

Jerzy KORNOWSKI  
Główny Instytut Górnictwa, Katowice  
Iwona GOŁDA  
Politechnika Śląska – studium doktoranckie, Gliwice

## WYBRANE PROBLEMY OBSERWACJI DRGAŃ I ESTYMACJI ENERGII ZDARZEŃ SEJSMICZNYCH. CZUJNIKI DRGAŃ I ZAGADNIENIE DETEKCJI

**Streszczenie.** Artykuł ten jest rozwinięciem poprzedniej pracy autorów [14] o obserwacyjnych podstawach oceny zagrożenia sejsmicznego w górnictwie, z tego też powodu ma częściowo dydaktyczny charakter. Zajmujemy się tu opisem właściwości układów pomiarowych sejsmologii górniczej i sejsmoakustyki, a w szczególności ich czujnikami oraz analizą założeń, które decydują o jakości interpretacji pomiarów, zatem pośrednio o jakości ocen zagrożenia.

## SOME PROBLEMS OF OSCILLATION OBSERVATIONS AND ESTIMATION OF SEISMIC EVENTS ENERGY. SENSORS AND DETECTION ISSUES

**Summary.** This is a continuation of the our previous paper [14] about analyzing observational problems of seismic emission in mining, where the observations are to be useful for seismic/rockburst hazard assessment. Stressed are differences between a seismometer and geophone and some elementary but very important (and undervaluated in practice) notions and issues of event detection are discussed.

### 1. Wprowadzenie

Artykuł dotyczy ważnych w zastosowaniu, a niezbyt często analizowanych, zagadnień dotyczących aparaturowej obserwacji krótkotrwałych zdarzeń sejsmicznych – zarówno wstrząsów, jak i „impulsów” sejsmoakustycznych (AE) – oraz ich automatycznej detekcji na tle szumu. Zakładamy, że końcowym celem tych obserwacji jest prognoza indukowanego eksploatacją górnictw zagrożenia sejsmicznego w kopalni.

Uznając użyteczność i racjonalność powszechnie znanej definicji ryzyka:

$$\text{ryzyko} = \left\{ \begin{array}{l} \text{prawdopodobieństwo} \\ \text{szkodliwego} \\ \text{zdarzenia} \end{array} \right\} \bullet \left\{ \begin{array}{l} \text{straty} \\ \text{spowodowane} \\ \text{zdarzeniem} \end{array} \right\},$$

lecz nie chcąc wdawać się w niezmierne kłopotliwe i kontrowersyjne dyskusje dotyczące strat, a w szczególności ceny życia i zdrowia ludzi, zagadnienie strat pomijamy, ograniczając się do **prawdopodobieństwa** i zamiast „ryzyka” – by nie wprowadzać zamieszania – stosujemy inną znaną nazwę, a mianowicie **zagrożenie**, w naszym przypadku **zagrożenie sejsmiczne**,  $Z^S$ . Zasadniczą zaletą stosowania pojęcia (oraz oceniania i prognozowania) zagrożenia sejsmicznego – zamiast zagrożenia tąpnięciami – jest istnienie ścisłej, ilościowej i konstruktywnej (tzn. umożliwiającej obliczanie i prognozowanie) definicji tej wielkości, o następującej postaci [13]:

**Zagrożenie sejsmiczne,  $Z^S$  lub  $Z^S[(t,t+\Delta t),S]$ , jest to prawdopodobieństwo  $Z^S = P\{E^C[(t,t+\Delta t),S] \geq E_g\}$ , że całkowita energia sejsmiczna ( $E^C$ ), wyemitowana w okresie  $(t,t+\Delta t)$  z obszaru  $S$ , przekroczy wartość graniczną  $E_g$ , zwaną progiem bezpieczeństwa lub elementarną energią tąpnięcia [11].**

Definicja ta jest znana, patrz np. [17, s. 819].

Parametry rozkładu  $E^C$  w kolejnych, przyszłych jednostkach czasu, mogą być prognozowane (co  $\Delta t$ , np. co godzinę) na podstawie szeregu czasowego energii ( $E^C$ ) zaobserwowanych w minionych jednostkach czasu.

Gdy  $S \rightarrow 0$  oraz  $\Delta t \rightarrow 0$ , to tak zdefiniowane zagrożenie  $Z^S$  staje się zagrożeniem, że wystąpi zdarzenie  $E > E_g$  w chwili  $t$ , w punkcie  $S$ , lecz, jak argumentują [13], przejście graniczne ( $S \rightarrow 0$ ,  $\Delta t \rightarrow 0$ ) jest narzędziem teoretycznym, którego nie polecamy w zastosowaniach, ograniczając prognozy do obszaru ściany i okresu godziny lub zmiany. W definicji tej występuje pojęcie energii ( $E^C$ ) całkowitej emisji sejsmicznej z ustalonego obszaru (np. ściany,  $S$ ), w ustalonym okresie (np. od  $t$  do  $t+\Delta t$ ). Ponieważ energię całkowitą  $E^C$  oblicza się jako sumę energii wstrząsów ( $E^w$ ) i energii zdarzeń sejsmoakustycznych ( $E^{AE}$ ), więc podstawowym warunkiem obliczalności  $E^C$  jest addytywność  $E^w$  i  $E^{AE}$ , co oznacza że muszą to być identyczne wielkości fizyczne (tzn. energie) i muszą być wyrażone w tych samych jednostkach. Tymczasem przyjmuje się powszechnie, że energia wstrząsów ( $E^w$ ) jest energią wyrażoną w dżulach, podczas gdy obecnie działające systemy obserwacyjne AE informują użytkownika o wartości tak zwanej energii umownej ( $EU$ ), która nie jest energią. Stąd celem naszej pracy są opis i analiza zagadnień związanych z estymacją energii sejsmicznej, przy czym w niniejszej, obszerniejszej pracy, zajmujemy się problemami

czujników elektrodynamicznych stosowanych do obserwacji krótkotrwałych przebiegów sejsmicznych oraz problemami automatycznej detekcji zdarzeń na tle szumu. Nasze analizy oparte są na prostym modelu czujnika reagującego na jedną „poosiową” składową drgań. *Kursywą zaznaczone zostały zagadnienia nie w pełni dotąd zbadane (lub nieobecne w literaturze przedmiotu), które stanowią mogą ciekawe tematy przyszłych badań.*

Zwracamy uwagę Czytelnika, że:

1. Tor pomiarowo-transmisyjny zarówno sejsmologii górniczej, jak i sejsmoakustyki obejmuje zazwyczaj: sondę lub sejsmometr SPI-70, wzmacniacz zwany nadajnikiem, linię kablową, wzmacniacz zwany odbiornikiem i konwerter A/C, którego (cyfrowe) wyjście jest wejściem na komputer.
2. Sonda (jednoskładowa) może zawierać:
  - a) tylko geofon (jak. np w ARES-5, WLIS),
  - b) akcelerometr z przedwzmacniaczem (jak np. ARES-3, 4),
  - c) geofon z przedwzmacniaczem i filtrem – stosowane jako sejsmometr.

Praca nasza dotyczy tylko czujników elektrodynamicznych (bez elektroniki) nie jest to więc, z oczywistych powodów, pełny opis aparatury. Dodajmy, że w literaturze polskiej zwykle stosowane jest określenie: sejsmometr/geofon „elektrodynamiczny”, a w anglojęzycznej zwykle „elektromagnetyczny”, lecz jest to kwestia umowna: „The simplest [...] is an electromagnetic (electrodynamic) device [...]” (Najprostsze [...] jest elektromagnetyczne (elektrodynamiczne) urządzenie [...]) [20, s. 287].

## 2. Czujniki drgań sejsmicznych i ich właściwości

### 2.1. Cel obserwacji drgań i cel tego rozdziału

Do obserwacji drgań (sejsmicznych) stosowane są **czujniki drgań**, którymi zazwyczaj są: **sejsmometr, geofon i akcelerometr**<sup>1</sup>. Czujniki te reagują na sygnał wejściowy (czyli drgania ośrodka, z którym czujnik ma – to podstawowe założenie – sztywny kontakt), generując na

---

<sup>1</sup> W ruchu drgającym przemieszczenie ( $x$ ), prędkość ( $v$ ) i przyspieszenie ( $a$ ) są tylko różnymi cechami tych samych drgań: gdy przemieszczenie opisane jest równaniem  $x(t) = A \sin \omega t$ , to prędkość  $v(t) = \dot{x} = \omega A \cos \omega t$  i przyspieszenie  $a(t) = \ddot{x} = -\omega^2 A \sin \omega t$ . Należy zauważyć, że amplituda przemieszczenia ( $A$ ) nie zależy od  $\omega$ , amplituda prędkości ( $\omega A$ ) zależy liniowo od  $\omega$  i amplituda przyspieszenia zależy od  $\omega^2$ .

wyjściu sygnał elektryczny. **Sejsmometrem współcześnie<sup>2</sup> nazywamy czujnik drgań, którego (lub: gdy jego) napięciowa odpowiedź jest w przybliżeniu proporcjonalna do prędkości drgań wymuszających – i to samo dotyczy geofonu**, który jednak przystosowany jest zazwyczaj do obserwowania drgań o amplitudach mniejszych i częstotliwościach większych („wyższych”) od obserwowanych za pomocą sejsmometru<sup>3</sup>. Stąd sejsmometr uważany jest za narzędzie sejsmologii i stosowany do obserwacji wstrząsów, a geofon za narzędzie sejsmoakustyki i stosowany do obserwacji zdarzeń AE. Obecnie jednak wprowadza się geofony (zwane geofonami niskoczęstotliwościowymi lub wprost sejsmometrami) do obserwacji wstrząsów lub wstrząsów i zdarzeń AE – co może stać się przyczyną trudności i jest jednym z powodów napisania tej pracy.

**Akcelerometrem nazywamy czujnik, którego (lub: gdy jego) odpowiedź elektryczna jest – jak wskazuje nazwa – proporcjonalna do przyspieszenia drgań wymuszających.** Zauważyć trzeba, a bywa to niedostrzegane, że w przypadku obserwacji zjawisk sejsmicznych wielkością dostępną dla komputera („na Stacji Tapañ”) jest napięcie [V] na wyjściu systemu pomiarowego, podczas gdy istotne (np. dla oceny intensywności zjawisk w górotworze) są parametry fal sejsmicznych w górotworze w otoczeniu czujnika lub nawet parametry (odległego od czujnika) źródła tych fal. **Zagadnienie związku między wymuszeniem i odpowiedzią czujnika jest więc ważne, nietrywialne i ono właśnie jest przedmiotem tego rozdziału.**

## 2.2. Elementarne właściwości sejsmometru

Analizę związku między odpowiedzią napięciową sejsmometru a wymuszeniem (np. w formie drgań ośrodka) ułatwić ma czteroczęściowy rys. 2.1. Część „a” tego rysunku przedstawia uproszczony szkic „elektryczny” sejsmometru z uzwojeniem poruszającym się (na „sprężynie Hooke’a” o współczynniku sprężystości  $k$ ) względem magnesu związanego z obudową (która z kolei jest sztywno związana ze skałą). Jak pamiętamy, siła elektromoto-

---

<sup>2</sup> Sejsmometry klasyczne, dziś już niepopularne, generowały odpowiedź przemieszczeniową (ruch „pisaka”) proporcjonalną do przemieszczenia cząstek ośrodka w ruchu drgającym.

<sup>3</sup> W polskim górnictwie od wielu lat najpopularniejszy jest sejsmometr SPI-70. W aparaturze PASAT-M stosowane są czujniki GS-11 (Geospace) w sondach (np. SG3/2H), w nowej aparaturze sejsmoakustycznej ARES-5 stosowane są geofony GS-14 (Geospace) w sondach (np. SP5.28/E), a w aparaturach przenośnych (WLIS), geofony DF-7G (też w sondach). W nieprodukowanych już, lecz nadal popularnych, systemach ARES-3, ARES-4, czujnikami były akcelerometry (lepsze, lecz droższe od geofonów).

ryczna  $u(t)$  (napięcie) jest w tym przypadku proporcjonalna do chwilowej prędkości  $\dot{y}(t)$  względnego ruchu uzwojenia (względem pola magnetycznego).

Część „b” rysunku przedstawia analogię mechaniczną części „a”, adresowaną do Czytelnika, któremu bliższe są pojęcia mechaniki, w tym modele reologiczne skał. Model mechaniczny nie ma wyjścia napięciowego, uznajemy tu, że wystarczy opis prędkości drgań względnych ( $\dot{y}(t) = \dot{z}(t) - \dot{x}(t)$ ). Tłumik newtonowski rozprasza energię (analogicznie do opornika  $Ra$ ) i wartość  $\eta = 0$  jest odpowiednikiem otwartego obwodu elektrycznego (kiedy to  $Ra \rightarrow \infty$ ).

Zaznaczono przemieszczenie  $x(t)$  cząstek górotworu oraz przemieszczenie  $z(t)$  masy  $m$  drgającej – względem ich położenia równowagi. Ponadto, definiuje się przemieszczenie („względne”)  $y(t)$ , decydujące o odpowiedzi:

$$y(t) = z(t) - x(t) \quad (2.1)$$

(dalej już nie zaznaczamy zależności od czasu, pisząc np.  $x$  zamiast  $x(t)$  i  $\dot{x}$  zamiast  $dx/dt$ ).

Część „c” rys. 2.1 przedstawia schemat blokowy i transmitancję sejsmometru z zaznaczonym sygnałem wejściowym i odpowiedzią zarówno w dziedzinie czasu ( $t$ ), jak i operatora  $s$ . Funkcje operatorowe otrzymuje się za pomocą przekształcenia Laplace’a i dla zjawisk stacjonarnych  $s=j\omega$  (gdzie  $j^2=-1$ ).

Część „d” przedstawia tzw. charakterystykę amplitudowo-częstotliwościową sejsmometru (czyli wykres czułości – lub wzmocnienia – w zależności od częstotliwości  $\omega = 2\pi f$ ), mierzoną w procesie laboratoryjnej kalibracji i dobrze znaną pracownikom działów tapani kopalni (Uwaga: wykresy w dokumentacjach kalibracyjnych pokazują zazwyczaj tylko płaski fragment charakterystyki z wytłumionym pikiem rezonansowym).

Ponieważ na elemencie sprężystym siła  $F = ky$ , a na elemencie lepkim  $F = c\dot{y}$ , więc zapisać można tak zwane równanie dynamicznej równowagi sił (krócej zwane też równaniem równowagi) dla masy  $m$ :

$$m\ddot{z} + c\dot{y} + ky = 0, \quad (2.2)$$

wstawiając „ $z$ ” z równania 2.1 i oznaczając  $2q = c/m$ ,  $\omega_n^2 = k/m$ . Otrzymuje się wówczas:

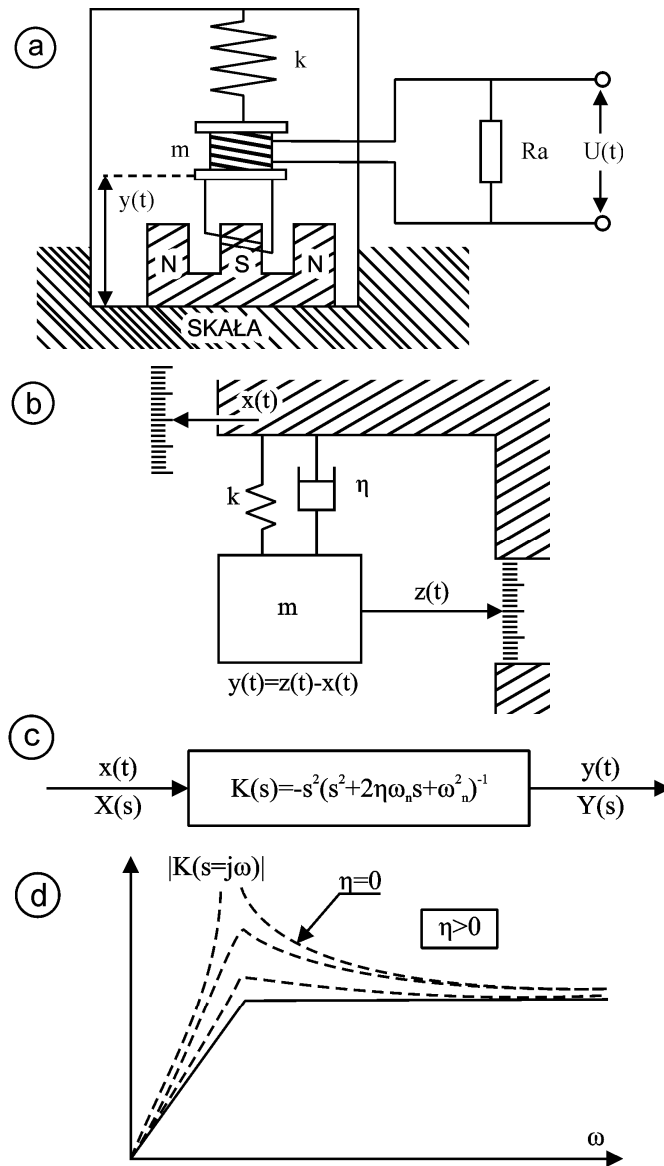
$$\ddot{y} + 2q\dot{y} + \omega_n^2 y = -\ddot{x} \quad (2.3)$$

(por. [1], [16]) i równanie to zwane jest równaniem oscylatora liniowego.

Jeżeli chcemy w sposób „szybki i zwięzły” ocenić odpowiedź sejsmometru na drgania długotrwałe (np. gdy badamy drgania fundamentu wielkiego silnika lub generatora), to

stosując symbolikę operatorową ( $s=j\omega$  i mnożenie funkcji operatorowej przez  $s$  zastępuje różniczkowanie odpowiedniej funkcji czasu), możemy równanie (2.3) zapisać w postaci:

$$s^2 Y(s) + 2qsY(s) + \omega_n^2 Y(s) = -s^2 X(s). \quad (2.4)$$



Rys. 2.1. Szkic i zasada działania sejsmometru: a) uproszczony szkic „elektryczny”, b) „mechaniczny” schemat zastępczy, c) schemat blokowy i transmitancja sejsmometru, d) charakterystyka amplitudowa, czyli wykres  $H_{i,i}(\omega)$  – patrz tab. 2.1 – dla różnych wartości tłumienia  $\eta = q/\omega_n = c/(2m\omega_n)$ . Zmienne  $x$ ,  $y$ ,  $z$  symbolizują przemieszczenia. Odpowiedź napięciowa  $u(t)$  jest w przybliżeniu proporcjonalna do  $\dot{y} = \dot{z} - \dot{x}$  prędkości drgań uzwojenia względem pola magnetycznego. Masa  $m$  drga tylko wzdłuż osi czujnika, niezależnie od kierunku propagacji fali, stąd sejsmometr reaguje tylko na „składową poosiową” fali

Fig. 2.1. Schema and operation principle of seismometer: a) simplified “electric” schema, b) equivalent “mechanical” schema, c) Block schema and transfer function, d) amplitude – frequency characteristics,  $H_{i,i}(\omega)$  for a few values of damping coefficient. Symbols  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , are displacements. Voltage response  $U(t)$  is approximately proportional to the  $y = z - x$ , velocity of coil oscillations in magnetic field. Mass  $m$  can oscillate only along the sensor’ axis, independently of the wave propagation direction, so the response depends on axial component of wave only

Ponieważ w przypadku drgań cząstek ośrodka (np. w ruchu falowym) przemieszczenie ( $x$ ), prędkość ( $\dot{x}$ ) i przyspieszenie ( $\ddot{x}$ ) są tylko różnymi cechami tych samych drgań i od zastosowania zależy, która z tych wielkości jest akurat przedmiotem zainteresowania, więc dla przemieszczeniowej (operatorowej) odpowiedzi  $Y(s)$  zapisać można wariantowo<sup>4</sup> zależności jak w tab. 2.1, gdzie **wielkość**  $K_{0,j}(s)$ , przekształcającą (operatorowy) sygnał wejściowy  $[s^j X(s)]$  w sygnał wyjściowy  $Y(s)$  (patrz rys. 2.1c), **nazywamy operatorową transmitancją układu** (np. sejsmometru).

Tabela 2.1

Zależności wiążące odpowiedź przemieszczeniową  $Y(s)=L\{y(t)\}$  sejsmometru z wymuszeniami przyspieszeniowym  $s^2 X(s)$ , prędkościowym  $sX(s)$  i przemieszczeniowym  $X(s)$ . Odpowiedź prędkościową (także napięciową) otrzymuje się, mnożąc  $Y(s)$  – w równaniach (2.5a, b, c) – przez  $s$ , co oznacza różniczkowanie w dziedzinie czasu

Wymuszenie $[s^2 X(s)]$ przyspieszeniowe	Wymuszenie $[sX(s)]$ prędkościowe	Wymuszenie $[X(s)]$ przemieszczeniowe
$Y(s) = -K_{0,2}(s)[s^2 X(s)]$	$Y(s) = -K_{0,1}(s)[sX(s)]$	$Y(s) = -K_{0,0}(s)[X(s)]$ (2.5a, b, c)
$K_{0,2}(s) = [s^2 + 2qs + \omega_n^2]^{-1}$	$K_{0,1}(s) = s[s^2 + 2qs + \omega_n^2]^{-1}$	$K_{0,0}(s) = s^2[s^2 + 2qs + \omega_n^2]^{-1}$ (2.6a, b, c)
$H_{0,2}(\omega) =  K_{0,2}(j\omega) $	$H_{0,1}(\omega) =  K_{0,1}(j\omega) $	$H_{0,0}(\omega) =  K_{0,0}(j\omega) $ (2.7a, b, c)

Widzimy jak – nie zmieniając wartości iloczynu  $K(s)s^2 X(s)$  ani odpowiedzi  $Y(s)$  – „manipulacje” operatorem  $s$  zmieniają interpretację („nazewnictwo”) wymuszenia i powodują obrót charakterystyki względem osi wykresu (co w dziedzinie czasu odpowiada stwierdzeniu, że „pochodna splotu dwu funkcji jest splotem jednej z pochodną drugiej” [7, s. 135]. Interpretując mnożenie przez  $s$  jako zmianę nazwy funkcji (np. z  $x$  na  $\dot{x}$ ) bez zmiany jej postaci, widzimy, że ta sama transmitancja  $K_{0,0}(s)$  przekształca  $X(s) \rightarrow Y(s)$ ,  $sX(s) \rightarrow sY(s)$  oraz  $s^2 X(s) \rightarrow s^2 Y(s)$  i podobnie wnioski dotyczą funkcji  $K_{0,1}(s)$  i  $K_{0,2}(s)$  – **bardzo ułatwia to analizę odpowiedzi oscylatora (np. sejsmometru) na różne wymuszenia**. Czytelnik zaznajomiony z symboliką operatorową oceni właściwości układu wprost na podstawie tych równań, my jednak zrobimy to w formie jawnej, być może łatwiejszej. Nadal ograniczając się do stanów ustalonych (kiedy to  $s=j\omega$ ), zapiszmy najczęściej w literaturze (np. [1], [15]) analizowaną transmitancję (2.6 c) w postaci:

<sup>4</sup> W symbolach  $K_{i,j}$  oraz  $H_{i,j}$  pierwszy indeks ( $i$ ) oznacza krotność różniczkowania sygnału wyjściowego (np.  $i=0$  informuje, że na wyjściu obserwujemy przemieszczenie), a drugi ( $j$ ) to krotność różniczkowania sygnału wejściowego. Na przykład  $K_{0,2}$  to transmitancja układu wiążąca przyspieszenie ( $\ddot{x}$ ) z przemieszczeniem ( $y$ ). Pełną tabelę czynników przekształcających podają np. [6] – tab. 2.1).

$$K_{0,0}(j\omega) = (j\omega)^2 [(\omega_n^2 - \omega^2) + j2q\omega]^{-1}, \quad (2.8)$$

a stąd, dla biegunowej formy funkcji zespolonej:

$$K_{0,0}(j\omega) = |K_{0,0}(j\omega)| e^{j\varphi(\omega)}, \quad (2.9)$$

stosując znaną tożsamość  $(a-jb)(a+jb)=a^2+b^2$ , możemy także zapisać:

$$H_{0,0}(\omega) \equiv |K_{0,0}(j\omega)| = \omega^2 [(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + 4q^2\omega^2]^{-1/2} \quad (2.10a)$$

(moduł funkcji zespolonej jest funkcją rzeczywistą, charakterystyka fazowa  $\varphi(\omega)$  nas nie interesuje, symbol „ $\equiv$ ” oznacza tożsamość definiującą, a funkcja  $H_{0,0}(\omega)$  ma, dla  $q=0$ , czyli bez tłumienia, dwa bieguny  $\omega=\pm\omega_n$ , z których tylko jeden  $\omega=+\omega_n$  określa rezonans fizyczny). Moduł  $H(\omega)$  zespolonej transmitancji  $K(s)$ , niezależnie od indeksowania, w literaturze nazywany bywa (szczególnie w paśmie  $\omega$ , w którym ma wartość niemal stałą) czułością lub wzmocnieniem (układu), a jego wykres (na osiach  $H-\omega$ ) – patrz na rys. 2.1d – charakterystyką amplitudowo-częstotliwościową lub charakterystyką amplitudową (lub nawet tylko charakterystyką). Laboratoryjny pomiar (wraz z rysunkiem i analizą) charakterystyki układu nazywamy **kalibracją**.

W przypadku gdy przedmiotem zainteresowania są ustalone (długotrwałe) sygnały sinusoidalne (np.  $a \sin \omega t$ ), **charakterystyka amplitudowa  $H_{ij}(\omega)$  przedstawia dla każdej wartości  $\omega(=2\pi f)$  multiplikatywne wzmocnienie** [ $H(\omega) = a_{wy} \sin \omega t / a_{we} \sin \omega t$ , gdzie  $a_{wy}$  i  $a_{we}$  to amplitudy sygnału na wyjściu i wejściu układu] **sygnału przez układ**<sup>5</sup> (np. sejsmometr). Indeksy (i, j) określają „typ” sygnałów zgodnie z przypisem (4), a z równania (2.10a) wynika, że funkcja  $H_{0,0}(\omega)$ , przedstawiająca czułość sejsmometru, dąży do 0, gdy  $\omega \rightarrow 0$  oraz dąży do wartości stałej (1), gdy  $\omega \rightarrow \infty$ . Gdy  $q \rightarrow 0$ , to  $H_{0,0}(\omega)$  osiąga, dla  $\omega = \omega_n$ , **maksimum zwane rezonansem, stąd  $\omega_n$  zwane jest częstotliwością własną (lub rezonansową) układu bez tłumienia, natomiast  $\omega_p^2 = \omega_n^2(1 - \eta^2)$  zwane jest częstotliwością własną układu tłumionego**. Wnioski te potwierdza rys. 2.1d.

<sup>5</sup> Używając słowa „wzmocnienie” należy pamiętać, że jest ono poprawne w układach, które nie zmieniają przenoszonej wielkości fizycznej, a zmieniają jej wartość, np. w sejsmometrii element zwany nadajnikiem przekształca napięcie  $U_1$  w napięcie  $U_2$ , a **iloraz amplitud  $U_2/U_1$  nazywamy jego wzmocnieniem**. Sejsmometr przekształca sygnał mechaniczny (prędkość, [m/s]) w sygnał elektryczny [V], a **ich iloraz [Vs/m] lepiej nazywać czułością** lub modulem transmitancji, bo układ bierny (tzn. nie obejmujący zasilania) nie może wzmocniać (powiększać) energii sygnału wejściowego, gdyż przeczyłoby to zasadzie zachowania energii i żargonowe „wzmocnienie” może wprowadzać błąd.



W tym miejscu zazwyczaj kończy się – by nie zniechęcić Czytelnika – „podręcznikowy” (np. [15]) opis działania sejsmometru, **wystarczający do analizy drgań długotrwałych** (gdy nieistotne są stany nieustalone – **zatem nie w sejsmologii górniczej!**) **i pod warunkiem, że wartość  $\omega_n$**  (zazwyczaj możliwa do regulacji, np. w polskim sejsmometrze SPI-70) **jest dostosowana do potrzeb.**

Nim zajmiemy się pracą sejsmometru w warunkach nieustalonych, należy podsumować wnioski z dotychczasowej analizy, gdyż interpretacja odpowiedzi może okazać się prosta tylko w przypadku, gdy wymuszenie  $x(t)$  jest jednoczęstotliwościowym sygnałem ustalonym, (np. gdy  $x(t) = A_0 \sin \omega_0 t$ ) – wówczas bowiem czułość jest po prostu stałą liczbą. Przypomnijmy, że czujnik nazywamy miernikiem prędkości drgań, gdy odpowiedź napięciowa ( $u \sim \dot{y}$ ) jest proporcjonalna do  $\dot{x}$  (zatem niezależna od  $\omega$ !). Gdy  $x(t)$  jest sumą składowych,  $x(t) = \sum A_i \sin \omega_i t$  i na wyjściu obserwujemy sygnał napięciowy  $u(t)$ , to zgodnie z (2.10 a):

- a) gdy wszystkie wartości  $\omega = \omega_i$  spełniają nierówność  $\omega_i \ll \omega_n$  (patrz rys. 2.1 d), to z równania (2.10 a) wynika, że czułość  $H_{0,0}(\omega_i)$  jest proporcjonalna do  $\omega_i^2$ , zatem odpowiedź  $y$  jest proporcjonalna do  $\ddot{x}$  (zatem  $u(t) \sim \dot{y} \sim \ddot{x}$ ) i sejsmometr NIE JEST miernikiem prędkości;
- b) gdy wszystkie wartości  $\omega_i$  są ściśle skupione wokół  $\omega_n$  (tzn.  $\omega_i \approx \omega_n$  dla wszystkich „i”), to na podstawie (2.10 a),  $|K_{0,0}(j\omega_i)| = \omega_i / 2q$ , zatem dla  $q \gg 0$ , na podstawie (2.10 a), odpowiedź  $y$  jest proporcjonalna do  $\dot{x}$ , a napięcie  $u(t)$  do  $\ddot{x}$ , i sejsmometr NIE JEST miernikiem prędkości;
- c) gdy wszystkie wartości  $\omega_i$  spełniają nierówności  $\omega_i \gg \omega_n$  (patrz rys. 2.1 d), to czułość  $H_{0,0}(\omega)$  (niemal) nie zależy od częstotliwości, a stąd  $y \sim x$  i  $\dot{y} \sim \dot{x}$ , zatem napięcie wyjściowe jest proporcjonalne do prędkości drgań cząstek ośrodka – w takich warunkach sejsmometr JEST miernikiem prędkości;
- d) wynik pomiaru (tzn. napięcie  $u(t)$  na wyjściu sejsmometru) nie ma prostej interpretacji fizycznej, gdy częstotliwości  $\omega_i$  składowych sygnału wejściowego rozproszone są po obu stronach  $\omega_n$ .

Jeżeli sejsmometr ma być stosowany do pomiaru prędkości drgań długotrwałych, to sytuacji a), b) i d) należy unikać, regulując okres drgań własnych ( $T_n = 1/\omega_n$ ) tak, by oczekiwane drgania wejściowe miały częstotliwość znacznie większą od  $\omega_n$  (patrz także

[18, s. 74). Nie wolno też dopuścić do pomiaru, gdy czujnik po umieszczeniu w sondzie nie był kalibrowany – wówczas po prostu nie wiadomo co on mierzy.

Warto dodać, że mimo innej formy i symboliki równanie (2.10 a) jest identyczne z równaniem (4.27) w podręczniku [15] i oba te równania określają wzmocnienie sejsmometru, gdy taka sama wielkość fizyczna występuje na jego wejściu i wyjściu (tzn.  $(x$  i  $y)$  lub  $(\dot{x}$  i  $\dot{y})$  lub  $(\ddot{x}$  i  $\ddot{y})$ ).

Chcąc ułatwić Czytelnikowi przyswojenie żargonu inżynierskiego stosowanego przy analizie charakterystyk, zapiszemy równanie charakterystyki  $H_{0,n}$  w (uproszczonej) formie:

$$H_{0,n} \approx \omega^{2-n} (\text{const} + \omega^4)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.10b)$$

Widać, że gdy  $\omega \rightarrow 0$ , to  $\lim H_{0,n}(\omega) = \omega^{2-n}$ , a logarytmując i mnożąc przez 20, otrzymuje się (w granicy):  $20 \log H_{0,n}(\omega) = 20(2-n) \log \omega$  lub, na skali decybelowo-logarytmicznej,  $H_{dB} = 20(2-n)$  [dB/dekadę], gdzie dekadą nazywamy 10-krotną zmianę wartości  $\omega$  (np.  $1 \rightarrow 10 \rightarrow 100$  itd). Na przykład (patrz rys. 2.1d), gdy  $n = 0$ , to mówi się, że charakterystyka opada w tempie 40 dB/dekadę. Podobnie, gdy  $\omega \rightarrow \infty$ , to  $\lim H_{0,n}(\omega) = \omega^{-n}$ , a stąd (w granicy), na skali decybelowo-logarytmicznej,  $H_{dB} = -20n$  [dB/dekadę] i np. dla  $n = 0$  charakterystyka jest równoległa do osi  $\omega$  (znak: „+”, „-” określają kierunek opadania). **Żargon ten** – w połączeniu ze skalą dB/log – **umożliwia** nie tylko **odręczne rysowanie i porównywanie charakterystyk, ale także ich „pamięciową” analizę**, nawet dla złożonych systemów.

W pewnych sytuacjach – szczególnie w geofizyce górniczej – interesują nas odpowiedzi czujnika na wymuszenia krótkotrwałe i szybko zanikające, a nie na wymuszenia długotrwałe i ustalone. Typowym przykładem i modelem drgań szybko zanikających jest wykładniczo tłumiona sinusoida  $(a \exp(-\gamma t) \sin \omega t)^6$ .

Jeżeli więc założymy, że wymuszenie przyspieszeniowe ma postać:

$$-\ddot{x}_1 = a e^{-\gamma t} \sin \omega_1 t, \quad (2.11)$$

<sup>6</sup> Jest to np. odpowiedź przemieszczeniowa znanego w mechanice skał modelu „standardowego” ciała reologicznego na impuls siły/przyspieszenia ( $F=ma$ ).

to wiadomo (np. [12]), że dla zerowych warunków początkowych rozwiązanie równania (2.3) i przemieszczeniowa odpowiedź sejsmometru mają (gdy  $q' = q - \gamma$ ,  $q = \eta\omega_n$ ,  $\omega_p = \omega_n \sqrt{1 - \eta^2}$ ) postać:

$$y_1(t) = aH'_{0,2} \{ \exp(-\gamma t) \sin(\omega_1 t - \varphi_1) - (\omega_1 / \omega_p) \exp(-qt) \sin(\omega_p t - \varphi_p) \} \quad (2.12)$$

$$H'_{0,2}(\omega, \gamma) = (\sqrt{(\omega_p^2 - \omega_1^2 + q'^2)^2 + 4\omega_1^2 q'^2})^{-1} \quad (2.13)$$

(należy zauważyć, że gdy  $\gamma = 0$ , to  $q' = q$ ,  $\omega_p^2 + q^2 = \omega_n^2$  i pomnożone przez  $\omega^2$  równanie (2.13) staje się identyczne z (2.10 a)). Odpowiedź prędkościową (i napięciową) uzyskuje się różniczkując (2.12). Odpowiedź (2.12) zawiera składową wymuszoną z parametrami  $(\omega_1, \gamma)$  oraz składową własną z parametrami  $(\omega_p, q)$  – przy czym obie te składowe zanikają wykładniczo, a moduł transmitancji  $H(\omega, \gamma)$  nie jest już funkcją tylko częstotliwości, lecz zależy i od częstotliwości i od tłumienia sygnału wymuszającego (taka uogólniona charakterystyka staje się więc powierzchnią rozpiętą ponad płaszczyznę  $(\omega, \gamma)$ , a „zwykła” charakterystyka  $H(\omega)$ , do której jesteśmy przyzwyczajeni, jest przekrojem powierzchni  $H(\omega, \gamma)$  wzdłuż osi  $\gamma = 0$ . Ponadto, pojęcie „wzmocnienia/czułości”, jasne w przypadku sygnałów ustalonych, wymaga osobnej definicji, a jego użyteczność nie jest oczywista)<sup>7</sup>.

W sejsmologii oraz sejsmoakustyce górniczej równie ważna i interesująca może być też odpowiedź prędkościowa ( $\dot{y}_2$  poniżej) na wymuszenie prędkościowe:

$$\dot{x}_2 = ae^{-\gamma t} \sin \omega_1 t, \quad (2.14)$$

którą otrzymać można<sup>8</sup>, dwukrotnie różniczkując rozwiązanie (2.12):

$$\dot{y}_2 (= \ddot{y}_1) = aH'_{0,2} [e^{-\gamma t} f_1(\omega_1, \gamma) - (\omega_1 / \omega_p) e^{-qt} f_2(\omega_p, q)] \quad (2.15)$$

$$f_1(\omega_1, \gamma) = \gamma^2 \sin(\omega_1 t - \varphi_1) - 2\gamma\omega_1 \cos(\omega_1 t - \varphi_1) - \omega_1^2 \sin(\omega_1 t - \varphi_1) \quad (2.16a)$$

$$f_2(\omega_p, q) = q^2 \sin(\omega_p t - \varphi_p) - 2q\omega_p \cos(\omega_p t - \varphi_p) - \omega_p^2 \sin(\omega_p t - \varphi_p), \quad (2.16b)$$

<sup>7</sup> Powstaje więc pytanie o użyteczność zwyczajowo badanych charakterystyk  $H(\omega)$  w sejsmologii i sejsmoakustyce, gdzie niemal zawsze obserwuje się sygnały krótkotrwałe. Ten ważny i ciekawy temat należy jednak odłożyć do osobnej publikacji.

<sup>8</sup> Przemieszczenie (2.12) jest rozwiązaniem równania (2.5c), gdy wymuszenie przyspieszeniem ma postać (2.11). Obustronne pomnożenie (2.5c) przez  $s^{-1}$  nie zmienia jego rozwiązania, lecz zmienia nazwy (lub interpretację) sygnałów: (2.12) jest teraz odpowiedzią „całkowanym przemieszczeniem” na wymuszenie prędkościowe  $a \exp(\gamma t) \sin \omega t$ . Zatem pochodna z (2.12) to odpowiedź przemieszczeniowa, a druga pochodna to odpowiedź prędkościowa na wymuszenie prędkością  $a \exp(\gamma t) \sin \omega t$ . Takie właśnie ułatwienia umożliwiają „manipulacje” operatorowe wg tab. 2.1.

gdzie składnik zawierający  $f_1$  to **składowa wymuszona**, a składnik zawierający  $f_2$  to **składowa własna** prędkościowej odpowiedzi ( $\dot{y} \sim u$ ) sejsmometru na prędkościowe wymuszenie ( $\dot{x}_2$ ).

Nie są to tylko ćwiczenia matematyczne: **równanie (2.15) określa odpowiedź sejsmometru** (który z założenia reaguje na sygnał prędkości) **na typowe wymuszenie (2.14), pokazując czego należy się spodziewać w najprostszycy warunkach sejsmologii i sejsmoakustyki górniczej (tzn. gdy sygnał wejściowy ma postać (2.14))**. Jeżeli sejsmometr w tradycyjny sposób dobierany jest do pracy i zgodnie z wnioskiem C (powyżej)  $\omega_1 \gg \omega_p$ , to składowa własna ( $f_2$ ) może dominować w obrazie odpowiedzi ( $u \sim \dot{y}$ ), czyniąc bezzasadnym wnioskowanie o cechach źródła (na podstawie  $u \sim \dot{y}$ ) i o parametrach drgań w punkcie pomiaru.

Ze względu na objętość artykułu nie przedstawiamy już graficznej ilustracji tego efektu, ograniczając się do wniosku, że **skutki stosowania zbyt uproszczonej teorii w praktyce sejsmologii górniczej oraz sejsmoakustyki są rozliczne i mogą prowadzić do zupełnie błędnych analiz**, w tym analiz zagrożenia pod ziemią i przyspieszenia ( $a_{\max}$ ) na powierzchni. *Zagadnienie to czeka na dalsze badania.*

Analiza równań (2.15), (2.16 a, b) oraz (2.13) prowadzi do wniosków:

W1. Przyjęte z innych dziedzin nauki i techniki metody „kalibracji” czujników nie muszą być w naszych zastosowaniach optymalne i *analiza metod oraz wyników kalibracji stanowi może otwarty temat badawczy.*

W2. Utarte wyobrażenia o widmach sygnałów sejsmicznych i dość prymitywne *metody analizy widmowej*, nieuwzględniające wpływu składowych własnych, mogą być źródłem dużych błędów i *powinny stać się ponownie – po wielu latach – przedmiotem badań.*

### 2.3. Geofon elektrodynamiczny

Demontując (np. rozcinając mechanicznie) – najlepiej już uszkodzony<sup>9</sup> – typowy geofon (np. „Geospace”), można stwierdzić, że (wbrew zapewnieniom podręczników) jest on, zgrubnie opisując, zbudowany tak jak pokazano na rys. 2.2a i składa się, oprócz obudowy, z dwóch sprężyn, ruchomej cewki i ruchomego magnesu, zatem mamy tu dwa stopnie swobody. Napięciowy sygnał wyjściowy  $u(t)$  jest, tak jak w przypadku sejsmometru,

<sup>9</sup> Obudowa czujnika jest zawsze celowo zalutowana, tak by nie można go „rozłożyć na części” bez zniszczenia i by woda lub inne zanieczyszczenia nie dostały się do środka.

proporcjonalny do prędkości ( $\dot{y}_{21}$ ) drgań cewki względem magnesu i – gdy szkieł elektryczny zastępujemy „analogiem” mechanicznym – pochłaniające energię obciążenie zewnętrzne (tzn. opór  $R_a$ ) należy zastąpić newtonowskim tłumikiem. Rysunek 2.2b jest mechanicznym analogiem rysunku 2.2a, rys. 2.2c przedstawia blokowy schemat przepływu sygnału, a rys. 2.2d ilustruje typowy wygląd charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej. **Celem analizy jest, jak poprzednio, określenie zależności między odpowiedzią napięciową  $u(t)$  a wymuszeniem  $\dot{x}(t)$ .** Podobnie jak sejsmometr, geofon ten reaguje tylko na składową poosiową drgań wymuszających. Jak poprzednio,  $x(t)$  to przemieszczenie drgających elementów górotworu, natomiast  $z_1(t)$  i  $z_2(t)$  to przemieszczenia mas  $m_1$  i  $m_2$ , względem ich położenia równowagi. Dalej nie zaznaczamy zależności od czasu, pisząc  $z_1$  zamiast  $z_1(t)$  itp. Zgodnie z tą umową  $y_{21} = z_2 - z_1$  to przemieszczenie masy  $m_1$  względem  $m_2$  i pamiętamy, że siła elektromotoryczna (napięcie)  $u$  jest proporcjonalna do  $\dot{y}_{21}$ , zatem  $u \sim \dot{y}_{21}$ . Dla masy  $m_2$  równanie dynamicznej równowagi sił („akcja = reakcji” to też prawo Newtona) ma postać:

$$m_2 \ddot{z}_2 = c_2 \dot{y}_{21} + k_2 y_{21}, \quad (2.17)$$

a stąd, dzieląc przez  $m_2$  i oznaczając  $l_2 = c_2 / m_2$  oraz  $q_2 = k_2 / m_2$ , otrzymuje się:

$$\ddot{z}_2 = l_2 \dot{y}_{21} + q_2 y_{21}. \quad (2.18)$$

Dalej pomijamy indeks „21” przy zmiennej Y i wprowadzamy zapis operatorowy:

$$Z_2(s) = s^{-2}(sl_2 + q_2)Y(s). \quad (2.19)$$

Dla masy  $m_1$  odpowiednie równanie ma postać:

$$m_1 \ddot{z}_1 = k_1(x - z_1) + c\dot{y}_{21} + k_2 y_{21}, \quad (2.20)$$

a podstawiając  $q_1 = k_1 / m_1$ ,  $l_{21} = c_2 / m_1$  oraz  $q_{21} = k_2 / m_1$ , w zapisie operatorowym otrzymuje się:

$$Z_1(s) = \frac{q_1}{s^2 + q_1} X(s) + \frac{sl_{21} + q_{21}}{s^2 + q_1} Y(s), \quad (2.21)$$

Ponieważ (z definicji)  $Y(s) = Z_2(s) - Z_1(s)$ , więc zapisać można:

$$Y(s) = \frac{sl_2 + q_2}{s^2} Y(s) - \frac{q_1}{s^2 + q_1} X(s) - \frac{sl_{21} + q_{21}}{s^2 + q_1} Y(s), \quad (2.22)$$

i po przekształceniach równanie to zapisać można w postaci:

$$Y(s) = \frac{-s^2 q_1}{s^4 - s^3(l_2 - l_{21}) + s^2(q_1 + q_{21} - q_2) - sl_2 q_1 - q_1 q_2} X(s). \quad (2.23)$$

Równanie to wiąże odpowiedź  $Y(s) \sim y_{21}(t)$  z wymuszeniem  $X(s) \sim x(t)$ . Gdy tłumienie  $c_2$  jest bardzo małe – lub równoważnie: gdy opór  $R_a$  obciążający ten czujnik jest bardzo duży – to  $l_2 \rightarrow 0$  i  $l_{21} \rightarrow 0$ , a równanie (2.23) przyjmuje postać:

$$Y(s) = \frac{-vq_1}{v^2 + v(q_1 + q_{21} - q_2) - q_1q_2} X(s) \quad (2.24)$$

(gdzie  $v = s^2$ ) i w mianowniku występuje tzw. równanie dwukwadratowe, którego rozwiązanie ma postać:

$$v_{1,2} = \left[ -(q_1 + q_{21} - q_2) \pm \sqrt{(q_1 + q_{21} - q_2)^2 + 4q_1q_2} \right] / 2 \quad (2.25)$$

i można zapisać:

$$Y(s) = -v \frac{q_1}{v - v_1} \frac{1}{v - v_2} X(s), \quad (2.26)$$

a ponieważ założono bardzo małe tłumienie, czyli  $s = j\omega$ , zatem  $v = -\omega^2$ , więc:

$$Y(\omega) = \left[ \omega^2 \frac{q_1}{-\omega^2 - v_1} \right] \left[ \frac{1}{-\omega^2 - v_2} \right] X(\omega) \quad (2.27)$$

(mnożąc (2.23) lub (2.24) obustronnie przez  $s$ , otrzymuje się transformatę odpowiedzi  $\dot{y}_{21} \sim u$  na wymuszenie  $\dot{x}$ ).

Jeżeli parametry  $q_1, q_2, q_{21}$  (zatem współczynniki sprężystości  $k_1, k_2$  oraz masy  $m_1, m_2$ ) są dobrane tak, że „rozwiązania”  $v_1$  i  $v_2$  są rzeczywiste i ujemne (np. łatwo można sprawdzić, że dla  $k_1 = 1, k_2 = 5, m_1 = 1, m_2 = 5$ , czyli dla  $q_1 = 1, q_2 = 1, q_{21} = 5$  otrzymuje się  $v_{1,2} = (-5 \pm \sqrt{21})/2$ , zatem  $v_1 \approx -0,21, v_2 = -4,8$ ), to równanie (2.27) ma dwie pary rzeczywistych biegunów:  $\omega_{1,2} = \pm\sqrt{-v_1}$ ,  $\omega_{3,4} = \pm\sqrt{-v_2}$ , z których tylko bieguny określone dla dodatnich częstotliwości stanowią punkty rezonansowe charakterystyki geofonu. Można dodać, że schemat blokowy (rys. 2.2c) może być przedstawiony w nieco bardziej „eleganckiej” postaci – przez wyeliminowanie zmiennych  $z_1$  i  $z_2$  – ilustrującej wprost równanie (2.22).

To właśnie istnienie dwóch biegunów decyduje o wyglądzie charakterystyki amplitudowej geofonu i wyjaśnia kontrowersje oraz wątpliwości praktyków, zazwyczaj przekonanych, że charakterystyka geofonu „powinna” wyglądać tak jak charakterystyka

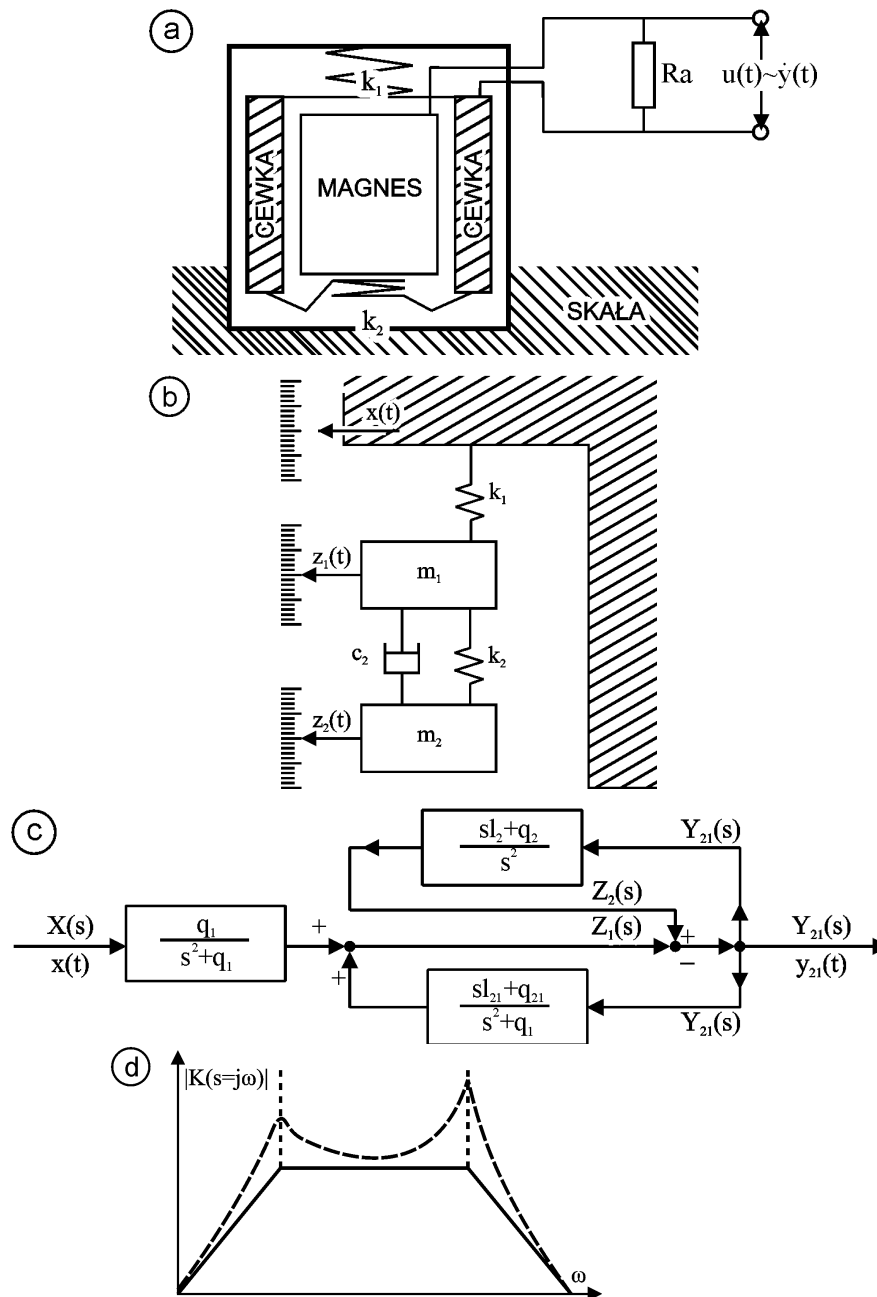
sejsmometru (rys. 2.1d)<sup>10</sup>. Laboratoryjne pomiary charakterystyki amplitudowej – których przykład pokazano na rys. 2.3 – nieodmiennie potwierdzają istnienie dwóch biegunów, choć ich ostrość, szczególnie bieguna niskoczęstotliwościowego, zależy może od typu (a nawet od egzemplarza) geofonu. *Zagadnienie odpowiedzi geofonu na wymuszenia krótkotrwałe, w przypadku gdy tłumienie jest różne od zera, jest ważne, a słabo rozpoznane w geofizyce górniczej.*

Analizując rys. 2.3 należy pamiętać, że geofon w postaci, jaką kupuje się u producenta geofonów (w odróżnieniu od producenta kompletnej aparatury górniczej), jest urządzeniem „delikatnym”, łatwym do zniszczenia, i zainstalowany pod ziemią w kopalni zapewne szybko zostałby uszkodzony. Stąd producenci górniczej aparatury pomiarowej umieszczają geofony w stalowej rurze (zazwyczaj o długości 10 – 25cm i o średnicy zgodnej ze średnicą typowych wiertel – „raczków” – czyli  $\varnothing 42$  mm), zwanej sondą. Sonda zabezpiecza geofon, lecz zestaw taki (tzn. geofon w sondzie) ma inną – często zdecydowanie inną – charakterystykę niż sam geofon, niemal zawsze „przesuniętą” w stronę niskich częstotliwości i zależną od „warsztatowej” jakości montażu oraz (w niektórych typach sond) od uszczeltek, które zmieniają swe właściwości z upływem czasu. Stąd, analizując właściwości układu pomiarowego, należy zawsze korzystać z charakterystyk zestawu obejmującego geofon w sondzie – a nigdy z charakterystyk samego geofonu (np. pokazywanych w katalogach producenta geofonów). Chcąc pogłębić zamieszanie, górnicy z reguły sondę nazywają geofonem, nawet wtedy, gdy wewnątrz (stalowej rury) znajduje się akcelerometr (często wraz z elektronicznym przedwzmacniaczem), a ostatnio niektóre typy „niskoczęstotliwościowych” geofonów nazywa się sejsmometrami, montuje i zalewa masą epoksydową – wraz ze wzmacniaczem i filtrem dolnoprzepustowym – we wspólnej obudowie (sondzie) i stosuje w sejsmologii górniczej.

Na rys. 2.3 zestawiono charakterystyki amplitudowe samego (typowego) geofonu „górniczego” DF-7G (u góry) i tego samego geofonu w sondzie. Choć logarytmiczna skala częstotliwości w pewnym stopniu „maskuje” różnice, widać, że sam geofon (u góry) ma rezonans w okolicy 1200 Hz, podczas gdy geofon w sondzie ma rezonans w pobliżu 950 Hz (a był to egzemplarz starannie przygotowany do badań).

---

<sup>10</sup> W niektórych torach pomiarowych występuje filtr dolnoprzepustowy, łagodzący skutki drugiego rezonansu – patrz rys. 1.8 w [16]. Komplikuje to jednak analizę i wprowadza własne zniekształcenia. Przypadek ten pomijamy. W nadajniku i odbiorniku toru (TSA) aparatury ARES-5 są filtry dolnoprzepustowe, których pasmo przenoszenia sięga poza wysokoczęstotliwościowy rezonans geofonu, zatem charakterystyka całego toru jest niemal identyczna z charakterystyką geofonu, rys. 2.2d.



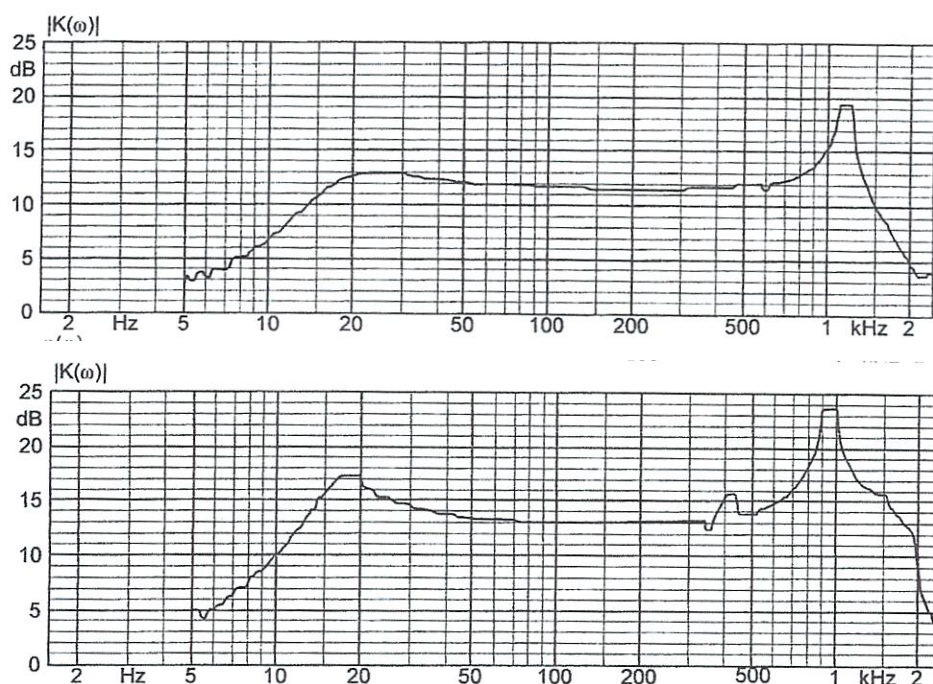
Rys. 2.2. Szkic i zasada działania geofonu elektrodynamicznego: a) uproszczony szkic „elektryczny”, b) mechaniczny schemat zastępczy, c) schemat blokowy geofonu, w sposób jawny uwzględniający równania (2.19) oraz (2.21);  $q_i = k_i / m_i$ ,  $l_i = c / m_i$  d) charakterystyka amplitudowa dla różnych wartości tłumienia. Zmienne  $x$ ,  $y$ ,  $z$  symbolizują przemieszczenia. Siła elektromotoryczna  $U(t)$  na wyjściu geofonu jest w przybliżeniu proporcjonalna do prędkości  $\dot{y}_{21} = \dot{z}_2 - \dot{z}_1$  ruchu uzwojenia względem pola magnetycznego

Fig. 2.2. Schema and operation principle of electro-dynamic geophone: a) simplified “electric schema”, b) equivalent “mechanical” schema, c) Block schema illustrating equations 2.19 and 2.21, where  $q_i = k_i / m_i$ ,  $l_i = c / m_i$  d) amplitude-frequency characteristics for two values of damping. Symbols  $x$ ,  $y$ ,  $z$  are displacements, voltage  $U(t)$  is approximately proportional to the  $\dot{y}_{21} = \dot{z}_2 - \dot{z}_1$ , velocity of coil oscillations in magnetic field

Pasma częstotliwości, w którym charakterystyka jest w przybliżeniu płaska (rys. 2.3 u góry, od ok. 30 Hz do ok. 800 Hz), nazywamy **obszarem stałego wzmocnienia**. Jeżeli



widmo sygnału mieści się w tym paśmie, to odpowiedź czujnika jest proporcjonalna do (i zachowuje kształt) wymuszenia. Im większa część widma sygnału sejsmicznego znajduje się poza obszarem stałego wzmocnienia, tym bardziej sygnał jest zniekształcony i tym mniej użyteczny (chyba, że stosuje się specjalne postępowanie zwane **dekonwolucją** lub **rozplataniem**, lecz to wymaga specjalnego oprogramowania). Stąd określenie szerokości i właściwego położenia obszaru stałego wzmocnienia jest jednym z celów kalibracji i stanowi jedno z kryteriów jakości czujnika.



Rys. 2.3. Amplitudowa charakterystyka typowego geofonu DF-7G bez sondy (u góry) oraz geofonu DF-7G umieszczonego w standardowej sondzie geofonowej

Fig. 2.3. Amplitude – frequency characteristics of the typical geophone DF-7G without a probe (upper) and installed inside the standard metallic probe

Choć jest to wyraźnie widoczne na rys. 2.1 i 2.2, należy jasno stwierdzić i podkreślić, że **zarówno w przypadku sejsmometru, jak i w przypadku geofonu, oporność wyjściowa ( $R_a$ ) jest jedynym w (tym uproszczonym) modelu czujnika absorberem energii, zatem**

**energia elektryczna** ( $e = R^{-1} \int_0^T u^2(t) dt$ , gdzie  $u(t)$  to napięcie) **zmierzona na oporności**

**wyjściowej czujnika równa jest (tzw. poosiowej składowej) docierającym do czujnika**

**strumieniowi ( $e_\beta^*$ ) energii sejsmicznej** ( $e^* = \rho V \int_0^T v^2(t) dt$ , gdzie  $\rho V$  to oporność

akustyczna, a  $v(t)$  to prędkość drgań elementów ośrodka). Zatem – w przypadku poprawnie przygotowanych pomiarów – jakość pomiaru strumienia  $e^*$  energii odpowiada jakości, z jaką

model (2.3) – lub (2.17) i (2.20) – opisuje rzeczywisty czujnik, skorygowaną o błąd pomiaru energii elektrycznej ( $e$ ) – a wynika stąd użyteczność badania i ulepszania modeli (by uniknąć nieporozumień, dodajmy, że np. [23, s. 115]) chwilową wartość strumienia nazywa natężeniem fali). Ma to podstawowe znaczenie w zagadnieniu pomiaru energii drgań, zatem i w zagadnieniach oceny oraz prognozy zagrożenia sejsmicznego. Wniosek ten dotyczy tylko pomiaru  $e_{\beta}^*$  i czujników tu opisanych, zilustrowanych na rys. 2.1 i 2.2. Nie dotyczy natomiast pomiaru  $e^*$  (ani tym bardziej parametrów źródła fal, na przykład energii), chwilowej amplitudy przebiegów, ani też pomiarów  $e_{\beta}^*$  w układach zawierających (między „wejściem” a obserwowanym „wyjściem”) dodatkowe elementy elektroniczne (i/lub zasilanie) – analiza takich złożonych układów wykracza poza ramy tej pracy.

Gdy celem pomiaru nie jest, lub jest nie tylko, estymacja skumulowanej energii krótkotrwałego sygnału, ale pomiar jego chwilowej amplitudy, zagadnienie jest zazwyczaj znacznie trudniejsze i (jeśli układ jest liniowy) wymaga wykonania, znając funkcję Greena układu pomiarowego, operacji zwanej dekonwolucją lub rozplataniem. Zagadnienie to wykracza jednak poza zakres naszego artykułu. Podkreślenia wymaga również konieczność zapewnienia „sztywnego kontaktu” czujnika z ośrodkiem, którego drgania są mierzone. Jest to zagadnienie czysto techniczne i praktyczne, lecz jego wpływ na jakość wyników jest ogromny i nie może być przeceniony.

Kończąc rozdział, można dodać, że, jak stwierdza m.in. podręcznik producenta czujników [8], model sejsmometru z rys. 2.1b i odpowiadające mu równanie  $H_{0,2}(\omega)$  mogą być także użyte do opisu akcelerometru piezoelektrycznego, lecz bez (elektronicznego) „przedwzmacniacza”, który np. w aparaturach ARES 3 i ARES 4 jest elementem koniecznym (we wspólnej obudowie z przetwornikiem piezoelektrycznym), by sygnał na wyjściu akcelerometru wyraźnie przewyższał poziom szumu.

Podstawy fizyczne opisanych w tym rozdziale zagadnień przedstawia np. [23].

### 3. Detekcja zdarzeń

#### 3.1. Podstawowe pojęcia

Zauważenie – przez człowieka – że nastąpił silny wstrząs nie jest zazwyczaj trudne, niezależnie od tego, czy spostrzegany jest on na sejsmogramie czy na podstawie odczutyh drgań. Wykrycie wstrząsu staje się trudniejsze, gdy drgania są słabe (np. pochodzą

z odległego źródła) lub gdy amplituda drgań porównywalna jest z lokalnym poziomem szumu. To samo zadanie staje się naukowym problemem, gdy **wykrywanie, czyli detekcję**, zjawisk trzeba zautomatyzować i sformułować zbiór reguł, które umożliwią programowi komputerowemu detekcję, pomijając jak najmniej wstrząsów oraz jak najmniej „skoków” szumu, uznając je za wstrząsy (oba kryteria są ważne: wyobraźmy sobie system monitorujący zakaz eksplozji nuklearnych!).

**Chcąc podkreślić znaczenie zagadnienia – zazwyczaj niedocenianego w sejsmologii górniczej i seismoakustyce – należy zauważyć, że algorytm detekcji wstrząsów i impulsów AE stanowi ich operacyjną definicję<sup>11</sup>: te i tylko te zjawiska, które algorytm ten zakwalifikuje jako wstrząsy/impulsy AE są następnie przetwarzane i mogą wpływać na ocenę zagrożenia sejsmicznego/tąpaniem. Gdy algorytm detekcji działa źle, to wszystkie dalsze analizy – w tym analizy zagrożenia – są złe i wprowadzają w błąd.**

Warto dodać, że zagadnienie detekcji dotyczy zarówno zjawisk krótkotrwałych (np. wstrząsów) na tle stacjonarnego szumu, jak i stopniowych zmian właściwości procesu (np. stopniowego wzrostu zagrożenia – nie tylko sejsmicznego, ale także np. powodzią lub epidemią itp.). Teoria detekcji dotyczy więc różnych klas zjawisk. Według [9] „stwierdzenie obecności lub braku sygnału wiąże się z dziedziną wnioskowania statystycznego, zwaną testowaniem hipotez lub teorią decyzji, a w terminologii inżynierskiej teoria decyzji zwana jest teorią detekcji ze względu na wczesne zastosowania w systemach radarowych”. Badacz interesujący się zagadnieniami detekcji ma więc do dyspozycji niemożliwą niemal do ogarnięcia literaturę z wielu dziedzin nauki – ze statystyką i teorią przetwarzania sygnałów na czele (patrz np. [4], [5], [9], [10], [19] – a każda z tych książek zawiera wiele odwołań).

Występujący na tle szumu sygnał może być wykryty, jeśli odróżnia się od niego niektórymi swymi cechami – zadanie detekcji jest najłatwiejsze, gdy przyjąć można, że sygnał od szumu różni się amplitudą. Należy wówczas w poprawny i użyteczny sposób zdefiniować te amplitudy – na przykład jako chwilową wartość obwiedni (sygnału, a także szumu) lub chwilową wartość bezwzględną lub kwadratową (sygnału, a także szumu), być może filtrowaną filtrem dolnoprzepustowym – i **iloraz tych amplitud, zwany** niezbyt fortunnie **stosunkiem sygnału do szumu** (ang. signal to noise ratio) i **oznaczany skrótem S/N**, porównywany z pewną stałą lub zmienną wartością kryterialną  $P_p$ . W najprostszym

---

<sup>11</sup> Ten ważny fakt jest niedostrzegalny przez użytkowników, którym wydaje się, że odczucie wstrząsu jest łatwe i pewne, a ich wyłapywanie nie jest zajęciem godnym górnika czy geofizyka. Tymczasem tylko znikoma część wstrząsów – równocześnie silnych i bliskich – może być łatwo i bez wątpliwości odczuta, a na stan (np. stopień spękania) górotworu, a więc i na zagrożenie, wpływają również „słabe” zjawiska.

przypadku, gdy iloraz  $S/N > P_p$ , deklaruje się „sygnał” lub alarm. Ponieważ chwilowe amplitudy szumu i sygnałów są wielkościami losowymi i podlegają znacznym chwilowym fluktuacjom (np. w przypadku obserwacji impulsów AE ze ściany skrawanej kombajnem), **detekcja, niezależnie od algorytmu, nigdy nie jest idealna. Zawsze pewna liczba sygnałów zostanie przeoczona (*błąd przeoczenia* w teorii testowania hipotez zwany błędem drugiego rodzaju), a niektóre fragmenty szumu, lub innych zakłóceń, zostaną mylnie rozpoznane jako sygnały (*falszywy alarm* lub błąd pierwszego rodzaju w teorii testów). Zjawisko występowania błędów detekcji jest nieuniknione, a ich względna liczebność zależy przede wszystkim od wartości ilorazu  $S/N$ .**

Współczesne systemy obserwacyjne sejsmologii i sejsmoakustyki zawierają zawsze komputer, który jest urządzeniem cyfrowym i operuje nie na sygnale ciągłym, lecz na ciągach/szeregach liczb. **Ciągły sygnał sejsmiczny**, przychodzący z czujników, jest **próbkowany** przez konwerter analogowo-cyfrowy (A/C) umieszczony na wejściu komputera, **a pojęcie to oznacza odczytywanie co okres  $T$  chwilowej wartości sygnału ciągłego** i przekazywanie do komputera ciągu liczb o wartości stałej między chwilami próbkowania (zatem na wyjściu konwertera A/C występuje sygnał „schodkowy”, ten tryb pracy ma angielską nazwę „sample and hold”). Sygnał ciągły jest próbkowany dobrze, jeśli nie powoduje to utraty informacji. W teorii przetwarzania sygnałów **dowodzi się** – jest to tzw. twierdzenie Kotelnikowa-Nyquista-Shannona (K-N-S) – **że jeśli sygnał ciągły zawiera składowe o częstotliwości nie większej od  $f_N$ , to musi być próbkowany z częstotliwością  $f_p = 2f_N$ , by nie nastąpiła utrata informacji (w praktyce częstotliwość  $f_p$  powinna osiągnąć nawet  $5f_N$ ).** **Częstotliwość  $f_N$  zwana jest częstotliwością Nyquista.**

Gdy celem przetwarzania sygnału są wykrycie i analiza zdarzeń sejsmicznych, to w przypadku sejsmologii górniczej zazwyczaj stosuje się  $200\text{Hz} < f_p < 500\text{Hz}$ , a w przypadku sejsmoakustyki w pokładzie węgla –  $2\text{kHz} < f_p < 5\text{kHz}$  (w przypadku obserwacji w skałach stropowych lub w przypadku badania próbek skalnych w laboratorium niezbędne są znacznie wyższe częstotliwości próbkowania).

Pojęcia częstotliwości próbkowania i częstotliwości Nyquista, która nie powoduje utraty informacji, znajdują zastosowanie również w zagadnieniach detekcji zmian w procesie o charakterze ciągłym, na przykład w zagadnieniu wykrywania zmian zagrożenia sejsmicznego/tąpnięciem. Zagrożenie – lub jak się czasem mówi, stan zagrożenia – traktować można jako ciągłą funkcję czasu i wówczas próbkowaniem jest operacja oceny (chwilowej liczbowej wartości) tego zagrożenia. Ocenę tę – czyli próbkowanie ciągłego procesu – można

robić okresowo, na przykład na koniec każdej ośmiogodzinnej zmiany, co godzinę lub ogólnie co  $T_p$ . **Próbkowanie bez utraty informacji wykonywane jest poprawnie, gdy uzyskana w ten sposób informacja umożliwia optymalną ocenę tego co będzie się działo między momentami próbkowania.** Stanowi to problem niezwykle ważny, niezwykle trudny i całkowicie niedostrzegany/niezrozumiany przez użytkowników. Wyobraźmy sobie, że prowadzący do tąpnięcia proces pęknięcia skały trwa pół godziny: np. zaczyna się o 11<sup>10</sup> i kończy tąpnięciem o 11<sup>40</sup>. Przed 11<sup>10</sup> nie było oznak wzrostu zagrożenia, po 11<sup>40</sup> jest już „po wszystkim”. Próbkowanie – czyli ocena zagrożenia – raz na zmianę nie daje żadnych szans ostrzeżenia przed nieszczęściem. Poprawne próbkowanie (ocenie zagrożenia) musi być wykonywane (a informacja dostarczana zainteresowanym) zgodnie z twierdzeniem K-N-S, czyli co najmniej dwa razy częściej od częstotliwości najszybszych zjawisk w obserwowanym procesie – wówczas teoria zapewnia, że zdarzenia nas nie zaskoczą. *Jest to problem z wielu powodów trudny, zatem i ciekawy jako temat badawczy.*

Teraz możemy wrócić do zagadnienia automatycznej detekcji zdarzeń sejsmicznych, wstrząsów i impulsów AE.

### 3.2. Algorytm Allena

W przypadkach gdy cechą odróżniającą zdarzenie (które chcemy wykryć) od tła jest amplituda tego zdarzenia (wyraźnie większa od amplitudy tła lub szumu), to w sejsmologii i sejsmoakustyce stosowane są dwie metody automatycznej detekcji:

- Skrajnie uproszczona metoda detekcji „stałoproęgowej”, która polega na porównywaniu (przez program komputerowy) amplitudy obwiedni sygnału<sup>12</sup> z zadaniem progami  $A_1$ , którego przewyższenie traktowane jest jako oznaka nadejścia sygnału, a następnie z progami  $A_2 < A_1$ , którego przekroczenie w dół (od wartości większych od  $A_1$  do mniejszych) traktowane jest jako oznaka zaniku sygnału.

W przypadku gdy stały próg detekcji ( $A_1$  i  $A_2$ ) zakładany jest (raz na zawsze) przez producenta oprogramowania sejsmologii górniczej i sejsmoakustyki, a obsługa tej aparatury (na kopalnianej stacji tupań) ma możliwość manipulowania wzmocnieniem kanałów (przed wejściem sygnału do komputera), prowadzić to może do bezwartościowych, pozornych obserwacji, służących tylko do zafałszowania stanu zagrożenia. Użytkownicy zazwyczaj nie pamiętają, że akceptując stałoproęgowy algorytm

---

<sup>12</sup> Zazwyczaj obwiednię aproksymuje się za pomocą operacji „prostowania” – czyli wyznaczenia bezwzględnej wartości – a następnie filtracji wyprostowanego sygnału.

detekcji, akceptują też skrajnie prymitywną definicję: zdarzeniami sejsmicznymi nazywamy te i tylko te fragmenty przebiegu  $Y(i)$ , które zaczynają się, gdy obwódnia  $|obwY(i)|$  przewyższy ustalony próg „ $A_1$ ” i kończą się, gdy opadnie ona poniżej progu „ $A_2$ ”. Nawet okresowa „regulacja” progów  $A_1$  i  $A_2$  niewiele pomoże. Wystarczy wzrost poziomu szumu w otoczeniu czujnika, by algorytm ten sygnalizował „ciągłą detekcję”, która szybko zmusi obsługę do wyłączenia kanału. Stałoprogową metodą detekcji powinna być zakazana przepisami.

- Przyjęty z seismologii trzęsień Ziemi algorytm Allena (patrz np. [2], [3], [16, s. 32], [21], [22]). Algorytm ten – pokazany na rys. 3.1 w formie uproszczonego „programu” (rys. 3.1a, u góry) i w formie schematu przepływu sygnału (rys. 3.1b, u dołu) – jest algorytmem adaptacyjnym, uczącym się (i przystosowującym się do) zmiennego poziomu szumu i zmiennego wzmocnienia. Algorytm Allena porównuje w kolejnych chwilach  $t = k \cdot T_p$ ,  $k=1, 2, 3...$  iloraz STA/LTA, czyli średniej krótkookresowej (STA – od ang. short time average) i średniej długookresowej (LTA – od ang. long time average), z wartością progową  $P_p$  (rys. 3.1a), sygnalizującą początek zdarzenia, i z wartością  $P_k$  (rys. 3.1b), sygnalizującą koniec zdarzenia. „Program” z rys. 3.1a zawiera tylko jeden próg (if STA/LTA>P then „alarm”) i służy tylko do uproszczonego pokazania zasady działania algorytmu. Schemat z rys. 3.1b, choć nadal bardzo prosty, znacznie lepiej nadaje się do realnych zastosowań – choć zawiera kilka parametrów, których wartości specjalista<sup>13</sup> musi ustalić przed uruchomieniem programu w kopalni. Parametry algorytmu dobiera się tak, by przebieg na wyjściu filtru STA aproksymował nieco tylko wygładzoną obwiednię przebiegu wejściowego, podczas gdy przebieg na wyjściu LTA aproksymować powinien poziom szumu, przy czym w dobrze skonstruowanym algorytmie wykryte sygnały („wstrząsy”) nie wpływają na LTA, zatem nie zniekształcają poziomu szumu. Dzięki temu iloraz STA/LTA interpretować można jako przybliżenie (chwilowej wartości) S/N. Kryterium detekcji sprawdza, z każdą nową „próbką” przebiegu, czy iloraz S/N przekroczył założony próg detekcji (np.  $P_p=3$ ), co uznawane jest za początek zdarzenia, a następnie czy iloraz ten zmalał poniżej drugiego progu (np.  $P_k=1,5$ ), co uznawane jest za koniec zdarzenia. Należy zauważyć, że jest to kryterium racjonalne, lecz dopuszcza wiele rozmaitych błędów, a parametry  $P_p$  i  $P_k$  mają tu co najwyżej „eksperymentalne”

<sup>13</sup> Jeżeli przepisy nie stanowią inaczej, jest to obowiązkiem geofizyka, gdyż właśnie wartości parametrów algorytmu decydują o tym, co ten algorytm zakwalifikuje jako zdarzenie, a co jako szum. „Spychanie” tego obowiązku na programistę, który być może nie jest geofizykiem, może odebrać sens metodzie.

uzasadnienie. Gdy rozkład wartości różnicy  $|STA(t) - LTA(t)|$  aproksymować można rozkładem np. logarytmiczno-normalnym, to możliwe staje się stosowanie przybliżonej (bardzo prostej) wersji testowania (związanej z nazwiskami Neymana i Pearsona) obecności sygnału, umożliwiając przybliżoną analizę teoretyczną i „optymalny” dobór parametrów algorytmu. *Analiza typowych rozkładów (unormowanej) różnicy  $|STA(t) - LTA(t)|$  jest prostym i pilnym zadaniem badawczym.* Pokazany na rys. 3.1 schemat nie obejmuje zagadnienia aproksymacji obwiedni sygnału (zazwyczaj jest to bardzo proste przekształcenie:  $x(t) = |y(t)|$ , określające wartość bezwzględną sygnału, po którym stosowana jest filtracja „wygładzająca”).

Przykłady ilustrujące działanie algorytmu Allena, a także opis właściwości filtrów STA i LTA, przedstawia np. [12] – rys. 6.3, 6.5, 6.6). Gdy jest poprawnie zakodowany, algorytm ten działa nieporównywalnie lepiej od algorytmu detekcji stałoproęgowej. W języku polskim o zagadnieniach detekcji w sejsmologii i sejsmoakustyce więcej pisze [12, s. 175-192], generalnie jednak nie jest to temat popularny w pracach z tego zakresu i *problemy zastosowań, w tym skuteczność detekcji i jej wpływ na wyniki oceny zagrożenia sejsmicznego, w większej swej części czekają na zbadanie.*

Na zakończenie artykułu użytkownikom – czyli kopalnianym działom tupań – można doradzić, by kupując oprogramowanie (zazwyczaj kupuje się je wraz z aparaturą i nie zwraca na nie większej uwagi) jako warunek minimalny zakupu stawiali przeprowadzenie testu porównującego wyniki detekcji zdarzeń AE (lub wstrząsów) przez operatora i przez program automatycznej detekcji i zadbali, by zdarzenia testujące były realistyczne – jest to szczególnie ważne w przypadku sejsmoakustyki.

#### a) Uproszczony algorytm Allena

1. Ustal wartości początkowe i parametry algorytmu:

$$STA(1)=X(1); LTA(1)=X(1); 1 >> \alpha >> \beta > 0; P > 1$$

2. Oblicz wartość LTA(t) aproksymującą „zdecydowanie wygładzony” poziom szumu oraz wartość STA(t) aproksymującą „nieco wygładzoną” obwiednię sygnału wejściowego. X(t) to zazwyczaj wyprostowana wartość sygnału y(t) wejściowego:  $X(t)=|y(t)|$

dla  $t=1, 2, 3, 4, \dots$ ,

licz

$$STA(t)=STA(t-1)+\alpha[X(t)-STA(t-1)]$$

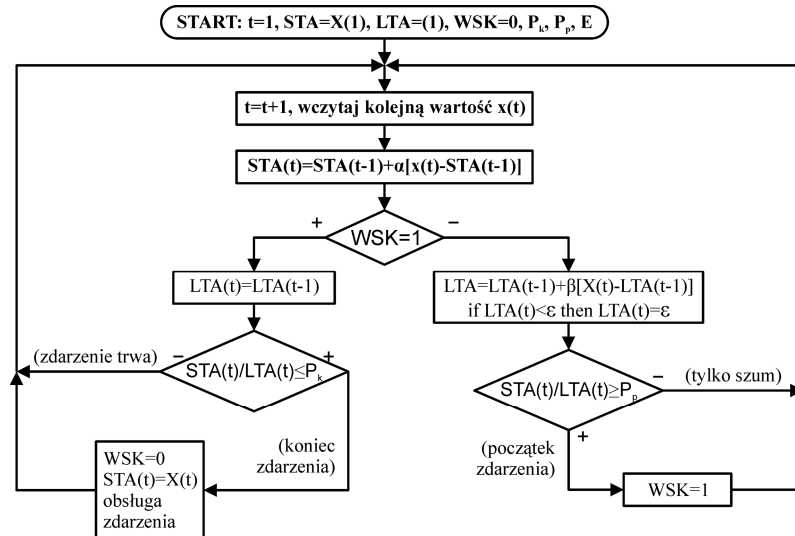
$$LTA(t)=LTA(t-1)+\beta[X(t)-LTA(t-1)]$$

If  $STA(t)/LTA(t) > P$  then „alarm/detekcja“

End

Odpowiedni dobór wartości  $P$  umożliwi kontrolę równowagi między liczbą fałszywych alarmów i liczbą przeoczonych zdarzeń.

### b) Schemat przepływu sygnałów



Algorytm ten definiuje zdarzenie jako ciąg wartości  $\{y(i)\}$  zaczynający się, gdy  $STA/LTA \geq P_p$ , i kończący się, gdy  $STA/LTA \leq P_k$ . Indeksowanie  $STA$  i  $LTA$  nie jest konieczne.

Rys. 3.1. Algorytm Allena – uproszczony „program”: a) i schemat przepływu sygnału, b) WSK to wskaźnik obecności zdarzenia. W czasie trwania zdarzenia poziom  $LTA$  nie jest aktualizowany.  $\epsilon$  to mała liczba wykluczająca dzielenie przez zero. Parametry  $\{\alpha, \beta, \epsilon, P_p, P_k\}$  należy ustalić przed uruchomieniem algorytmu

Fig. 3.1. Allens' algorithm simplified “program” a), and information flow diagram b). Note that during the detected event the  $LTA$  value rests unchanged.  $\epsilon$  is a small constant, guarding against 0 division. Parameters  $\{\alpha, \beta, \epsilon, P_p, P_k\}$  should be assumed before operation starting

## 4. Podsumowanie i wnioski

Teoria czujnika elektrodynamicznego i jego pracy w warunkach ustalonych jest dość prosta i znana. Znacznie mniej umiemy powiedzieć o warunkach poprawnej pracy tego czujnika w środowisku przebiegów przejściowych, a tymczasem w sejsmologii górniczej i sejsmoakustyce to właśnie przebiegi przejściowe, znane jako sejsmogramy wstrząsów, niosą potencjalnie użyteczną informację o zagrożeniu sejsmicznym/tąpianiami. Stąd wynika pilna potrzeba odpowiednich badań. W artykule, po wprowadzeniu klasycznej teorii czujnika, podsumowano (niektóre) warunki jego poprawnej pracy, w szczególności formułując następujące wnioski:



1. Czujnik musi być zawsze starannie dobrany do warunków *przyszłej* pracy. Zlekceważenie tego warunku powoduje, że przebiegi docierające (od czujników) do komputera mogą nie mieć użytecznej interpretacji fizycznej (tzn. nie przedstawiają ani przyspieszenia, ani prędkości, ani przemieszczenia, lecz przypadkową ich mieszaninę) i nie nadają się ani do badania emisji sejsmicznej, ani do badania zagrożenia. Co najgorsze, sejsmogramy wyglądają „normalnie” i użytkownicy (na stacji tupań) są przekonani, że wszystko jest w porządku, tylko oceny zagrożenia, nie wiadomo dlaczego, są złe.
2. Potrzebne jest wznowienie – od lat zaniechanych – badań nad podstawowymi zagadnieniami obserwacji sejsmicznej. Należy przypuszczać, że przyjęte z innych dziedzin nauki/techniki metody obserwacji – w dodatku źle stosowane – nie spełniają swego zadania (lub kiepsko spełniają) w środowisku sygnałów krótkotrwałych.
3. Charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe wszystkich (lub niemal wszystkich) geofonów elektrodynamicznych (w tym „Geospace” stosowanych jako sejsmometry) stosowanych obecnie w polskim górnictwie mają dwa piki i dwie częstotliwości rezonansowe (rys. 2.2d, 2.3), między którymi znajduje się „pasma stałego wzmocnienia”, które obejmować powinno zakresy widmowe sygnałów niosących użyteczną informację. W niektórych przypadkach filtracja usuwa rezonans wysokoczęstotliwościowy, lecz zawsze wprowadza to inne zniekształcenia.
4. Gdy potrzebna jest informacja zawarta w kształcie sejsmogramu lub w jego widmie, przebiegi docierające do komputera należy poddawać dekonwolucji.
5. Mimo zniekształcenia sygnału wejściowego (co w niektórych zastosowaniach jest istotne, a w innych nie) zarówno geofon, jak i sejsmometr (gdy są poprawnie dobrane do potrzeb) umożliwiają łatwy, przybliżony pomiar (tzw. składowej poosiowej) unormowanego (tzn. określonego, zakładając  $\rho = 1\text{kg}/\text{m}^3$  i  $V = 1\text{m}/\text{s}$ , w ośrodku) strumienia energii fal sejsmicznych – stąd (pośrednio) wynika ich użyteczność w zagadnieniu prognozy zagrożenia sejsmicznego i nasze zainteresowanie ich teorią.

## BIBLIOGRAFIA

1. Aki K., Richards P.G.: Quantitative Seismology (2<sup>ed</sup>). Sausalito, California University Science Books 2000.
2. Allen R.: Automatic earthquake recognition and timing from single trace. Bull. Seismol. Soc. Amer., Vol. 68, 1978, p. 1521-1532.

3. Allen R.: Automatic phase pickers, their present use and future prospects. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, Vol. 72, No. 6, 1982, p. 225-242.
4. Basseville M., Benveniste A.: *Detection of Abrupt Changes in Signals and Dynamical Systems*. Springer – Verlag, New York 1986.
5. Basseville M., Nikiforow I.V.: *Detection of Abrupt Changes. Theory and Application*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs 1993.
6. Bendat J., Piersol A.: *Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych*. PWN, Warszawa 1976.
7. Bracewell R.: *Przekształcenia Fouriera i jego zastosowania*. WNT, Warszawa 1968.
8. Bruel i Kjaer: *Piezoelectric Accelerometer and Vibration Preamplifier Handbook*. Wydawnictwo Bruel and Kjaer, Naerum, Danmark 1978, p. 24-27.
9. Gibson J.D., Melsa J.L.: *Introduction to Nonparametric Detection with Application*. Academic Press, New York 1975.
10. Kay S.M.: *Fundamentals of Statistical Signal Processing, Vol. II, Detection Theory*. Prentice Hall, Englewood Cliffs 1988.
11. Konopko W.: Doświadczalne podstawy kwalifikowania wyrobisk górniczych w kopalniach węgla kamiennego do stopni zagrożenia tąpnięciami. *Prace Naukowe GIG*, nr 795, GIG, Katowice 1994.
12. Kornowski J.: *Podstawy sejsmoakustycznej oceny i prognozy zagrożenia sejsmicznego w górnictwie*, Wydaw. GIG, Katowice 2002.
13. Kornowski J., Kurzeja J.: *Krótkookresowa prognoza zagrożenia sejsmicznego w górnictwie*. Wydawnictwo GIG, Katowice 2008.
14. Kornowski J., Bura I.: *Analiza czujników i problemów obserwacji w sejsmoakustyce i sejsmologii górniczej*. *Prace Naukowe, GIG nr 4/3/2010*, Wydawnictwo GIG, Katowice 2010.
15. Marcak H., Zuberek W.M.: *Geofizyka górnicza*. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice 1994.
16. Mendecki A. J. (ed.): *Seismic Monitoring in Mines*. Chapman and Hall, London 1997.
17. Musson R., Cecic I.: *Macroseismology*, [in:] Lee W., Kanamori H., Jennings P., Kisslinger C.: *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*. Academic Press, New York 2002, p. 807-822.
18. Ono K., Cho H., Matsuo T.: *Transfer functions of acoustic emission sensors*, “*J. Acoustic Emission*”, Vol. 26, 2008, p. 72-90.
19. Van Trees H.L.: *Detection, Estimation and Modulation Theory*. J. Wiley, New York 1968.
20. Wielandt E.: *Seismometry*, [in:] Lee W., Kanamori H., Jennings P., Kisslinger C.: *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*. Academic Press, New York 2002, p. 283-304.
21. Withers M., Aster R., Young C., Beiriger J., Harris M., Moore S., Trujillo J.: *A comparison of select trigger algorithms for automated global seismic phase and event detection*. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, Vol. 88, 1998, p. 85-106.
22. Withers M., Aster R., Young C.: *An Automated Local and Regional Seismic Event Detection and Location System Using Waveform Correlation*. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, Vol. 89, No. 3, 1999, p. 657-669.
23. Zastawny A.: *Zarys fizyki*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1997.

Recenzent: Dr hab. inż. Zenon Pilecki, prof. IGSMiE PAN

**Abstract**

In this paper we discuss observational problems of seismic emission in coal mining, where this emission is the information carrier allowing for seismic/rockburst hazard assessment and prediction. Simple model of seismometer is analyzed at first, with transformations which make the analysis even easier and allow to quickly calculate its response for transient input, so important in seismic observations. Then we stress the differences between the seismometer – which is modeled as the second-order oscillator – and the geophone which exhibits two resonances in its amplitude – frequency response and is better modeled as a fourth-order device. This differences are to be taken into account if we really want – as is usually declared – to estimate quantitative, not qualitative only, attributes (ex. energy flux) of seismic events.

We discuss also some very basic notions and problems of event detection, stressing the commonly overlooked fact that detection algorithm makes, in fact, an operational definition of seismic event and only events accepted with this algorithm are used for hazard assessment and prediction. It is not a problem as long as the events are detected with a human operator, but it can be really disastrous when automatic detection is necessary – as, for example in mining seismoacoustics.