

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВІЛЬНИХ КОЛИВАНЬ ПРОГІННИХ БУДОВ ТИПУ 690/7К

Розглянуто результати теоретичних досліджень перших шести форм вільних коливань металевих прогінних будов з розрахунковим прогоном 110 м, виготовлених за типовим проектом 690/7К.

Рассмотрены результаты теоретических исследований первых шести форм свободных колебаний металлических пролетных строений с расчетным пролетом 110 м, изготовленных по типовому проекту 690/7К.

The paper considers the outcomes of theoretical research of the first six forms of free vibration of metallic span structures with design span of 110 m, manufactured under the standard project 690/7K.

На залізничній мережі країн СНД експлуатуються виготовлені за індивідуальними проектами і типові металеві прогінні будови. Серед типових прогінних будов для перекриття великих прогонів багато і таких, що виготовлені за типовим проектом 690/7 і 690/7К.

Під час експлуатації мости, крім статичних навантажень, зазнають також і динамічних навантажень, до яких відносяться сили інерції. Сили інерції збільшують напруження в елементах мостових конструкцій і можуть створювати затруднення для їх нормальної експлуатації [1].

У сучасних умовах введення на залізничному транспорті нових типів рухомого складу з підвищеними навантаженнями на осі й швидкісного руху пасажирських поїздів, дослідження динаміки прогінних будов мостів отримує особливу актуальність. Розглядати взаємодію такої складної системи, як система «прогінна будова + поїзд» неможливо без знання динамічних характеристик вільних коливань безпосередньо прогінної будови.

Нижче розглядаються динамічні характеристики вільних коливань металевих прогінних будов розрахунковим прогоном 110 м типу 690/7К. Раніше теоретичні дослідження власних просторових коливань таких прогінних будов не провадилися.

Типовий проект 690/7К прогінних будов із величиною розрахункового прогону 110 м розробив Діпротрансміст у 1968 р. Прогінні будови мають їзду низом. Головні ферми висотою 15 м мають паралельні пояси і трикутну решітку з додатковими стояками і підвісками. Довжина панелі головних ферм – 11,0 м, довжина панелі вітрових в'язей – 5,5 м, відстань між осями головних ферм – 5,8 м.

Проїжджа частина включена в сумісну роботу з нижніми поясами головних ферм за допомо-

гою нижніх поздовжніх в'язей і спеціальних діафрагм. Всі елементи головних ферм зварні з монтажними з'єднаннями на високоміцних болтах. Перерізи поясів і розкосів коробчасті і складаються із двох вертикальних листів, верхнього горизонтального суцільного і нижнього горизонтального перфорованого листа. Висота перерізу елементів для поясів прийнята 650 мм, для порталних розкосів 800 мм, для проміжних розкосів 650 і 450 мм. Ширина коробки однакова для всіх елементів головних ферм і дорівнює 526 мм.

Підвіски і стояки мають переріз Н-подібного типу. Стики поясів суміщені з вузлами головних ферм і розташовані через 11,0 м. Головні ферми з'єднані поздовжніми в'язями в площині нижніх і верхніх поясів, опорними поперечними в'язями (порталами) і поперечними в'язями у площині стояків. Нижні і верхні поздовжні в'язі мають хрестову решітку.

Дослідження роботи залізничних мостів при складних динамічних навантаженнях потребує знання параметрів вільних просторових коливань прогінних будов. З цією метою в галузевій науково-дослідній лабораторії штучних споруд Дніпропетровського національного університету імені академіка В. Лазаряна для визначення частот і форм вільних коливань металевих прогінних будов типу 690/7К використовувалися наближені формули і метод скінченних елементів.

Наближені формули

В існуючій літературі, яка стосується питань динамічного розрахунку залізничних мостів, наведена велика кількість формул, що дозволяють з різним ступенем точності визначити період, а отже, і частоту вільних коливань прогінних будов із наскрізними головними фермами. Вва-

жається, що для періодів вертикальних коливань досить точні результати можуть бути одержані при використанні формули [1]

$$T = 0,9 \sqrt{\frac{\sigma_p}{E}} \cdot \frac{l}{\sqrt{h}},$$

де T – період вертикальних коливань, с; σ_p – середнє розрахункове напруження, яке виникає в поясах головних ферм в середині прогону від постійного навантаження, МПа; E – модуль пружності матеріалу прогінної будови, МПа; l – довжина розрахункового прогону, м; h – теоретична висота головних ферм, м.

За результатами обчислень період вільних вертикальних коливань прогінної будови дорівнює 0,433 с і відповідно частота 2,31 Гц.

Розрахункова величина періоду вільних горизонтальних коливань визначалась за формулою [3]

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{C}},$$

де M – приведена маса прогінної будови; C – розрахункова характеристика горизонтальної жорсткості прогінної будови.

Отримане за цією формулою значення періоду вільних горизонтальних коливань дорівнює 1,106 с, що відповідає частоті коливань 0,90 Гц.

Період крутильних коливань прогінної будови визначається за формулою

$$T = 6l \left(5 + \frac{h}{b} \right) \cdot 10^{-4},$$

де h – теоретична висота головних ферм, м; b – відстань між осями головних ферм, м.

Розрахункові величини періоду і частот крутильних коливань дорівнюють відповідно 0,498 с і 2,01 Гц.

Система з дискретними масами

Для побудови форм просторових коливань і уточнення значень частот прогінної будови використовувалася також методика, що була розроблена канд. техн. наук В. П. Тарасенко і відома під назвою «методика ДІТу» [4]. Згідно з цією теорією основна система з нескінченною кількістю степенів вільності замінюється еквівалентною системою з декількома степенями вільності шляхом приведення мас. Крім того, в розрахунках нехтували поздовжніми деформаціями стояків головних ферм, розпірок вітрових ферм і поперечних балок.

З урахуванням прийнятих допущень отримана система має чотири степені вільності (рис. 1).

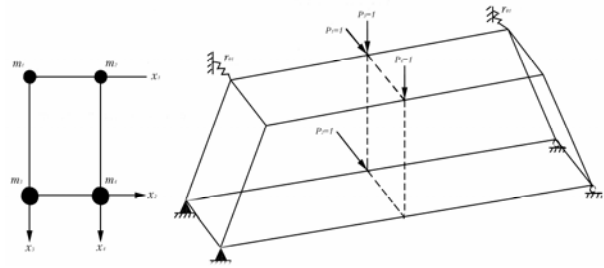


Рис. 1. Розрахункова схема прогінної будови

Для такої системи рівняння частот у матричній формі можна записати так:

$$|A_1 - \lambda E| = 0,$$

де λ – власне число матриці добутку $A_1 = AM$; E – одинична матриця; A – матриця одиничних переміщень; M – діагональна матриця мас.

Задача визначення частот і форм власних коливань зводиться до визначення власних чисел і векторів матриці A_1 .

Отримані перші три частоти власних коливань мають такі значення: $\nu_1 = 0,99$ Гц, $\nu_2 = 1,71$ Гц, і $\nu_3 = 2,34$ Гц. Форми деформації поперечного контуру в середині прогінної будови під час власних коливань прогінної будови наведені на рис. 2.

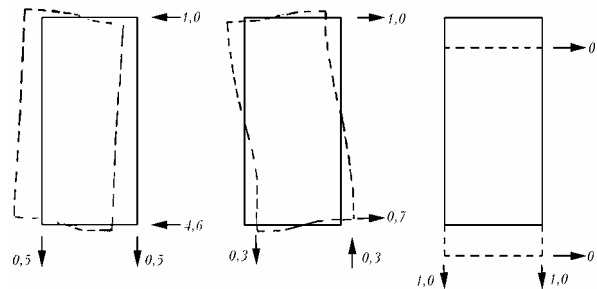


Рис. 2. Форми деформації поперечного перерізу в середині прогінної будови

У вертикальній площині форма деформації прогінної будови має вигляд півхвилі синусоїди.

При першій формі коливань деформація поперечного перерізу прогінної будови характеризується синфазними горизонтальними зміщеннями вітрових ферм і значно меншими зміщеннями головних ферм у вертикальній площині.

Друга форма коливань характеризується антифазними горизонтальними зміщеннями вітрових ферм і невеликим поворотом прогінної будови відносно центра крутіння.

Для третьої форми коливань характерні синфазні переміщення головних ферм прогінної будови при повній відсутності горизонтальних переміщень.

Система з дискретними масами

З метою визначення форм коливань для інших перерізів прогінної будови і аналізу спектра частот досліджувалися дві просторові розрахункові схеми з відповідними геометричними і жорсткісними характеристиками реальної конструкції.

Розподілені по довжині маси елементів прогінної будови замінювалися дискретними масами, величина яких визначалась за «правилом важеля». Передбачалось, що з'єднання елементів у вузлах головних ферм – жорстке.

Дискретні маси в розрахункових схемах розташовувалися в окремих вузлах головних ферм (рис. 3). Для кожної із цих мас враховувалися вертикальні, поздовжні і поперечні горизонтальні сили інерції.

У зв'язку з тим, що симетрична конструкція може мати тільки прямо або кососиметричні форми коливань, досліджувалися дві розрахункові схеми, які охоплювали всі можливі конфігурації системи під час просторових коливань.

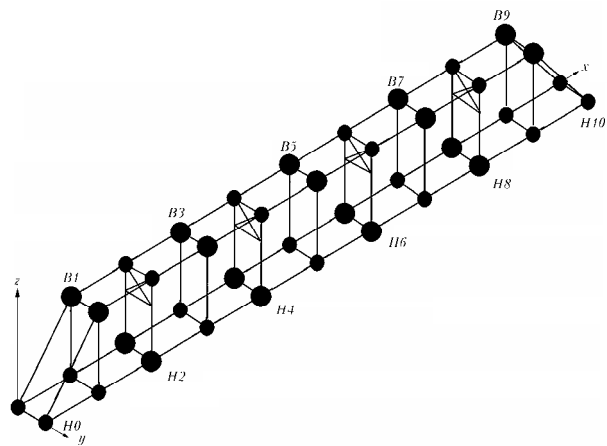


Рис. 3. Схема розташування зосереджених мас

На елементи, що перетинаються із поздовжньою площиною симетрії (верхні і нижні поздовжні в'язі поперечні в'язі, поперечні балки), накладали обмеження, що відповідали той чи іншій схемі, яка розглядається, і тим самим забезпечувалась робота прийнятої схеми і натурального об'єкта. Результати визначення частот коливань наведені в табл. 1.

Т а б л и ц я 1

Частоти власних коливань прогінної будови, Гц

Вид коливань	Форми коливань прогінної будови									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Кососиметричні	1,06	1,69	2,46	3,07	3,86	4,79	5,40	6,37	7,18	7,89
Симетричні	2,28	4,99	6,29	9,22	13,35	14,18	14,81	16,01	17,33	19,92

Десять форм кососиметричних просторових коливань можна поділити на дві групи. До першої групи слід віднести перші чотири форми коливань, які відповідають коливанням елементів прогінної будови в горизонтальній площині (рис. 4, 5). Деяку відміну становить друга форма коливань з частотою $\theta_2 = 1,69$ Гц, де антифазні горизонтальні зміщення вітрових ферм супроводжуються вертикальними коливаннями головних ферм, але із значно меншими амплітудами.

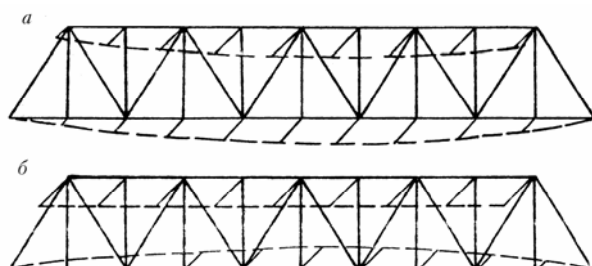


Рис. 4. Перші дві форми коливань:
а – частота коливань 1,06 Гц; б – частота коливань 1,69 Гц

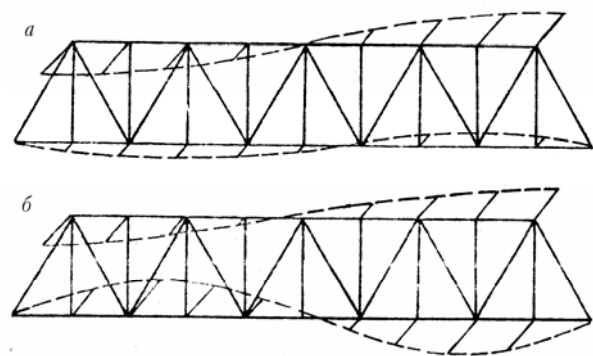


Рис. 5. Третя і четверта форма коливань:
а – частота коливань 2,46 Гц; б – частота коливань 3,07 Гц

Для другої групи частот характерна наявність коливань поясів ферм як в горизонтальній, так і в вертикальній площинах з приблизно рівними амплітудами.

Деформація поперечних контурів прогінної будови в перерізах В2-Н2, В5-Н5 і В8-Н8 при вільних коливаннях з частотами 3,86; 4,79; 5,40 і 6,37 Гц наведені на рис. 6.

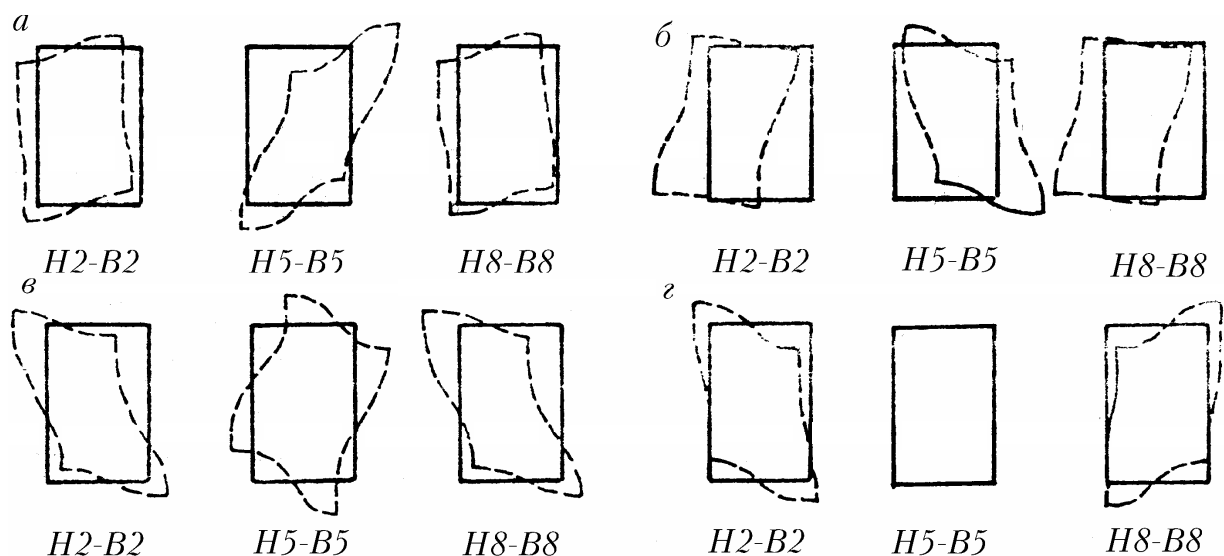


Рис. 6. Деформація контурів прогінної будови в перерізах В2-Н2, В5- Н5 і В8-Н8:
a – частота коливань 3,86 Гц; *б* – частота коливань 4,79 Гц; *в* – частота коливань 5,40 Гц; *г* – частота коливань 6,37 Гц

При розгляді симетричних форм вільних коливань прогінної будови слід відмітити їх загальну особливість. Розгляд симетричної системи дає можливість отримати частоти і форми вільних просторових коливань у вертикальній площині. Деформація прогінної будови при вільних вертикальних коливаннях за першими чотирма формами наведена на рис. 7 і 8.

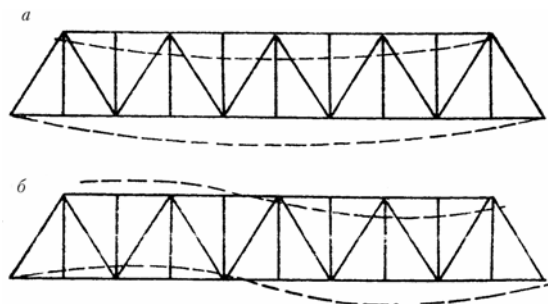


Рис. 7. Першим дві форми вертикальних коливань:
a – частота коливань 2,28 Гц; *б* – частота коливань 4,99 Гц

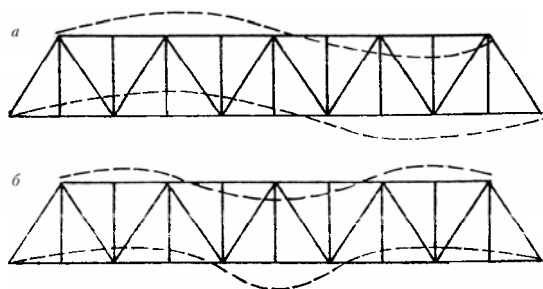


Рис. 8. Третя і четверта форми коливань:
a – частота коливань 6,29 Гц; *б* – частота коливань 9,22 Гц

Поздовжні переміщення кінця прогінної будови з боку рухомих опорних частин при вільних просторових коливаннях мають значну ве-

личину при другій і більш високих формах коливань у вертикальній площині.

Вільні просторові коливання

Задача вирішувалася з використанням метода скінченних елементів.

Під час досліджень вільних просторових коливань прогінної будови досліджувався також вплив сил інерції на частоти коливань. З цієї метою було розглянуто три розрахункові схеми. У першій схемі враховувалися вертикальні і поперечні горизонтальні сили інерції мас. Друга схема враховувала вертикальні і поздовжні горизонтальні сили інерції мас, а третя схема – горизонтальні поперечні і поздовжні сили інерції мас. Результати визначення частот коливань прогінної будови для розглянутих розрахункових схем наведені в табл. 2.

Перші шість форм просторових власних коливань прогінної будови наведені на рис. 9–14.

Перша форма просторових коливань з частотою 1,07 Гц характеризується синфазними поперечними зміщеннями вітрових ферм в горизонтальній площині (рис. 9). У вертикальній площині переміщення вузлів прогінної будови не відбувається.

Друга форма просторових коливань з частотою 1,69 Гц характеризується антифазними поперечними зміщеннями вітрових ферм в горизонтальній площині. На відміну від першої форми коливань, під час власних просторових коливань другої форми крім горизонтальних переміщень вузлів прогінної будови спостерігаються і вертикальні, але з незначними амплітудами.

Частоти власних коливань прогінної будови, Гц

Розрахункова схема	Форми коливань прогінної будови									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Схема № 1	1,07	1,69	2,42	2,44	3,04	3,77	4,40	5,34	5,63	5,94
Схема № 2	2,38	4,10	5,18	6,67	7,15	9,97	10,59	12,71	13,12	16,69
Схема № 3	1,07	1,71	2,43	3,04	4,05	4,46	5,05	5,62	6,11	7,69

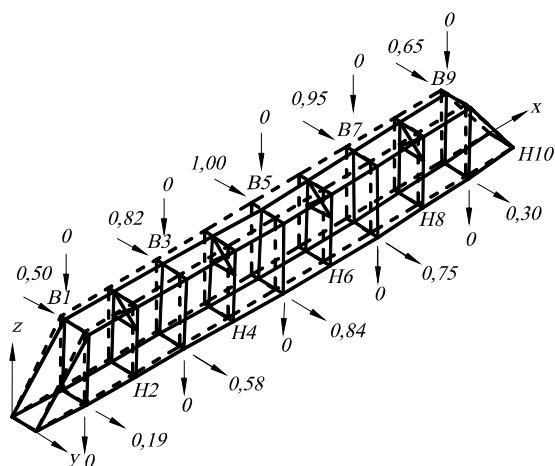


Рис. 9. Перша форма просторових коливань прогінної будови

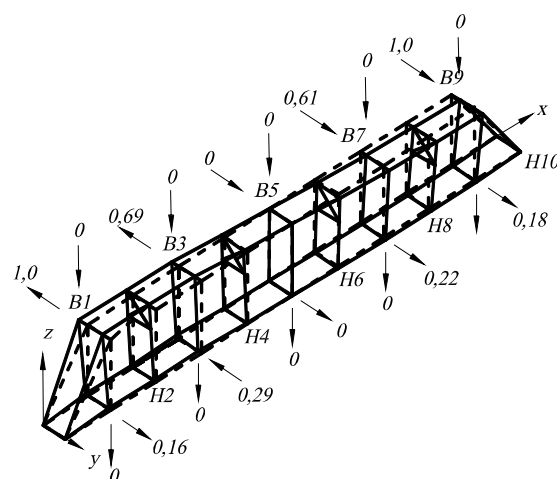


Рис. 11. Третя форма просторових коливань прогінної будови

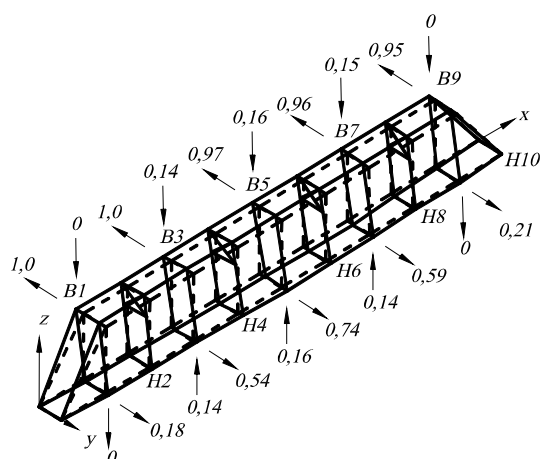


Рис. 10. Друга форма просторових коливань прогінної будови

У разі вільних просторових коливань прогінної будови з частотою 2,42 Гц (третя форма просторових коливань) переміщення вузлів вітрових ферм в горизонтальній площині відбуваються синфазно, але по двох півхвилях. Обидва портали прогінної будови переміщуються на однакову величину, але в протилежних напрямках. Поперечний переріз посередині прогінної будови не деформується. Переміщення вузлів головних ферм у вертикальній площині не спостерігається (рис. 11).

Подальша трансформація форм вільних просторових коливань прогінної будови відбувається за рахунок зростання амплітуд коливань у вертикальній площині. Коливання прогінної будови з частотою 2,44 Гц відповідають конфігурації прогінної будови, яка викликана синфазними переміщеннями головних ферм у вертикальній площині. У цьому випадку головні ферми прогінної будови зміщуються у вертикальній площині на значну величину. Переміщення вітрових ферм прогінної будови не спостерігаються (рис. 12).

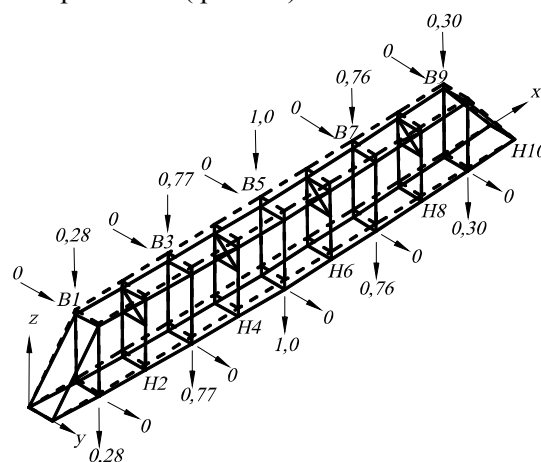


Рис. 12. Четверта форма просторових коливань прогінної будови

П'ята форма вільних просторових коливань з частотою 3,04 Гц характеризується антифазними поперечними зміщеннями вітрових ферм у горизонтальній площині і відповідає формі, яка припускалася в «теорії балдахіну» [2].

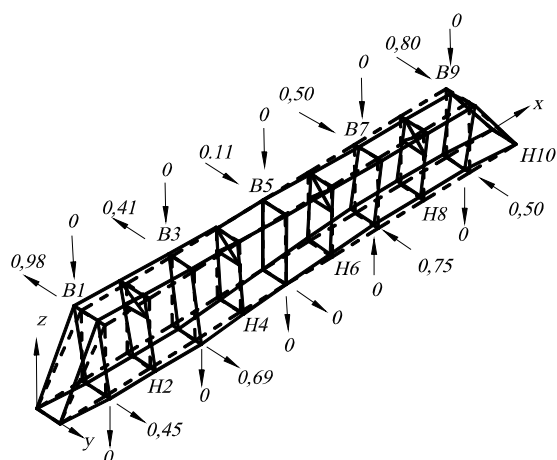


Рис. 13. П'ята форма просторових коливань прогінної будови

При збільшенні частоти вільних просторових коливань до 3,77 Гц зростанням амплітуд вертикальних коливань і перерозподіл інтенсивності коливань між верхньою і нижньою вітровими фермами (рис. 14).

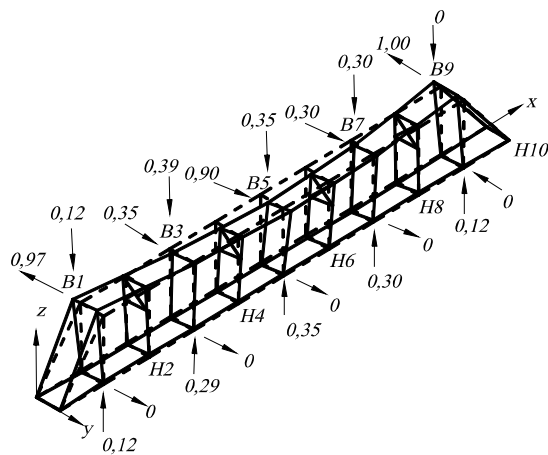


Рис. 14. Шоста форма просторових коливань прогінної будови

Такі коливання призводять до деформацій поперечних контурів прогінної будови і відносяться до коливань типу «бічна качка» [2].

Для перевірки розрахунків теоретичних частот вільних коливань прогінних будов, які виготовлені за типовим проектом інв. № 690/7к, дві прогінні будови випробували динамічним навантаженням [5] у вигляді поїздів і локомотивів, що обертаються на ділянці мосту. Значення частот, які були підраховані за різними методиками, в табл. 3 порівнюються з експериментальними [5].

Т а б л и ц я 3

Частоти і періоди вільних просторових коливань

Форма	Наближені формули		Теорія ДПТУ		Метод МСЕ		Експеримент	
	ν , Гц	T, с	ν , Гц	T, с	ν , Гц	T, с	ν , Гц	T, с
1	0,90	1,106	1,00	1,000	1,07	0,934	0,95	1,050
2	2,01	0,498	1,71	0,584	1,69	0,592	2,02	0,495
3	–	–	–	–	2,42	0,413	–	–
4	2,34	0,427	2,34	0,427	2,44	0,410	2,35	0,426
5	–	–	–	–	3,04	0,329	–	–
6	–	–	–	–	3,77	0,265	–	–

Досить хороший збіг розрахункових і експериментальних значень періодів і частот горизонтальних і вертикальних вільних просторових коливань прогінної будови спостерігається для першої форми вільних просторових горизонтальних коливань, а також для вертикальних коливань. Гірше відповідають експериментальним значенням частоти і періоди крутильних коливань, що були підраховані з використанням методу скінчених елементів (МСЕ). У цьому випадку розходження становить 16 %, і очевидно, впливає той факт, що вся маса прогінної будови в розрахунку розподілялася по

вузлам головних ферм, що призводить до завищеного значення моменту інерції обертання і як наслідок – до більш низького значення крутильної частоти.

Частоти вільних просторових горизонтальних антифазних коливань верхніх вітрових ферм прогінної будови, які були визначені за наближеними формами, найбільше співпадають з експериментальними. Майже однаковий результат для крутильних і вертикальних вільних коливань прогінної будови отриманий при розрахунках за «методикою ДПТУ», однак у цьому випадку розходження з експериментом становить близько 19 %.

Частоти горизонтальних, крутильних і вертикальних вільних просторових коливань прогінної будови, які були визначені за наближеними формулами, найбільш точно співпадають з відповідними експериментальними.

Метод скінченних елементів вимагає великого обсягу робіт по підготовці даних для розрахунку, але дає найбільш наближений до експерименту результат тільки для синфазних горизонтальних коливань вітрових ферм і вертикальних коливань головних ферм.

На наш погляд, метод скінченних елементів слід застосовувати для визначення форм коливань прогінних будов з наскрізною решіткою в тому разі, коли необхідно мати більш високі частоти.

Для визначення перших трьох низьких частот коливань, якщо немає необхідності знати величини зміщення вузлів прогінної будови, найпростіше використати наближені формули.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Бондарь Н. Г. Динамическое воздействие поездов на мосты. – Д.: Днепропетр. ин-т инженеров трансп., 1990.
2. Бондарь М. Г. и др. Динамика железнодорожных мостов. – М.: Транспорт, 1965. – 412 с.
3. Технические условия проектирования железнодорожных, автодорожных и городских мостов и труб (СН 200-62). – М.: Трансжелдориздат, 1962. – 328 с.
4. Тарасенко В. П. Свободные пространственные колебания и жесткость балочных пролетных строений металлических мостов / Вопросы статики и динамики железнодорожных мостов: Тр. Днепропетр. ин-та инженеров жел. дор. трансп. – Д., 1961.
5. Борщов В. І. Динамічні випробування прогінної будови типу 690/7к / В. І. Борщов, М. К. Журбенко, Б. Д. Сухоруков // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2004. – Вип. 3.

Надійшла до редколегії 25 05.04.