

Edward MACIĄG, Jarosław CHEŁMECKI  
Politechnika Krakowska, Kraków

## STOPIEŃ INTERAKCJI UKŁADU WYSOKI BUDYNEK- PODŁOŻE GRUNTOWE PODLEGAJĄCEGO WSTRZĄSOM GÓRNICZYM

**Streszczenie.** Uwzględniając rozważania teoretyczne w [2], na podstawie badań dynamicznych wysokiego budynku o 12 kondygnacjach, podlegającego silnym wstrząsom górniczym, dokonano identyfikacji podstawowych częstotliwości rezonansowych budynku na podatnym podłożu i przy założeniu sztywnego podłoża. Analizowano amplitudowe widma przyspieszeń drgań górnej kondygnacji budynku oraz stosunki amplitudowych widm przyspieszeń drgań 12 kondygnacji i fundamentu budynku. Deformacja podłoża w czasie ruchu budynku na skutek wstrząsów górniczych przyczynia się do obniżenia o 0,04 do 0,05 Hz podstawowych częstotliwości rezonansowych tego budynku, co wyraża stopień interakcji układu grunt-budynek.

## DEGREE OF THE INTERACTION OF THE HIGH STRUCTURE- FOUNDATION UNDER THE ROCKBURSTS

**Summary.** Taking into consideration the theoretical analysis from [2], the identification of resonance fundamental frequencies of high building (12 story) subjected to strong and very strong mining tremors was carried out for the building on flexible ground and with the assumption of rigid ground. The amplitude spectra from vibrations of 12<sup>th</sup> story and of the building foundation were analyzed. The ground deformation during the building motion caused by mining tremors makes a contribution to 0,04÷0,05 Hz decreasing of the building resonance fundamental frequencies.

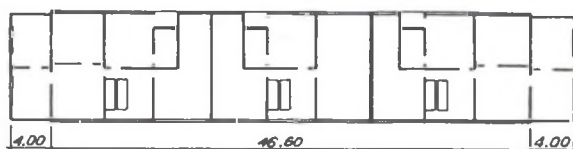
### 1. Wprowadzenie

Zjawisko współpracy konstrukcji i podłoża na działania sejsmiczne i parasejsmiczne wynikające z wzajemnego oddziaływania układu konstrukcja- podłoże gruntowe nosi nazwę interakcji dynamicznej. W zjawisku interakcji mamy do czynienia z wyraźnym sprzężeniem zachowania się budynku i podłoża gruntowego. Interakcja grunt- budynek (IGB) może mieć

znaczący wpływ na sejsmiczne odpowiedzi budynków posadowionych na słabym gruncie. Aczkolwiek IGB występuje zawsze, jednak przyjmuje się powszechnie, że jeśli IGB jest mała, wówczas na ruch fundamentu nie ma wpływu ruch górnych kondygnacji budynku. Wtedy budynek może być przyjęty jako zamocowany w podłożu (oparty na sztywnym-niepodatnym podłożu) i przebiegi drgań rejestrowane na fundamencie można traktować jako wymuszenie kinematyczne. Jeśli IGB jest znacząca, takiego założenia nie można przyjmować z powodu sprzężenia układu budynek-fundament i otaczający ośrodek gruntowy. Jest stosunkowo mało prac wykorzystujących zarejestrowane przebiegi drgań do bezpośredniej identyfikacji IGB. Jako znaczące można tu wymienić [1÷5]. Również dwaj pierwsi autorzy referatu zajmowali się tą problematyką [6÷8]. Niniejszy referat dotyczy oceny stopnia interakcji układu wysoki budynek-podłoże gruntowe podlegającego wstrząsom górnicy. Przez stopień IGB rozumie się różnicę między podstawowymi częstotliwościami rezonansowymi budynku w trakcie jego ruchu, powodującego deformację podłoża, a tymi częstotliwościami w przypadku budynku na sztywnym (niepodatnym) podłożu. Do wyznaczenia tych różnic, co sprowadza się do określenia częstotliwości rezonansowych budynku z udziałem IGB i bez niej, wykorzystuje się przebiegi drgań zarejestrowane równocześnie w poziomie fundamentu i górnej kondygnacji budynku w trakcie wstrząsu górnicy (por. [2]). Rozpatruje się więc wpływ IGB na częstotliwościową zawartość przebiegów drgań budynku.

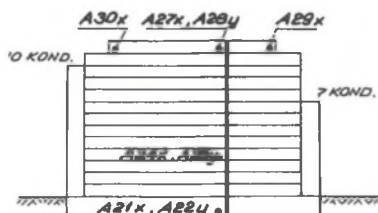
## 2. Opis badanego budynku i przeprowadzonych pomiarów drgań

Badany budynek (w Polkowicach w LGOM) jest obiektem 12-kondygnacyjnym, wykonanym w technologii wielkopłytywowej i składa się z dwu oddylatowanych części: jedno- i dwuklatkowej. Wysokość kondygnacji wynosi 2,7 m. Układ ścian nośnych mieszany, poprzeczno-podłużny. Obie części są w całości podpiwniczone, posadowione na ławach fundamentowych. Stropy wykonano z płyt żelbetowych, pełnych o grubości 15 cm. Pokrycie dachu stanowią płyty panwiowe. Budynek ma wzmocnienia zrealizowane poprzez wprowadzenie dodatkowych, przylegających do ścian szczytowych, przeseł wykonanych w technologii betonu monolitycznego. Wzmocnienia sięgają: w części jednoklatkowej do poziomu 7 kondygnacji, a w części dwuklatkowej do 10 kondygnacji. Rzut poziomy budynku i jego przekrój pokazano odpowiednio na rys. 1 i 2.



Rys. 1. Rzut poziomy budynku

Fig. 1. Plan of the building



Rys. 2. Przekrój i rozmieszczenie aparatury

Fig. 2. Section and location of the accelerations

Mierzono składowe poziome drgań budynku, odpowiednio w kierunku osi poprzecznej budynku (oś x) oraz osi podłużnej- oś y. Czujniki pomiarowe (akcelerometry) rozmieszczone są w budynku następująco:

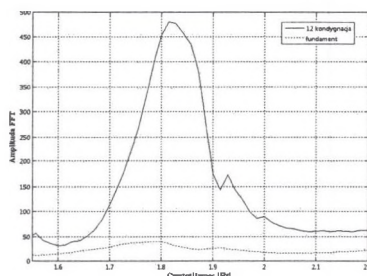
- 2 w poziomie fundamentów- mierzące składowe drgań x i y,
- 2 w poziomie posadzki 4 kondygnacji (III p.)- mierzące składowe x i y,
- 4 w poziomie 12 (najwyższej) kondygnacji; 2 do pomiaru składowych drgań x na obu końcach dwuklatkowej części budynku (przy ścianie szczytowej i dylatacji), 1 do pomiaru składowej drgań x części jednoklatkowej oraz 1 do pomiaru składowej poziomej drgań y przy dylatacji w części dwuklatkowej.

Na rysunku 2 pokazano rozmieszczenie akcelerometrów. Zainstalowana aparatura w budynku jest częścią większego zestawu pomiarowego, stanowiącego monitoring drgań wzbudzanych wstrząsami górnymi. Jest to tzw. aparatura „czuwająca”. Wstrząsy górnicze są skutkiem gwałtownego pęknięcia skał w górotworze w wyniku podziemnej eksploatacji rudy miedzi w kopalni „Rudna”.

Fale od ogniska wstrząsu propagują się do powierzchni, oddziałując na zabudowę i infrastrukturę. W rejonie Polkowic zdarzają się najsilniejsze wstrząsy górnicze, nawet o energii  $E_0 = 1,9E9J$ , wzbudzające wyjątkowo intensywne drgania powierzchniowe, niejednokrotnie powodujące wiele uszkodzeń budynków.

### 3. Wpływ interakcji układu grunt-budynek na częstotliwości drgań budynku

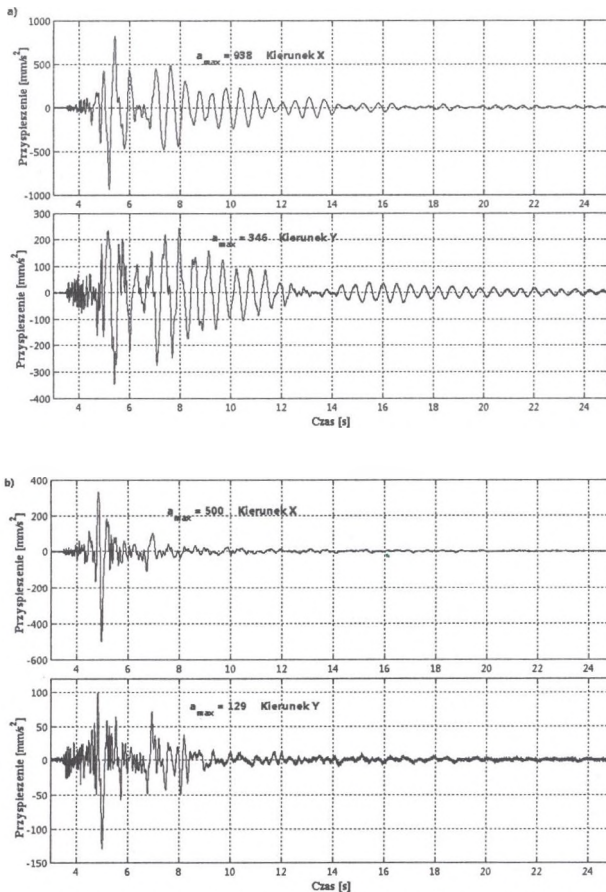
Przez „identyfikację IGB” rozumie się tu wykrywanie dynamicznych charakterystyk budynku posadowionego na sztywnym podłożu na podstawie pomierzonych przebiegów drgań fundamentu i górnych kondygnacji budynku na podatnym podłożu. W tym celu Śafak [2] analizował częstotliwościowe funkcje odpowiedzi prostego dwumasowego układu (o 2 stopniach swobody), podlegającego kinematycznie wymuszonym drganiom poprzez podłoże. Bezwzględna wartość stosunku odpowiedzi górnej do dolnej części układu,  $|R|$ , opisuje charakterystyki budynku na sztywnym podłożu.  $|R|$  może być obliczane jako stosunek amplitudowego widma Fouriera przyspieszenia drgań górnej kondygnacji budynku do przyspieszenia fundamentu. Tak określona wielkość bywa nazywana funkcją transformacji. Dominujący „pik” tego stosunku określa podstawową częstotliwość drgań budynku na sztywnym podłożu. W zależności od stopnia IGB, dominujące częstotliwości drgań budynku mogą być istotnie różne od tych, jakie miałby budynek na sztywnym podłożu. Dla wstępnego rozeznania, czy od danego wstrząsu górnicyzgo ma miejsce IGB, wpływająca na zawartość częstotliwościową przebiegów drgań omawianego budynku, bada się najniższe dominujące częstotliwości przebiegów drgań górnej kondygnacji i fundamentu budynku w celu wykrycia częstotliwości drgań górnej kondygnacji w przebiegu drgań fundamentu, co świadczyłoby o oddziaływaniu górnych kondygnacji budynku na drgania fundamentu. Na rys. 3 pokazano widma amplitudowe składowych poziomych przyspieszeń drgań pomierzonych na 12 kondygnacji i na fundamencie budynku od silnego wstrząsu górnicyzgo o energii  $E_n = 1,2E_6J$  i odległości epicentralnej  $r_e = 1335$  m.



Rys. 3. Dominująca częstotliwość drgań górnej kondygnacji budynku w paśmie 1,79÷1,82 Hz zawarta jest w przebiegu drgań fundamentu

Fig. 3. Dominant vibration frequencies of the building top story in the band 1.79-1.82 Hz is contained in the foundation recording

Dominująca częstotliwość górnej kondygnacji w paśmie 1,79- 1,83 Hz występuje w przebiegu drgań fundamentu. Dnia 16.05.2004 o godz. 11.53 i 11.58 zdarzyły się dwa bardzo silne wstrząsy górnice w filarze ochronnym Polkowic (o energiach  $E_n = 8,4 E8 J$  i  $E_n = 8,9 E7 J$  i tej samej odległości epicentralnej względem badanego budynku,  $r_e = 924 m$ ), powodując lekkie uszkodzenia wielu budynków. Wyjątkowo rzadko zdarzają się tak bardzo silne wstrząsy następujące jeden po drugim. Na rys. 4a i 4b pokazane są zarejestrowane przebiegi przyspieszeń drgań górnej kondygnacji budynku i jego fundamentu odpowiednio w kierunku x i y od wstrząsu o godz. 11.58. Zdecydowanie intensywniejsze od tego wstrząsu górnicego są drgania budynku w kierunku osi poprzecznej x. Na górnej kondygnacji maksymalna wartość przyspieszenia drgań przekracza  $900 \text{ mm/s}^2$ .

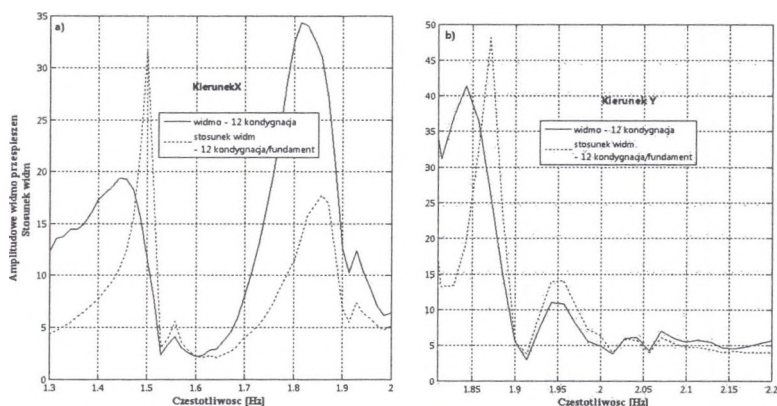


Rys. 4. a) Przebiegi drgań górnej kondygnacji, b) fundamentu budynku  
Fig. 4. Recordings of the top story (a) and building foundation (b)

Z kolei na rys. 5a i 5b pokazane są amplitudowe widma przyspieszeń drgań (przeskalowane) 12 kondygnacji budynku oraz stosunek amplitudowych widm przyspieszeń



drzań ( $|R|$ ) 12 kondygnacji i fundamentu budynku, odpowiednio w kierunku  $x$  i  $y$ . Na podstawie krzywej reprezentującej amplitudowe widmo drzań 12 kondygnacji budynku w kierunku osi poprzecznej  $x$  (rys. 5a) wyznaczono podstawowe częstotliwości rezonansowe drzań budynku na podanym podłożu, odpowiadające „pikowym” wartościom ww. krzywej. Są to: podstawowa częstotliwość rezonansowa drzań translacyjnych budynku w kierunku osi poprzecznej  $x$ ,  $f_{1x} = 1,45$  Hz oraz podstawowa częstotliwość rezonansowa drzań skrętnych budynku  $f_{1skr} = 1,82$  Hz. Na krzywej wyrażającej stosunek widm (rys. 5a) „pikowym” wartościom tej krzywej odpowiadają: podstawowa częstotliwość drzań translacyjnych w kierunku  $x$ ,  $f_{1xz} = 1,51$  Hz oraz podstawowa częstotliwość drzań skrętnych  $f_{1skrz} = 1,87$  Hz budynku na sztywnym podłożu.



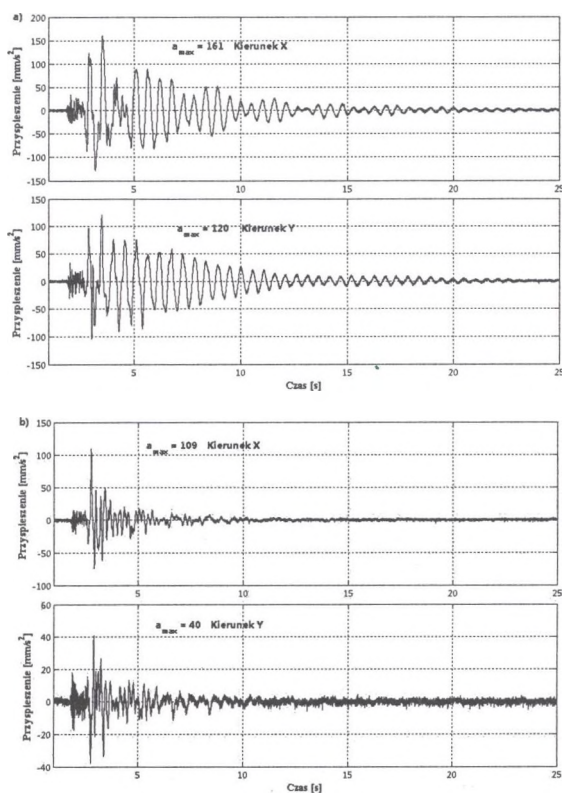
Rys. 5. Amplitudowe widma przyspieszeń drań (przeskalowane) 12 kondygnacji oraz stosunek widm przyspieszeń drzań 12 kondygnacji i fundamentu budynku: a) kierunek  $x$ , b) kierunek  $y$

Fig. 5. Fourier acceleration spectra (divided) of the top story and the ratio of Fourier acceleration spectra of the top story and building foundation: a) direction  $x$ , b) direction  $y$

Z rysunku 5b, na podstawie krzywej amplitudowych widm pomierzonych przyspieszeń drzań górnej kondygnacji w kierunku osi  $y$ , odczytano podstawową częstotliwość rezonansową drzań skrętnych budynku na podatnym podłożu,  $f_{1skr} = 1,83$  Hz, oczywiście tę samą wartość jak na podstawie zarejestrowanych drzań w kierunku  $x$ . Na podstawie krzywej reprezentującej stosunek amplitudowych widm (rys. 5b) otrzymano podstawową częstotliwość drzań skrętnych  $f_{1skrz} = 1,87$  Hz (jak wyżej) budynku na sztywnym podłożu. Badany budynek (jego część dwuklatkowa) wykazuje „skłonność” do drzań skrętnych. Tylko od niektórych wstrząsów pojawiają się drgania translacyjne budynku w kierunku osi poprzecznej  $x$ , ich występowanie ustalono na podstawie zarejestrowanych drzań na 12

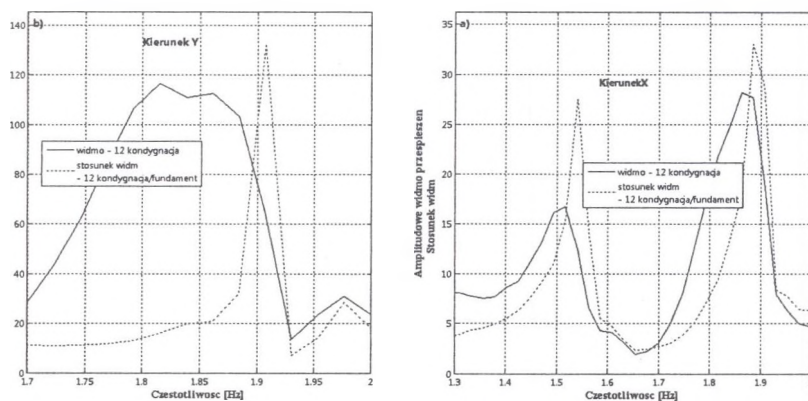
kondygnacji na obu końcach dwuklatkowej części budynku (przypadek drgań w kierunku x z tą samą częstotliwością i w tej samej fazie). Odkształcalność podłoża w czasie ruchu budynku wywołanego bardzo silnym wstrząsem górnicy obniża podstawowe częstotliwości rezonansowe tego obiektu, w tym przypadku o 0,05 Hz, względem wartości tych częstotliwości w przypadku budynku na niepodatnym podłożu. Nieco większe wartości przesunięć podstawowych częstotliwości drgań wysokiego budynku (o 30 kondygnacjach) zaobserwowano w czasie trzęsienia ziemi [2].

Z kolei na rys. 6a i b pokazano przebiegi drgań górnej kondygnacji i fundamentu badanego budynku od wstrząsu górnicy z dnia 01.05.2002, godz. 5.38, o energii  $E_n=1,3E7$  J i odległości epicentralnej  $r_e=1030$  m. Wstrząs ten wywołał zdecydowanie niższy poziom drgań budynku niż poprzednio omawiany. Wyniki analizy widmowej przebiegów przyspieszeń drgań z rys. 6a i 6b przeprowadzonej tak samo jak poprzednio są przedstawione na rys. 7a i 7b.



Rys. 6. a) Przebiegi drgań górnej kondygnacji, b) fundamentu budynku  
 Fig. 6. Recordings of the top story (a) and building foundation (b)

Podstawowe częstotliwości rezonansowe drgań budynku na podatnym podłożu, wynikające z krzywej reprezentującej amplitudowe widmo drgań 12 kondygnacji budynku w kierunku x, (rys. 7a) wynoszą:  $f_{1x} = 1,50$  Hz i  $f_{1skr} = 1,86$  Hz. Na krzywej wyrażającej stosunek widm (rys. 7a), „pikowym” wartościom tej krzywej odpowiadają: podstawowa częstotliwość drgań translacyjnych w kierunku osi poprzecznej  $f_{1xz} = 1,54$  Hz oraz podstawowa częstotliwość drgań skrętnych  $f_{1skrz} = 1,89$  Hz budynku na sztywnym podłożu. Z rysunku 7b wynika, że podstawowa częstotliwość drgań skrętnych budynku na sztywnym podłożu wynosi  $f_{1skrz} = 1,91$  Hz. W tym przypadku podstawowe częstotliwości drgań są nieco wyższe niż wyznaczone poprzednio od wstrząsu z 16.05.04. Należy wnioskować, że w przypadku mniej intensywnych drgań gruntu, przekazujących się na budynek, podłoże pod budynkiem w czasie jego ruchu podlega mniejszym deformacjom; jego odpowiedź, szczególnie górnych kondygnacji wynikająca z tej deformacji może być mniejsza, ale z nieco wyższymi częstotliwościami drgań.



Rys. 7. Amplitudowe widma przyspieszeń drgań (przeskalowane) 12 kondygnacji oraz stosunek widm przyspieszeń drgań 12 kondygnacji i fundamentu budynku: a) kierunek x, b) kierunek y

Fig. 7. Fourier acceleration spectra (divided) of the top story and the ratio of Fourier acceleration spectra of the top story and building foundation: a) direction x, b) direction y

Podobne analizy pomierzonych drgań tego budynku od kilku silnych i bardzo silnych wstrząsów wykazały, że: podstawowa częstotliwość translacyjnych drgań rezonansowych w kierunku osi poprzecznej x budynku z uwzględnieniem deformacji podłoża pozostaje w paśmie  $f_{1x} = 1,44 \div 1,50$  Hz, a podstawowa częstotliwość drgań skrętnych  $f_{1skr} = 1,81 \div 1,86$  Hz. Podstawowa częstotliwość drgań budynku przy założeniu sztywnego podłoża (braku jego deformacji) w kierunku x wynosi  $f_{1xz} = 1,51 \div 1,54$  Hz, a drgań skrętnych  $f_{1skrz} = 1,87 \div 1,91$  Hz. Od niektórych bardzo silnych wstrząsów, w przypadku małych odległości epicentralnych, do budynku (wzdłuż i w szerz) docierają zróżnicowane drgania



gruntu (w zakresie intensywności i częstotliwości), zawierające składowe drgań z niskimi dominującymi częstotliwościami 1 do 2 Hz. Grunt pod budynkiem i jego fundamenty podlegają zróżnicowanym drganiom. Przebiegi drgań górnych kondygnacji zawierają szereg składowych drgań o zbliżonych częstotliwościach z pasma 1,2 do 1,95 Hz, zmieniających się w czasie w trakcie kilku pierwszych sekund przebiegu drgań. W takich przypadkach określenie podstawowych częstotliwości rezonansowych budynku można wykonać na podstawie przebiegów drgań budynku z pominięciem pierwszych kilku sekund drgań. Podstawową częstotliwość rezonansową budynku w kierunku osi podłużnej  $y$ ,  $f_{1y}$  wyznaczono na podstawie tych fragmentów przebiegu drgań zarejestrowanych w p. k28 (por. rys. 2), gdy jednocześnie w p. k27, k29 i k30 przebiegi drgań zawierały tylko składowe translacyjne drgań w kierunku osi  $x$  z podstawową częstotliwością rezonansową w paśmie 1,44- 1,50 Hz, co zdarzało się bardzo rzadko. Częstotliwość  $f_{1y}$  pozostaje w paśmie 2,06-2,17 Hz. Tłumienie w pasmach częstotliwości rezonansowych wyznaczono na podstawie filtrowanych przebiegów przemieszczeń górnej kondygnacji, po dwukrotnym scałkowaniu przyspieszeń (z korektą linii bazowej). Ułamek tłumienia krytycznego  $\xi = 1,6-2,6\%$ . Tłumienie odpowiadające drugim częstotliwościom rezonansowym, tu nieomawianym, pozostaje w tych samych granicach, a nawet bywa mniejsze.

#### 4. Wnioski

Na podstawie zarejestrowanych przebiegów przyspieszeń drgań („czuwająca” aparatura) górnej kondygnacji wysokiego budynku (o 12 kondygnacjach) oraz jego fundamentu wywołanych silnymi wstrząsami górniczymi możliwa jest identyfikacja podstawowych częstotliwości rezonansowych tego budynku na podatnym podłożu gruntowym i przy założeniu sztywnego podłoża. Stopień interakcji jest tu niewielki, ma miejsce obniżenie podstawowych częstotliwości rezonansowych budynku na skutek deformacji podłoża w czasie ruchu obiektu o  $0,04 \div 0,05$  Hz.

## LITERATURA

1. Luco J. E., Trifunac M. D., Long H. L.: Isolation of soil- structure interaction effects by full- scale forced vibration tests, *Earthquake Eng. and Struct. Dynamics*, 1988, vol. 16, 1-21.
2. Şafak E.: Detection and identification of soil- structure interaction in buildings from vibration recordings, *J. Stuc. Eng.*, 1995, 121, no. 5, 899-906.
3. Çelebi M., Şafak E.: Seismic response of Pacific Park Plaza, I: data and preliminary analysis, *J. Struct. Eng.*, 1992, 118, no. 6, 1547-1565.
4. Şafak E., Çelebi M.: Recorded seismic response of Pacific Park Plaza, II: system identification, *J. Strut. Eng.*, 118, no. 6, 1566-1589.
5. Stewart J. P., Fenves G. L.: System identification for the evaluating soil- structure interaction effects in building from strong motion recordings, *Earthquake Eng. and Struct. Dynamics*, 1998, 27, 869-885.
6. Maciąg E.: Doświadczalna ocean zmian cech dynamicznych budynków w zależności od sposobu ich posadowienia, *Arch. Civ., Eng.*, 1981, 27, z. 4, 621-634.
7. Maciąg E.: Experimental evaluation of changes of dynamic properties of buildings on differences grounds, *Earthquake Eng. and Struct. Dynamics*, 1986, 14, 925-932.
8. Maciąg E., Kuźniar K.: The influence of ground flexibility on the fundamental frequencies of natural vibrations of medium- height buildings with load bearing concrete walls, *Arch. Civ. Eng.*, 1993, 39, 2, 139-151.
9. Wolf J. P.: *Dynamic soil- structure interaction*. Prentice- Hall, Inc. Englewood Cliffs, N.J.

Recenzent: Dr hab. inż. Marian Kawulok, prof. w Pol. Śl.