

Rozwiązanie problemu nadmiernych drgań stropów budynku przemysłowego o konstrukcji stalowej

Bolesław Szmygin, Jerzy Podgórski, Jarosław Bęc,
Piotr Wielgos, Tomasz Nowicki

*Katedra Mechaniki Budowli, Wydział Inżynierii Budowlanej i Sanitarnej,
Politechnika Lubelska, 20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 40,
e-mail: t.nowicki@pollub.pl*

Streszczenie: W niniejszej pracy zajęto się problemem drgań pojawiających się w wielu budynkach przemysłowych. W latach 2003-2005 sprawdzono dwa budynki w kopalni węgla „Lubelski Węgiel S.A.” Kilka lat później pojawiły się drgania stropów w budynku, które zostały wywołane prawdopodobnie przez modyfikacje wprowadzone w konstrukcji lub przez nieprawidłowe utrzymanie maszyn. Zarówno pomiary jak i symulacje numeryczne wykazały wystąpienie rezonansu. Stwierdzono, że główne elementy konstrukcji nie były zagrożone, a drgania dotyczyły tylko stropów. Zaprojektowano niezbędne modyfikacje konstrukcji i przeprowadzono testowe pomiary po ich wprowadzeniu.

Słowa kluczowe: drgania, pomiary drgań, MES.

1. Wstęp

Zjawisko drgań mechanicznych zaniechane w fazie projektowania obiektów budowlanych często stanowi problem w fazie ich użytkowania [4,5]. Wśród wielu przyczyn pojawiania się nadmiernych drgań w przypadku budynków przemysłowych wymienić można: pominięcie analizy drgań lub nadmierne jej uproszczenie na etapie projektowania, wykonywanie nieudokumentowanych modyfikacji konstrukcji w trakcie użytkowania, częste wprowadzanie zmian w technologii produkcji oraz nieodpowiednia konserwacja. W przypadku stalowych konstrukcji szkieletowych charakteryzujących się niskim tłumieniem drgań mechanicznych zaniechanie problemu może spowodować zagrożenie bezpieczeństwa konstrukcji lub jej części.

W latach 2003–2005 zbadane zostały dwa obiekty przemysłowe w obrębie zakładu „Lubelski Węgiel” S.A.: budynek płuczki ciężkiej ZPMW (kwiecień, maj 2003) oraz stacja przygotowania (czerwiec, lipiec 2004). W obu budynkach wystąpiło zjawisko nadmiernych drgań stropów spowodowane pracą urządzeń wykorzystywanych w obróbce węgla. W pracy przedstawiona została metodyka analizy zaistniałej sytuacji oraz zaproponowany sposób wyeliminowania drgań. Przytoczone wyniki liczbowe dotyczą jednego z badanych budynków.

2. Ogólna charakterystyka badanych obiektów

Oba obiekty są wielokondygnacyjnymi konstrukcjami stalowymi słupowo – belkowymi o wysokościach ok. 20 m i wymiarach w rzucie poziomym ok. 12×24 m.

Śłupy, wykonane ze spawanych dwuteowników HKS300-1, rozstawione są w siatce 6×6 m. Belki stalowe to walcowane dwuteowniki: I240p, I260p, I300p, I400p lub (z przyczyn technologicznych) ceowniki o tych samych wysokościach. Stropy wykonano jako monolityczne płyty żelbetowe (o grubości 8–12 cm) oparte na belkach stalowych, które w większości przypadków są obetonowane. Niektóre stropy wykończono gładzią cementową o grubości 5 cm. Ze względu na otwory technologiczne stropy nie stanowią ciągłej powierzchni na poszczególnych kondygnacjach. Lekkie ściany osłonowe części technologicznej wykonane zostały z blachy fałdowej z 5 cm warstwą izolacji cieplnej.

W obu budynkach znajduje się wiele maszyn wykorzystywanych w obróbce urobku kopalnianego m. in. kruszarki, sortownice, przesiewacze wibracyjne, przenośniki taśmowe oraz urządzenia do płukania węgla.

3. Kompleksowa analiza stanu zaistniałego

Analizę problemu rozpoczęto od zapoznania się z dokumentacją techniczną obiektów. Pozwoliło to wstępnie określić miejsca najbardziej podatne na występowanie drgań. Następnie zweryfikowano aktualność przedstawionej dokumentacji w trakcie wizji lokalnej i ostatecznie wybrano miejsca pomiarów. Kolejnym etapem pracy była analiza zarejestrowanych danych oraz analiza modelowa.

W analizie wykorzystano urządzenia pomiarowe firmy Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH (HBM): akcelerometry B12/200, wzmacniacz pomiarowy Spider 8, oprogramowanie sterująco-analizujące Catman 4.0. Analiza modalna wykonana została za pomocą pakietu programów MES firmy ALGOR Inc.

3.1. Wykonanie pomiarów

Wielkościami mierzonymi były przyspieszenia. Zadbano, aby w trakcie pomiarów wystąpiły różne scenariusze pracy maszyn. Punkty pomiarowe usytuowane zostały w tych miejscach, gdzie zauważono największe amplitudy drgań: bezpośrednio na stropach, na słupach i głównych belkach konstrukcji oraz na elementach wsporczych urządzeń stanowiących źródła drgań (Rys. 1).



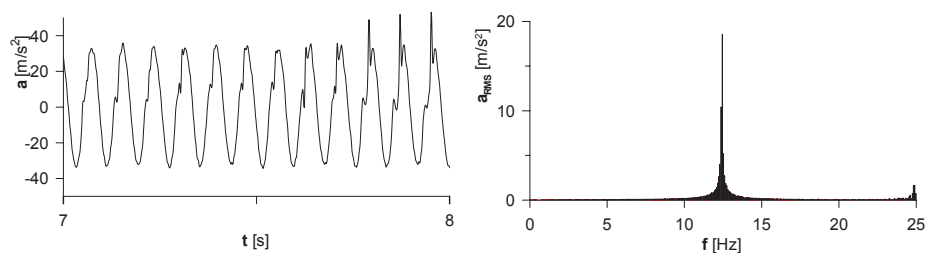
Rys. 1. Sposób zamocowania akcelerometrów.
Fig. 1. Accelerators constraining fastening.

3.2. Wyniki pomiarów drgań

Analiza widmowa zarejestrowanego sygnału pozwoliła określić rzeczywistą charakterystykę źródeł (Rys. 2) oraz charakter odpowiedzi konstrukcji (Rys. 3).

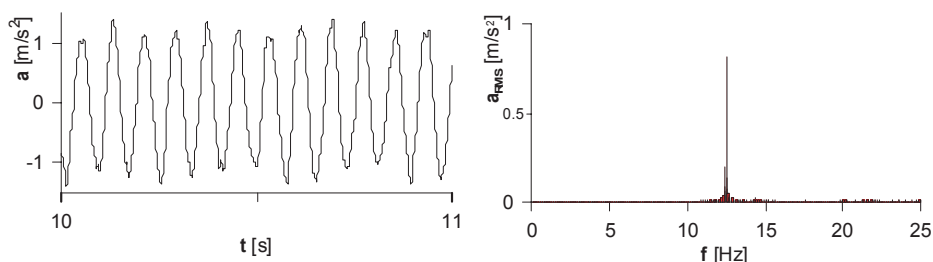
W przypadku obydwu obiektów stwierdzono, że częstotliwość najsilniejszego wymuszenia wynosiła 12,5 Hz. Kolejne słabnące wymuszenia zarejestrowano przy częstotliwościach 25 oraz 50 Hz. Widmo drgań wyznaczone dla konstrukcji stropów wykazywało większe „rozmycie”, dało się zauważyć prawidłowość występowania 3 lub 4 najsilniejszych składowych w przedziale od 5 do 20 Hz. W najsilniej drgających miejscach zarejestrowano drgania z częstotliwością $f_w = 12,5$ Hz. Jak później zostało stwierdzone są to drgania o charakterze rezonansowym.

Na podstawie badań wykonano ocenę szkodliwości drgań na budynek i ludzi [1] [2]. Stwierdzono, że główne elementy konstrukcyjne obiektu nie podlegają szkodliwemu działaniu drgań, ponieważ amplitudy przyspieszeń (zarówno pionowe jak i poziome) nie przekraczały wartości 0,001g. Natomiast stwierdzono, że maksymalne wartości przyspieszeń pomierzonych na belkach stropowych w okolicach pracujących przesiewaczy przekraczają wartość 0,05 m/s². Wielkości te mogły stanowić zagrożenie bezpieczeństwa lokalnych konstrukcji stropów, ponadto powodowały zagrożenie zdrowia ludzi.



Rys. 2. Charakterystyka jednego ze źródeł drgań w budynku stacji przygotowania.

Fig. 2. Characteristic of one of the vibration sources in the preparation station building.



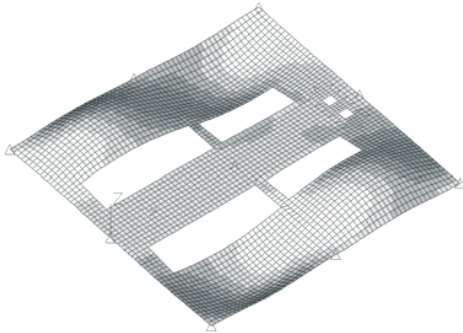
Rys. 3. Drgania pionowe rezonansowe stropu w budynku stacji przygotowania na poziomie +3,70 m.

Fig. 3. Vertical resonant vibrations of the floor in the preparation station building at the level +3.70 m.

3.3. Wyznaczenie charakterystyk dynamicznych

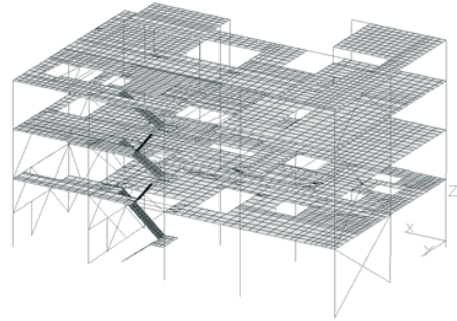
Dla badanych obiektów utworzono szereg modeli metody elementów skończonych, których analiza potwierdziła lokalny zasięg występujących drgań. Wykorzystano modele płyt stropowych (Rys. 4), modele kondygnacji oraz modele całych obiektów (Rys. 5). Modele zbudowano z elementów prętowych oraz płytowych dostępnych w bibliotece elementów skończonych Algora [3]. Ograniczono się do analizy modalnej, której wynikiem było wyznaczenie częstotliwości i postaci drgań własnych konstrukcji (Tab. 1). Porównanie wyników otrzymanych dla różnych

modeli pozwoliło jednoznacznie określić charakterystyki dynamiczne najsilniej drgających stropów. Przyjęto przedział strefy rezonansowej od 9,4 do 15.6 Hz $(1 \pm 0,25)f_w$. Na podstawie porównania wyników otrzymanych z różnych modeli stwierdzono, że drgania z częstotliwościami poniżej 5 Hz są drganiami szkieletu całego obiektu. Rezultaty pomiarów i obliczeń wyraźnie wskazywały, że nadmierne drgania stropów spowodowane były wystąpieniem rezonansu mechanicznego przy częstotliwości wymuszającej $f_w = 12,5$ Hz.



Rys. 4. Model płyty stropu na poziomie +3,70m w budynku stacji przygotowania – pierwsza postać drgań własnych 10.9Hz.

Fig. 4. Floor plate model at the level +3.70m in the preparation station building – first natural vibration mode shape 10.9Hz.

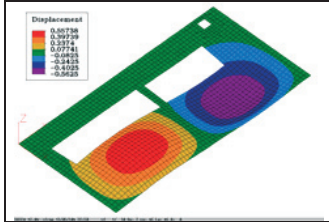
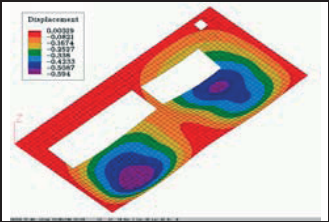
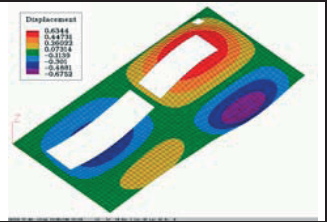
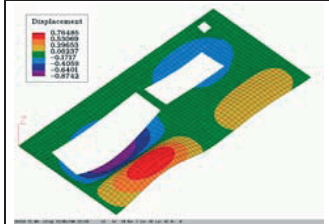
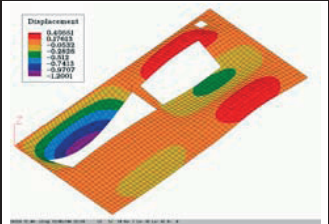
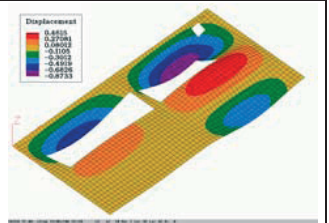


Rys. 5. Model MES konstrukcji budynku płuczki ciężkiej.

Fig. 5. FEM model of the heavy washer building.

Tabela 1. Częstotliwości i postaci drgań własnych stropu na poziomie +3,70 m w budynku stacji przygotowania.

Table 1. Frequencies and mode shapes of floor natural vibrations at the level +3.70 m in the preparation station building.

$f_1 = 10.9$ Hz	$f_2 = 14.0$ Hz	$f_3 = 15.5$ Hz
		
Resonance	Resonance	Resonance
$f_4 = 17.1$ Hz	$f_5 = 17.7$ Hz	$f_6 = 19.5$ Hz
		
Out of resonance	Out of resonance	Out of resonance

4. Rozwiązanie problemu nadmiernych drgań

Zostały rozpatrzone różne możliwe warianty naprawy zaistniałego stanu. Sposoby związane z ingerencją w źródła drgań zostały odrzucone jako zbyt kosztowne. Jedynym możliwym rozwiązaniem była zmiana charakterystyk dynamicznych stropów. Sugerowane przez zarządcę obiektów wzmocnienia żelbetonowych płyt stropowych zostały sprawdzone w analizie numerycznej i odrzucone jako niezadowalające, a nawet pogarszające istniejącą sytuację. Natomiast całkowita wymiana płyt stropowych wydawała się zbyt kłopotliwa. Ostatecznie zdecydowano podnieść częstotliwości drgań własnych konstrukcji przez wzmocnienie belek stropowych lub wprowadzenie dodatkowych słupów usztywniających konstrukcje.

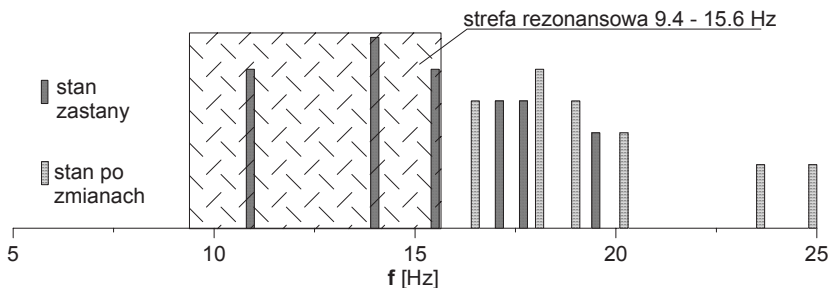
Zaprojektowano wzmocnienie stalowych belek stropowych przez przyspawanie do nich od dołu dwuteowników (Rys. 6). W miejscach, gdzie wykonanie modyfikacji belek stropowych byłoby trudne, zaprojektowano słupy stężające (Rys. 7). Rozwiązanie ze słupami możliwe było do zrealizowania jedynie w przypadku pierwszych kondygnacji obu budynków.

5. Kontrola poprawności przyjętych rozwiązań

Zaprojektowane rozwiązania zostały zweryfikowane zarówno w procesie symulacji numerycznej jak i pomiarów kontrolnych.

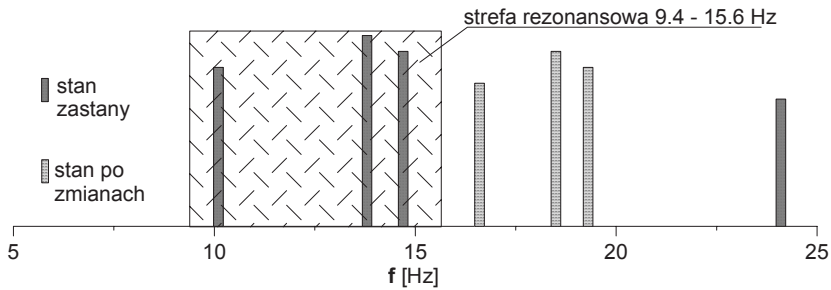
5.1. Symulacja zachowania zmodyfikowanej konstrukcji stropów

Najszybszą metodą zweryfikowania poprawności zaprojektowanych zmian było przeprowadzenie symulacji numerycznej. Na tym etapie w zupełności wystarczające było rozpatrzenie wyłącznie modeli płyt stropowych. Obliczenia przeprowadzono dla wszystkich stropów. Uzyskane wyniki potwierdziły trafność przyjętego rozwiązania (Rys. 8-9).



Rys. 8. Przesunięcie częstotliwości drgań własnych stropu na poziomie na poziomie +3,70 m w budynku stacji przygotowania jako efekt wprowadzenia słupów.

Fig. 8. Natural vibrations frequencies shift for the floor at the level +3.70 m in the preparation station building as an effect of columns introduction.

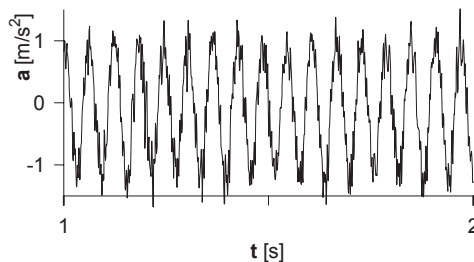


Rys. 9. Przesunięcie częstotliwości drgań własnych stropu na poziomie +7,60 m w budynku stacji przygotowania jako efekt wzmocnienia belek.

Fig. 9. Natural vibrations frequencies shift for the floor at the level +7.60 m in the preparation station building as an effect of beams strengthening.

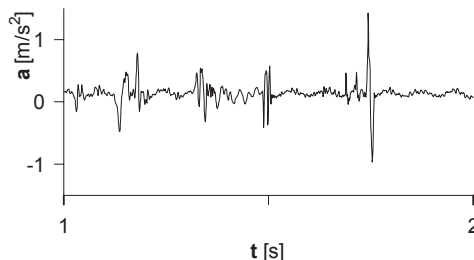
5.2. Wyniki pomiarów kontrolnych

Pierwsze badania kontrolne zostały przeprowadzone w lutym 2005 roku. Do tego czasu wykonano zalecane prace jedynie w budynku płuczki ciężkiej. Punkty pomiarowe zostały usytuowane w tych samych miejscach, które wybrano w czasie pierwszego pomiaru. Wyniki pomiarów przeprowadzonych po wzmocnieniu konstrukcji wykazały kilkukrotne zmniejszenie wartości maksymalnych przyspieszeń drgań (Rys. 10-11).



Rys. 10. Wartości zarejestrowane w roku 2003 na pomoście przy przesiewaczu nr 1 w budynku płuczki ciężkiej.

Fig. 10. Values measured on the platform by the shifter no. 1 in the heavy washer building in year 2003.



Rys. 11. Wartości zarejestrowane w roku 2005 na pomoście przy przesiewaczu nr 1 w budynku płuczki ciężkiej po wykonaniu zalecanych prac.

Fig. 11. Values measured on the platform by the shifter no. 1 in the heavy washer building after modifications in year 2003.

6. Wnioski

Pojawiające się nadmierne drgania w obiektach przemysłowych mogą być spowodowane zmianami w technologii produkcji, nieudokumentowanymi modyfikacjami konstrukcji lub mogą wynikać z nienależytej konserwacji maszyn. Każde wystąpienie takiego zjawiska powinno być dokładnie zbadane. Powinny być podane przyczyny wystąpienia drgań i zaprojektowane środki zaradcze. Nieocenioną pomocą w tego typu zagadnieniach jest analiza metodą elementów skończonych. Pozwala ona w tani i szybki sposób sprawdzić wiele wariantów rozwiązań i wybrać rozwiązanie optymalne.

Literatura

- [1] PN-B-02170, *Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki*, 1985.
- [2] PN-B-02171, *Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach*, 1988.
- [3] Spyrakos C.C., *Finite Element Modeling in Engineering Practice*, West Virginia University Press, 1994.
- [4] Pavic A., Reynolds P., Waldron P., Bennett K.J., *Critical review of guidelines for checking vibration serviceability of post-tensioned concrete floors*, *Cement & Concrete Composites* 23 (2001) 21-31.
- [5] Kirzhner F., Rosenhouse G., Zimmels Y., *Attenuation of noise and vibration caused by underground trains, using soil replacement*, *Tunnelling and Underground Space Technology* 21 (2006) 561-567.

Solution to excessive vibration of floors in a steel structured industrial building

Bolesław Szmygin, Jerzy Podgórski, Jarosław Bęc,
Piotr Wielgos, Tomasz Nowicki

*Department of Structural Mechanics, Faculty of Civil and Sanitary Engineering,
Lublin University of Technology, 20-618 Lublin, Nadbystrzycka 40,
e-mail: t.nowicki@pollub.pl*

Abstract: This paper deals with the problem of vibration that occurs in many industrial buildings. It covers the complete procedure of handling such tasks. Two buildings in a “Lubelski Wegiel S.A.” coal mine were examined in 2003 – 2005. Some years after building vibration of floors appeared (Figs 2-3). It was caused probably by modification in the building structures or improper maintenance of machines. Measurements and numerical simulations (Figs 4-5 and Tab. 1) showed that resonance appeared. It was stated that main elements of the structure were not in danger and vibration concern the floors only. Necessary modifications of the structures were designed (Figs 6-7). Testing measurements after bringing them into effect were conducted (Figs 8-11).

Key words: vibrations, vibrations measurements, FEM.