

УДК 624.072.336

Krzysztof Gnyp, mgr.inz., Sławomir Karaś, dr.inz.,
Katedra Dróg i Mostów, Wydział Budownictwa i Architektury,
Politechnika Lubelska

ODDZIAŁYWANIE DYNAMICZNE POCIĄGÓW NA PROJEKTOWANY BUDYNEK I LUDZI USYTUOWANY NAD LINIĄ KOLEJOWĄ

Streszczenie. Przyspieszony rozwój miejskiej infrastruktury komunikacyjnej, a w szczególności kolejowej wymusza szukanie nowych przestrzeni pod inwestycje. Przestrzeń infrastruktury komunikacyjnej przenika się z przestrzenią użytkową (konsumpcyjną) tworząc wzajemne oddziaływania symbiotyczne. Rozwój ten niesie ze sobą wzrost oddziaływań na otaczające środowisko. W artykule przedstawiono wpływ infrastruktury kolejowej na nowo projektowany budynek handlowo – biurowo - usługowy usytuowany na estakadzie nad torem kolejowym oraz na przebywających w nim ludzi i urządzenia techniczne. Celem przeprowadzonych badań oraz analiz było uzyskanie przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi budowli położonej w sąsiedztwie torów, co z kolei pozwoli prognozować przebiegi czasowe drgań projektowanej budowli z wymuszeniem kinematycznym w poziomie posadowienia. Dla potrzeb obliczeń statyczno-wytrzymałościowych sprawdzono wpływ drgań podłoża gruntowego wywołanych przejazdem taboru kolejowego na dynamiczny przyrost naprężeń w konstrukcji oraz określenie współczynnika dynamicznego, a co za tym idzie uwzględnienie wzrostu i zmienności naprężeń w rozwiązaniach konstrukcyjnych. Przeprowadzenie analizy oddziaływania dynamicznego na poziomie projektowym pozwala wyeliminować wpływ obciążenia drganiami poprzez zastosowanie odpowiedniego systemu tłumiącego drgania w najbardziej optymalnym miejscu drgającego ośrodka.

Słowa kluczowe: dynamika, współczynnik dynamiczny, system tłumiący drgania

1 Przedmiot opracowania

Przedmiotem opracowania jest projektowany budynek położony na linii kolejowej.

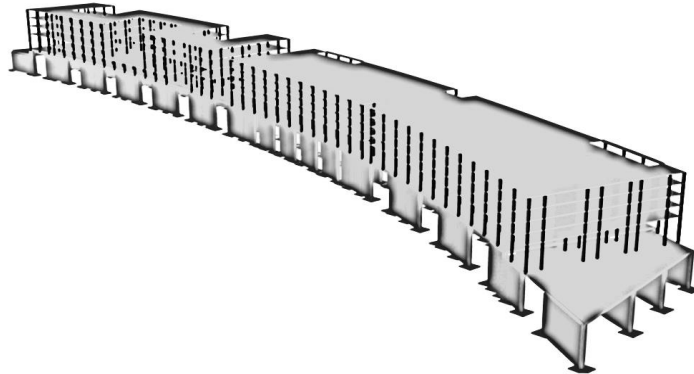
Przejazd pociągów pod obiektem zapewniony będzie poprzez układ trzech tuneli ograniczonych przez konstrukcję ścian fundamentowych oraz stropu przykrycia tunelu.

Całość projektowanego budynku podzielona jest na dwa segmenty o zróżnicowanych poziomach stropów. Konstrukcję analizowanego budynku stanowi żelbetowy układ słupowo płytowy posadowiony na ścianach szczelinowych grubości 80 cm zwieńczonych żelbetową płytą stropową o grubości 80 cm i 150 cm. Słupy

nośne 60×60cm w rozstawie ~ 8.0 m po osi toru i poprzecznie do osi toru w rozstawie od 3.0 m do 9.0 m. Płyty stropowe żelbetowe grubości 25cm i 30cm.

Parametry techniczno konstrukcji projektowanego budynku uwzględnione w analizie dynamicznej.

- ilość kondygnacji (nad płytą stropową tunelu) 5 ,
- długość całkowita budynku (po osi toru środkowego) ~378,0 m ,
- szerokość budynku 34.0÷38.0 m ,
- wysokość budynku ~30.00 m ,
- wysokość kondygnacji w segmencie biurowym budynku wynosi 3.00 m ,
- wysokość kondygnacji w segmencie handlowo-usługowym wynosi 3.95 m .



Rysunek 1. Widok ogólny projektowanego budynku

2 Cel i zakres analizy dynamicznej

Celem opracowania jest określenie wpływu przejeżdżających w sąsiedztwie projektowanego obiektu pociągów na obiekt oraz na przebywających w nim ludzi.

Opracowanie obejmuje:

- charakterystykę geotechniczną podłoża gruntowego oraz opis projektowanej konstrukcji,
- omówienie wyników przeprowadzonych pomiarów drgań podłoża gruntowego od ruchu taboru kolejowego,
- analizę dynamiczną konstrukcji obiektu oraz ocenę wpływu drgań podłoża na budynek oraz na przebywających w nim ludzi,
- wnioski i zalecenia wynikające z przeprowadzonych badań i analiz.

3 Pomiary drgań podłoża gruntowego od taboru kolejowego

Pomiary drgań podłoża gruntowego od ruchu taboru kolejowego w miejscu projektowanego obiektu wykonano w okolicy istniejącej kładki dla pieszych zlokalizowanej nad linią kolejową.

Badania drgań zostały wykonane w 4 punktach pomiarowych zlokalizowanych wg kolejności [9][10][11][12][13]:

- P1 - punkt zlokalizowany na podkładzie kolejowym toru obciążanego przejeżdżającym taborem kolejowym

- P2 - punkt zlokalizowany w gruncie w odległości 1.5 m od zewnętrznej szyny toru,
- P3 - punkt zlokalizowany w gruncie w odległości 3 m od zewnętrznej szyny toru,
- P4 - punkt zlokalizowany na żelbetowym fundamencie kładki dla pieszych w odległości 4 m od zewnętrznej szyny toru (4.75 m od jego osi).

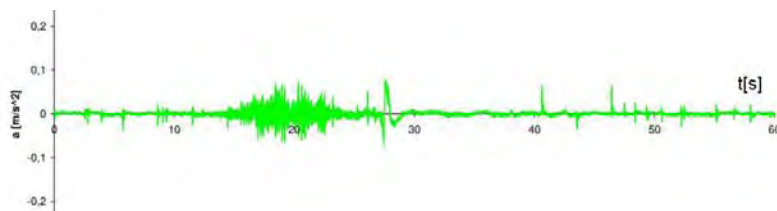
Do badań użyto następującej aparatury pomiarowej:

- System pomiaru drgań PULSE typu 3560C
- Przetwornik przyspieszenia typu 4507 B 005
- Przetwornik przyspieszenia typu 4514-B
- Kalibrator drgań typu 4294

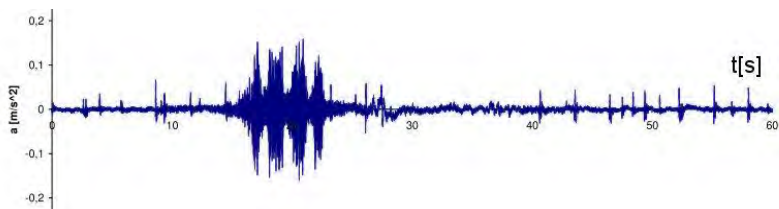
Celem przeprowadzonych badań jest uzyskanie przyśpieszeniowego spektrum odpowiedzi fundamentów budowli położonej w sąsiedztwie torów, co z kolei pozwoli prognozować przebiegi czasowe drgań projektowanej budowli z wymuszeniem kinematycznym w poziomie posadowienia. [6][12][13]

Poniżej są przedstawione przykładowe wykresy i tabele z wynikami pomiarów przyspieszeń punktu pomiarowego P4 położonego na fundamencie kładki dla pieszych. Pomiarów dokonano dla czterech przejeżdżających składów pociągów osobowych z prędkością 25 km/h i 40 km/h.

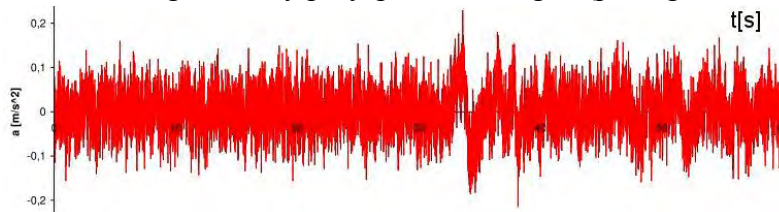
Przyjęty układ odniesienia: oś x – równoległa do osi toru, oś y – prostopadła do osi toru, oś z – oś pionowa. Na rysunkach 2 do 4 zaprezentowano przykładowe przebiegi czasowe przyspieszenia drgań wybranego zdarzenia w zakresie częstotliwości do 100 Hz dla punktu P4.



Rysunek 2. Przebieg czasowy przyspieszenia drgań (pociąg osobowy) w osi x

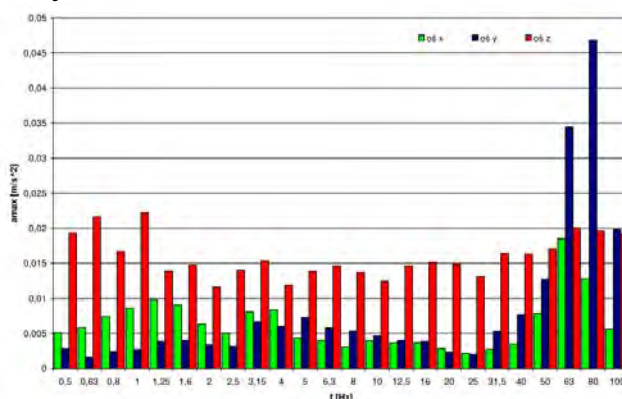


Rysunek 3. Przebieg czasowy przyspieszenia drgań (pociąg osobowy) w osi y



Rysunek 4. Przebieg czasowy przyspieszenia drgań (pociąg osobowy) w osi z

Przykładowe wyniki pomiarów maksymalnej wartości skutecznej przyspieszenia drgań w pasmach 1/3-oktawowych - a_{max} w zakresie częstotliwości od 0,5 Hz do 100 Hz zaprezentowano na Rysunku 5



Rysunek 5. Przyspieszenie drgań w pasmach 1/3-oktawowych pomiaru P43

Dla zarejestrowanych przejazdów taboru kolejowego prędkość rozchodzenia się fali pomiędzy analizowanymi punktami pomiarowymi zlokalizowanymi w gruncie wynosi ~ 340 m/s. Względna rozszerzona niepewność wyników pomiarów, U wynika, że świadectwa wzorcowania zastosowanych przetworników drgań typu i wynosi: $U = 5\% \cdot w$ gdzie: w – wynik pomiaru.

4 Analiza numeryczna projektowanego obiektu

Do obliczeń statyczno - dynamicznych wykorzystano schemat statyczny ustroju słupowo-płytowego. W analizie dynamicznej konstrukcję obciążono ciężarem własnym oraz wymuszeniem kinematycznym wyznaczonym na podstawie badań drgań podłoża gruntowego. W analizie modalnej uwzględniono obciążenie ciężarem własnym konstrukcji jako masy rozłożone [7].

Tabela nr 1 Przykładowe pierwsze dwadzieścia częstości drgań własnych konstrukcji

Postać drgań własnych	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Częstość drgań własnych [Hz]	0,95	0,96	1,01	1,05	1,15	1,21	1,81	1,97	1,99	2,00	2,01	2,01	2,05	2,07	2,13	2,18	2,18	2,57	2,93	3,06

Analizę czasową przebiegu drgań przeprowadzono dla obciążenia kinematycznego wyznaczonego dla poszczególnych pasm tercjowych w zakresie od 0.5 Hz do 100 Hz.

W tabeli można zauważyć występowanie częstości drgań własnych parami [7].

W analizie czasowej wykorzystano metodę całkowania równań ruchu [8] [9] [10] [12] [13] [15]. Funkcje czasowe drgań oraz amplitudy wymuszeń przyjęto na podstawie wyników pomiarów drgań.

Ekstremalne wartości przyspieszeń drgań punktów konstrukcji wyodrębniono dla węzłów zgrupowanych w 12 pionach. Piony opisano: Pion01 - Pion12

W każdym pionie występuje sześć węzłów na sześciu poziomach (kondygnacjach budynku), kolejno idąc od dołu (płyta przekrycia tunelu) do góry (strop ostatniej kondygnacji). Poziomy opisano Po0 - Po5

5 Wnioski wynikające z analizy numerycznej

Wpływ drgań podłoża na konstrukcję projektowanego budynku.

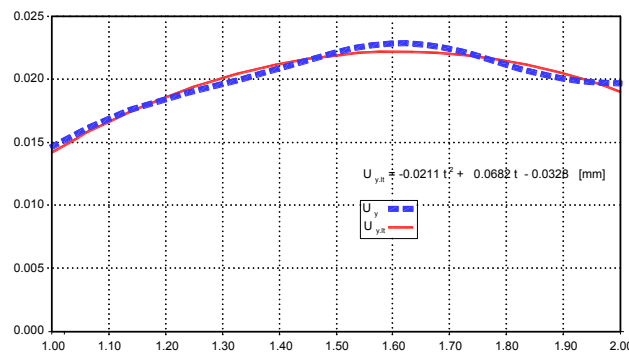
Maksymalne przyspieszenia, jakich doznają pojedyncze elementy konstrukcji są mniejsze od 0.010 m/s^2 . Wg [1] dla budynków do pięciu kondygnacji, których wysokość jest mniejsza od podwójnej najmniejszej szerokości przy drganiach poniżej dolnej granicy 0.025 m/s^2 można nie uwzględniać wpływów dynamicznych.

W ocenie wpływów dynamicznych drgań podłoża gruntowego na konstrukcję budynku wykorzystano pracę [16]. Na podstawie wykresów przemieszczeń wybranych węzłów modelu konstrukcji określono przemieszczenia dynamiczne (R_{dyn}), oraz przemieszczenia statyczne (R_{sta}). Przemieszczenia dynamiczne (R_{dyn}) to ekstremalne wartości przemieszczeń drgającego punktu. Przemieszczenia statyczne (R_{sta}) to wartości z wykresu opisanego funkcją wielomianu drugiego lub trzeciego stopnia (linia trendu) biegnącego pomiędzy ekstremami fali dynamicznej, w miejscu przecięcia wykresu przemieszczeń drgającego punktu, wzięte z odpowiadającej R_{dyn} chwili czasowej.

Dynamiczny współczynnik wzmocnienia (the dynamic amplification factor) opisuje wzór [16]: $\text{DAF} = R_{\text{dyn}} / R_{\text{sta}}$

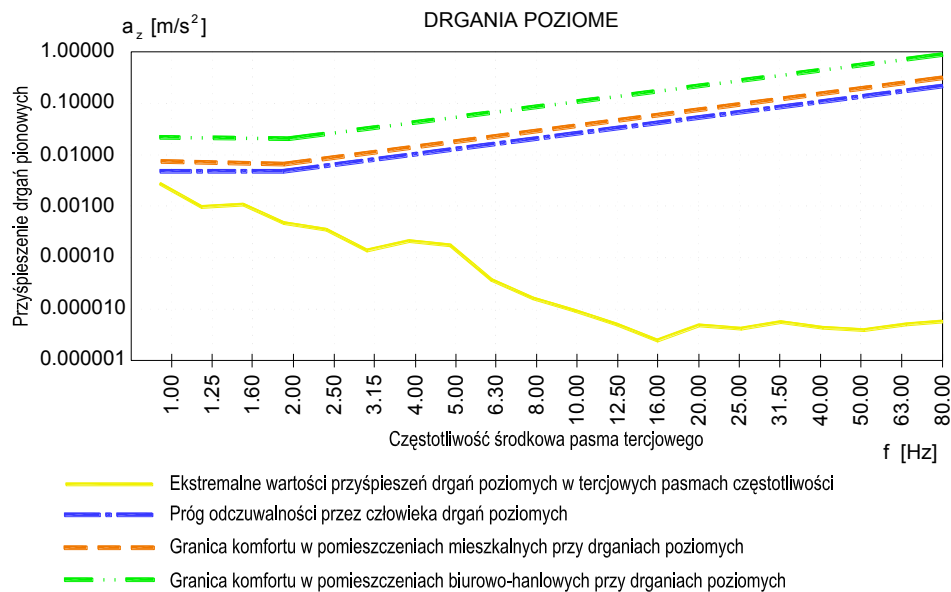
We wszystkich przeanalizowanych przez nas węzłach wiernego modelu konstrukcji wartość współczynnika DAF zawierała się w przedziale $1.03 \div 1.07$.

Poniżej przedstawiono wybrany przykład przeanalizowanego węzła, przy czym na rysunku pokazano fragment wykresu w sąsiedztwie ekstremum.



Rysunek 6. Przemieszczenia (U_y) węzła modelu konstrukcji obciążonej wymuszeniem kinematycznym od przejeżdżającego w tunelu pod budynkiem pociągu z prędkością 40 km/h w paśmie 1.25 Hz oraz linia trendu tych przemieszczeń.

$$R_{\text{dyn}} = U_y \text{ dla } t = 1.60 \text{ s}, R_{\text{sta}} = U_{y,lt} \text{ dla } t = 1.60 \text{ s}, R_{\text{dyn}} = 0.022850 \text{ mm}, R_{\text{sta}} = 0.022048 \text{ mm}$$



Rysunek 8. Ekstremalne wartości przyspieszeń poziomych punktu P0 w pionie Nr 3

Wyboru punktów dokonano na podstawie wyselekcjonowanych ekstremów przyspieszeń dla poszczególnych pasm tercjowych oraz dodatkowo w innych miejscach występowania dużych wartości przyspieszeń. Ekstremalne wartości przyspieszeń drgań punktów konstrukcji dla poszczególnych pasm tercjowych w płaszczyźnie pionowej i poziomej oraz wartości progów odczuwalności przez człowieka drgań pionowych i poziomych pokazuje tabela 3

Tabela 2. Ekstremalne wartości przyspieszeń ($a_{z,max}$, $a_{xy,max}$) oraz wartości progów odczuwalności przez człowieka drgań pionowych i poziomych ($a_{1,z}$, $a_{1,xy}$).

f [Hz]	Węzeł	$a_{z,max}$ [m/s ²]	$a_{1,z}$ [m/s ²]	Węzeł	$a_{xy,max}$ [m/s ²]	$a_{1,xy}$ [m/s ²]
1.00	Pion04-Po5	0.006666	0.0100	Pion01-Po5	0.004229	0.0036
1.25	Pion04-Po5	0.002517	0.0089	Pion01-Po5	0.001283	0.0036
1.60	Pion04-Po5	0.002820	0.0080	Pion01-Po1	0.001440	0.0036
2.00	Pion04-Po5	0.001250	0.0070	Pion02-Po5	0.000632	0.0036
2.50	Pion04-Po0	0.001250	0.0063	Pion04-Po0	0.000473	0.0045
3.15	Pion04-Po5	0.000374	0.0057	Pion01-Po5	0.000191	0.0057
4.00	Pion04-Po5	0.000563	0.0050	Pion01-Po1	0.000293	0.0072
5.00	Pion02-Po5	0.000555	0.0050	Pion02-Po5	0.000282	0.0090
6.30	Pion04-Po5	0.000108	0.0050	Pion01-Po5	0.000055	0.0114
8.00	Pion04-Po5	0.000047	0.0050	Pion01-Po5	0.000024	0.0144
10.00	Pion04-Po5	0.000028	0.0062	Pion01-Po5	0.000014	0.0180
12.50	Pion04-Po5	0.000016	0.0078	Pion01-Po5	0.000008	0.0225
16.00	Pion04-Po5	0.000008	0.0100	Pion01-Po5	0.000004	0.0289
20.00	Pion02-Po5	0.000016	0.0125	Pion10-Po1	0.000010	0.0361
25.00	Pion02-Po5	0.000013	0.0156	Pion10-Po1	0.000008	0.0451
31.50	Pion03-Po2	0.000018	0.0197	Pion10-Po1	0.000015	0.0568
40.00	Pion03-Po2	0.000013	0.0250	Pion10-Po1	0.000010	0.0721
50.00	Pion03-Po2	0.000012	0.0313	Pion10-Po1	0.000011	0.0902
63.00	Pion03-Po2	0.000016	0.0394	Pion10-Po1	0.000012	0.1140
80.00	Pion03-Po2	0.000020	0.0500	Pion10-Po1	0.000013	0.1440

Widzimy, że tylko dla jednej częstości 1.00 Hz występują przekroczenia progu odczuwalności dla drgań poziomych, a wartości przyspieszeń spadają wraz ze wzrostem częstotliwości drgań. Jest to sytuacja uzasadniona, gdy przyjrzymy się częstości drgań własnych konstrukcji. Pierwszych 20 częstości drgań własnych zawiera się w przedziale od 1 do 3 Hz, świadczy to o tym że konstrukcja jest bardzo sztywna i tylko w niskich częstościach (zblizonych do częstości drgań własnych) odpowiada na wymuszenie kinematyczne.

6 Wnioski wynikające z oceny wpływu drgań podłoża na w budynek

Na podstawie wykonanej analizy dynamicznej wiernego modelu konstrukcji obciążonej wymuszeniem kinematycznym od przejeżdżających w tunelu pod budynkiem pociągów należy stwierdzić, że:

- przejeżdżające z prędkością do 100 km/h pod budynkiem pociągi nie mają znaczącego wpływu na konstrukcję budynku,
- analiza wykresów przemieszczeń elementów konstrukcji poddanej wymuszeniu kinematycznemu pozwoliła nam określić wartość dynamicznego współczynnika wzmocnienia (DAF) na poziomie $1.04 \div 1.07$,
- W analizie statycznej konstrukcji wpływ drgań podłoża gruntowego wywołanych przejazdem taboru kolejowego należy uwzględnić stosując współczynnik dynamiczny $\emptyset_{\text{dyn}} = 1.10$.

7 Wnioski wynikające z oceny wpływu drgań podłoża na ludzi w budynku

Na podstawie wykonanej analizy dynamicznej wiernego modelu konstrukcji obciążonej wymuszeniem kinematycznym od przejeżdżających w tunelu pod budynkiem pociągów należy stwierdzić, że:

- przejeżdżające z prędkością do 100 km/h pod budynkiem pociągi nie mają istotnego wpływu na przebywających w budynku ludzi,
- przekroczenie progu odczuwalności przez człowieka drgań w płaszczyźnie poziomej elementów konstrukcji na najwyższej kondygnacji budynku, implikują zastosowanie środków tłumiących drgania, szczególnie w zakresie występujących przekroczeń np. w postaci mat tłumiących pod podkładami kolejowymi lub działających poziomo nastrojonych tłumików masy; optymalnym rozwiązaniem jest zastosowanie mat tłumiących, a dopiero po wykonaniu pomiarów drgań ukończonego obiektu rozważanie (w razie konieczności) montażu tłumików masy,
- wskazane jest aby pomiaru drgań ukończonego obiektu dokonać w ramach próbnego obciążenia przejeżdżającym taborem kolejowym.

[1] PN-85/B-02170 Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki.

[2] PN-88/B-02171 Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach.

- [3] Ciesielski R. i in., Komentarz do normy PN-85/B-02170 „Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki”, COBPBO-Warszawa, Warszawa 1988.
- [4] Ciesielski R., Kawecki J., Stypuła K., Tomana A., Obliczanie obudowy tunelu metra w obszarach sejsmicznych, *Inżynieria i Budownictwo*, nr 8-9/90, s. 299-305.
- [5] Ciesielski R., Kawecki J., Maciąg E., Stypuła K., Ocena diagnostyczna skutków wpływów drgań na budynki i ludzi w budynkach, *Inżynieria i Budownictwo* nr 9/93, s. 390-394.
- [6] Ciesielski R., Kawecki J., Maciąg E., Ocena wpływu wibracji na budowlę i ludzi w budynkach (diagnostyka dynamiczna), Wyd. Instytut Techniki Budowlanej, 1993.
- [7] Karaś S., Krasnowski A. Dostosowanie obiektów mostowych na CKM do dużych prędkości pociągów w świetle badań teoretycznych i doświadczalnych, *Roads and Bridges – Drogi i Mosty* 12 (2013) 385 - 410
- [8] Dulińska J., Zięba A. Metody oceny wpływu wstrząsów górniczych na wybrane budowle wielkogabarytowe, Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków 2010.
- [9] Bąk G., Gosk W. Sztywność podłoża piaszczystego w procesach obciążenia i odciążenia wywołanych udarem, Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków 2007.
- [10] Szcześniak Z., Modelowanie zachowania dynamicznego konstrukcji podziemnych w warunkach działania powietrznej fali uderzeniowej, Wyd. WAT, Warszawa 1999.
- [11] Kawecki J. Diagnostyka dynamiczna konstrukcji zagłębionych w gruncie, XX Ogólnopolska konferencja warsztat pracy projektanta konstrukcji Wisła - Ustroń, 01 ÷ 04 marca 2005 r.
- [12] Kawecki J. Konstrukcje zagłębione w gruncie. Diagnostyka dynamiczna, XXIV Ogólnopolskie warsztaty pracy projektanta konstrukcji Wisła, 17 ÷ 20 marca 2009 r.
- [13] Stypuła K. Drgania generowane w podłożu przez transport szynowy i ich wpływ na budynki i ludzi w budynkach, XXIV Ogólnopolskie warsztaty pracy projektanta konstrukcji Wisła, 17 ÷ 20 marca 2009 r.
- [14] Kerr A.D. (ed.) “Railroad track mechanics and technology”, Pergamon Press, 1975.
- [15] Misiak J. „Mechanika ogólna” Wydawnictwa Naukowo-Techniczne 1993 r.

[16] Paultre P., Chaallal O., Proulx J. "Bridge dynamics and dynamic amplification factor - a review of analytical and experimental findings" Can. J. Civ. Eng. 19, 260-278 (1992).

ABSTRACT

An accelerated development of urban communication infrastructure, especially that of railway, forces search for new space for investment. The area of communication infrastructure interpenetrates usable space creating mutual symbiotic interaction. This development carries the growth of influence on the surrounding areas. This article presents the influence of a railway infrastructure on a newly designed commercial and office center situated on the flyover over the railway track, as well as on technical devices and people staying there. The aim of the research and the analysis was to gain information about acceleration spectrum of the response of the building that is situated near the railway track and thus to forecast vibration timings of a designed building together with kinematic excitation at the level of foundation. For static strength calculations, the research investigated the influence of subsoil vibrations caused by rolling stock on a dynamic stress increase in the structure as well as on the specification of a dynamic factor and thus on taking into consideration the growth and stress variation in design approach. The analysis of the dynamic factor at the designing level enables us to eliminate the influence of vibration exposure by introducing vibration damping system in the most optimal location of vibration centre.

Keywords: dynamics, the coefficient of dynamic systems with vibration damping.

АННОТАЦИЯ

Ускоренное развитие инфраструктуры городской связи, особенно железной дороги, заставляет искать новые места для инвестиций. Площадь коммуникационной инфраструктуры проникает в полезное пространство, создавая взаимное симбиотическое взаимодействие. Это развитие несет рост влияния на окружающую среду. В статье представлено влияние железнодорожной инфраструктуры на недавно разработанный коммерческий и офисный центр, расположенный на эстакаде над железнодорожными путями, а также на людей пребывающих там и технических устройств.

Ключевые слова: динамика, коэффициент динамической системы с демпфированием вибрации.