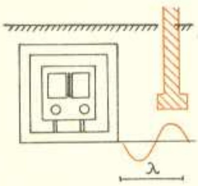
Co zrobić, żeby metro nie huczało?

Dr inż. Jadwiga Abłamowicz-Potapowicz.

Fizyka opisuje zjawiska, przy założeniu modelu o idealnych parametrach, komplikacje wynikające z niejednorodności materiałów czy równoczesności zdarzeń i nakładania się pewnych wpływów, które mogą zniekształcić efekt końcowy, ujmuje rachunek prawdopodobieństwa i statystyka.

Przy projektowaniu rozwiązań technicznych często podstawę stanowią wyniki badań i empiryczny opis efektu końcowego nie analizujący fizycznego przebiegu zjawiska. Dla bardzo złożonych problemów projektant rozwiązania technicznego przygotowuje program na maszynę matematyczną, opisuje zjawisko w sposób idealny i wprowadza szereg współczynników, pozwalających uzyskać lepsze przybliżenie. Przy projektowaniu ochrony przeciwdźwiękowej dla metra warszawskiego wykorzystano doświadczenia (osiągnięcia i błędy) projektantów metra w Moskwie, Londynie, Paryżu, Pradze, Budapeszcie, Sztokholmie i Berlinie. Np. po oddaniu do eksploatacji metra moskiewskiego, okazało się, że na niektórych płytkich odcinkach, drgania wywołane przejazdem pociągu metra, przenoszą się na budynki mieszkalne. Przekroczenie wartości dopuszczalnych zanotowano w odległości 10, 20 i 30 m. Wartości maksymalne amplitud, prędkości i przyspieszeń wystąpiły dla częstotliwości 8, 16, 32 i 64 Hz. W metrze londyńskim, oprócz zakłóceń przenoszących się przez podłoże, zanotowano tzw. „efekt tłoka", polegający na gwałtownym rozprężeniu się przy wjeździe pociągu na stację tłoczonego tunelem powietrza.



W metrze paryskim w celu uniknięcia efektów przenoszenia się drgań od przejazdu pociągu metra, wprowadzono wagony na pneumatykach eliminując w zasadzie ten problem. We wszystkich zaprojektowanych i oddanych do użytku metrach stwierdzono znaczne przekroczenie założonego poziomu dźwięku (hałasu) od instalacji wentylacji mechanicznej, na stacjach metra i na czerpnio-wyrzutniach powietrza.

Pierwszym etapem projektowania było określenie wpływu drgań gruntu na budynki sąsiadujące z linią metra.

Drgania gruntu wyznaczono zgodnie z teorią sprężystości, korzystając z równań Naviera, dotyczących dynamicznej równowagi wewnętrznej ciała. W przestrzeni ograniczonej można określić składowe obciążenia powierzchniowego i przy wykorzystaniu warunków ciągłości odkształcenia (równania Saint Venanta) i uogólnionego prawa Hooke'a (dot. związku między odkształceniami i naprężeniami) oraz wprowadzając stałe Lamego i operator Laplace'a

$\nabla^2 = \frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2} + \frac{d^2}{dz^2}$, można dojść do opisania ruchu falowego w prostej

postaci $\nabla^2 f - a^2 \frac{d^2 f}{dt^2} = 0$

(f — częstotliwość).

Równanie Naviera i wynikające z niego równania falowe dla rozchodzenia się odkształceń w ośrodku sprężystym były wprowadzone w »Delcie« 3/1976. W tekście obok równanie falowe opisuje zmiany częstotliwości lokalnej rozchodzących się odkształceń. Często zamiast wprowadzania częstotliwości lokalnej (zależnej od położenia i czasu) dokonuje się tzw. analizy harmonicznej rozkładając drganie złożone na składowe o określonych i stałych częstotliwościach (przyp. red).

Postać ruchu falowego będzie różna dla fal podłużnych i poprzecznych, a z zależności wynikających między częstotliwością a prędkością można wyliczyć długość fali poprzecznej i podłużnej.

Między prędkością rozprzestrzeniania się fal podłużnych i poprzecznych zachodzi

związek $\frac{v_l}{v_t} = \sqrt{\frac{2(1-\mu)}{1-2\mu}} > 2$

gdzie μ — współczynnik Poissona.

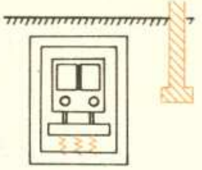
Wynika stąd, że fale podłużne rozchodzą się w ośrodku sprężystym znacznie szybciej niż fale poprzeczne. Dowolny prostopadłościan znajdujący się poza obrębem miejsca zakłócenia doznaje najpierw drgań podłużnych, a dopiero po pewnym czasie dochodzą do niego fale poprzeczne.

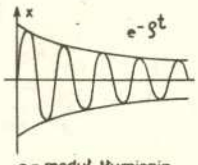
W warunkach warszawskich podłoże zawiera ruiny zburzonej Warszawy, nowe i stare uzbrojenie terenu i bardzo niejednorodny grunt.

Przy projektowaniu rozwiązania technicznego przyjęto model najniekorzystniejszego układu obciążeń oraz istnienie mostków akustycznych między tunelem metra a fundamentami najbliższej linii zabudowy mieszkalnej. Założono też, że przestrzeń podłoża gruntowego jest nieograniczona.

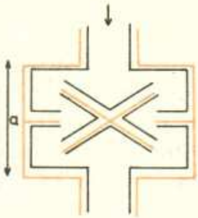
Mostek akustyczny w tym wypadku to ewentualne sztywne połączenie tunelu metra z budynkami mieszkalnymi. Takie połączenie znacznie pogarsza izolacyjne własności gruntu. (przyp. red.)

Istotną cechą takiego ruchu drgającego jest brak częstotliwości własnych, natomiast dla każdego materiału przestrzeni istnieją właściwe mu prędkości rozchodzenia się fal podłużnych i poprzecznych, niezależne od częstotliwości drgań.





ϱ - moduł tłumienia



Zabezpieczenia akustyczne dla metra warszawskiego od przenoszenia się drgań przez podłoże, zaprojektowano wewnątrz tunelu, izolując tunel od drgań przenoszonych przez torowisko, zalecając równocześnie pociąg na pneumatykach. Równocześnie na odcinkach specjalnych projektowano dylatację gruntu do poziomu posadowienia tunelu.
Eliminację efektu tłoka rozwiązali empirycznie Anglicy, wprowadzając przetoki międzytunelowe i szyby wentylacji grawitacyjnej przed wjazdem pociągu na stację.
Sprawa tłumienia hałasu instalacji wentylacji mechanicznej jest w zasadzie prosta pod względem fizycznym, bo dźwięk rozprzestrzenia się w powietrzu, który to ośrodek w rozwiązaniu technicznym można uważać za jednorodny. Zasada rozprzestrzeniania się dźwięku w powietrzu jest zgodna z prostymi prawami fizyki. Zgodnie z tą zasadą zaprojektowano na terenowych czerpniach i wyrzutniach tłumiki komorowe, w których założono 15 odbić fal dźwiękowych a przyporządkowana tej liczbie odbić strata energii określa zdolność tłumienia tłumika D.

$$D = 10 \lg\left(\frac{a}{F} \cdot \frac{\alpha}{0{,}055(1-\alpha)n}\right) + \Delta \qquad (\alpha \cong 0{,}4 \quad \Delta = 8 \text{ dB}),$$

gdzie
n — liczba odbić
F — powierzchnia tłumiąca
α — współczynnik pochłaniania
Przytoczone powyżej rozwiązania podają schematycznie zasadę ochrony przeciwdźwiękowej budynków mieszkalnych, sąsiadujących z linią metra.
Wszystkie inne problemy akustyczne dotyczą adaptacji akustycznej stacji, zapewnienia zrozumiałości informacji słownej podawanej przez głośniki, izolacji dyspozytorni oraz blisko położonych budynków specjalnych, jak np. Radio i Telewizja.
Dla pierwszej linii metra w Warszawie zaprojektowano więc następujące rozwiązanie akustyczne z zakresu ochrony przeciwdźwiękowej i akustyki wnętrz
— izolację poziomą podtorza na całej długości metra płytkiego
— dodatkowe izolacje pionowe na odcinku sąsiadującym z obiektem Radia i Telewizji oraz Centralną Dyspozytornią
— komorowe tłumiki dla instalacji wentylacji mechanicznej szlaku i stacji od strony czerpnio-wyrzutni
— tłumiki szczelinowe dla instalacji wentylacji stacji i pomieszczeń technologicznych
— przetoki międzytunelowe przed wjazdem pociągu metra na stację
— adaptację akustyczną stacji ze względu na zrozumiałość informacji podawanej przez głośniki
— adaptację akustyczną pomieszczeń obsługi stacji i niektórych pomieszczeń technologicznych.

Rozwiązanie zadania **M 100.**

Niech f będzie szukaną funkcją. Przyjmując w danej równości $x = y = 0$ otrzymujemy $[f(0)]^2 = [f(0)]^2 + [f(0)]^2$, skąd $f(0) = 0$. Przyjmując w tej samej równości $y = -x$, wobec równości $f(0) = 0$, otrzymujemy $0 = [f(0)]^2 = [f(x)]^2 + [f(-x)]^2$, a więc dla każdej liczby rzeczywistej x jest $f(x) = 0$. Oczywiście funkcja tożsamościowo równa zeru spełnia warunki zadania.

Doniesienie

Powszechnie znane dowody niewymierności pierwiastków kwadratowych z liczb naturalnych nie będących kwadratami korzystają z pojęć teorii liczb. Mówi się w nich np. o liczbach względnie pierwszych i podzielności.
W roku 1975 matematyk angielski T. Estermann opublikował następujący dowód niewymierności liczby $\sqrt{2}$, nie korzystający z pojęć teorii liczb:
Załóżmy, że $\sqrt{2}$ jest liczbą wymierną. Istnieją więc takie liczby naturalne k, że $k\sqrt{2}$ jest liczbą naturalną. Niech n będzie najmniejszą z nich. Liczba $(\sqrt{2}-1)n$ jest więc naturalna jako różnica liczb naturalnych $n\sqrt{2}$ i n. Jest ona oczywiście mniejsza od n. Pomnóżmy ją przez $\sqrt{2}$:

$$(\sqrt{2}-1)n\sqrt{2} = 2n - n\sqrt{2}.$$

Różnica $2n - n\sqrt{2}$ jest, jako różnica dwóch liczb naturalnych, też liczbą naturalną. Wskazaliśmy więc liczbę naturalną $((\sqrt{2}-1)n)$ mniejszą od n, która pomnożona przez $\sqrt{2}$ daje liczbę naturalną. Otrzymana sprzeczność dowodzi, że założenie o wymierności $\sqrt{2}$ jest fałszywe, a więc $\sqrt{2}$ jest liczbą niewymierną.
Rozpatrując liczbę

$$(\sqrt{m}-[\sqrt{m}])\, n\sqrt{m},$$

gdzie $[x]$ jest częścią całkowitą liczby x, można podobnie udowodnić, że $\sqrt{m}$ jest liczbą niewymierną, jeśli tylko m nie jest kwadratem liczby całkowitej.

Andrzej MĄKOWSKI