

*Krzysztof Stypuła\**

## WYBRANE PROBLEMY OCHRONY ZABUDOWY POWIERZCHNIOWEJ PRZED DRGANIAMI GENEROWANYMI PRZEZ KOMUNIKACJĘ PODZIEMNĄ

---

### **1. Podstawy diagnostyki wpływu drgań na budynki i ludzi w budynkach**

Wpływ drgań na budynki i ludzi w budynkach jest jednym z głównych problemów ochrony środowiska związanych z komunikacją podziemną. Diagnostyka tych wpływów ujęta jest w dwu polskich normach, opracowanych w Instytucie Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej [1, 2]:

- PN-85/B-02170. Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki.
- PN-88/B-02171. Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach.

Ocenom podlegają drgania pomierzone w odpowiednich punktach konstrukcji lub otrzymane w wyniku obliczeń symulacyjnych na podstawie danych wejściowych pochodzących z takich pomiarów. Wyróżnia się trzy składowe drgań: dwie poziome  $x$  i  $y$  oraz składową pionową  $z$ .

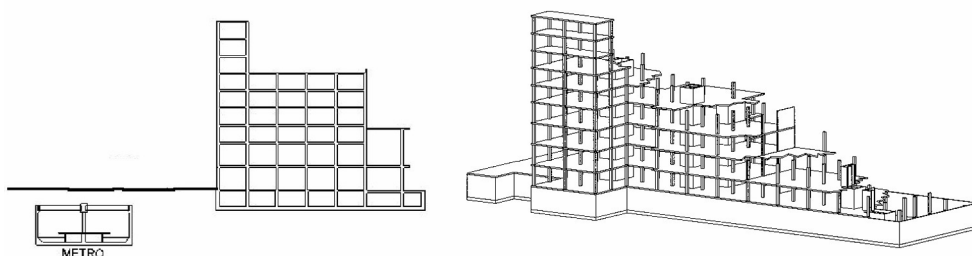
W odróżnieniu od innych wpływów środowiskowych drgania stanowią dla budowli dodatkowe obciążenie. Stąd pełna ocena wpływu drgań na konstrukcję budynku powinna być wykonana zgodnie z zasadami dynamiki budowli, co wymaga zbudowania modelu konstrukcji budynku do obliczeń dynamicznych (rys. 1) i poddania go wymuszeniu.

Wymuszenie może być zrealizowane albo przez przyłożenie do fundamentów przebiegów czasowych drgań (pomierzonych lub prognozowanych drgań fundamentów) albo w postaci tzw. spektrów odpowiedzi. Ocena polega na sprawdzeniu możliwości wystąpienia rezonansu, wyznaczeniu sił bezwładności działających dodatkowo na konstrukcję pod wpły-

---

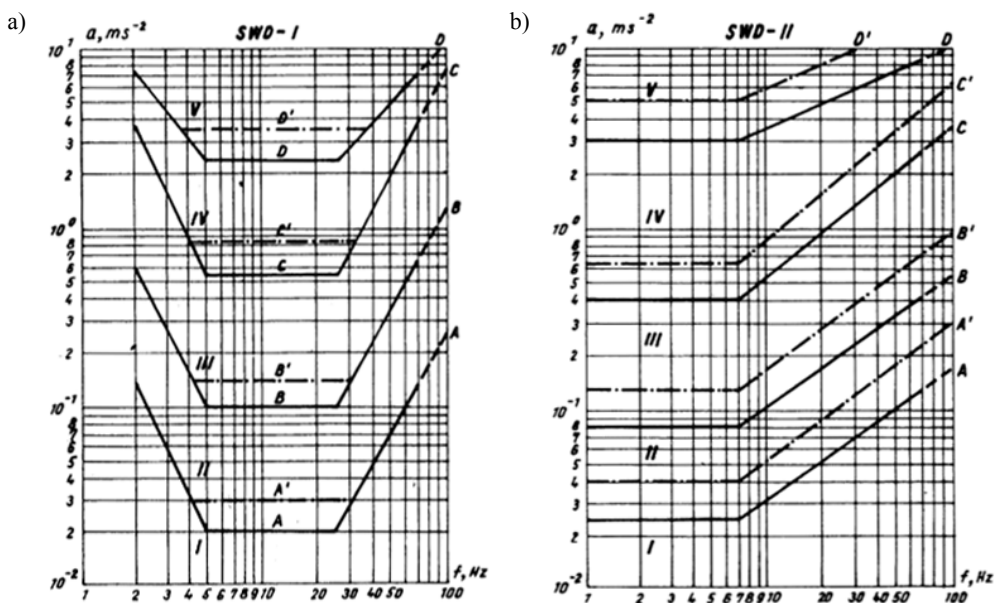
\* Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska, Kraków

wem drgań, obciążeniu modelu obliczeniowego konstrukcji wszystkimi obciążeniami statycznymi i dynamicznymi (siłami bezwładności) i sprawdzeniu tak obciążonej konstrukcji pod względem wytrzymałościowym zgodnie z wymaganiami norm dotyczących obliczeń i projektowania konstrukcji budowlanych.



Rys. 1. Usytuowanie budynku względem tunelu i fragment modelu obliczeniowego budynku

W normie PN-85/B-02170 podano także przybliżony sposób oceny wpływu poziomych składowych drgań (w postaci przemieszczeń lub przyspieszeń) na budynek za pomocą tzw. skal wpływów dynamicznych: SWD-I i SWD-II (rys. 2).



Rys. 2. Skale SWD-I (a) i SWD-II (b) w wersji przyspieszeniowej

Skale SWD dotyczą dwu najczęściej spotykanych klas budynków niskich i średnio wysokich (do 5 kondygnacji nadziemnych włącznie) wykonanych z elementów murowych (przeznaczonych do ręcznego układania jak cegła, pustaki itp.) oraz z wielkich bloków:

- skala SWD-I odnosi się do budynków o kształcie zwartym, wymiarach zewnętrznych rzutu poziomego poniżej 15 m, jedno- lub dwukondygnacyjnych i o wysokości nie przekraczającej żadnego z wymiarów rzutu poziomego;
- skala SWD-II odnosi się do budynków nie wyższych niż pięć kondygnacji, których wysokość jest mniejsza od podwójnej najmniejszej szerokości budynku w rzucie poziomym oraz do budynków niskich (do 2 kondygnacji), nie spełniających warunków podanych dla SWD-I.

Znając szczytowe wartości amplitud przemieszczeń lub przyspieszeń (oś pionowa skali) oraz odpowiadające im częstotliwości środkowe pasm tercjowych drgań poziomych (oś pozioma skali) budynku (pomierzonych w poziomie terenu lub na fundamencie) można zakwalifikować te drgania do jednej z pięciu stref szkodliwości:

- strefa I — drgania nieodczuwalne przez budynek;
- strefa II — drgania odczuwalne przez budynek, ale nieszkodliwe dla jego konstrukcji;
- strefa III — drgania szkodliwe dla budynku, powodują lokalne zarysowania i spękania;
- strefa IV — drgania o dużej szkodliwości dla budynku, stanowiące zagrożenie bezpieczeństwa ludzi;
- strefa V — drgania powodujące awarię budynku przez walenie się murów, spadanie stropów itp., budynek nie może być użytkowany.

Ludzie przebywający w budynkach odbierają drgania komunikacyjne w sposób bierny, ponieważ nie mają bezpośredniego wpływu na działanie źródeł tych drgań.

Norma PN-88/B-02171 (zgodna ze standardami ISO) określa dopuszczalne wartości parametrów drgań mechanicznych w celu zapewnienia wymaganego komfortu przebywania ludzi w pomieszczeniach, w zależności od:

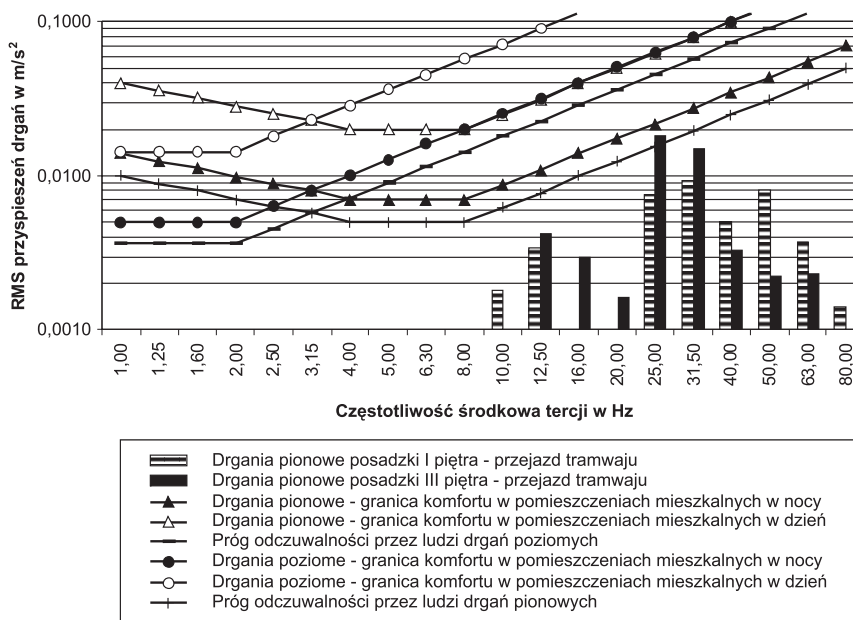
- przeznaczenia pomieszczenia w budynku (mieszkania, biura, warsztaty, szpitale itp.);
- pory występowania drgań (dzień tj. od godz. 6 do 22 lub noc tj. od godz. 22 do 6);
- charakteru i powtarzalności drgań;
- kierunku działania drgań — poziomego (prostopadle do kręgosłupa człowieka) lub pionowego (równoległe do kręgosłupa).

Podstawą oceny są wyniki analizy częstotliwościowej drgań zarejestrowanych w miejscu odbioru ich przez człowieka. Analizuje się wartości skuteczne przyspieszeń drgań tzw. RMS (*root mean square*) w tercjowych pasmach częstotliwości i porównuje je z dopuszczalnymi wartościami tych parametrów określającymi wymagany komfort przebywania ludzi.

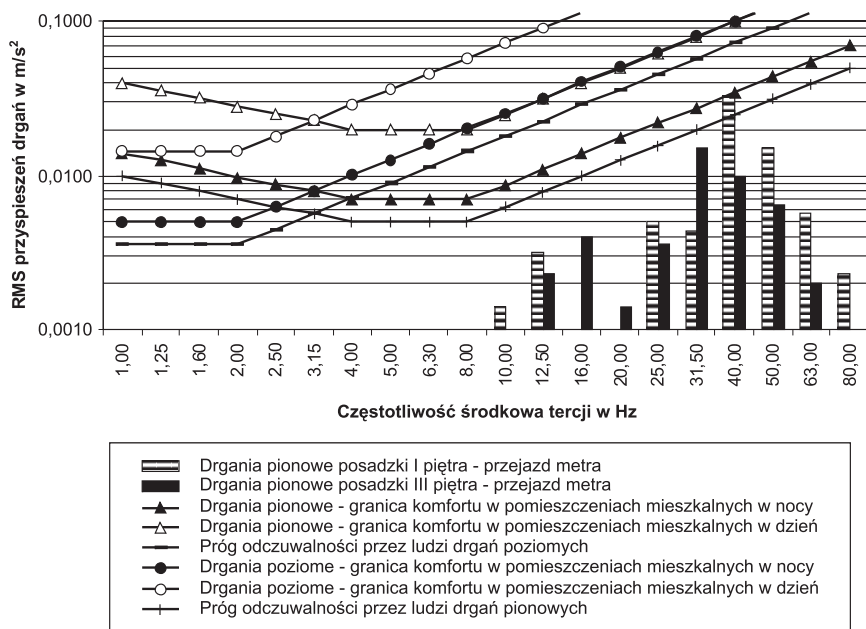
W przypadku drgań generowanych przez komunikację podziemną ochrona ludzi w budynkach przed drganiami ma decydujące znaczenie, bowiem próg odczuwalności drgań przez ludzi ma znacznie niższą wartość niż granica, od której odczuwa drgania konstrukcja budynku.

## 2. Odbiór przez budynki drgań generowanych przez komunikację podziemną

Odpowiedź budynku na drgania generowane przez komunikację podziemną z reguły różni się od reakcji na drgania wywołane przez komunikację naziemną [7]. O ile w tym ostatnim przypadku na ogół poziom drgań (w dominujących pasmach częstotliwości) wzrasta na coraz wyższych kondygnacjach to poziom drgań od komunikacji podziemnej w budynkach położonych blisko tunelu najczęściej jest największy na dolnych kondygnacjach a na wyższych kondygnacjach maleje lub pozostaje bez zmian. Problem ten ilustrują zamieszczone przykładowo na rysunkach 3 i 4 analizy wpływu na ludzi drgań pionowych stropów na I i III piętrze budynku I-10 wywołanych przejazdami tramwaju i metra. Uwzględnienie tej specyfiki odbioru drgań przez budynki ma istotne znaczenie w przeprowadzaniu pomiarów drgań budowli generowanych przez komunikację podziemną.



Rys. 3. Analiza wpływu na ludzi drgań pionowych posadzki I i III piętra budynku I-10, wywołanych przejazdami tramwaju (w odległości ok. 9 m)

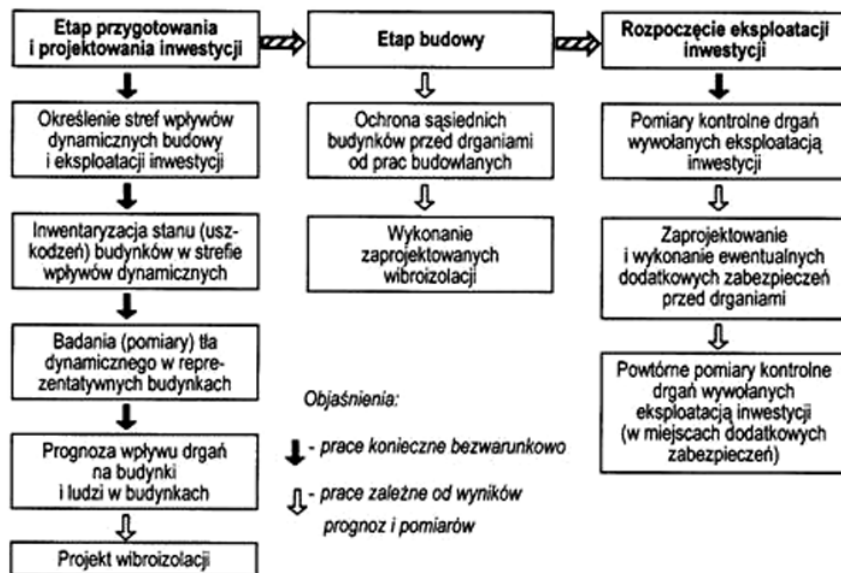


Rys. 4. Analiza wpływu na ludzi drgań pionowych posadzki I i III piętra budynku I-10, wywołanych przejazdami metra w tunelu (w odległości ok. 22 m)

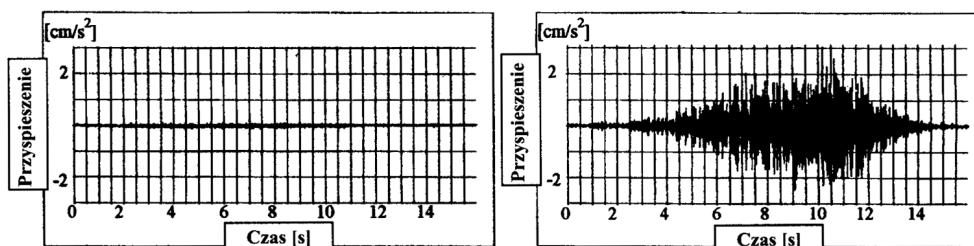
### 3. Ochrona zabudowy przed drganiami w przypadku inwestycji z zakresu komunikacji podziemnej na przykładzie metra w Warszawie

Przystępując do analizy wpływu inwestycji komunikacyjnej na środowisko należy określić m.in. zasięg obszaru wpływów dynamicznych tj. obszaru, na którym zabudowa wymaga uwzględnienia (analiz, pomiarów, prognoz) wpływów dynamicznych wywołanych przez dane źródło drgań a przenoszonych przez grunt. W odniesieniu do metra w Warszawie zasięg tego obszaru ustalono na 40 m od ściany tunelu metra. W stosunku do zabudowy znajdującej się na tym obszarze przyjęto harmonogram działań przedstawiony schematycznie na rysunku 5.

Najefektywniejsze sposoby ochrony środowiska przed drganiami dotyczą ograniczenia emisji drgań w samym ich źródle. W tym celu należy przede wszystkim dbać o stan nawierzchni (likwidacja nierówności jezdni dróg kołowych, falistości szyn itp.) oraz w przypadku transportu szynowego o stan kół taboru szynowego. Przejazd samochodu po nierównościach jezdni może spowodować kilkukrotny wzrost poziomu drgań budynku a w przypadku deformacji kół taboru szynowego możliwy jest wzrost poziomu drgań kilkanaście lub więcej razy [3] jak to przedstawiono przykładowo na rysunku 6.



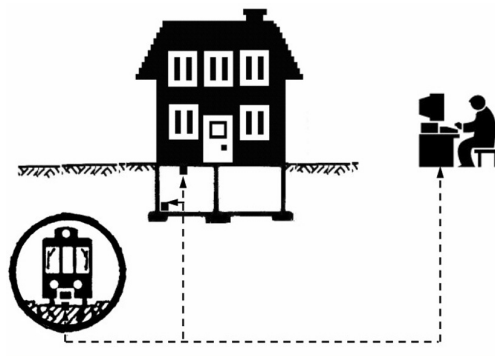
Rys. 5. Harmonogram prac z zakresu ochrony przed drganiami w przypadku inwestycji w dziedzinie transportu lądowego



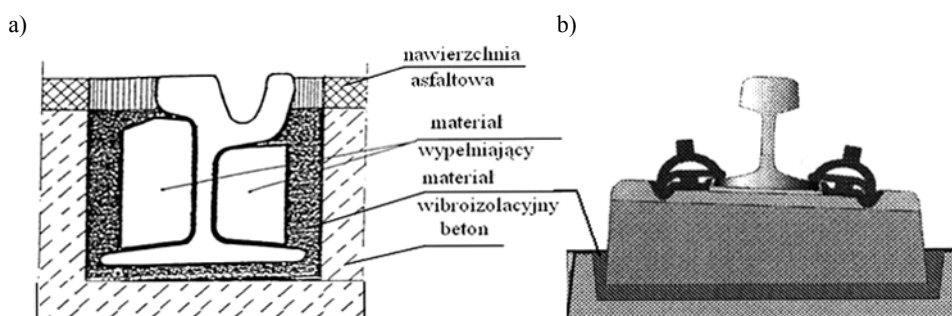
Rys. 6. Porównanie przebiegów czasowych przyspieszeń drgań poziomych posadzki parteru budynku podczas następujących po sobie przejazdów dwu pociągów tego samego typu różniących się stanem kół (bicie promieniowe wynosiło odpowiednio 0,09 oraz 1,2 mm)

W tym ostatnim przypadku możliwa jest redukcja generowanych drgań przez eliminowanie z eksploatacji zdeformowanych kół. W tym celu zaprojektowano w metrze warszawskim system monitoringu drgań pozwalający zidentyfikować pociągi generujące drgania odczuwalne przez ludzi przebywających w monitorowanych budynkach (por. schemat na rys. 7).

Możliwe jest również ograniczenie emisji drgań przez wprowadzenie wibroizolacji w konstrukcji nawierzchni. W tunelach komunikacyjnych jest to najczęściej zastosowanie mat wibroizolacyjnych, a w odniesieniu do nawierzchni szynowych stosuje się szyny w otulinie lub podpory blokowe w otulinie (rys. 8). Poniżej przedstawiono przykłady tego typu zastosowań.



Rys. 7. Schemat systemu monitoringu w metrze warszawskim



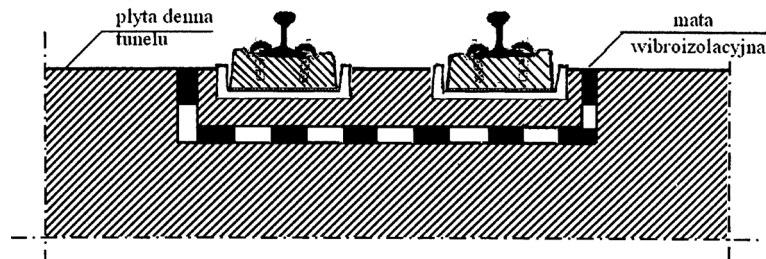
Rys. 8. Schemat szyny w otulinie (a) oraz podpory blokowej w otulinie (b)

#### 4. Przykłady zastosowań wibroizolacji w tunelach komunikacyjnych

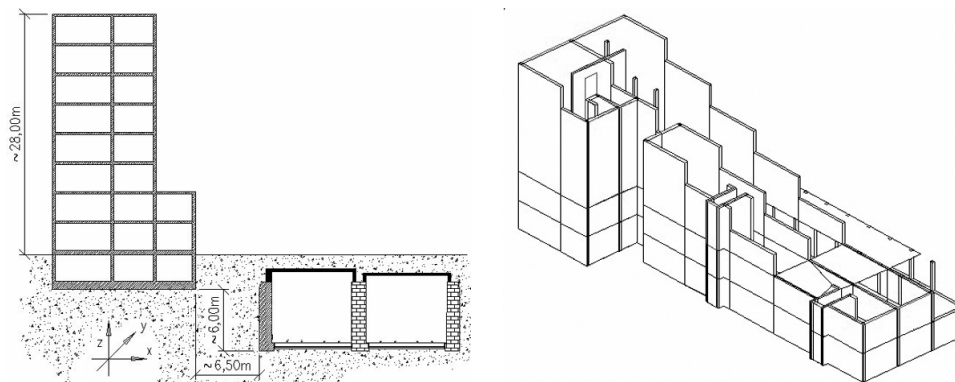
Pierwsza w Polsce realizacja nawierzchni kolejowej z dwustopniową wibroizolacją w postaci systemu podpór blokowych w otulinie EBS firmy Edilon oraz mat wibroizolacyjnych firmy Phoenix (rys. 9) miała miejsce w 2007 r. w tunelu średnicowym w Warszawie<sup>1</sup>, znajdującym się pod jezdnią Alej Jerozolimskich.

Obliczenia symulacyjne przeprowadzono na modelu najbliższego budynku, oddalonego 6,5 m od ściany tunelu (rys. 10). Jako kryterium skuteczności wibroizolacyjnej przyjęto obniżenie poziomu wpływu drgań na ludzi w tym budynku poniżej progu odczuwalności drgań przez ludzi. Obliczenia wykonano dla różnych wariantów rozwiązań, przyjmując różne maty wibroizolacyjne, zmieniając grubość i sztywność oraz właściwości tłumiące tych mat aż do uzyskania założonej skuteczności. Podstawą obliczeń symulacyjnych były dane materiałowe dostarczone przez producentów EBS i mat wibroizolacyjnych.

<sup>1</sup> Projekt nawierzchni wykonało Biuro Projektów METROPROJEKT Sp. z o.o. a obliczenia wibroizolacji zespół pracowników Instytutu Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej pod kierunkiem autora.



Rys. 9. Schemat dwustopniowej wibroizolacji nawierzchni szynowej (EBS + mata wibroizolacyjna)



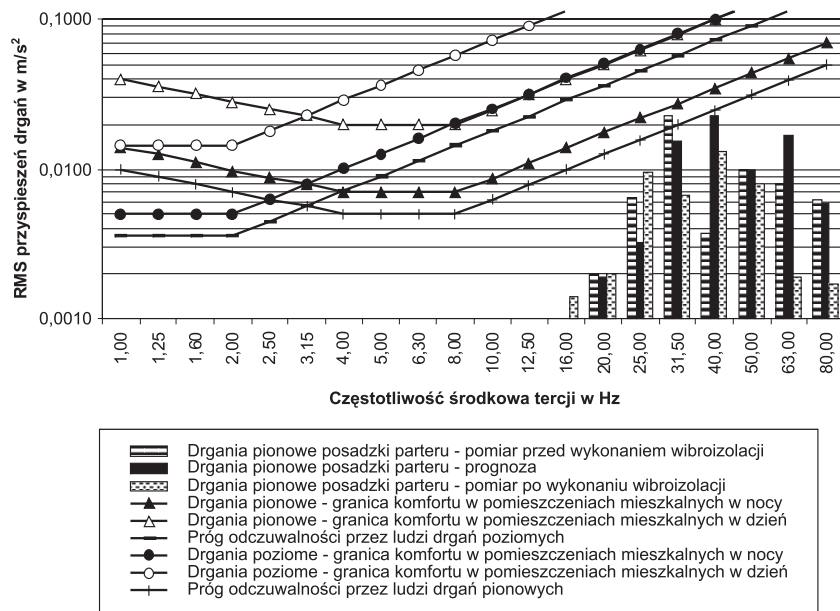
Rys. 10. Przekrój przez budynek i tunel oraz fragment modelu obliczeniowego budynku

Na rysunku 11 porównano wyniki analiz wpływu drgań na ludzi w rozważanym budynku otrzymane: z pomiaru drgań przed wykonaniem wibroizolacji, z prognozy uwzględniającej zaprojektowaną wibroizolację oraz z pomiaru kontrolnego drgań po wykonaniu wibroizolacji. Wyniki pomiaru kontrolnego potwierdziły skuteczność zaprojektowanej wibroizolacji [8].

Zebrane doświadczenia wykorzystano w projektowaniu tzw. bielańskiego odcinka I linii metra w Warszawie. W strefie oddziaływań dynamicznych metra, której zasięg został w Warszawie (metro płytkie) określony na 40 m (w rzucie poziomym) od ścian zewnętrznych tunelu znalazło się na tym odcinku metra 129 budynków. We wszystkich budynkach wykonano inwentaryzację stanu technicznego ich konstrukcji (wraz z fotograficzną dokumentacją uszkodzeń). Następnie wybrano 36 budynków reprezentatywnych dla całej zabudowy i wykonano w nich kolejno: pomiary tła dynamicznego oraz prognozę wpływu drgań na budynek i ludzi przebywających w budynku. W przeważającej liczbie budynków prognozowany poziom wpływu drgań na ludzi był zbyt wysoki (znaczne przekroczenia progu odczuwalności drgań przez ludzi) toteż zaproponowano zastosowanie w tunelu, na odcinkach gdzie usytuowane są te budynki, nawierzchni bezpodsypkowej o podobnej konstrukcji jak w tu-



nelu średnicowym: bloki w otulinie systemu EBS (*Embedded Block System*) firmy Edilon oraz tam gdzie konieczne także maty wibroizolacyjne (Sedrapur) pod płytą podtorową.



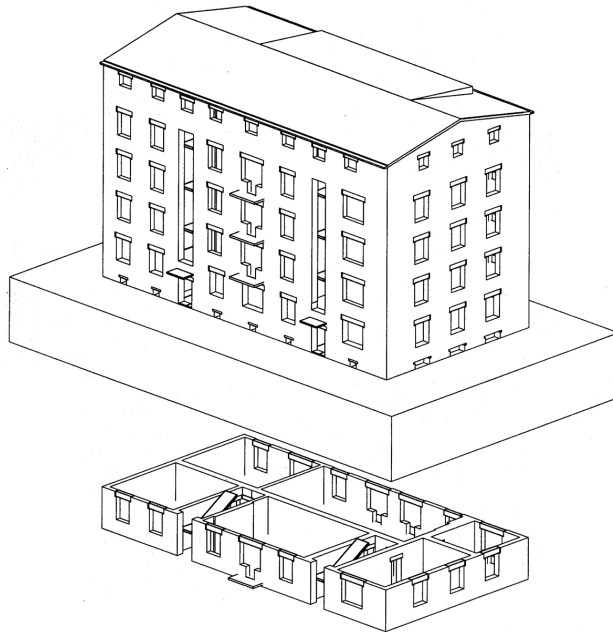
Rys. 11. Wyniki analiz wpływu drgań na ludzi w rozważanym budynku

Projektowanie rozpoczęto od optymalizowania konstrukcji tunelu z punktu widzenia ochrony sąsiedniej zabudowy przed drganiami. W tym celu, wykorzystując dane z obszernej bazy danych pomiarowych drgań metra (będącej w dyspozycji Instytutu Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej [6]) dokonano analizy wpływu drgań na ludzi przebywających w wybranym budynku w zależności od wariantu konstrukcji obudowy tunelu (grubości ścian szczelinowych i ich zagłębienia, grubości płyty dennej, stosunku masy płyty podtorowej do płyty dennej itd.). Następnie po uzgodnieniu konstrukcji tunelu z projektantami tunelu<sup>2</sup>, wykonano prognozy wpływu drgań na ludzi w budynkach reprezentatywnych, dobierając tak parametry wibroizolacji nawierzchni szynowej w tunelu, aby uzyskać w poszczególnych budynkach drgania poniżej progu odczuwalności drgań przez ludzi.

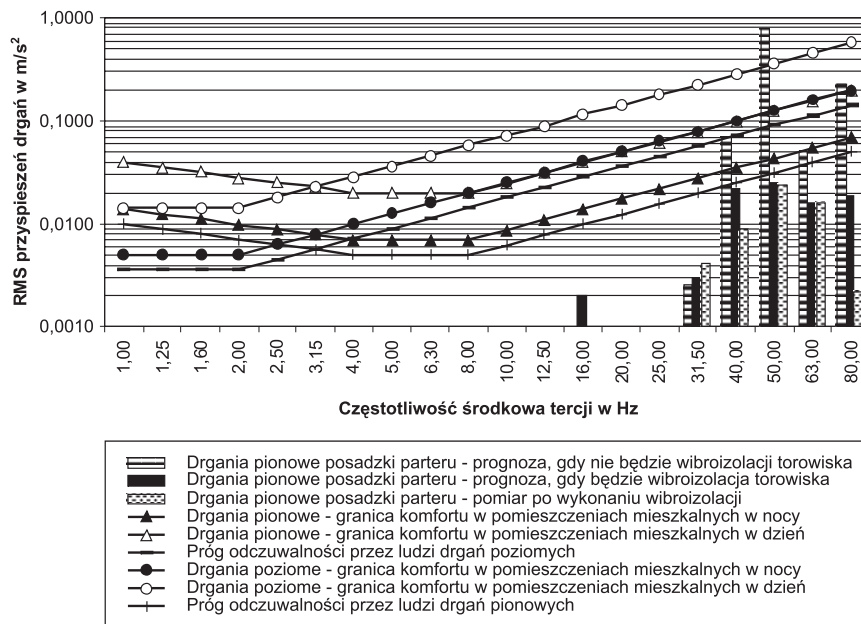
W odniesieniu do wybranego budynku (rys. 12) przedstawiono poniżej (rys. 13) przykładowo wyniki analiz wpływu drgań na ludzi na parterze budynku uzyskane:

- z prognozy nie uwzględniającej wibroizolacji w konstrukcji nawierzchni w tunelu,
- z prognozy uwzględniającej wibroizolację (system EBS + mata o grubości 37 mm),
- z pomiarów po zrealizowaniu wibroizolacji i oddaniu odcinka metra do eksploatacji.

<sup>2</sup> Projekt tunelu wykonało Biuro Projektów METROPROJEKT Sp. z o.o.



Rys. 12. Model budynku (całość i jedna kondygnacja)



Rys. 13. Wyniki analiz wpływu drgań wzbudzanych przez metro na parterze budynku z rysunku 12

Podobne systemy wibroizolacji w postaci połączenia bloków lub szyn w otulinie z matami wibroizolacyjnymi stosuje się także w innych krajach (rys. 14).



**Rys. 14.** Zastosowanie systemów EBS oraz ERS firmy Edilon z matami wibroizolacyjnymi pod płytą podtorową w tunelach metra w Madrycie

## 5. Wnioski

Celem uniknięcia niekorzystnego wpływu drgań generowanych przez komunikację podziemną na sąsiednią zabudowę należy m.in. wykonać przed realizacją inwestycji prognozy tego wpływu, wykorzystując w tym celu odpowiednie bazy danych pomiarowych. Jeżeli

z prognozy wynika konieczność zastosowania wibroizolacji, to powinna ona zostać zaprojektowana przy zastosowaniu modelowania konstrukcji i obliczeń symulacyjnych. Konieczność wykonania obliczeń (lub badań doświadczalnych) potwierdzających skuteczność wibroizolacji w przypadku konkretnego jej zastosowania wynika z uzależnienia efektów wibroizolacyjnych od wielu czynników, m.in. od: sztywności i własności tłumiących materiału wibroizolacyjnego (masy zalewowej, mat itp.) oraz wymiarów zastosowanych elementów np. grubości mat wibroizolacyjnych, rozstawu podpór np. podpór blokowych i wynikających z niego ugięć szyny, konstrukcji i wymiarów (masy) płyt podtorowych, sztywności podbudowy, konstrukcji obudowy tunelu, różnego spektrum częstotliwości drgań w przypadku różnych rodzajów pojazdów (samochód, tramwaj, metro, wagon kolejowy), warunków gruntowo-wodnych na drodze propagacji od toru do budynku, konstrukcji i stanu technicznego budynku odbierającego drgania.

Źle dobrana wibroizolacja może nie tylko nie przynieść spodziewanych efektów, ale wręcz spowodować wzrost poziomu generowanych drgań.

#### LITERATURA

- [1] *Ciesielski R., Kawecki J., Maciąg E., Stypuła K.*: Ocena diagnostyczna skutków wpływów drgań na budynki i ludzi w budynkach. Inż. i Budownictwo, nr 9/93, s. 390–394
- [2] *Ciesielski R., Kawecki J., Maciąg E.*: Ocena wpływu wibracji na budowlę i ludzi w budynkach (Diagnostyka dynamiczna). ITB, Warszawa, 1993
- [3] *Ciesielski R., Stypuła K.*: Influence of shape change of carriage wheels in consequence of exploitation wear on the level of building vibration caused by shallow underground train passages — case history. Conference Structural Dynamics EURODYN 2002, Grundmann&Schuëller (eds.) © 2002 Swets & Zeitlinger, Lisse, s. 313–316
- [4] PN-85/B-02170. Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki
- [5] PN-88/B-02171. Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach
- [6] *Stypuła K.*: Drgania mechaniczne wywołane eksploatacją metra płytkiego i ich wpływ na budynki. Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej, Inżynieria Lądowa nr 72, Kraków, 2001
- [7] *Stypuła K.*: Vibrations caused by train passages in metro tunnel compared with vibrations from surface transportation. Proc. of the 6th International Conference on Structural Dynamics EURODYN 2005, C. Soize&G.I. Schuëller (eds.) © 2005 Millpress, Rotterdam, vol. 3, s. 2059–2064
- [8] *Stypuła K., Koziol K.*: Effects of changes to the track superstructure on human perception of rail-induced vibrations in a selected building near the rail tunnel in Warsaw — predictions and measurements. Proceedings of the 7th European Conference on Structural Dynamics, EURODYN 2008, 7–9 July 2008 Southampton, s. 58