

Tomasz Kwiatkowski

TRÓJWARIANTOWA ANALIZA DYNAMICZNA RAMY NOŚNEJ DWUNAWOWEJ HALI STALOWEJ

Wprowadzenie

W dzisiejszych czasach projektowanie obiektu budowlanego jest procesem złożonym z kilku faz. Na początku przyjmuje się koncepcję dotyczącą wyglądu budynku, usytuowania i przeznaczenia. W działaniach tych operuje się metodami, procedurami i technikami w ramach przestrzeni informacji i ogólnej uznanej metodologii projektowania [1]. Do obliczeń konstrukcyjnych niezbędne są założenia architektoniczno-funkcjonalne, na ich podstawie prowadzi się wstępne analizy obliczeniowe w celu opracowania koncepcji systemu konstrukcyjnego układu nośnego obiektu. W kolejnym etapie dokonuje się optymalnego wyboru koncepcji dotyczącej schematu statycznego konstrukcji. Robi się to tak, aby przyjmowany schemat statyczny był jak najbardziej zbliżony do rzeczywistego [2]. Uwzględnia się coraz częściej dynamiczne efekty spowodowane przez wiatr (np. w drapaczach chmur), trzęsienia ziemi, pracę maszyn, ruch drogowy, wybuch w kamieniołomach, fale morskie oraz ruch od pojazdów kolejowych. Stały się one ważne w procesie projektowania konstrukcji, ponieważ mają wpływ na ich bezpieczeństwo i trwałość. Duże możliwości daje nam rozwój techniki i tworzenie coraz to nowszych i trwalszych materiałów. Taki to właśnie potencjał skłania dzisiejszych projektantów do tworzenia coraz to większych i wyższych budowli. To z kolei prowadzi do tego, że coraz częściej konstrukcja obliczana jest nie tylko pod względem statycznym, ale także dynamicznym.

1. Obciążenia dynamiczne i eliminatory drgań

Obciążenia dynamiczne możemy podzielić, biorąc pod uwagę kilka czynników. Pierwszy z nich stanowi pochodzenie obciążenia dynamicznego, ustalenie, czym może być wywołane, np. ruchem pojazdów lub ludzi, parciem lub opływem wiatru, trzęsieniem ziemi lub maszynami. Drugim czynnikiem jest charakter obciążenia, może być on losowy (wartości i przebiegu w czasie nie znamy) lub deterministycz-

ny, czyli spowodowany ruchem maszyn. Trzecim czynnikiem jest czas oddziaływania dynamicznego obciążenia, które może być nieokresowe (np. obciążenie impulsywne) lub okresowe, czyli jednoharmoniczne lub poliharmoniczne. Ostatnim czynnikiem jest charakter losowy obciążenia, czyli stacjonarny, np. parcie wiatru, i niestacjonarny, np. trzęsienie ziemi [3, 4]. Przeciwdziałanie skutkom obciążeń dynamicznych, czyli drganiom, możemy osiągnąć poprzez ich redukcję. Redukcji drgań dokonujemy m.in. poprzez: metody aktywne (aktywne układy regulacji, aktywne eliminatory drgań lub aktywne tłumiki drgań), metody półaktywne (półaktywne układy regulacji, półaktywne eliminatory drgań lub półaktywne tłumiki drgań), metody pasywne (pasywne układy regulacji, pasywne eliminatory drgań lub pasywne tłumiki drgań) oraz metody hybrydowe (jest to połączenie np. metody pasywnej z metodą aktywną).

Eliminatory drgań są to dodatkowe elementy konstrukcji, urządzenia lub dodatkowe systemy zainstalowane na konstrukcji lub wbudowane w konstrukcję po to, by zmniejszyć skutek dynamicznego oddziaływania obciążenia na konstrukcję [3, 5]. Przez skutek dynamicznego oddziaływania na konstrukcję obciążenia rozumie się zwykle amplitudy drgań i przyspieszenie konstrukcji. Drgania wpływają negatywnie nie tylko na konstrukcję, ale również na człowieka oraz maszyny. Drgania mechaniczne zwane powszechnie wibracjami świadczą o stanie technicznym maszyny. Ale maszyny, które wytwarzają wibracje, mogą negatywnie wpływać na organizm człowieka, który ma bezpośredni z nimi kontakt. W wielu przypadkach długotrwały kontakt z urządzeniami wywołującymi drgania może być przyczyną licznych zmian chorobowych, takich jak: wydłużenie czasu reakcji ruchowej, zmiany w układzie kostnym, rozdrażnienie, bezsenność i wielu innych.

Drgania mechaniczne wpływają także negatywnie na urządzenia, powodując ich niezdolność do prawidłowego funkcjonowania, to znaczy zmniejszając ich żywotność, niezawodność i dokładność. Drgania mogą także doprowadzić do zniszczenia danej maszyny, jeżeli przyjmą charakter oscylacyjny i będą działać dostatecznie długo (ilość powtarzalnych cykli). Zjawisko to nosi nazwę zmęczenia materiałowego i należy się z nim prawie zawsze liczyć [4]. W przypadku maszyn i urządzeń z punktu widzenia drgań należy je traktować dwojako, to znaczy jako odbiorniki zewnętrznych drgań zakłócających oraz jako źródła drgań w przypadku maszyny o dużej dynamiczności. Wrażliwość maszyn i urządzeń na drgania zewnętrzne sprawdza się według normy. Najbardziej narażone na drgania są konstrukcje inżynierskie, przede wszystkim budynki, mosty, tamy, instalacje wielkiej chemii itd. We wszystkich tych przypadkach drgania przychodzą z zewnątrz do konstrukcji, czyli wymuszenia drgań konstrukcji mogą być jedynie zewnętrzne. Powodem tych drgań może być ruch podłoża, na którym wzniesiono budowlę, przepływ medium w rurociągu lub drgania od zainstalowanych maszyn w hali. Mogą być także wymuszenia aerodynamiczne poprzez ruch mas powietrza, udary dźwiękowe lub wybuch. Na największe drgania narażone są wysokie konstrukcje, dlatego montowane są w nich tłumiki drgań harmonicznym nazywane systemem TMD, czyli Tuned

Mass Damper, oraz AMD, czyli Active Mass Damper, albo absorber harmoniczny.

Urządzenia takiego typu są montowane w budynkach wysokościowych (wieżowcach), które narażone są przede wszystkim na ruchy mas powietrza oraz trzęsienia ziemi. Zasada ich działania jest prosta, mają za zadanie zamortyzować wstrząsy i drgania. Działają na zasadzie przeciwwagi, poruszając się w przeciwnym kierunku niż budynek, w którym są zamontowane. System TMD jest zamontowany między 92 a 87 piętrem wieżowca o nazwie Taipei 101 na Tajwanie, ma ok. pięć i pół metra średnicy, kosztował prawie 4 miliony dolarów. Jest to wielka stalowa kula skonstruowana z 41 stalowych płyt zawieszonych na stalowych linach o średnicy 9 cm i jest w stanie wytłumić nawet do 40% drgań budynku [6, 7]. Ma ona za zadanie zapobiegać skutkom wibracji, począwszy od zwykłego dyskomfortu, a skończywszy na zniszczeniu konstrukcji.

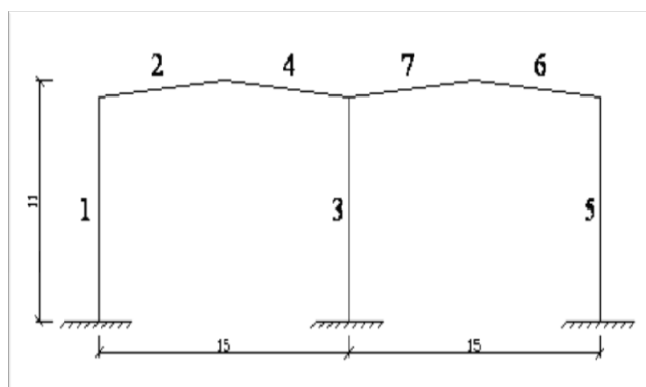
Wiadukty i mosty, po których porusza się pociąg, zabezpiecza się coraz częściej systemem ERS, który zapewnia sprężyste, ciągłe mocowanie szyn przy jednoczesnej izolacji elektrycznej toru na całej jego długości. System ERS jest stosowany w bezpodsytkowych nawierzchniach szynowych na obiektach, gdzie wymagana jest istotna redukcja wibracji i poziomu hałasu, powstałych na skutek ruchu pojazdów szynowych. Bardzo dobre tłumienie drgań, mała masa oraz zmniejszona wysokość konstrukcji powodują, że system szyny w otulinie (ERS) doskonale sprawdza się na obiektach inżynierskich. W mostach stalowych, gdzie zastosowano system ERS, hałas może być zredukowany nawet o kilkanaście decybeli w stosunku do tradycyjnej nawierzchni [8].

W ostatnich latach postawiono wiele konstrukcji stalowych, takich jak hale produkcyjne, magazyny itp. Są to konstrukcje o dość dużych gabarytach i właściwe dobranie schematu statycznego może nie tylko obniżyć koszt budowy, ale także wpłynąć korzystnie na zachowanie się konstrukcji podczas obciążenia dynamicznego (np. od ruchu suwnic). W dalszej części omówiono najczęściej stosowane rozwiązania statyczne stosowane do budowy hal stalowych.

2. Podstawowe założenia

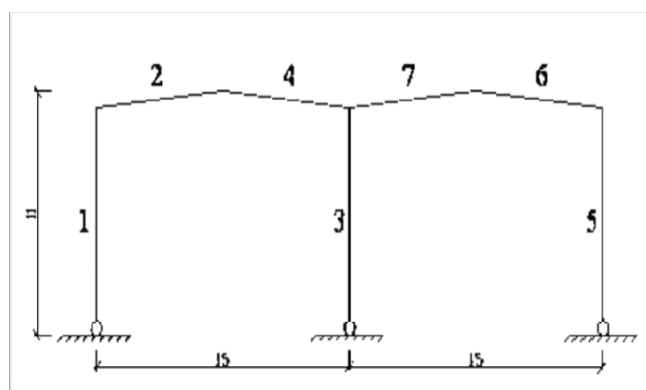
Do obliczeń przyjęto trzy schematy ram hali dwunawowej o wymiarach: wysokość hali $H = 11$ m, szerokość $B = 15$ m, rozstaw rygli w kierunku podłużnym hali $L_w = 9$ m, liczba przęseł $n = 11$ i spadek połaci dachowej 10%. Wszystkie schematy hal obciążono takimi samymi obciążeniami; od wiatru, śniegu i ciężaru stałego. Będą się jedynie różnić schematami statycznymi.

Schemat pierwszy to rama połączona sztywno z fundamentem i ryglami. Taki układ ma dużo zalet, na przykład posiada dużą sztywność w kierunku poprzecznym, co umożliwia stosowanie ciężkich suwnic, ma możliwość wzmocnienia konstrukcji przy zmianie procesu technologicznego itp. Schemat pierwszy przedstawiony jest na rysunku 1.



Rys. 1. Rama nośna dwunawowej hali stalowej (schemat 1)

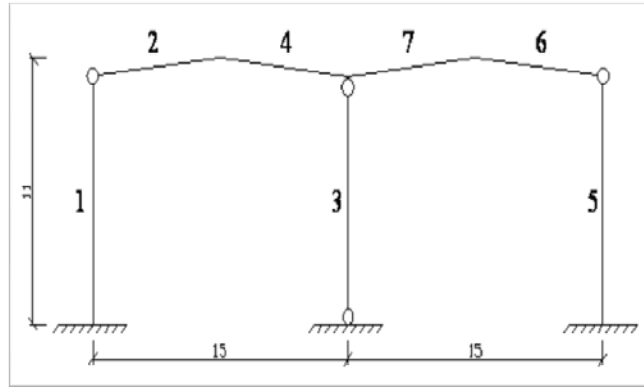
Schemat drugi to rama połączona przegubowo z fundamentami, a sztywno z ryglami. Zaletą takiego układu jest przede wszystkim możliwość stosowania nowoczesnych metod montażu, niskie zużycie stali, duża sztywność wzdłuż osi poprzecznej hali. Schemat drugi przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Rama dwunawowa połączona przegubowo z fundamentem, a sztywno z ryglami (schemat 2)

Jako trzeci schemat przyjęto ramę, w której słupy skrajne są połączone sztywno z fundamentem, a z ryglami przegubowo, natomiast słup środkowy jest połączony z fundamentem i ryglami przegubowo, jest to bardzo charakterystyczne rozwiązanie w halach dwu- i wielonawowych. Tak połączone słupy noszą nazwę słupów wahliwych, są to zazwyczaj słupy pośrednie lub skrajnie usytuowane pomiędzy nawami. Schemat trzeci jest pokazany na rysunku 3.

Dla trzech schematów statycznych (ramy nośnej hali dwunawowej) będzie przeprowadzona analiza modalna. Schematy będą porównywane ze sobą, a ponadto przeprowadzona zostanie dodatkowa analiza modalna dla poszczególnych ram, w których będzie skracana długość słupa.



Rys. 3. Rama nośna dwunawowej hali stalowej (schemat 3)

Ugięcie dopuszczalne dla wszystkich schematów statycznych ram nośnych hali dwunawowej wynosi (tablica 4 w normie PN-90/B-03200):

$$U_{\text{dop}} = \frac{L}{250}; \quad U_{\text{dop}} = \frac{15}{250}; \quad U_{\text{dop}} = 0,06 \text{ m}; \quad U_{\text{dop}} = 6 \text{ cm} \quad (1)$$

gdzie:

L - rozpiętość elementu, m.

Przemieszczenie węzłów górnych dla słupów wynosi:

$$W_{\text{dop}} = \frac{l}{150}; \quad W_{\text{dop}} = \frac{10,25}{150}; \quad W_{\text{dop}} = 0,0683 \text{ m}; \quad W_{\text{dop}} = 6,83 \text{ cm} \quad (2)$$

gdzie:

l - wysokość słupa, m.

Dla analizowanych schematów statycznych w tabeli 1 zamieszczono parametry ugięć i przemieszczeń poszczególnych ram, natomiast w tabeli 2 podano wykaz przyjętych profili.

TABELA 1

Ugięcia i przemieszczenie poszczególnych ram

Schemat 1	UX cm	UZ cm	Schemat 2	UX cm	UZ cm	Schemat 3	UX cm	UZ cm
MAX	3,8	0,6		6,6	0,5		4,2	0,7
Pręt		2			2			2
Węzeł	7			7			7	
Przypadek	SGU/2	SGU/5		SGU/2	SGU/5		SGU/2	SGU/5

TABELA 2

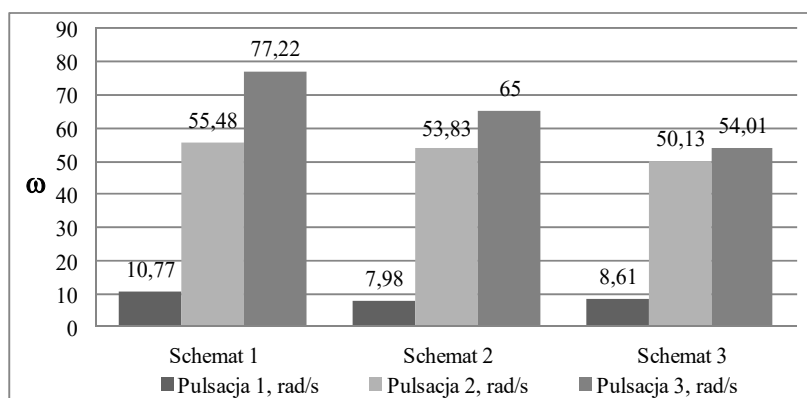
Wykaz przyjętych profili

Schemat 1	Profile	Schemat 2	Profile	Schemat 3	Profile
Słupy skrajne	HEB 200		HEM 260		HEM 260
Rygle	IPE 600		IPE 600		IPE 600
Słupy środkowe	HEB 200		HEB 260		HEB 240

Wszystkie obliczenia dynamiczne oraz wymiarowanie konstrukcji zostały wykonane za pomocą programu komputerowego firmy Autodesk o nazwie Robot Millenium. Wszystkie obliczenia i zestawienia obciążeń zostały wykonane według polskich norm.

3. Porównanie schematów ram pod względem modalnym

Na rysunku 4 zostały przedstawione wyniki analizy modalnej dla ram o wyjściowych gabarytach.



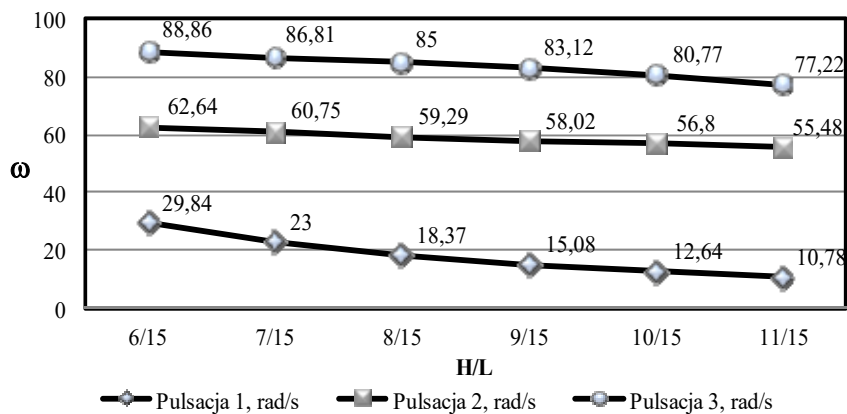
Rys. 4. Wykresy drgań własnych dla poszczególnych schematów statycznych

Jak widać z powyższego wykresu, najniższą częstotliwość drgań własnych przyjmuje schemat 3, a najwyższą schemat 1. Najbardziej niekorzystny pod względem dynamicznym staje się schemat 3, ponieważ jego częstota drgań jest najniższa. Łatwo więc można konstrukcję wprowadzić w drgania, a co za tym idzie, gdy dojdzie do cyklicznego powtarzania drgań, może to doprowadzić ją do rezonansu, co z kolei prowadzi do zniszczenia konstrukcji. Sprzyjająca sytuacja dla konstrukcji to taka, w której przy rozruchu jakiegoś urządzenia siła wymuszająca osiąga przez moment pierwszą częstotliwość drgań własnych konstrukcji, a następnie stabilizuje się między pierwszą a drugą częstotliwością drgań własnych. Wykres ten pokazuje wyraźnie, że dobór schematu statycznego wpływa na częstotliwość drgań własnych konstrukcji. Dla-

tę przy tworzeniu projektu ważny jest wybór schematu, który jest uzależniony od takich czynników, jak: lokalizacja przyszłej konstrukcji, strefa klimatyczna czy technologia, co także wpływa na wytyczenie elementów rozpatrywanej konstrukcji.

Analiza modalna ramy nośnej hali dwunawowej

Na rysunkach 5-7 zostały przedstawione wyniki uzyskane dla poszczególnych przypadków modyfikacji długości słupa (był skracany co 1 m). Wysokość ramy zmniejsza się od 11 do 6 m. Rozpiętość nawy oznaczono literą L, a wysokość ramy w kalenicy literą H.

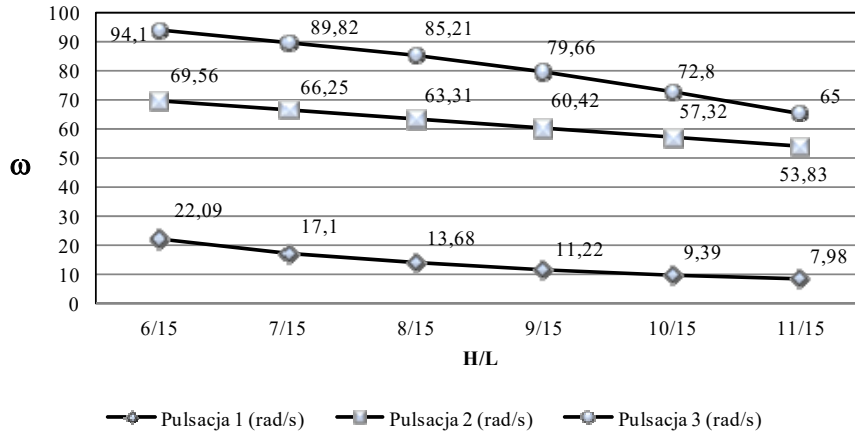


Rys. 5. Częstota drgań własnych dla wariantu pierwszego (schemat 1)

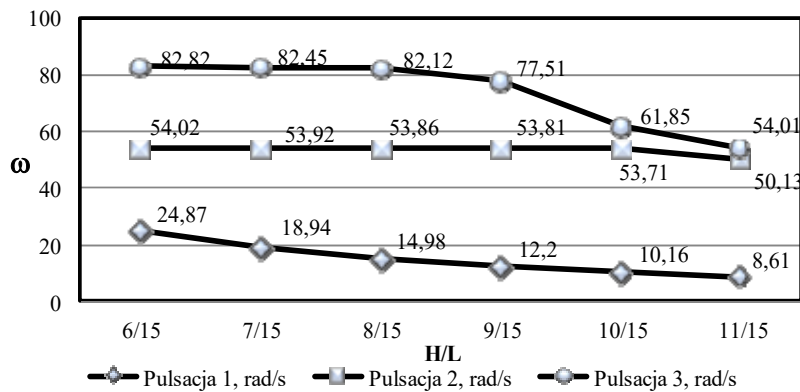
Jak widać z powyższego wykresu, manipulowanie wysokością słupa (czyli skracanie słupa) może nam pomóc nie tylko w redukcji drgań, ale także w doborze odpowiednich przekrojów na dane elementy konstrukcji. Jednak niezwykle rzadko taka manipulacja jest możliwa - założenia technologiczne i funkcjonalne narzucają zazwyczaj projektantowi gabaryty (w tym wysokość) obiektu. Projektuje się przeważnie budynki o minimalnej wysokości ze względu zarówno na koszty wznoszenia, jak i eksploatacji (ogrzewanie). Częstota drgań konstrukcji wraz ze spadkiem jej wysokości rosła, powodując, że konstrukcja stała się bardziej sztywna, to znaczy, że jej podatność na oddziaływania zewnętrzne malała. Gdy siła wymuszająca będzie miała wyższą lub zbliżoną częstotliwość do częstotliwości drgań własnych konstrukcji, wówczas może wystąpić rezonans. Na wykresie przedstawiono ten wzrost dla trzech pierwszych postaci drgań.

Zmiana wysokości słupa w drugim schemacie statycznym wpłynęła także korzystnie na częstotliwość drgań własnych konstrukcji. Widać wyraźnie, że podczas zmiany (czyli skracania słupa) nie tylko doszło do wzrostu częstotliwości drgań, co pokazuje, że konstrukcja staje się sztywniejsza, ale także można zaobserwować zmniejszenie wytyczenia przekrojów elementów konstrukcji. Zmniejszenie wytyczenia jest na tyle duże, że można zastosować mniejsze profile, które będą bardziej ekonomiczne, lżejsze oraz tańsze. Zmniejszenie profili prowadzi do zmniejszenia

masy konstrukcji, ale także i spadku sztywności, co wpływa na zmniejszenie częstości drgań. Bez dokładnej analizy (przy zapewnieniu porównywalnego wyężenia przekrojów) takie wnioski są nieuprawnione. Niestety, są to wielkości sprzężone ze sobą, dlatego dla uproszczenia obliczeń i możliwości porównania zachowano profile. Przesztynianie konstrukcji (tutaj przez zmniejszanie wysokości) jest sposobem tzw. strojenia konstrukcji.



Rys. 6. Częstość drgań własnych dla wariantu drugiego (schemat 2)



Rys. 7. Częstość drgań własnych dla wariantu trzeciego (schemat 3)

Zmiana wysokości spowodowała wzrost częstości drgań własnych konstrukcji oraz spadek wyężenia przyjętych przekrojów. Jednak można zauważyć, że w tym przypadku między drugą a trzecią częstością drgań jest bardzo mały skok. Dopiero przy skróceniu słupa o 2 m skok między częstościami zaczyna być znaczący.

Wnioski

Rozpatrywane były trzy warianty schematów statycznych. Analiza miała na celu ukazanie najbardziej korzystnego schematu statycznego pod względem dynamicznym. Trzy przyjęte schematy zostały poddane tym samym obciążeniom zewnętrznym, z których utworzono kombinacje normowe. Następnie przeprowadzono na nich analizę modalną. Ponadto został założony graniczny zakres wyężenia prętów od 50 do 95%, jak również dopuszczalne ugięcie (wzór (1)) oraz dopuszczalne przemieszczenie (wzór (2)).

Na podstawie danych z wykresów oraz zestawienia poszczególnych schematów można wywnioskować, że najkorzystniejszym schematem statycznym jest schemat 1. Zaletami tego schematu jest wysoka (najwyższa z tych trzech schematów) częstość drgań własnych konstrukcji, możliwość dobrania takich samych przekrojów do każdego słupa, duża sztywność w kierunku poprzecznym (umożliwia stosowanie na przykład ciężkich suwnic), możliwość wzmocnienia konstrukcji przy zmianie procesu technologicznego oraz mały (w porównaniu z innymi schematami) ciężar ramy. Zmiana wysokości słupa nadaje temu schematowi większą sztywność oraz stwarza możliwość zastosowania mniejszych przekrojów. Jednak w rzeczywistości taka manipulacja jest niezwykle rzadko stosowana i możliwa, ponieważ projektantowi z góry narzuca się założenia technologiczne i funkcjonalne hali.

Obliczając lub kształtując konstrukcję, należy przyjmować takie wymiary i kształty, aby przy najmniej korzystnych obciążeniach naprężenia w materiale nie przekraczały określonej wytrzymałości. Dobranie odpowiedniego schematu statycznego może pomóc w wymiarowaniu konstrukcji.

Literatura

- [1] Szymczak C., Podstawy teorii projektowania, WN PWN, Warszawa 1998.
- [2] Łapko A., Jenssen B.C., Podstawy projektowania i algorytmy obliczeń konstrukcji żelbetowych, Arkady, Warszawa 2009.
- [3] Lewandowski R., Redukcja drgań konstrukcji budowlanych, Wykład obieralny 2002, 03.
- [4] Lewandowski R., Dynamika konstrukcji budowlanych, Politechnika Poznańska, Poznań 2006.
- [5] <http://m-bridge.blogspot.com/2008/04/pont-de-normandie.html>
- [6] [http://pl.wikipedia.org/wiki/System_TMD_\(04.2009\)](http://pl.wikipedia.org/wiki/System_TMD_(04.2009))
- [7] [http://pl.wikipedia.org/wiki/Taipei_101_\(2009\)](http://pl.wikipedia.org/wiki/Taipei_101_(2009))
- [8] [http://www.tines.pl/pl/Zastosowanie/Kolej/Mosty_i_wiadukty/484_\(2009\)](http://www.tines.pl/pl/Zastosowanie/Kolej/Mosty_i_wiadukty/484_(2009))

Streszczenie

Tematem niniejszego artykułu jest trójwariantowa analiza dynamiczna ramy nośnej dwunawowej hali stalowej. Zaprezentowano podział obciążeń dynamicznych, metody redukcji drgań oraz opisano oddziaływanie drgań na organizm człowieka, konstrukcje i urządzenia. W artykule zostały przyjęte trzy schematy statyczne dla dwunawowej hali stalowej o jednakowych gabarytach. Każdemu schematowi narzucone zostały takie same obciążenia, na podstawie których wygenerowano kombinacje normowe za pomocą programu komputerowego. Następnie przeprowadzono analizę modalną dla

każdego z trzech schematów. Wszystkie obliczenia zostały przeprowadzone w programie komputerowym firmy Autodesk o nazwie Robot Millennium. Wyniki analiz przedstawiono w formie wykresów. Na podstawie danych z wykresów oraz porównania poszczególnych schematów zostało wybrane najkorzystniejsze rozwiązanie dla ramy nośnej pod względem dynamicznym.

Drei dynamische Varianten der Analyse der tragenden zwei-schiffigen Stahlhalle

Zusammenfassung

Es wurde eine Einteilung der dynamischen Belastungen, Methode der Reduktion von Schwingungen, sowohl eine Wirkung der Schwingungen auf Menschen, Konstruktionen und Vorrichtungen vorgestellt. Im Rahmen des Bauplanes wurden drei statischen Schemas mit den gleichen Abmessungen für die Stahlhalle ausgewählt. Jedem Schema wurden dieselben Belastungen zugeordnet anhand, dessen wurde eine Normkombination durch ein Computerprogramm erlangt. Dann wird eine Modalanalyse für jeden Schema durchgeführt. Alle Ausrechnungen wurden in einem Computerprogramm Autodesk - Robot Millennium ausgeführt. Die Ergebnisse der Analysen werden in Form von den Diagrammen vorgestellt. Aufgrund der Diagrammen und des Schemavergleiches wurde die günstigste Lösung in dynamischer Hinsicht für tragenden Rahmen gewählt.