz częściej używane przy rozwiązywaniu zagadnień inżynierskich z uwagi na rozwój takich metod sejsmicznych, jak wielokanałowa analiza fal powierzchniowych MASW (ang. *Multichannel Analysis of Surface Waves*) i interferometria sejsmiczna IS (ang. *Seismic Interferometry*). Wykorzystanie ich jako źródeł sejsmicznych pozwala na wykonanie badań sejsmicznych.

Szum sejsmiczny jest złożeniem wielu zjawisk falowych zachodzących w różnym czasie i pochodzących z różnych źródeł wymienionych w rozdziale 1. Na rejestrowany szum sejsmiczny składają się fale wgłębne i powierzchniowe, z których większą część energii sejsmicznej przenoszą fale powierzchniowe (rys. 12) [25].



Rys. 11. Znormalizowana energia różnych źródeł sejsmicznych w pełnym paśmie częstotliwości – a); oraz w paśmie częstotliwości powyżej 100 Hz – b) na podstawie [6]

Fig. 11. The normalized energy diagram of various seismic sources in whole frequency band a) and in frequency band above 100 Hz b) based on [6]



Rys. 12. Trójskładowa rejestracja szumu sejsmicznego na terenie górniczym – a) oraz jego widmo częstotliwościowe – b)
Fig. 12. Three-component seismic noise record from a mining area a) and its frequency spectrum b)

W ostatnich latach przeprowadzono wiele eksperymentów i badań przy wykorzystaniu źródeł pasywnych. Najczęściej jest to szum sejsmiczny pochodzący od przejeżdżających ciężkich pojazdów. Hauser [5] wykorzystał drgania wywołane przez maszynę drążącą tunel do zobrazowania ośrodka geologicznego wzdłuż projektowanej trasy przebiegu tunelu. Tego typu rozwiązanie pozwoliło na wykonanie rejestracji sejsmicznej bez konieczności wstrzymywania prac budowlanych.

Źródła pasywne znalazły także zastosowanie do monitorowania lawin śnieżnych [21] oraz do scharakteryzowania mechanicznych zmian w osadach u podstawy przemieszczającego się lodowca [2]. Ponadto, szum sejsmiczny generowany przez przelatujące samoloty może mieć zastosowanie do kontroli ruchu powietrznego [15].

Do rozpoznania ośrodka geologicznego prowadzi się badania sejsmiczne przy zastosowaniu często źródeł aktywnych i pasywnych [7].

3. Porównanie parametrów wybranych kafarów i wibratorów stosowanych w sejsmice inżynierskiej

Do ważniejszych światowych producentów kafarów i wibratorów należą: TerraPlus (Kanada), Industrial Vehicles International Inc. (USA), GISCO (USA), R.T. Clark (USA), B.W.S GEOFYSIK (USA) oraz GEOTOMOGRAPHIE (Niemcy). Porównanie parametrów technicznych dla wybranych kafarów zestawiono w tabeli 1, a wybranych wibratorów w tabeli 2.

Jednym z kafarów (produkcji B.W.S GEOFYSIK) przeznaczonych do zastosowań inżynierskich jest AWG GeoStrike o masie 45-55 kg, w pełni elektryczny i bardzo cichy podczas pracy. Może być montowany zarówno na samochodzie, jak i bezpośrednio na badanym podłożu. Składa się z płytki oraz tuby, w której umieszczony jest bijak oraz system hydrauliczny. Producent oferuje również model AWG GeoStrike 200 P/S WAVE, który generuje zarówno fale podłużne, jak i poprzeczne. Do uderzania o płytkę system używa bijaka o masie 90 kg [29].

Interesujący jest kafar ESS100 (produkcji GISCO) z możliwością przyspieszania ruchu bijaka. Może być on zamontowany na wózku ESSCART umożliwiającym łatwe przemieszczanie źródła. Opcjonalny wyzwalacz radiowy pozwala na zdalne uruchamianie urządzenia. ESS100 wraz z całym oprzyrządowaniem waży 110 kg. System występuje w dwóch wersjach. Wersja ESS100HM jest zamontowana na samochodzie, natomiast druga wersja ESS100SC jest źródłem montowanym na wózku ESSCART. Źródło umożliwia wykonanie 1500 uderzeń z wykorzystaniem zasilania jednej baterii. Producent oferuje również źródło ESS200ATV [31] o większej, 90 kg masie bijaka.

Propelled Energy Generator PEG-40 (produkcji R.T. Clark) jest lekkim kafarem wraz z tubą, generatorem i płytką 100 kg. Masa bijaka napędzanego w tubie i uderzającego o płytkę o wymiarach 46 cm x 46 cm x 2,5 cm wynosi 36 kg. Źródło wykorzystuje elastomery w celu nadania bijakowi dużej prędkości. Pasma generowanych częstotliwości drgań wynosi 10-250 Hz [33]. Źródło jest łatwe w użyciu i może

Tablica 1. Parametry techniczne wybranych kafarów do inżynierskich badań sejsmicznych

Table 1. Technical parameters of selected weight drops used in seismic engineering

Producent	B.W.S GEOFYSIK			GISCO		R.T. Clark
	AWG GeoStrike 100-120 lb	AWG BWSgeofysik 120 lb H.E	AWG GeoStrike 200 P/S Wave	ESS100	ESS200ATV	PEG-40 kg
Zasilanie	AC/DC	-	-	12 V DC	12 V DC	12 V DC
Energia/siła udaru	-	-	-	191 J	-	-
Masa młota	45-55 kg młot	55 kg młot	90 kg młot	22,5 kg	90 kg młot	36 kg młot
Pasma częstotliwości	-	-	-	-	-	10-250 Hz
Masa zestawu	-	-	-	110 kg	-	100 kg
Mocowanie	auto/ATV*	ATV*	przyczepa	wózek	ATV*	auto/ATV*
Rodzaj fali	P	P	P/S	P/S	P/S	P/S

*ATV – skrót od *All-Terrain Vehicle*, quad

być zamontowane zarówno na samochodzie, jak i bezpośrednio na badanym podłożu. Niewielka masa tego źródła oraz możliwość przymocowania do różnych pojazdów czyni go łatwym w transporcie i zwiększa tym samym możliwości jego zastosowania.

Źródło wibratorowe VIBSIST-20 (produkcji TerraPlus) jest jednym z najmniejszych źródeł znajdującym zastosowanie w pomiarach sejsmicznych dla płytkich oraz średnich zasięgów głębokościowych o dużej rozdzielczości. Oparte jest ono na technice SIST (ang. *Swept Impact Seismic Technique*) łączącej technikę Vibroseis z techniką zastosowaną w źródle wibratorowym Mini-Sosie. Sygnały sejsmiczne generowane są jako serie drgań zgodnie z wcześniej zaprogramowaną sekwencją. Użycie źródła pozwala osiągnąć szerokie widmo częstotliwościowe sygnału nawet, gdy kontakt ze skalą lub gruntem jest względnie słaby. VIBSIST-20 zapewnia głębokość penetracji podobną jak przy użyciu źródła eksplozywnego, ale przy dużej rozdzielczości. Duży stosunek sygnału do szumu osiągnięty jest przy energii sygnału wynoszącej 10 kJ w czasie 25 s. Użycie VIBSIST-20 zapewnia lepszą identyfikację pierwszych wstąpień fali podłużnej, niż przy uderzeniu młotem dzięki wyzwoleniu większej energii uderzenia w tym samym czasie. Model VIBSIST-50 firmy TerraPlus jest oparty o tę samą technikę co VIBSIST-20 i ma te same zastosowania. Różni się on natomiast energią generowanego sygnału. Jest ona większa i wynosi 15 kJ w czasie 25 s, co pozwala na osiągnięcie większej rozdzielczości. Widmo częstotliwościowe sygnału jest szerokie i osiąga 1500 Hz [34].

Źródło wibratorowe MiniVIB T-2500 (produkcji Industrial Vehicles International Inc.) (fot. 3b) jest montowane na dwu lub czterośladowym pojeździe. Źródło przeznaczone jest do badań sejsmicznych o dużej rozdzielczości. Generuje sygnał w paśmie częstotliwości od 10 do 550 Hz, najszerszym w swojej klasie. Producent oferuje specjalną nakładkę umożliwiającą wytwarzanie fal poprzecznych. Konstrukcja nakładki umożliwia obracanie poziomo zamocowanego siłownika wibratora pod każdym kątem względem linii pomiarowej [32].

Wibrator EIViS III S8 (prod. GEOTOMOGRAPHIE) jest zamontowany na przenośnym stelażu. Generator sygnału

z 16-bitowym konwerterem generuje analogowy sygnał, jednocześnie uruchamiający urządzenie rejestrujące (rys. 9). Możliwe jest odwracanie kierunku polaryzacji sygnału. Długość trwania sygnału oraz pasmo częstotliwościowe są zmienne i mogą być ustawiane indywidualnie. Absorbery drgań tłumią wibracje pomiędzy źródłem i stelażem. Są one kontrolowane przez czujniki ciśnienia. Pasma częstotliwości uzyskiwanego sygnału wynosi 5-320 Hz, a osiągnięta maksymalna głębokość penetracji to około 100 m. Masa źródła wynosi około 35 kg, natomiast całego urządzenia wraz ze stelażem i zasilaniem około 130 kg [30]. Stosunkowo niewielka masa pozwala na łatwy transport urządzenia i zwiększa możliwości jego zastosowania w terenie o skomplikowanej morfologii.

4. Kryterium wyboru właściwego źródła sejsmicznego

Wybór właściwego źródła sejsmicznego w projektowaniu badań sejsmicznych jest jednym z kluczowych zadań mających na celu uzyskanie jak najlepszych wyników akwizycji sejsmicznej. Nadrzędnym celem jest wygenerowanie sygnału, który zapewni wystarczający zasięg głębokościowy o odpowiednio dużej rozdzielczości danych.

Przy wyborze źródła należy zdefiniować cel zadania geologiczno-inżynierskiego, a tym samym oszacować zasięg głębokościowy rozpoznania sejsmicznego. Bardzo często przed podjęciem właściwych badań sejsmicznych wykonuje się pomiary testowe, które pomagają przy wyborze właściwego źródła. Ponadto, należy rozemnić warunki pomiarowe i możliwe ograniczenia związane z zastosowaniem źródła np. konieczność ochrony zwierciadła wód podziemnych, obiektów budowlanych, infrastruktury itp.

Zakup, utrzymanie i obsługa źródeł sejsmicznych jest również istotnym zagadnieniem organizacyjnym, prawnym i ekonomicznym. Kluczowym kryterium są też możliwości sprzętowe związane z zakresem pracy, wytrzymałością i mobilnością źródła.

Tablica 2. Parametry techniczne wybranych inżynierskich wibratorów sejsmicznych
Table 2. Technical parameters of selected engineering seismic vibrators

Producent	TerraPlus		Industrial Vehicles International Inc.	GEOTOMOGRAPHIE
Model	VIBSIST-20	VIBSIST-50	MiniVIB T-2500	Shearwave Vibrator EIViS III S8
Zasilanie	115V/60 Hz 230V/50 Hz	115V/60 Hz 230V/50 Hz	Silnik 37 konny, 2400 RPM	12/24 V DC, 90 Ah
Max pobór prądu	14 A	25 A	-	-
Współczynnik powtórzeń	10-30/s	5-18/s	-	-
Energia/siła udaru	20 J (1.5 kW młot)	55 J (1.8 kW młot)	27 N	450 N
Masa młota	-	-	141 kg	-
Pasma częstotliwości	50-2500 Hz	50-1500 Hz	10-550 Hz (5,8 oktav)	5-320 Hz
Charakterystyki sygnału	każdy kształt lub zaprogramowany liniowy sygnał	każdy kształt lub zaprogramowany liniowy sygnał	każdy kształt: liniowe i nieliniowe	każdy kształt
Czas trwania sygnału	2,5-20 s	4-30 s	-	-
Masa zestawu	21,4 kg	59 kg	1100 kg	130 kg
Mocowanie	wózek	wózek	auto	taczka
Rodzaj fali	P/S	P	P/S (wybór)	S

Osoba projektująca badania sejsmiczne musi mieć również na uwadze, że osiągnięcie większego zasięgu głębokościowego jest możliwe przy użyciu źródła niskoczęstotliwościowego, ale jednocześnie uzyskiwana jest mniejsza rozdzielczość rejestracji. W doborze źródła ważne jest możliwie jak najbardziej dokładne studium warunków geologicznych badanego terenu oraz dobra znajomość parametrów konkretnych źródeł sejsmicznych i możliwości ich wykorzystania.

5. Podsumowanie

W sejsmice inżynierskiej najczęściej stosowanymi źródłami sejsmicznymi są młoty i kafary, a rzadziej materiały wybuchowe, wibratory i sparkery. W zależności od warunków pomiarowych, właściwy dobór źródła pozwala na uzyskanie oczekiwanych zasięgów głębokościowych dla satysfakcjonującej rozdzielczości rejestracji sejsmicznych. Są to źródła na ogół łatwe w transporcie i proste w obsłudze. Z powodzeniem są stosowane w terenie o zróżnicowanej morfologii, jak również na terenach zurbanizowanych.

Na podstawie przeprowadzonych testów można stwierdzić, że uderzenie młotem pozwala uzyskać najbardziej satysfakcjonujące wyniki w płytkim rozpoznaniu sejsmicznym w typowych warunkach pomiarowych. W trudniejszych warunkach pomiarowych, w ośrodku o większym tłumieniu, sprawdza się cięższy kafar o masie bijaka od 30 do 100 kg. W zastosowaniach w górnictwie, w wyrobiskach podziemnych, uderzenie młotem w pręt stalowy o większej średnicy w nieodspojony ocios jest porównywalny z uderzeniem młota w płytkę metalową.

W ostatnich latach coraz częściej w rozwiązywaniu zadań inżynierskich wykorzystuje się źródła pasywne. Jest to związane z rozwojem takich metod jak: MASW, interferometria sejsmiczna lub mikrosondowanie sejsmiczne. Szum sejsmiczny generowany na przykład przez przejeżdżające ciężkie pojazdy lub pracę maszyn jest cennym źródłem wykorzystywanym do badania budowy i właściwości ośrodka przypowierzchniowego i może służyć do czasoprzestrzennej obserwacji różnych procesów fizyczno-mechanicznych.

Podstawowym kryterium zastosowania źródła sejsmicznego jest zdefiniowanie celu zadania geologiczno-inżynierskiego, które jest przedmiotem badań sejsmicznych.

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

Literatura

1. *Bhokonok O., Prado R. L., Diogo L. A.*: Comparative tests of seismic sources and geophones aiming at shallow reflection seismic investigation in urban areas. *Revista Brasileira de Geofísica* 2006, nr 24(1), s. 81-89.
2. *Brisbourne A., Stuart G., Kulesa B.*: Passive seismic signatures of a fast-flowing Alpine glacier. *AGU Fall Meeting* 2007.
3. *Bühnemann J., Holliger K.*: Comparative test of various high-frequency seismic sources. 66th SEG Annual Meeting, Denver, Colorado, Society of Exploration Geophysicists 1996, s. 880-883.
4. *Bühnemann J., Holliger K.*: Comparison of high-frequency seismic sources at the Grimsel test site, central Alps, Switzerland. *Geophysics* 1998, t. 63, nr 4, s. 1363-1370.
5. *Hauser E.C.*: Detection and Location of Obstructions Ahead of a Tunnel Boring machine using the Tunneling Vibrations as a Seismic Source: The First Successful Example. 2001 Symposium on Application of Geophysics to Environmental and Engineering Problems (SAGEEP) 2001, CD Publication SSI-7.
6. *Karasthatis V.K., Louis I.F.*: Comparison test of seismic sources in shallow reflection seismics. *Annales Geologiques des Payes Helleniques* 2002.
7. *Liu Y., Luke B., Pullammanaoallil S., Louie J., Bay J.*: Combining active- and passive-source measurements to profile shear wave velocities for seismic microzonation. *Earthquake Engineering and Soil Dynamics* 2005, s. 1-14.
8. *Marcak H., Pilecki Z.* (red.): Wyznaczanie właściwości utworów fliszu karpackiego metodą sejsmiczną dla potrzeb budownictwa tunelowego. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków 2003.
9. *Marelli S., Manukyan E., Maurer H., Greenhalgh S.A., Green A.G.*: Appraisal of waveform repeatability for crosshole and hole-to-tunnel seismic monitoring of radioactive waste repositories. *Geophysics* 2010, t. 75, nr 5.
10. *Matula R., Czaja K.*: Implementation and application of ultralight-vibrator in shallow seismic acquisition. „Przeгляд Górnicy” 2014, nr 7 (w druku).
11. *Maurer H., Marelli S., Manukyan E., Green A.G., Greenhalgh S.A.*: Non-intrusive seismic monitoring of high-level radioactive waste repositories. *SEG Las Vegas Annual Meeting* 2012, s. 1-5.
12. *McCann D.M., Andrew E.M., McCann C.*: Seismic sources for shallow reflecting surveying. *Geophysical Prospecting* 1985, nr 33, s. 943-955.
13. *McCann D.M., Grainger P., McCann C.*: Inter-borehole acoustic measurements and their use in engineering geology. *Geophysical Prospecting* 1975, nr 23, s. 50-69.
14. *McGuinness W.T., Beckmann W.C., Officer C.B.*: The application of various geophysical techniques to specialized engineering projects. *Geophysics* 1962, t. XXVII, nr 2, s. 221-236.
15. *Meunier J., Menard J.P.*: Seismic noise without a seismic source. *EAGE 66th Conference & Exhibition*, 7-10 June, Paris, France 2004 – conference materials .
16. *Miller R.D., Pullan S.E., Steeples D., W., Hunter J.*: Field comparison of shallow seismic sources near Chino, California. *Geophysics* 1992, t. 57, nr 5, s. 693-709.
17. *Miller R.D., Pullan S.E., Waldner J.S., Haeni F.P.*: Field comparison of shallow seismic sources. *Geophysics* 1986, t. 51, nr 2, s. 2067-2092.
18. *Okada H.*: The microseismic survey method. *Society of Exploration Geophysicists of Japan. Geophysical Monograph Series* 2003, nr 12.
19. *Pilecki Z., Harba P., Adamczyk A., Krawiec K., Pilecka E.*: Geofony w sejsmice inżynierskiej. „Przeгляд Górnicy” 2014, nr 7 (w druku).
20. *Reynolds J. M.*: An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. Wyd. 2. Chichester, Wiley-Blackwell Publishing Wielka Brytania 2011, s. 154-169.
21. *Rubin M.J., Camp T., van Hervijnen A., Schweizer J.*: Automatically detecting avalanche events in passive seismic data. 11th International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA) 2012, t. 1, s. 13-20.
22. *Sharma P.V.*: Environmental and engineering geophysics. Cambridge University Press Wielka Brytania 2002, s. 124-126.
23. *Sheriff R.E.*: Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics. Wyd. 4. Tulsa, Society of Exploration Geophysicists Oklahoma 2011, s. 2.
24. *Singh S.*: High-frequency shallow seismic reflection mapping in tin mining. *Geophysical Prospecting* 1984, nr 32 s. 1033-1044.
25. *Toksöz M.N., Lacoss R.T.*: Microseisms: mode structures and sources. *Science* 1968, nr 159, s. 872-873.
26. *Trzeźniowski Z.*: Jak odkryć ropę naftową. Agencja Reklamowo-Wydawnicza Media2, Kraków 2005, s. 107-116.
27. *Van der Veen M., Buness H.A., Bükler F., Green A.G.*: Field comparison of high-frequency seismic sources for imaging shallow (10-250 m) structures. *JEEG* 2000, t. 5, nr 2, s. 39-56.
28. *Van Koughnet R.*: Accelerated weight drop for New Zealand seismic acquisition. *New Zealand Petroleum Conference* 21 September 2010.
29. www.bgsisal.com
30. www.crosswellinstruments.de
31. www.giscogeo.com
32. www.indvehicles.com
33. www.rtclark.com
34. www.terraplus.ca