

Strojenie konstrukcji przy obciążeniach cyklicznych



dr inż.
JAN GIERCZAK
Politechnika Wroclawska
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego,
Katedra Konstrukcji Budowlanych
ORCID: 0000-0003-3219-1844



dr inż.
RAJMUND IGNATOWICZ
Politechnika Wroclawska
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Katedra Konstrukcji Budowlanych
ORCID: 0000-0003-3663-0170

W prezentowanej publikacji przedstawiono sposób strojenia konstrukcji na przykładzie konstrukcji stropu w Zakładach Spożywczych. Drgania przekazywane na strop pochodzą od przenośnika dwumasowego typu PVK2-9 wywołującego lokalne ponadnormatywne drgania. Opisano metodę identyfikacji szkodliwych drgań oraz sposób ich usunięcia poprzez zastosowanie podpory o zmiennej podatności.

W budynku na stropie zamocowano przenośnik taśmowy dwumasowy typu PVK2-9/0,8. Zespół napędowy składa się z silnika elektrycznego o mocy 5,5 kW, który zapewnia ruch obrotowy wału napędowego i przekładni pasowo-klinowej przekazującej moment obrotowy na wał korbowy. Wał korbowy zamienia ruch obrotowy na ruch posuwisto-zwrotny wykorzystany przez korbówód. Dwumasowy wibracyjny przenośnik korbowy składa się z następujących zespołów: konstrukcji wsporczej, zespołu rynien przenośnika, przeciwwagi, napędu i amortyzatorów oscylacyjnych. Przenośnik ma następujące parametry techniczne (rys. 1.):

- Długość nominalna 10736 mm,
- Masa całkowita przenośnika 2155 kg,
- Częstotliwość wytwarzana przez silnik 7,96 Hz.

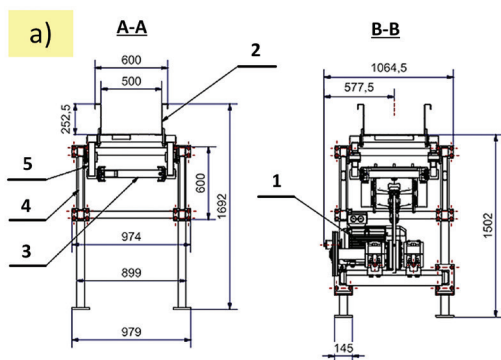
W trakcie użytkowania przenośnika zauważono, że strop żelbetowy o grubości 0,15 m doznaje odczuwalnych wibracji i wzbudza niepokój użytkowników. Miejsce to znajduje się pomiędzy osiami 11-12/B-C (rys. 2a.). Odczuwalne wibracje są tym większe, im więcej masy zalega w przenośniku. Zaleganie masy występuje pomiędzy osiami 11-9. Przenośnik jest usytuowany pomiędzy osiami 11-7 wzdłuż osi B (około 1,2 m od osi B w kierunku osi C do osi przenośnika).

Charakterystyka konstrukcji stropu

Główny układ konstrukcyjny budynku składa się z ram poprzecznych. Zasadniczy układ konstrukcyjny w kierunku poprzecznym jest trzynawowy (rys. 3.). W rzędach B-C-D hala jest dwunawowa, a w rzędzie D-E jest czterokondygnacyjna. Ramy są rozstawione co 6,0 m. Pomiędzy ramami na ryglach spoczywają belki HEA 280 oparte bezpośrednio na pasie górnym rygla. Belki te rozstawione są 2,25+1,50+2,25 m. Pomiędzy belkami stropowymi oparte są przegubowo belki wolnopodparte z HEA 220. Belki te są rozstawione co 3,0 m. W późniejszym okresie dokończono do tego układu belki z HEA 220 w układzie nieregularnym. Na belkach stropowych spoczywa płyta żelbetowa, a na niej zamontowano przenośnik PVK2-9 oraz inne urządzenia wraz ze zbiornikami (rys. 2b., 2c). Zbiorniki w okresie użytkowania są wypełnione od 10 do 90%.

Przedstawiony na rysunkach 2. i 3. układ konstrukcyjny stropu w trakcie użytkowania był wiele razy modernizowany. Dostawiono nowe słupy, wzmocniono słupy w kondygnacji dolnej poprzez dospawanie dodatkowych profili. Na poszczególnych kondygnacjach biegną dodatkowe konstrukcje wsporcze dla urządzeń, które są na bieżąco modernizowane. Pod stropami podwieszono instalacje, które w trakcie użytkowania hali wielokrotnie zmieniano, co wiązało się ze zmianą obciążeń technologicznych. Konsekwencją tych zmian była zmiana parametrów dynamicznych stropu.

Układ poprzeczny konstrukcyjny w obu kierunkach jest szkieletowy. Brak jest ram portalowych. Słupy pracują jako połączone przegubowo z fundamentami oraz z belkami stropowymi. Sztywność układu konstrukcyjnego budynku zapewniają stężenia pionowe



Pos.	Nazwa	Mat.	Ilość	Masa
5	TB-FM 6-80 160		80	70,6 kg
4	Rama B500 L=24800		1	1982,08 [kg]
3	Rama przeciwcięż B500 L=24400		1	1197,57 [kg]
2	Zespół rynien B500 L=24850		1	1197,4 [kg]
1	Rama z Napędem 11 kW Cargill		2	1175,75 [kg]



Rys. 1. Przekrój poprzeczny przez przenośnik: a) poza napędem, b) w miejscu występowania napędu, c) widok na urządzenie

w ścianach podłużnych i szczytowych oraz tarcza w postaci stropu żelbetowego. Rygle i belki pracują jako elementy belek wolno- podpartych, dwuprzęsłowych lub trzyprzęsłowych. Wszystkie rygle są połączone ze słupami przegubowo. Na obiekcie wykonywano lokalne wzmocnienia konstrukcji z chwilą wprowadzania zmian technologicznych polegających na instalacji nowych zbiorników czy też innych urządzeń. Na belkach stropowych spoczywa strop żelbetowy, pracujący jednokierunkowo jako płyta wieloprzęsłowa. Grubość stropu wynosi 15 cm i jest on wykonany z betonu klasy C20/25. Przeprowadzone obliczenia statyczno-wytrzymałościowe wykazały prawie 100% wykorzystanie nośności w elementach konstrukcyjnych stropu, co oznacza, że nie występują żadne rezerwy nośności.

Badania parametrów dynamicznych stropu

W 2017 r. wykonano pomiary drgań stropu wibrogramem wymuszonych kinematycznych pracującym pod nadzorem oprogramowania mVIDIA w systemie Android, w skład którego wchodziły następujące urządzenia pomiarowe: SiBox, akcelerometr oraz inklinometr.

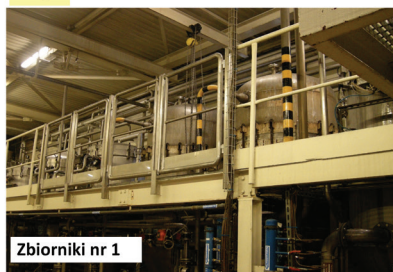
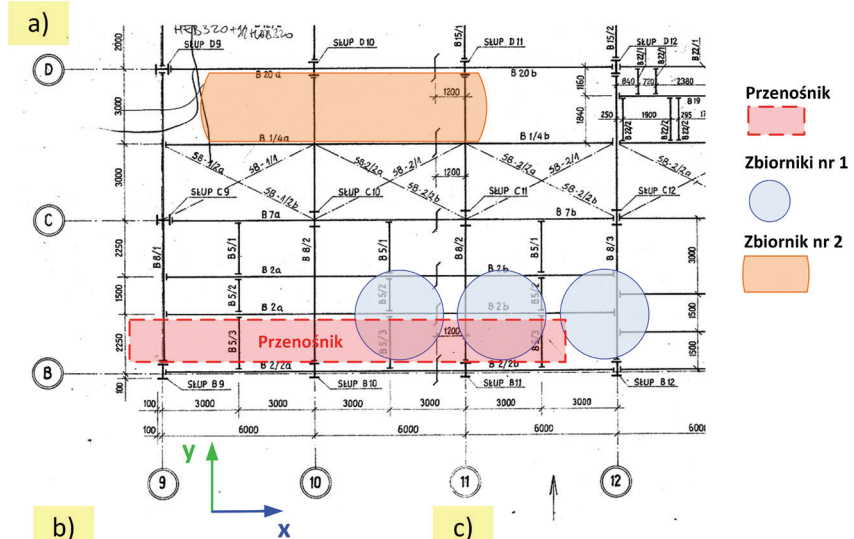
Pomiary wykonano w czterech punktach (rys. 2a.): punkt 1. na stropie pomiędzy osiami B-C/10-11, punkt 2. na przenośniku pomiędzy osiami B-C/10-11, punkt 3. na stropie pomiędzy osiami B-C/9-10, punkt 4. na przenośniku pomiędzy osiami B-C/9-10.

Punkt 1. znajdował się na stropie w miejscu, w którym drgania stropu były odczuwalne przez użytkownika obiektu. Punkt pomiarowy 3. (rys. 4.) był zlokalizowany w miejscu, gdzie nie odczuwano drgań podczas funkcjonowania przenośnika. Punkty pomiarowe 1. i 3. były oddalone od siebie o 6,0 m.

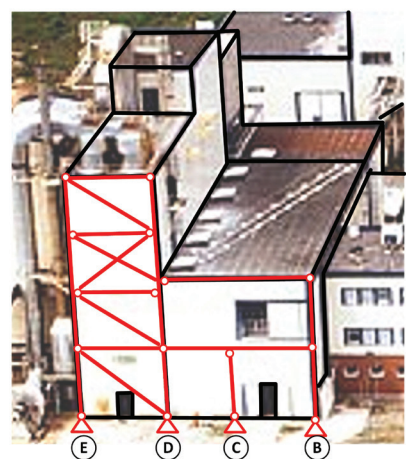
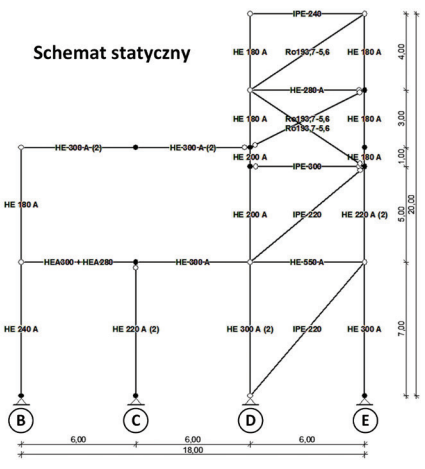
We wskazanych miejscach wykonano pomiary: przyspieszeń, prędkości oraz wielkości amplitud. Pomierzono widmo amplitudowe przyspieszenia i prędkości RMS dla kierunków X, Y i Z (gdzie Z jest kierunkiem pionowym i jest najbardziej przydatny do analizy dynamicznej). Na rysunku 5. przedstawiono widmo amplitud przyspieszeń dla punktu pomiarowego 1. w kierunku osi Z. Otrzymano następujące wyniki dla częstotliwości drgań własnych stropu 8 Hz (tab. 1.).

Z otrzymanych pomiarów wynikają następujące wnioski:

- Na stropie w punkcie pomiarowym 1. przyspieszenie jest pięciokrotnie większe niż na stropie w punkcie pomiarowym 3.
- Na przenośniku pomierzone przyspieszenie jest dwukrotnie większe niż na stropie w punkcie pomiarowym 1. i 10-krotnie większe niż na stropie pomierzone w punkcie 3.
- Zgodnie z [1] przyspieszenia wg skali SWD nie przekraczają strefy III i mieszczą się w strefie II (strefa II – drgania odczuwalne przez budynek, ale nieszkodliwe



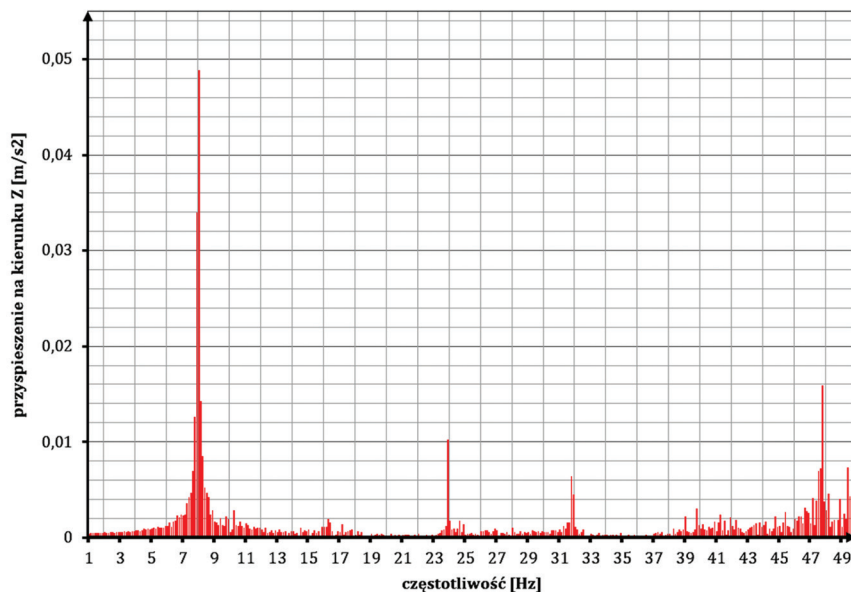
Rys. 2. Rozmieszczenie belek stropowych i układ urządzeń technologicznych: a) rozmieszczenie zbiorników pomiędzy osiami 9-12, b) widok na zbiorniki nr 1., c) widok na zbiorniki nr 2.



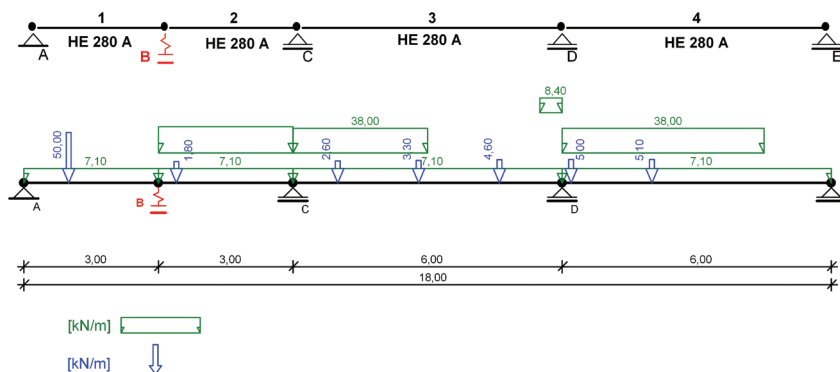
Rys. 3. Schemat układu poprzecznego konstrukcji budynku Zakładów Spożywczych



Rys. 4. Punkt pomiarowy 3. na stropie: a) pomiędzy osiami 10-11, b) urządzenia pomiarowe



Rys. 5. Widmo amplitudowe przyspieszeń RMS dla punktu pomiarowego nr 1



Rys. 6. Schemat statyczny i obciążenie belki trójprzęsłowej po wzmocnieniu podatną podporą w punkcie B

dla konstrukcji, następuje przyspieszone zużycie budynku i powstają pierwsze rysy w wyprawach, tynkach).

Dla punktów pomiarowych przedstawiono widmo amplitudowe prędkości RMS przy 8 Hz (tab. 2).

Z otrzymanych pomiarów wynikają następujące wnioski:

- Dla punktu pomiarowego 1. pomierzone prędkości na stropie są pięciokrotnie większe niż na stropie w punkcie pomiarowym 3.
- Pomierzone prędkości na stropie w punkcie pomiarowym 1. są prawie identyczne jak na przenośniku w punktach pomiarowych 2. i 4.

- Wartości prędkości mają zdecydowany wpływ na odbiór drgań przez ludzi. Dopuszczalne wartości dla zakładów przemysłowych, przy drganiach ustalonych zgodnie z PN-88/B-02171, są przekroczone (graniczna wartość wynosi 0,90 mm/s) – zgodnie z [1].

Dodatkowo sprawdzono widmo amplitud przyspieszeń RMS na kierunku X i Y. Z pomiarów wynika, że na badanym obszarze stropu przyspieszenia na kierunku X i Y nie mają większego wpływu na konstrukcję.

Z pomiarów, przy wyłączonym przenośniku, zanotowano (w rozpatrywanym obszarze) przyspieszenia oraz prędkości o 10–100 razy mniejsze. Pomiaru dokonano w punkcie 1.

Tabela 2. Widmo amplitudowe prędkości RMS przy 8 Hz na kierunkach Z, X i Y.

Punkt pomiarowy	Widmo amplitudowe prędkości dla kierunku		
	Z	X	Y
1	0,95 mm/s	0,09 mm/s	0,10 mm/s
2	1,10 mm/s	0,90 mm/s	5,80 mm/s
3	0,20 mm/s	0,11 mm/s	0,11 mm/s
4	2,10 mm/s	0,28 mm/s	2,00 mm/s

Tabela 1. Przyspieszenia dla poszczególnych punktów pomiarowych

Punkt pomiarowy	Przyspieszenia
1	0,05 m/s ²
2	0,10 m/s ²
3	0,01 m/s ²
4	0,11 m/s ²

przy podskokach zespołu badawczego o łącznym ciężarze 170 kg.

Obliczenia parametrów dynamicznych stropu

Przeprowadzono analizy statyczne badanego stropu wg [4, 5, 6]. Obciążenia technologiczne oszacowano na podstawie wizji lokalnych, pomiarów oraz dostarczonej dokumentacji. Według szacunkowych obliczeń częstotliwość drgań stropu może wynosić od 2,7 Hz do 8,0 Hz w zależności od wypełnienia zbiorników spoczywających na przedmiotowym stropie. W obliczeniach analizowano belkę trzyprzęsłową (rys. 6.) i rygiel dwuprzęsłowy. Podatność płyty żelbetowej pominięto ze względu na jej dużą sztywność giętną. Na stropie znajdują się zbiorniki, które obciążają strop w zależności od wypełnienia tych zbiorników. W ekstremalnych warunkach zbiorniki mogą być pełne lub prawie puste. Poziom wypełnienia zbiorników ma znaczący wpływ na parametry dynamiczne stropu.

Przypadek – obciążenie

Z przeprowadzonych analiz wynika, że przy 10% wypełnieniu zbiorników częstotliwość własna stropu wynosi około ~7,73 Hz. Wartość ta jest bliska częstotliwości wymuszenia drgającego przenośnika, a przy niewielkim dodatkowym opróżnieniu zbiorników zachodzi zjawisko rezonansu. Gdyby zastosować podporę niepodatną, to belka po stronie przeciwnej wchodzi w rezonans. Z tego powodu zaproponowano rozwiązanie polegające na zastosowaniu podpory o regulowanej podatności w celu dostrojenia, a w konsekwencji zminimalizowania oddziaływań rezonansowych na strop. Mając na celu pełniejsze rozeznanie zagadnienia, wykonano obliczenia celem określenia charakterystyk dynamicznych dla wydzielonego fragmentu płyty stropowej. Obliczenia te wykonano, rozpatrując strop bez dodatkowych podpór oraz strop, dla którego zastosowano podporę o regulowanej podatności. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 3. Na rysunku 7. zaprezentowano pierwszą postać drgań płyty stropowej bez dodatkowej podpory podatnej.

Wzmocnienie stropu poprzez wykonanie dodatkowej podpory podatnej

Zastosowanie podparcia podatnego pozwala regulować częstotliwość drgań stropu. W ten sposób można zminimalizować oddziaływanie przenośnika na kierunku pionowym.

Zaproponowano wzmocnienie stropu polegające na podparciu belek trzyprzęsłowych. Podparcie ma być wykonane w środku rozpiętości belki w polu skrajnym, tzn. między osiami 11-12 (rys. 2a.). Podparcie zmienia schemat belki trzyprzęsłowej na czteroprzęsłową o rozpiętości belek 3+3+6+6 m. Zaprojektowane podparcie jest regulowane poprzez zastosowanie śrub rektyfikujących.

Po zamontowaniu podparcia przeprowadzono pomiary drgań stropu pomiędzy osiami 11-12, jednocześnie regulując podparcie poprzez śruby rektyfikacyjne. Pomiar przyspieszeń w kierunku Z wynosił $0,05 \text{ m/s}^2$, a po wykonaniu podparcia – $0,012 \text{ m/s}^2$. Pomierzone przyspieszenia na kierunku pionowym były 4,2 razy mniejsze. Pomiar prędkości na kierunku pionowym wynosił $0,9 \text{ mm/s}^2$, a po wzmocnieniu stropu – $0,25 \text{ mm/s}^2$. Przy wyłączonym przenośniku parametry drgań stropu, tj. przyspieszenia i prędkości, spadły o ponad 300% w polu występowania rezonansu. Na pozostałej części stropu pomierzone parametry zwiększyły się i zależały od podatności podpory. Przy podporze o podatności większej niż 60 MN/m obszar stropu w sąsiednim polu wpadał w rezonans. Regulacji podatności podpory zaprzestano przy spadku parametrów dynamicznych stropu o ponad 300% oraz dla pozostałej części stropu wzrost parametrów dynamicznych stropu nie przekraczał 25%.

Wnioski

Zaproponowany sposób podparcia belek trójprzęsłowych redukuje oddziaływania dynamiczne od przenośnika na kierunku pionowym Z tylko w części pomiędzy osiami 11-12/B-C (rys. 2a.), w którym były one zauważalne w formie drgań stropu. Oddziaływania na pozostałej części stropu zmieniają się i pewne obszary stropu mogły wpadać w rezonans. Miało to miejsce np. przy podatności podpory większej niż 60 MN/m .

Literatura:

- [1] PN-B-02170:2016-12, Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki.
- [2] PN-B-217:1988, Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach.
- [3] ISO 10137:2007 Bases for design of structures – serviceability of buildings and walkways against vibrations.
- [4] Murray TM and Howard JN, 1998, Serviceability: Lively Floors – North American and British Design Methods, "J. Construct. Steel Research", Vol. 46, Nos 1-3 pp 105.
- [5] Naeim F., 1991, Design Practice to Prevent Floor Vibrations, Structural Steel Educational Council.
- [6] Wyatt T.A., 1989, Design Guide on Vibration of Floors, The Steel Construction Institute.

DOI: 10.5604/01.3001.0013.9716

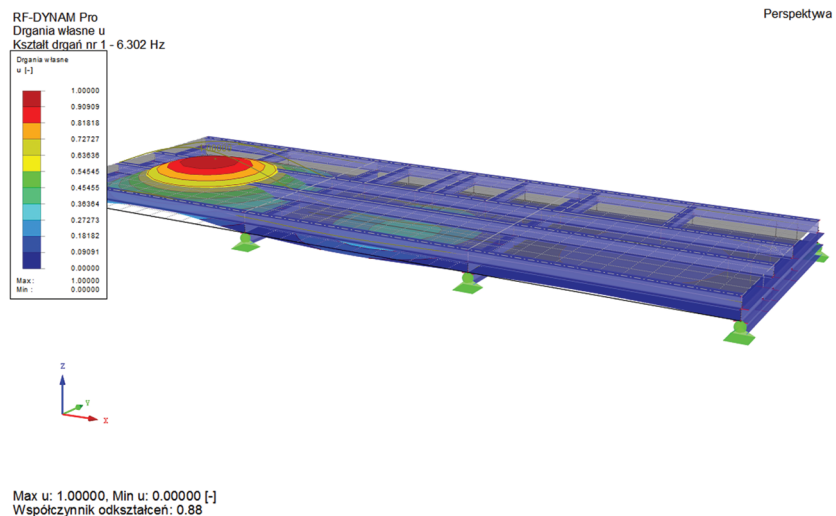
PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA

Gierczak Jan, Ignatowicz Rajmund L., 2020, Strojenie konstrukcji przy obciążeniach cyklicznych, „Builder” 04 (273). DOI: 10.5604/01.3001.0013.9716

Streszczenie: W prezentowanej publikacji przedstawiono sposób strojenia konstrukcji na przykładzie konstrukcji stropu w Zakładach Spożywczych. Drgania przekazywane

Tabela 3. Zestawienie częstotliwości drgań własnych stropu w zależności od podatności podpory i wypełnienia zbiorników

Przypadek – obciążenie zbiornikami (wypełnienie)	Podatność podpory	Częstotliwość drgań własnych stropu
[%]	[MN/m]	[Hz]
100	Bez podpory	4,407
50	Bez podpory	5,574
0	Bez podpory	8,811
10	Bez podpory	7,729
10	50	20,483
10	40	18,644
10	30	16,602
10	20	14,271
10	10	11,476



Rys. 7. Częstotliwość drgań fragmentu stropu niewzmocnionego dla 1. postaci drgań własnych

na strop pochodziły od przenośnika dwumasowego typu PVK2-9 wywołującego lokalne ponadnormatywne drgania. Opisano metodę identyfikacji szkodliwych drgań oraz sposób ich usunięcia poprzez zastosowanie podpory o zmiennej podatności. Miała ona za zadanie dostrojenie konstrukcji tak, aby znajdowała się poza rezonansem, tzn. aby częstotliwość drgań własnych układu konstrukcyjnego była różna od częstotliwości drgań wymuszonych przez urządzenia [1, 2, 3]. Zaproponowane rozwiązanie zweryfikowano po wykonaniu wzmocnienia przez rejestrację parametrów dynamicznych stropu wibrogramem wymuszenia kinematycznego [1, 2].

Słowa kluczowe: dynamika, charakterystyka dynamiczna konstrukcji

Abstract: The presented publication presents the way of structure tuning on the example of the ceiling structure in the Food Factory. The vibrations transmitted to the ceiling came from a two-mass conveyor type PVK2-9 causing local oversized vibrations. The method of identification of harmful vibrations and the method of their removal through the use of a support

with variable susceptibility was described. The purpose of the variable-vibration support was to tune the structure to be outside the resonance, i.e. to make the frequency of own vibrations of the structural system different from those forced by the devices [1, 2, 3]. The proposed solution was verified after the reinforcement was performed by recording the dynamic parameters of the ceiling with the kinematic excitation program [1, 2].

Keywords: dynamics, dynamic characteristics of the structure