



Uwzględnienie oddziaływań dynamicznych na konstrukcję trybun

Mgr inż. Michał Drzazga, Politechnika Wroclawska

1. Wprowadzenie

Artykuł ma na celu zbadanie problemu drgań konstrukcji trybun oraz zobrazowanie toku postępowania w przypadku analizy oddziaływań podczas projektowania trybun stadionów narażonych na wpływy dynamiczne generowane przez ruch tłumu.

Powszechnie wiadomo, że tłum ludzi może generować duże oddziaływanie o charakterze dynamicznym, szczególnie kiedy ruch tłumu obejmuje rytmiczne skakanie. Wszelkiego rodzaju ekscytacje tłumu m.in. w chwili zdobycia gola, czy śpiewania klubowych piosenek prowadzi do skoordynowanego skakania tłumu. Zjawisko drgań o charakterze rezonansowym nie jest zbyt powszechne i dlatego być może wielu projektantów w pewien sposób zaniedbuje to oddziaływanie. W przypadku stadionów oraz obiektów widowiskowych obciążenie dynamiczne jest obciążeniem dominującym. Projektanci są zobligowani do projektowania konstrukcji w taki sposób, aby stany graniczne użyteczności oraz nośności nie zostały przekroczone. Problem pojawia się, gdy dochodzi do skoordynowanych skoków tłumu ludzi, wówczas przemieszczenie od oddziaływań dynamicznych jest znacznie większe od przemieszczeń od obciążenia przyłożonego statycznie. Powinno się pamiętać, iż jest to bardzo duży wpływ, decydujący niejednokrotnie o niezawodności konstrukcji oraz o poziomie komfortu użytkownika. Prawdziwe niebezpieczeństwo pojawia się gdy skoordynowane skakanie wywołuje drgania o charakterze rezonansowym w konstrukcji. W chwili zrównania się częstotliwości, przemieszczenia konstrukcji znacznie rosną. Na przykład w konstrukcji o parametrze tłumienia 2% krytycznego narażonej na drgania o charakterze rezonansowym przemieszczenia rosną 25-krotnie w porównaniu z przemieszczeniem statycznym.

Efekty dynamiczne mogą prowadzić do przekroczenia dopuszczalnych stanów i powinny być wyeliminowane. Jako efekt dynamiczny określa się wzbudzenie o charakterze rezonansowym. Istotą wystąpienia rezonansu charakteryzują warunki oddziaływań dynamicznych na konstrukcję. Najważniejszą zasadą i zapewnieniem braku wystąpienia rezonansu jest takie zaprojektowanie ustroju nośnego, aby żadna z częstotliwości drgań własnych ω_{si} nie była równa bądź zbliżona do ω_s . Jednak, aby zapobiec efektowi rezonansu przejściowego, projektant powinien dobrać tak ustrój nośny, aby wszystkie

częstotliwości drgań własnych ω_s były większe od częstotliwości wymuszonych ω_w . Taką sytuacją nazywamy tzw. strojeniem wysokim. Strojeniem niskim nazywamy sytuację gdy $\omega_s < \omega_w$. Taka sytuacja jest dopuszczalna tylko, gdy częstotliwość wymuszeń ω_w następuje na tyle szybko, iż podczas krótkotrwałych zgodności $\omega_s = \omega_w$ nie spowoduje rozwoju rezonansu [5]. W pracach [3] i [4] określono, że miarą wzrostu przemieszczeń jest współczynnik dynamiczny v zdefiniowany przez iloraz amplitudy drgań spowodowanych wymuszającą siłą harmoniczną do przemieszczenia spowodowanego jednakową (tą samą) siłą przyłożoną statycznie.

$$v = \frac{a}{f} = \frac{\omega_s^2}{\sqrt{(\omega_s^2 - \omega_w^2)^2 + \frac{D^2 \omega_s^2}{\pi^2} \omega_w^2}} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega_w^2}{\omega_s^2}\right)^2 + \frac{D^2 \omega_w^2}{\pi^2 \omega_s^2}}} \quad 1.1$$

Gdzie: a – amplituda drgań spowodowanych wymuszającą siłą harmoniczną;
 f – przemieszczenie spowodowane jednakową (tą samą) siłą przyłożoną statycznie;
 ω_s – częstotliwość drgań własnych układu; ω_w – częstotliwość wymuszeń drgań własnych układu; D – parametr tłumienia (w przybliżeniu równy logarytmicznemu dekrementowi tłumienia). Przy przyjęciu $D=0$, czyli bez uwzględnienia parametru tłumienia konstrukcji otrzymano wzór:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega_w^2}{\omega_s^2}\right)^2}} \quad 1.2$$

Zagraniczne publikacje sugerują, aby wstępnie sprawdzić drgania bez uwzględnienia tłumienia, a dopiero, gdy stosunek $\omega_w/\omega_s \approx 1$ wówczas do analizy należy wziąć pod uwagę parametr tłumienia D .

W przypadku konstrukcji prefabrykowanych norma [N2] podaje przykładowe współczynniki tłumienia ξ (% z krytycznego) dla elementów żelbetowych sprężonych oraz prefabrykowanych przy rozpiętości 2 m do 15 m. Tak więc zakres współczynników tłumienia zawiera się między 0,8% do 3,0%. Współczynnik tłumienia zależy od rodzaju konstrukcji, materiału, od obecności niekonstrukcyjnych elementów, wieku, jakości konstrukcji, amplitudy oraz częstotliwości drgań. Wartością zalecaną współ-

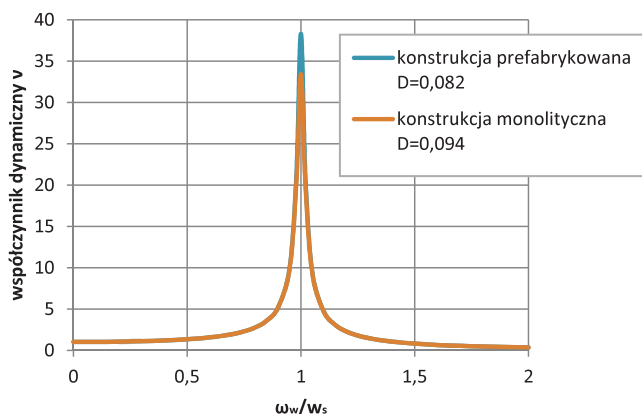


czynnika tłumienia dla stropów przy wstępnym projektowaniu w przypadku elementów sprężonych oraz prefabrykowanych norma [N2] podaje jako równą około 1,3%. W przypadku konstrukcji żelbetowych, monolitycznych współczynnik tłumienia ξ dla celu projektu wstępnego wynosi około 1,5%. Logarytmiczny dekrement tłumienia obliczyć można ze wzoru z pracy [7]:

$$\delta = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \quad 1.3$$

I tak dla konstrukcji żelbetowej, prefabrykowanej logarytmiczny dekrement tłumienia δ wynosi około 0,082, natomiast w przypadku konstrukcji żelbetowej, monolitycznej δ wynosi około 0,094. Na rysunku 1.1. przedstawiono zjawisko rezonansu w przypadku układu z tłumieniem.

Zjawisko rezonansu



Rys. 1.1. Wykres zjawiska rezonansu z uwzględnieniem tłumienia w przypadku konstrukcji żelbetowej prefabrykowanej oraz monolitycznej

Z powyższej analizy wynika, że przy podanym poziomie tłumienia gdyby dopuścić iloraz $\omega_w/\omega_s \approx 1$ wówczas współczynnik dynamiczny v wyniósłby około 38,31 dla konstrukcji prefabrykowanej oraz około 33,42 dla konstrukcji monolitycznej. Taki wzrost przemieszczeń doprowadziłby do katastrofy.

Konsekwencje nieuwzględnienia oddziaływań dynamicznych mogą być tragiczne. Jednym z wydarzeń, które zwróciło uwagę inżynierów na wpływy dynamiczne była katastrofa na stadionie Stade Armand-Cesari w Bastii na Korsyce. 5 maja 1992 r. tymczasowa trybuna zawaliła się przed półfinałowym meczem pucharu Francji pomiędzy zespołami SC Bastia i Olympique de Marseille. Życie straciło 17 osób, a ponad 2500 ludzi zostało rannych.

Innym przykładem istotności obciążeń dynamicznych, tym razem z Polski, jest stadion żużlowy w Zielonej Górze. Profesor Uniwersytetu Zielonogórskiego Jakub Marciniowski podjął się ekspertyzy wyżej wymienionego

obiektu. Profesor wspomina, że gdyby podczas meczu kibice skakali trochę dłużej, istniałoby duże prawdopodobieństwo, że doszłoby do katastrofy budowlanej i falujący dach zawaliłby się na trybunę, a mechanizm zniszczenia byłby gwałtowny. Okazało się, że projektant pominął wpływ obciążenia dynamicznego oraz nie sprawdził możliwości wystąpienia rezonansu. Jak wykazały badania, częstotliwość drgań własnych konstrukcji dachu wynosiły ok. 2,45 Hz, natomiast na obiekcie podczas meczów dochodziło do drgań o częstotliwości w granicach 2,2-2,3 Hz. Taka sytuacja (zbliżone wartości częstotliwości) stała się przyczyną pojawienia się drgań o charakterze rezonansowym. Podczas pomiarów zaobserwowano, że przebieg drgań narasta wyraźnie podczas zabawy kibiców. Ponadto na materiałach filmowych zarejestrowano drgania zadaszania wskazujące ewidentnie na wzbudzenia o charakterze rezonansowym. Taka sytuacja spowodowała konieczność przestrojenia konstrukcji. Dążono do tego, aby najmniejsza częstotliwość drgań swobodnych konstrukcji zadaszania była znacznie większa od częstotliwości drgań wymuszonych. Ostatecznie zdecydowano się na przestrojenie polegające na dodatkowym podparciu dźwigara słupem stalowym. Zastosowane rozwiązanie nie przesłania widoczności kibicom siedzącym na trybunach. Po wykonaniu analizy numerycznej zaobserwowano, że widmo częstotliwości drgań własnych przesunęło się tak, że pierwsza forma miała częstotliwość 5,31 Hz. Po wykonaniu wzmocnień wszystkich ram zbadano jedną trybunę. Badanie potwierdziło poziom pierwszej częstotliwości równy około 5,5 Hz. Wzmocnienie doprowadziło do uzyskania efektu strojenia wysokiego [5].

2. Zalecenia normatywne

Według normy PN-82/B-02003 obciążenia dynamiczne powinny być uwzględniane poprzez pomnożenie wartości obciążeń statycznych przez współczynnik dynamiczny bądź też poprzez wykonanie specjalnej analizy dynamicznej. Norma jednak nie określa współczynnika dynamicznego dla tłumy zgromadzonego na trybunie. Według PN-EN 1991-1-1:2004 w przypadku obciążeń użytkowych o charakterze dynamicznym powinno się rozważyć możliwość wystąpienia rezonansu. I tak według EN 1991. 2.2.(3): „Zaleca się, aby obciążenia użytkowe uwzględniane były jako quasi-statyczne. W modelach obciążeń, jeśli nie ma ryzyka rezonansu lub znaczącego dynamicznego zachowania się konstrukcji, mogą być uwzględniane efekty oddziaływania dynamicznego. W przypadku gdy można oczekiwać, że wystąpią efekty rezonansowe w wyniku synchronizowanego rytmicznego ruchu ludzi w czasie tańców lub skoków, zaleca się, aby model obliczeniowy był określony na podstawie specjalnej analizy dynamicznej”. Natomiast w przypadku zapisu dotyczącego stanu granicznego użyteczności norma PN-EN 1990:2004



podaje w punkcie A1.4.4, iż: „W celu nieprzekroczenia stanów granicznych użyteczności konstrukcji lub elementu konstrukcji z uwagi na drgania zaleca się utrzymanie częstotliwości drgań własnych konstrukcji lub elementu konstrukcji powyżej odpowiedniej wartości, zależnych od przeznaczenia użytkowego budynku i źródła drgań, oraz uzgodnionych z inwestorem i/lub właściwymi władzami.” Ponadto „Jeżeli częstotliwość drgań własnych konstrukcji jest niższa od odpowiedniej wartości, zaleca się dokonanie bardziej szczegółowej analizy odpowiedzi konstrukcji, z uwzględnieniem tłumienia.”

Dalsze informacje dotyczące efektów oddziaływań dynamicznych podaje [N2]. Powyższy dokument określa oddziaływanie tłum jako klasę B, to jest oddziaływanie, gdzie źródło drgań jest zmienne w czasie, ale o stałym miejscu. W tym przypadku wiele metod analizy może być stosowane do rozwiązania problemu drgań. Ponadto zostało określone, iż częstotliwość drgań własnych konstrukcji powinna być o 30% większa od częstotliwości wzbudzanych. Projektowanie stadionów w Wielkiej Brytanii w zakresie obciążeń opiera się na normie BS 6399 oraz na wielu publikacjach. I tak według załącznika A w normie British Standard 6399 można znaleźć sugerowany zakres częstotliwości dla wertykalnych wzbudzeń 1,5 Hz – 3,5 Hz, który dotyczy skoków i tańców jednej osoby. Powyższy zakres można zredukować do 1,5 Hz – 2,8 Hz dla większej grupy, ze względu na trudności w skoordynowanym tańcu przy wyższych częstotliwościach. Natomiast w przypadku horyzontalnych wzbudzeń nie ma aż tylu informacji. Publikacja [1] dzieli trybuny na: używane jedynie do oglądania wydarzeń sportowych, przy incydentalnej muzyce oraz używane do organizacji innych imprez masowych. W pierwszym przypadku aktywność tłumy nie jest stymulowana przez muzykę i nie jest w dużym stopniu zsynchronizowana. Autor powyższej publikacji zaleca, aby unikać sytuacji, w której częstotliwość wzbudzana jest większa niż pierwsza częstotliwość własna. Jeśli najniższa wertykalna częstotliwość własna wynosi powyżej 3,5 Hz dla pustego stadionu, wówczas nie ma zagrożenia rezonansu. Również częstotliwość drgań własnych wynosząca około 3 Hz powinna być wystarczająca, aby sprostać celowi, jakim jest zapobiegnięcie wystąpienia rezonansu. Drugą grupę obejmują wydarzenia, gdzie incydentalnie występują elementy muzyki. W odróżnieniu do koncertów muzycznych w tej grupie muzyka zapewnia małą stymulację skakania. W większości przypadków tego typu muzyka nie powoduje dyskomfortu widzów. Jednakże na obiektach o stosunkowo niskich częstotliwościach drgań własnych zaobserwowano pojawienie się czynników powodujących dyskomfort widzów siedzących. Dla tej grupy zalecaną minimalną częstotliwością drgań własnych jest 5 Hz. Dla ostatniej grupy, czyli koncertów, gdzie synchronizacja skoków i tańców jest wysoka, jeśli najniższa wertykalna często-

tliwość drgań własnych jest większa od 6 Hz dla pustego stadionu wówczas wystąpienie rezonansu jest praktycznie niemożliwe. Pomimo zapewnienia bezpieczeństwa powinno się zapewnić odpowiedni poziom komfortu widzów, dotyczy to jednak ekstremalnych koncertów i wzbudzeń. W przypadku kontroli horyzontalnych wzbudzeń dla wszystkich rodzajów trybun zalecaną wartością minimalnych horyzontalnych częstotliwości drgań własnych są 3 Hz. Jednakże, jest mało informacji dotyczących trybun stałych.

3. Analiza poziomu oddziaływań

Oddziaływanie od ciągłego skakania może być opisane przez siłę w konkretnym czasie t_p (okres kontaktu) charakteryzującą się tym, że jej wartość jest równa zero w chwili oderwania stóp od podłoża. W pracy [8] zaproponowano, aby funkcja oddziaływanie – czas była wyrażona przez sekwencje półsinusoidalnych drgań, co odpowiada pomiarom pojedynczego skakania. Funkcję oddziaływania w jednym okresie dla jednej osoby skaczącej $F_s(t)$ określa wzór:

$$F_s(t) = \begin{cases} K_p G_s \sin\left(\frac{\pi}{t_p}\right) & 0 \leq t \leq t_p \\ 0 & t_p \leq t \leq T_p \end{cases} \quad 3.1$$

gdzie: K_p – współczynnik oddziaływania (F_{\max}/G_s); F_{\max} – maksymalne obciążenie dynamiczne [N]; G_s – ciężar skaczącego [N]; t_p – czas kontaktu [s]; T_p – okres skoków [s].

Okres czasu kontaktu t_p przyjmuje wartości od 0 do wartości okresu T_p odpowiadającego poszczególnym ruchom i czynnościom. Współczynnik kontaktu α jest natomiast definiowany jako:

$$\alpha = \frac{t_p}{T_p} \leq 1,0 \quad 3.2$$

Zatem różny współczynnik kontaktu charakteryzuje różne formy czynności, co przedstawia tabela 3.1.

Tabela 3.1. Wartości współczynnika kontaktu α w zależności od formy czynności

Czynność	Współczynnik α
Ćwiczenia aerobowe o niskim oddziaływaniu	2/3
Rytmiczne wykonywanie ćwiczeń, ćwiczenia aerobowe o wysokim oddziaływaniu	1/2
Normalne skakanie	1/3

Ponadto, na podstawie eksperymentów zaobserwowano, iż w przypadku rytmicznego skakania średnia wartość oddziaływań pionowych jest zawsze równa ciężarowi osoby skaczącej. Przez porównanie równania 3.1



dla jednego okresu T_p do ciężaru G_s otrzymuje się następującą zależność:

$$K = \frac{\pi}{2\alpha} \quad 3.3$$

Z powyższego zapisu wynika więc, iż znając ciężar osoby skaczącej, częstotliwość skoków oraz formę aktywności (współczynnik kontaktu α) można wyznaczyć oddziaływanie dynamiczne.

Dla celów analizy użytecznym jest przedstawienie oddziaływania wyrażonego w dziedzinie częstotliwości jako szereg Fouriera:

- w kierunku wertykalnym:

$$F_v(t) = Q \left(1 + \sum_{n=1}^k \alpha_{n,v} \sin(2\pi nft + \varphi_{n,v}) \right) \quad 3.4$$

- w kierunku horyzontalnym:

$$F_h(t) = Q \left(1 + \sum_{n=1}^k \alpha_{n,h} \sin(2\pi nft + \varphi_{n,h}) \right) \quad 3.5$$

$\alpha_{n,v}$ – współczynnik n-tego okresu (kierunek wertykalny),

$\alpha_{n,h}$ – współczynnik n-tego okresu (kierunek horyzontalny),

n – liczba warunków Fouriera,

Q – oddziaływanie statyczne uczestniczącej osoby,

f – częstotliwość oddziaływania

$\varphi_{n,v}$ – przesunięcie fazowe n-tego okresu (kierunek wertykalny),

$\varphi_{n,h}$ – przesunięcie fazowe n-tego okresu (kierunek horyzontalny),

W tabeli 3.2 podano 6 pierwszych współczynników Fouriera oraz przesunięć fazowych dla różnych współczynników kontaktu α (dla różnych form czynności).

Tabela 3.2. Wartości współczynnika kontaktu α w zależności od formy czynności

		n=1	n=2	n=3	n=4	n=5	n=6
$\alpha=2/3$	m	9/7	9/55	2/15	9/247	9/391	2/63
	φ_n	$-\pi/6$	$-5\pi/6$	$-\pi/2$	$-\pi/6$	$-5\pi/6$	$-\pi/2$
$\alpha=1/2$	m	$\pi/2$	2/3	0	2/15	0	2/35
	φ_n	0	$-\pi/2$	0	$-\pi/2$	0	$-\pi/2$
$\alpha=1/3$	m	9/5	9/7	2/3	9/55	9/91	2/15
	φ_n	$\pi/6$	$-\pi/6$	$-\pi/2$	$-5\pi/6$	$-\pi/6$	$-\pi/2$

4. Obliczenia własne

W ramach pracy własnej opracowano dwa warianty układów konstrukcyjnych trybun stadionu. Trybuna główna (A) zaprojektowana została jako dwukondygnacyjna, natomiast pozostałe trybuny jako jednokondy-

gnacyjne. Zarówno trybuna południowo-zachodnia (A) (dwukondygnacyjna) jak i trybuna północno-wschodnia (C) (jednokondygnacyjna) zostały zaprojektowane na jednakową pojemność, tym samym dokonano porównania rozwiązań konstrukcyjnych. Ponadto, w obu przypadkach zwrócono uwagę na wpływ układu trybun na zapobiegnięcie efektowi rezonansu wywołanego synchronicznym oddziaływaniem widowni.

Trybuny zaprojektowane zostały na przybliżoną ilość widzów. Zważywszy na stan graniczny użyteczności trybuna A wypada mniej korzystnie niż trybuna B. Ugięcia trybuny dwukondygnacyjnej zbliżone są do granicznych (w przypadku trybuny wspornikowej). Natomiast ugięcia w przypadku trybuny B spełniają założenia normowe ze sporym zapasem. W przypadku częstotliwości drgań własnych oba warianty spełniają z zapasem wymagania odnośnie częstotliwości drgań własnych w kierunku wertykalnym. Jednakże zgoła odmiennie ma się to w przypadku częstotliwości drgań własnych w kierunku horyzontalnym, gdzie wartością graniczną zalecaną jest 3 Hz. Częstotliwość drgań własnych w kierunku horyzontalnym trybuny A mieści się w zalecanym zakresie, jednak konieczność spełnienia warunku częstotliwości w kierunku horyzontalnym stał się przyczyną zwiększenia sztywności słupów i belki zębatej dolnej kondygnacji. Podsumowując aspekt stanu granicznego użyteczności zaobserwowano, że nie ma ryzyka wystąpienia rezonansu spowodowanego synchronicznym skakaniem widzów, oraz że ugięcia nie przekroczą wartości dopuszczalnych zarówno w przypadku wariantu I jak i II.

W celu określenia wpływów dynamicznych oddziaływujących na konstrukcję wyznaczono zastępczy ciężar jednego widza o ciężarze 80 kG, skaczącego z częstotliwością 2 Hz. Przy wykorzystaniu powyższych informacji sporządzono wykres zależności oddziaływanie-czas dla n=6, z wykorzystaniem poniższych danych:

Tabela 4.1. Dane do wyznaczenia wykresu oddziaływanie-czas

		α	n	m	φ_n	f [Hz]	T_p [s]
n	0,33		1	1,800	0,524	2	0,5
			2	1,286	-0,524		
			3	0,667	-1,571		
			4	0,164	-2,618		
			5	0,099	-0,524		
			6	0,133	-1,571		

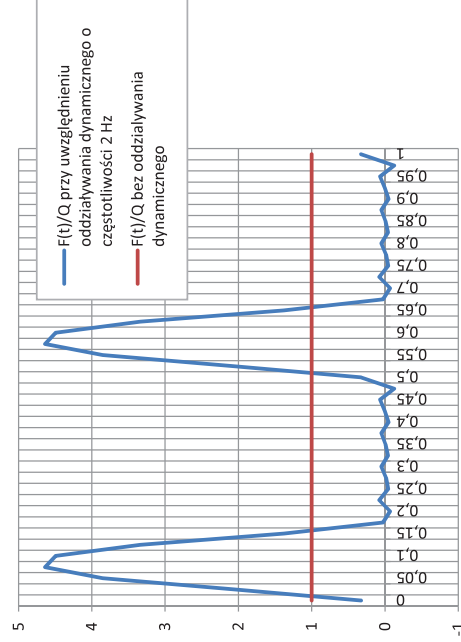
Uzyskany wykres obrazuje jak znaczny jest wzrost oddziaływania podczas przykładania obciążenia w sposób dynamiczny.

Wartość oddziaływania jest niemal 4,7-krotnie większa od oddziaływania tego samego obciążenia, ale przyłożonego statycznie. Ponadto, z powyższych obserwacji można wywnioskować, iż im wyższe skakanie tym współczynnik kontaktu mniejszy, a co za tym idzie – większe oddziaływanie maksymalne.



Tabela 4.2. Wartości współczynników dynamicznych uzależnione od czasu (dla $n=6$)

t [s]	$\sin(2 \cdot n \cdot \pi \cdot t / T_p + \Phi_n)$						F(t) [kg]	F(t)/Gs
	1	2	3	4	5	6		
1,000	0,500	-0,500	-1,000	-0,500	-0,500	-1,000	26,070	0,326
0,975	0,208	-0,914	-0,588	0,669	-0,866	0,309	-10,170	-0,127
0,950	-0,105	-0,978	0,309	0,914	0,500	0,809	5,364	0,067
0,925	-0,407	-0,669	0,951	-0,105	0,866	-0,809	0,182	0,002
0,900	-0,669	-0,105	0,809	-0,978	-0,500	-0,309	-4,016	-0,050
0,875	-0,866	0,500	0,000	-0,500	-0,866	1,000	3,990	0,050
0,850	-0,978	0,914	-0,809	0,669	0,500	-0,309	-0,617	-0,008
0,825	-0,995	0,978	-0,951	0,914	0,866	-0,809	-3,143	-0,039
0,800	-0,914	0,669	-0,309	-0,105	-0,500	0,809	4,099	0,051
0,775	-0,743	0,105	0,588	-0,978	-0,866	0,309	-1,274	-0,016
0,750	-0,500	-0,500	1,000	-0,500	0,500	-1,000	-3,351	-0,042
0,725	-0,208	-0,914	0,588	0,669	0,866	0,309	6,352	0,079
0,700	0,105	-0,978	-0,309	0,914	-0,500	0,809	-5,406	-0,068
0,675	0,407	-0,669	-0,951	-0,105	-0,866	-0,809	2,172	0,027
0,650	0,669	-0,105	-0,809	-0,978	0,500	-0,309	110,311	1,379
0,625	0,866	0,500	0,000	-0,500	0,866	1,000	267,110	3,339
0,600	0,978	0,914	0,809	0,669	-0,500	-0,309	359,473	4,493
0,575	0,995	0,978	0,951	0,914	-0,866	-0,809	371,021	4,638
0,550	0,914	0,669	0,309	-0,105	0,500	0,809	308,074	3,851
0,525	0,743	0,105	-0,588	-0,978	0,866	0,309	163,759	2,047
0,500	0,500	-0,500	-1,000	-0,500	-0,500	-1,000	26,070	0,326
0,475	0,208	-0,914	-0,588	0,669	-0,866	0,309	-10,170	-0,127
0,450	-0,105	-0,978	0,309	0,914	0,500	0,809	5,364	0,067
0,425	-0,407	-0,669	0,951	-0,105	0,866	-0,809	0,182	0,002
0,400	-0,669	-0,105	0,809	-0,978	-0,500	-0,309	-4,016	-0,050
0,375	-0,866	0,500	0,000	-0,500	-0,866	1,000	3,990	0,050
0,350	-0,978	0,914	-0,809	0,669	0,500	-0,309	-0,617	-0,008
0,325	-0,995	0,978	-0,951	0,914	0,866	-0,809	-3,143	-0,039
0,300	-0,914	0,669	-0,309	-0,105	-0,500	0,809	4,099	0,051
0,275	-0,743	0,105	0,588	-0,978	-0,866	0,309	-1,274	-0,016
0,250	-0,500	-0,500	1,000	-0,500	0,500	-1,000	-3,351	-0,042
0,225	-0,208	-0,914	0,588	0,669	0,866	0,309	6,352	0,079
0,200	0,105	-0,978	-0,309	0,914	-0,500	0,809	-5,406	-0,068
0,175	0,407	-0,669	-0,951	-0,105	-0,866	-0,809	2,172	0,027
0,150	0,669	-0,105	-0,809	-0,978	0,500	-0,309	110,311	1,379
0,125	0,866	0,500	0,000	-0,500	0,866	1,000	267,110	3,339
0,100	0,978	0,914	0,809	0,669	-0,500	-0,309	359,473	4,493
0,075	0,995	0,978	0,951	0,914	-0,866	-0,809	371,021	4,638
0,050	0,914	0,669	0,309	-0,105	0,500	0,809	308,074	3,851
0,025	0,743	0,105	-0,588	-0,978	0,866	0,309	163,759	2,047
0,000	0,500	-0,500	-1,000	-0,500	-0,500	-1,000	26,070	0,326



Rys. 4.1. Wykres wpływu oddziaływań dynamicznych w czasie dla osoby ważącej 80 kg i skaczącej z częstotliwością 2 Hz

Z analizy dynamicznej do dalszego wyznaczenia efektów oddziaływań przyjęto wertykalną siłę dynamiczną $F_v=371,02/9,81=3,64$ kN, natomiast horyzontalną siłę dynamiczną $F_h=0,1 \cdot 3,64$ kN $=0,364$ kN.

Tabela 4.3. Zestawienie wyników pierwszych trzech częstotliwości drgań własnych dla poszczególnych typów trybun. Przez pogrubienie oznaczono wartości mniejsze od zalecanych (w kierunku wertykalnym 6 Hz, w kierunku horyzontalnym 3 Hz)

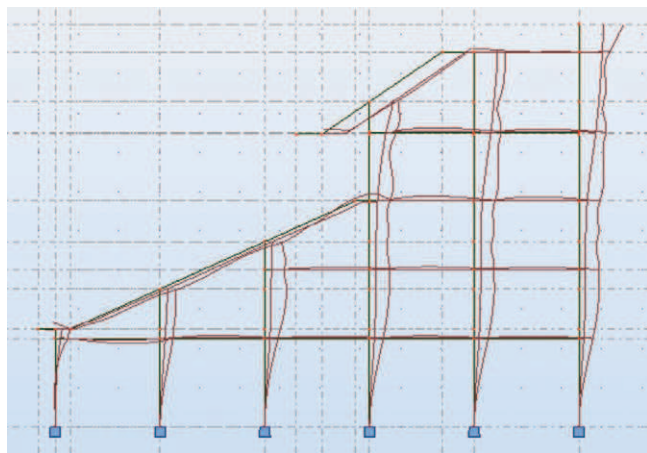
Wariant trybuny	Pierwsze 3 częstotliwości drgań własnych		Pierwsze 3 częstotliwości drgań własnych po optymalizacji	
	masa rozłożona wertykalnie	masa rozłożona horyzontalnie	masa rozłożona horyzontalnie	masa rozłożona horyzontalnie
Jednokondygnacyjna	21,06	4,08	brak optymalizacji, rezonans nie wystąpi	
	26,65	13,02		
	28,65	24,99		
Dwukondygnacyjna	14,58	2,28	3,01	
	21,31	4,33	6,07	
	24,47	16,12	20,07	

Ponadto, sprawdzono częstotliwości drgań własnych ustrojów z wykorzystaniem analizy modalnej w programie Robot Structural Analysis Professional 2011. Uzyskano wyniki wskazujące na ryzyko wystąpienia rezonansu w przypadku trybuny dwukondygnacyjnej.

Z rysunku 4.2. wynika, że należy zwiększyć głównie sztywność słupów. Przy zwiększeniu wysokości przekroju wszystkich słupów do $h=0,7$ m pierwsza częstotliwość drgań własnych wyniosła ok. 2,95 Hz, zwiększanie sztywności belki zębatej górnej kondygnacji nie ma zbyt sensu (z racji tego, że się ona nie deformuje, a przesuwają pod wpływem deformacji ustroju), zdecydowano się zwiększyć wysokość przekroju belki zębatej dolnej z $h=0,4$ m do $h=0,45$ m. Zdecydowano się obniżyć klasę betonu ze względu na zwiększenie parametrów charakterystyk przekrojów elementów. Ostatecznie uzyskano w kierunku horyzontalnym: $f=3,01 > 3$ Hz.

5. Podsumowanie

Obecnie stadiony nie są jedynie obiektami przeznaczonymi do wydarzeń sportowych, lecz również dąży się do przystosowania ich do wszelkiego rodzaju imprez masowych m.in.



Rys. 4.2. Deformacje od „przypadku” „drgania własne” przy masie rozłożonej horyzontalnie

koncertów. Największą synchronizację ekscytacji osiąga się podczas koncertów, gdzie tłum może skakać, tupać, klaskać czy kołysać się w rytm muzyki. Poziom tego typu oddziaływań jest większy niż w przypadku meczów piłki nożnej. Głównym problemem zarówno przy ocenie jak i projektowaniu jest zapewnienie bezpieczeństwa osób znajdujących się na trybunach oraz zapewnienie im odpowiedniego poziomu komfortu. Oznacza to, iż konstrukcja trybuny powinna być tak zaprojektowana, aby nie było zagrożenia zawaleniem oraz, aby nie występowały czynniki paniki spowodowane wpływami dynamicznymi.

Jeśli oddziaływanie dynamiczne tłumy jest ograniczone do wąskiego zakresu częstotliwości oraz gdy niezbędna do rozważenia jest ograniczona liczba warunków Fouriera, wówczas możliwe jest zdefiniowanie minimalnej częstotliwości dla danej konstrukcji, aby zapobiec problemom bezpieczeństwa wynikającym z oddziaływań dynamicznych. Zapewnia to stosunkowo proste kryteria, które są wygodne podczas procesu projektowania konstrukcji. Jednakże należy pamiętać, że nie oznacza to, że konstrukcja z niższą częstotliwością będzie zawodna. Jeśli

obliczenia wykazałyby na przykład wyniki częstotliwości konstrukcji nie do zaakceptowania, wówczas stosuje się rozmaite zabiegi ograniczające m.in. ograniczając liczebność tłumy zgromadzonego na trybunie.

Praca [5] podaje, iż najlepszą drogą uniknięcia drgań rezonansowych jest zaprojektowanie takiej konstrukcji, która w każdych warunkach wymuszeń dynamicznych będzie się charakteryzowała występowaniem sytuacji strojenia wysokiego. Analizę dynamiczną ustroju kończy się na określeniu najniższej częstotliwości drgań własnych, która powinna być 1,2–1,3-krotnie mniejsza od częstotliwości drgań wymuszonych. [5]

BIBLIOGRAFIA:

- [1] The Institution of Structural Engineers. Dynamic performance requirements for permanent grandstands subject to crowd action. Interim guidance on assessment and design. Published by The Institution of Structural Engineers, November 2001
- [2] Ellis B., Ji. T., Littler J. D., The response of grandstands to dynamic crowd loads. Proc. Instn Civ. Engrs Structs & Bldgs, 2000
- [3] Kisiel I., Dynamika fundamentów pod maszyny, PWN, Warszawa 1957
- [4] Timoshenko S., Young D. H., Advanced Dynamics, McGraw-Hill, 1948
- [5] Marcinowski J., Zagrożenia obiektów budowlanych wynikające z powstania drgań o charakterze rezonansowym, Przegląd Budowlany 5/2012
- [6] Kappos A. J., Dynamic loading and design of structures, Material, London 2002
- [7] Szulej J., Wyznaczenie ekwiwalentnego wiskotycznego tłumienia drgań w konstrukcjach wielomateriałowych, Politechnika Lubelska 2010
- [8] Ellis B., Ji. T., The response of structures to dynamic crowd loads, Digest 426 2004 Edition
- [9] Ellis B., Ji. T. and Bell A. J., Horizontal movements of frame structures induced by vertical loads, Proceedings of the Institution of Civil Engineers Structures & Buildings 156, May 2003 Issue 592

WYKORZYSTANE MATERIAŁY:

- [N1] PN-EN 1990 Eurokod, Podstawy projektowania konstrukcji, październik 2004. PKN, Warszawa 2004
- [N2] ISO 10137:2007(E) Bases for design of structures – Serviceability of buildings and walkways against vibrations
- [N3] PN-EN 1991-1-1 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-1: Oddziaływania ogólne. Ciężar objętościowy, ciężar własny, obciążenia użytkowe w budynkach, październik 2004. PKN, Warszawa 2004

Ogłoszenie o konferencji „Konstrukcje zespolone”

W dniu 26-27 czerwca 2014 roku na Wydziale Inżynierii Lądowej i Środowiska Uniwersytetu Zielonogórskiego odbędzie się pod patronatem Przewodniczącego Komitetu Inżynierii Lądowej i Środowiska PAN Konferencja Naukowa „Konstrukcje zespolone”. Będzie to kolejna X jubileuszowa konferencja, organizowana co 3 lata w Zielonej Górze. Tematyka konferencji obejmuje:

- Teoria konstrukcji zespolonych
- Badania
- Realizacje
- Wzmocnienia
- Mosty
- Diagnostyka

- Normalizacja
- Nowe technologie
- Projektowanie
- Podatne konstrukcje gruntowo-powłokowe
- Perspektywy rozwoju

W konferencji tradycyjnie udział biorą pracownicy nauki, projektanci i wykonawcy.

Informacji udziela Biuro konferencji:

Tel. 68 3282416, 068 3287396, 68 3282320,
Fax 68 3284777

E-mail: Konstrukcje-zespolone@uz.zgora.pl

Więcej informacji na stronie:

www.konstrukcje-zespolone.uz.zgora.pl