

## ДО ПИТАННЯ ДИНАМІЧНОЇ РОБОТИ НАПЛАВНИХ МОСТІВ

В публікації розглянуто декілька раніше апробованих на мостах інших систем розрахункових схем (моделей) для визначення частот вільних горизонтальних та вертикальних коливань наплавних мостів, які є дуже чутливими для динамічних навантажень. Запропонована оптимальна методика розрахунку.

*Ключові слова:* наплавні мости, балка, вільні коливання, динамічні розрахунки

Застосування наплавних мостів як правило обумовлено двома основними факторами: неможливістю спорудження жорстких тимчасових опор з геологічних та гідрологічних умов (значна глибина води, значний шар ґрунтів основи, що розмиваються, скельна основа) або їх спорудження тривале в часі, або має велику вартість.

При наявності інвентарних конструкцій (понтонів, прогонових будов) такі мости можуть бути ефективні за рахунок швидкості їх спорудження, хоча вони мають і суттєві недоліки: сезонність використання, обмеження судноплавства, можливість затоплення плавучих опор. Тим не менш в екстремальних ситуаціях такі мости є оптимальним варіантом.

На сучасному етапі проблема наведення тимчасових переправ набуває все більшого значення за рахунок зміни температурного режиму на планеті, що проявляється значними повеннями по всій Європі та інших країнах земної кулі. Швидке наведення наплавних переправ дає змогу евакуювати людей з підтоплених територій, підвезти продукти харчування тощо, тобто значно спростити ситуацію і головне тримати її під контролем. Для цього треба мати у розпорядженні ДССТ декілька таких переправ.

За способом використання плавучих засобів (понтони, баржі) наплавні мости поділяють на декілька типів: з балковими прогоновими будовами, що спираються на окремі плавучі опори (понтони); мости-стрічки де понтони з'єднані між собою. В свою чергу балка жорсткості може бути розрізна, нерозрізна та шарнірна. З умов раціонального проектування як правило в одній споруді використовують дві і навіть три типи балки жорсткості.

При розрізній схемі кожна плавуча опора працює окремо і тому при проході рухомого навантаження у проїжджій частині утворюються значні переломи, що обмежує швидкість руху (до 10 км/год.). Крім того вихід з ладу навіть однієї плавучої опори приводить до припинення руху. При застосування шарнірної системи

тимчасове навантаження розподіляється вже на декілька плавучих опор, профіль проїжджої частини є кращим, що дає змогу збільшити швидкість до 20...25 км/год.

Нерозрізна система є більш раціональною як за вантажопідйомністю, умовами експлуатації так і за швидкістю руху – до 30 км/год.

До основних конструктивних елементів наплавних мостів відносять: плавучі опори, прогонові будови, проїжджа частина та елементи з'єднання – деформаційні шви та шарніри. В окремих випадках у мостах-стрічках функції балки жорсткості можуть виконувати самі понтони.

У всіх випадках у горизонтальній площині плавучі опори закріплені відтяжками, які при розгляді горизонтальних коливань розглядаються як пружні опори.

Враховуючі наведені вище описання типів, у якості можливих розрахункових моделей для обчислення власних частот і форм коливань наплавних мостів можна розглянути наступні [1].

1. Шарнірний ланцюг: для мостів з розрізними прогоновими будовами та для шарнірної системи (як в горизонтальній так і в вертикальній площині).

2. Нерозрізна балка на пружних проміжних опорах (для нерозрізної конструкції).

3. Нерозрізна балка на пружній основі (для нерозрізної конструкції).

4. Розглянуті вище схеми (1, 2, 3) але з врахуванням додаткових зосереджених мас (понтони) в місцях розташування проміжних опор.

Для розглянутих вище схем приймемо рівняння для обчислення частот власних коливань без врахування таких факторів як інерція оберту, здвиги та поздовжні стискальні сили. Дослідження впливу даних факторів на частоту ретельно виконано у роботах і для даної конструкції ними можна нехтувати з похибкою не більше 2...3 %.

Розрахункові схеми наведені на рис. 1, а в табл. 1 наведені рівняння, за якими обчислюється частота коливань.

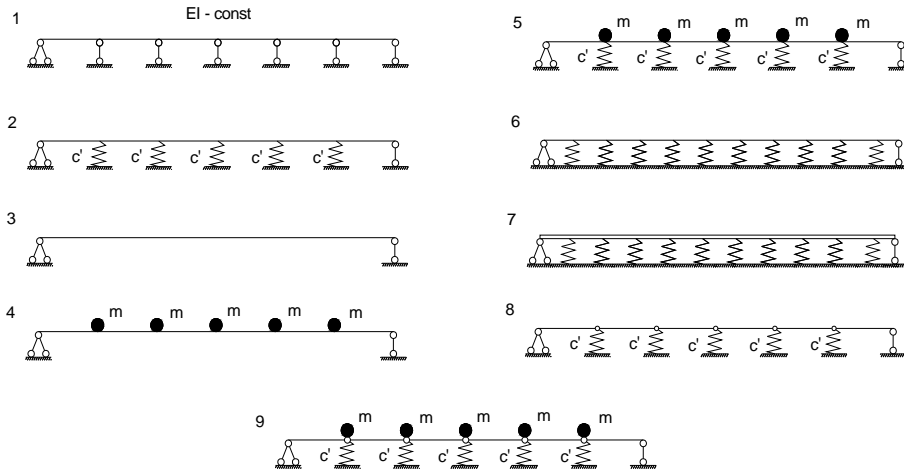


Рис. 1. Розрахункові схеми:

1 – багатопрогонова нерозрізна балка на абсолютно жорстких опорах ( $c' = \infty, \alpha = 0$ ); 2 – багатопрогонова нерозрізна балка на пружних опорах ( $0 < c' < \infty, \alpha = 0$ ); 3 – однопрогонова балка, загальною довжиною  $L = nl$  ( $c' = 0, \alpha = 0$ ); 4 – однопрогонова балка загальним прогоном  $L = nl$  з  $n - 1$  додатковими зосередженими масами, розташованими на балці через рівні проміжки ( $c' = 0, \alpha \neq 0$ ); 5 – багатопрогонова балка на пружних опорах з зосередженими додатковими масами у місцях пружних опор ( $0 < c' < \infty, \alpha \neq 0$ ); 6 – балка на суцільній пружній основі ( $l \rightarrow 0, n \rightarrow \infty, \alpha = 0$ ); 7 – балка на суцільній пружній основі з зосередженими додатковими масами, що відповідають додатковому шару, що має масу, але не має жорсткості ( $l \rightarrow 0, n \rightarrow \infty, \alpha \neq 0$ ); 8 – шарнірний ланцюг на пружних опорах; 9 – шарнірний ланцюг з додатковими масами у місцях пружних опор

Рівняння для обчислення власних частот коливань для наведених вище моделей мають наступний вигляд [1,2]

$$\begin{aligned}
 1. & \frac{\text{sh}\lambda_i(\cos\lambda_i - \cos\beta_i)}{\sin\lambda_i(\text{ch}\lambda_i - \cos\beta_i)} = 1; \\
 2. & \frac{\text{sh}\lambda_i}{\text{ch}\lambda_i - \cos\beta_i} - \frac{\sin\lambda_i}{\cos\lambda_i - \cos\beta_i} = \frac{2 \cdot \lambda_i^3}{c'}; \\
 3. & (\cos\lambda_i - \cos\beta_i) = 0; \\
 4. & \frac{\text{sh}\lambda_i}{\text{ch}\lambda_i - \cos\beta_i} - \frac{\sin\lambda_i}{\cos\lambda_i - \cos\beta_i} = -\frac{2}{\alpha\lambda_i}; \\
 5. & \frac{\text{sh}\lambda_i}{\text{ch}\lambda_i - \cos\beta_i} - \frac{\sin\lambda_i}{\cos\lambda_i - \cos\beta_i} = \frac{2 \cdot \lambda_i^3}{c' - \alpha \cdot \lambda_i^4}; \\
 6. & \lambda_i^4 - \beta_i^4 = 2c'; \\
 7. & \lambda_i^4 - \beta_i^4 = 2(c' - \alpha \cdot \lambda_i^4); \\
 8. & \frac{\text{ch}\lambda_i - \cos\beta_i}{\text{sh}\lambda_i} - \frac{\cos\lambda_i - \cos\beta_i}{\sin\lambda_i} = \frac{c'}{2 \cdot \lambda_i^3}; \\
 9. & \frac{\text{ch}\lambda_i - \cos\beta_i}{\text{sh}\lambda_i} - \frac{\cos\lambda_i - \cos\beta_i}{\sin\lambda_i} = \frac{c' - \alpha \cdot \lambda_i^4}{2 \cdot \lambda_i^3}.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

у яких введено наступні скорочення та позначення:  $\lambda_i$  – частотний параметр обчислений для  $i$ -тої форми коливань

( $\lambda_i^4 = \frac{\mu\omega^2 l^4}{EI}$ );  $\beta = \frac{\pi \cdot i}{n}$ ;  $i$  – номер форми коливань (1, 2, 3...  $n-1$ );  $n$  – кількість прольотів нерозрізної балки;  $c'$  – відносна жорсткість проміжної пружної опори ( $c' = \frac{c_o l^3}{2EI}$ );  $c_o$  – жорсткість пружної опори, кН/м;  $l$  – відстань між опорами, м;  $E$  – модуль пружності матеріалу, кН/м<sup>2</sup>;  $I$  – момент інерції балки жорсткості, м<sup>4</sup>;  $\alpha$  – коефіцієнт відношення маси зосередженого навантаження на опорі до маси прогону балки.

Для розрізної системи кожна плавуча опора працює окремо і сприймає опорні реакції від суміжних прогонових будов. Дія зосередженого навантаження визиває реакцію води по всій довжині опори (понтону). Власна вага понтона у всіх випадках не враховується, оскільки у ненавантаженому стані вона врівноважується відповідною розподіленою реакцією води.

Шарнірна система є статично невизначеною, оскільки вага транспортного засобу (а також і зосередженого навантаження) розподіляється на декілька плавучих опор. Балкові прогонові будови жорстко з'єднані з плавучими опорами по всій довжині. При дії одиничного вантажу опускання кожного шарніра дорівнює осадці попереднього, помноженого на фокусне відношення.

Вихідні параметри для розрахунку

Довжина прольоту $l$ , м	Момент інерції балки $I_{\text{вер.}}$ , $I_{\text{гор.}}$ м <sup>4</sup>	Кількість прольотів, $n$	Погонна вага балки, $\mu$ кН·м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>	Жорсткість опори $c_0$ , кН/м	Відносна жорсткість опор, $c'_{\text{вер.}}$	Відносна жорсткість опор, $c'_{\text{гор.}}$	Коефіцієнт $\alpha$
11,32	$1,744 \cdot 10^{-5}$	3	0,063	259,2	513,31	4,52	1,714
12,35					666,56	5,87	
14,41					1059,0	9,32	
16,47					1581,0	17,00	
18,53					2251,0	19,82	
21,63					3581,0	31,53	
23,68					4699,0	41,37	

Як правило для шарнірних систем застосовують двоопорні парони (два понтони на які спирається одна прогонова будова з консолями) і у цьому випадку ордината осадки плавучої опори від дії одиничної сили становить

$$c_0 = \frac{L_0}{\gamma \cdot F_0 \cdot (L_0 + l)}, \quad (2)$$

де  $L_0$  – довжина прогонової будови, м;  $F$  – площа поперечного перерізу понтона, м<sup>2</sup>;  $l$  – відстань між центрами суміжних понтонів, м.

Нерозрізна система статично невизначена і у більшості випадків її розраховують як балку на пружній основі.

Зовнішнє навантаження врівноважується розподіленою по довжині реакцією пружної основи, величина якої обчислюється за формулою

$$q = k \cdot y, \quad (3)$$

де  $k$  – коефіцієнт основи, який дорівнює реакції основи на одиниці довжини балки, що виникає при зануренні одиничної площі у пружну основу (воду) на одиницю глибини. Для мостів-стрічок  $k = \gamma B$  ( $B$  – ширина моста, м), а для мостів на окремих опорах  $k = \frac{\gamma \cdot F}{l}$  ( $F$  – площа однієї плавучої опори, м<sup>2</sup>).

Враховуючи, що у більшості випадків застосовують нерозрізну систему, як більш жорстку, в першу чергу розглянемо саме її.

Для обчислення частот у даному випадку можна застосувати декілька розрахункових схем і на основі зрівняння результатів, вибрати ту, яка при простих рішеннях дає надійні результати.

Перш за все розглянемо схеми 2, 5, 6 та 9, які найбільш підходять для обчислення частот.

У всіх даних формулах основною величиною є жорсткість проміжної пружної опори (тобто понтона). Розглянемо міст з нерозрізною балкою жорсткості на окремих опорах. Для визначення жорсткості проміжної опори обчислюємо силу, яку треба прикласти до понтона щоб отримати переміщення в 1 см. При вертикальних коливаннях це буде переміщення понтона (пружної опори) при дії одиничної сили, що прикладена до нього, а при горизонтальних коливаннях понтони виступають тільки як зосереджені маси, а у якості пружних опор виступають розтяжки. Понтон має розмір площі  $F = l \cdot B$  ( $l$  – довжина понтона,  $B$  – ширина понтона). Для отримання осадки  $h = 1$  м, необхідно прикласти силу  $P = l \cdot B \cdot h \cdot \gamma$ , тобто для реальних розмірів понтонів: КС-63 (1,8×3,6×7,2 м.), УП-78 (1,4×3,0×6,0 м.), П-12 (1,5×3,0×12,0 м), НЖМ-56 (1,35×3,6×9,0 м) жорсткість пружної опори (понтона) становить відповідно:  $c_0 = 259,2$  кН/м, 180,0 кН/м, 360,0 кН/м, 324,0 кН/м.

Жорсткість проміжної опори у горизонтальному напрямі лімітується якірними закріпленнями та якірним цепом (тросом). Найбільше зусилля у якірному цепу (тросі), що закріплює ділянку моста з однією плавучою опорою обчислюється за формулою [3]

$$T = \frac{n}{\cos \alpha} \cdot \sqrt{R^2 + V_1^2}, \quad (4)$$

де  $n$  – кількість плавучих опор (3);  $\alpha$  – горизонтальний кут між тросом та напрямком течії

(30°);  $V_1$  – вертикальний тиск якірного цепу (тросу) на плавучу опору або якірницю;  $R$  – сумарне якірне закріплення моста, яке складається з тиску вітру ( $R_1$ ), постійного хвильового тиску ( $R_2$ ) та тиску від течії води ( $R_3$ )

$$R = R_1 + R_2 + R_3. \quad (5)$$

Тиск вітру  $R_1$  приймається не менше 35 кгс/м<sup>2</sup> і при вітровій площі  $A = B \cdot 0,5$  м<sup>2</sup> (де 0,5 м – висота сухого борту понтона) складає  $R_1 = 63$  кгс. = 0,63 кН.

Постійний хвильовий тиск підраховується за формулою

$$R_2 = h \cdot B \left[ 24 + 26t + 46,2 \cdot \left( 0,4 - \frac{H}{\lambda} \right)^2 \cdot (t+1) \right], \quad (6)$$

де  $h$  – повна висота хвилі приймається для річок 1,2 м;  $B$  – ширина плавучої опори по фасаду мосту (3,6 м);  $H$  – фактична глибина води, м;  $\lambda$  – довжина хвилі (приймається рівною  $10h$ ) = 12 м;  $t$  – осадка плавучої опори (приймаємо 1,3 м. при сухому борті 0,5 м).

Враховуючи, що з перелічених величин перемінною можна вважати тільки глибину води, наведемо залежність

$$R_2 = f(H) = 3,188H^2 - 30,6H + 323,14. \quad (7)$$

При реальних глибинах води від 3 до 7 м, величина  $R_2$  може бути прийнята 255 кгс (2,55 кН).

Тиск від течії води обчислюється за виразом

$$R_3 = 51 \cdot C_0 \cdot C_l \cdot C_h \cdot \Omega \cdot V_u^2, \quad (8)$$

де  $\Omega$  – площа опори (понтону), що розташована перпендикулярно течії ( $3,6 \times 1,8 = 6,48$ ), м<sup>2</sup>;  $V$  – швидкість течії води, м/с (на даному етапі дослідження приймемо швидкість течії постійною – 2 м/с, при якій ще не потрібно враховувати підвищення рівня води перед плавучою опорою;  $C_l$  – коефіцієнт, що приймається у залежності від відношення величини прольоту нерозрізної балки до ширини плавучої опори ( $B = 3,6$  м.), тобто є величина перемінна (для довжин прольотів, що розглядаються в роботі – 11,32 м до 23,68 м, цей коефіцієнт дорівнює 1,0);  $C_0$  – коефіцієнт опору, що приймається у залежності від форми плавучої опори по фасаду (дорівнює 1,0);  $C_h$  – коефіцієнт збільшення опору на мілкій воді (для даного відношення довжини прогону до ширини опори (понтону)

дорівнює 1,0. На даному етапі дослідження приймемо швидкість течії постійною – 2 м/с, при якій ще не потрібно враховувати підвищення рівня води перед спорудою (понтонем).

Таким чином  $R_3 = 51 \cdot \Omega \cdot V^2 = 1321,9$  кгс = 13,22 кН. Сумарне якірне закріплення моста складає  $R = 18,32$  кН.

Вертикальний тиск якірного цепу (тросу) на плавучу опору або якірницю обчислюється за формулою

$$V_1 = R \cdot \frac{H}{L} + p \cdot \frac{L}{2}, \quad (9)$$

де  $L$  – відстань по горизонталі від місця прикріплення тросу до якоря, м (приймається не менше 8 глибин води  $H$ );  $p$  – погонна вага одного метра якірного цепу (тросу) попередньо можна прийняти 2 кгс/м, або 0,02 кН/м). Формула (9) дає наступний результат, якщо врахувати, що друга складова становить 1,5...2,2 % від першої.

$$V_1 = \frac{R}{8} + \frac{2 \cdot L}{2} = \frac{R}{8} + L = \frac{R}{8} + 8H = \frac{R}{8} = 0,125R.$$

Найбільше зусилля у якірному цепу (тросі), що закріплює ділянку моста до однієї плавучої опори, складається з сумарного якірного закріплення та вертикального тиску самого якірного тросу на плавучу опору і може бути обчислено за спрощеною формулою

$$T = \frac{R}{\cos \alpha}. \quad (10)$$

Нормативний документ [4] передбачає обчислювати гідростатичний тиск води на підводну частину конструкції (понтону) за формулою (11), яка по своїй структурі аналогічна формулі (5), але простіша з точки зору розрахунків

$$N_{\Gamma} = N_{\text{л}} + N_{\text{т}}, \quad (11)$$

де  $N_{\text{л}}$  – лобовий тиск води, кгс;  $N_{\text{т}}$  – сила тертя води по поверхні плаваючого тіла (понтону), кгс і визначаються відповідно за виразами

$$N_{\text{л}} = 50\varphi_0 \cdot A \cdot V^2; \quad N_{\text{т}} = f \cdot A_c \cdot V^2, \quad (12)$$

де  $V$  – швидкість течії води, м/с;  $\varphi_0$  – коефіцієнт опору, що приймається у залежності від форми плавучої опори по фасаду (дорівнює 1,0);  $f$  – коефіцієнт тертя, що для металевих конструкцій дорівнює 0,17 кгс·с/м<sup>4</sup>;  $A$  – підводна площа (по найбільш широкому поперечно-

му перерізу),  $m^2$ ;  $A_c$  – площа поверхні тертя води,  $m^2$  ( $A_c = L \cdot (B + 2t)$ ),  $t$  – осадка плашкоута (понтону), м.

Приймаючи ті ж самі параметри, що і у першому випадку, отримуємо наступний результат по гідростатичному тиску води на підводну частину плавучої опори (понтону)

$$N_r = 50 \cdot 1,0 \cdot 6,48 \cdot 2^2 + 0,17 \cdot 44,64 \cdot 2^2 = 15,995 \text{ кН}$$

Як видно розбіжність розрахунку складає 12,7 %, тобто для подальшого розрахунку можна прийняти перший результат (18,32 кН), що дає для зусилля в якірному цепу (тросі)  $T = 21,13$  кН.

З урахуванням рекомендованого коефіцієнту запасу  $k = 3,5$ ,  $T = 73,96$  кН. За розривним зусиллям беремо канат діаметром 14 мм за ГОСТ 2688-69.

За схемою 5 додатково необхідно враховувати понтон як зосереджену масу у місті розташування самої опори через коефіцієнт  $\alpha$ . Для розрахунку відносної жорсткості опори  $c'$  та коефіцієнта  $\alpha$  необхідно мати дані по балці: погонну масу, момент інерції.

У якості прикладу, який показує алгоритм розрахунку частот коливань за різними розрахунковими схемами, приймемо наплавний міст, який має у своєму складі 3 прогони (прогонові будови прийняті типовими з довжиною від 11,32 м до 23,68 м).

Балка металева, виконана нерозрізною по всій довжині.

У якості розрахункових схем, з дев'яти розглянутих вище, до розрахунку прийняті 2, 5, 6 та 9, як такі, що в більшій мірі відповідають реальній схемі роботи моста в цілому, а саме:

– нерозрізна балка на пружних опорах (понтонках);

– нерозрізна балка на пружних опорах з додатковими зосередженими масами у місцях пружних опор (понтони як зосереджені маси і в той же час пружні опори);

– нерозрізна балка на пружній основі (жорсткість пружних опор «розмазана» по довжині прогону);

– шарнірний ланцюг на пружних опорах з зосередженими масами у місцях опор (аналогічно понтони є зосередженими масами і в той же час пружними опорами).

З даних чотирьох схем дві: нерозрізна балка на пружній основі та шарнірний ланцюг з зосередженими масами у місцях пружних опор ме-

нше відповідають реальній схемі, а тому вони прийняті не як основні. Основна увага зосереджена на дослідженні результатів розрахунків по двох перших схемах (2 та 5). Причому у даному випадку необхідно простежити вплив врахування додаткових зосереджених мас на частоту власних коливань.

Розрахунок виконано з перебором чотирьох розрахункових схем, для чотирьох жорсткостей опор та для 7 довжин прогонових будов. Визначалась частота по першій формі коливань ( $i = 1$ ).

Результати розрахунку наведені у табл. 2.

Частота вільних вертикальних коливань обчислюється за формулою (1), а горизонтальних – за формулою (2)

$$\gamma = \frac{\lambda_i^2}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{EI_{\text{вер.}}}{\mu \cdot l^4}} = 11,212 \cdot \frac{\lambda_i^2}{l^2}; \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{\lambda_i^2}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{EI_{\text{гор.}}}{\mu \cdot l^4}} = 172,21 \cdot \frac{\lambda_i^2}{l^2}, \quad (2)$$

де  $\lambda_i$  – частотний параметр;  $E$  – модуль пружності,  $\text{кН/м}^2$ ;  $I_{\text{вер.}}, I_{\text{гор.}}$  – момент інерції прогонової будови відповідно в вертикальній та горизонтальній площині,  $m^4$ ;  $\mu$  – погонна маса прогонової будови,  $\text{кН} \cdot m^2/c^2$ ;  $l$  – розрахунковий прогін нерозрізної прогонової будови (відстань між проміжними опорами), м.

Результати розрахунків свідчать про те, що розрахункова схема у вигляді шарнірного ланцюга може бути застосована у тому випадку, коли балки прогонової будови не жорстко з'єднані при утворенні нерозрізної. Отже, розрахунковими схемами, які дають практично ідентичні результати, є балка на пружних опорах та балка на пружній основній (схеми 2 та 5), але вони не враховують зосереджені маси опор. Уточнення до частоти вертикальних коливань при врахуванні понтонів як зосереджених мас складає до 100 % (і тому основною розрахунковою слід вважати розрахункову схему 5).

Враховуючи, що особливістю коливань нерозрізних балок на пружних опорах є те, що частота по першій формі не обов'язково є мінімальною, були виконані розрахунки для п'яти розрахункових схем для коливань по трьох формах. Дані розрахунків зведені у табл. 3.

За результатами розрахунків побудовані графіки залежностей  $\gamma_i = f(l)$ ,  $\gamma_i = f(c')$  (рис. 2-5).

Результати розрахунків частот вільних коливань

№ схеми	Довжина прогону, м	Відносна жорсткість опори $c'_{\text{вер.}}$	Частотний параметр $\lambda$	Частота вертикальних коливань	Відносна жорсткість опори $c'_{\text{гор.}}$	Частотний параметр $\lambda$	Частота горизонтальних коливань
2	11,32	513,31	4,091	1,467	4,52	1,760	4,163
	12,35	666,56	4,137	1,258	5,87	1,900	4,076
	14,41	1059,0	4,196	0,950	9,32	2,100	3,657
	16,47	1581,0	4,230	0,739	17,00	2,400	3,356
	18,53	2251,0	4,250	0,589	19,82	2,500	3,135
	21,63	3581,0	4,268	0,436	31,53	2,760	2,804
	23,68	4699,0	4,275	0,365	41,37	2,920	2,619
	5	11,32	513,31	3,744	1,226	4,52	1,232
12,35		666,56	3,910	1,124	5,87	1,304	1,912
14,41		1059,0	4,110	0,912	9,32	1,456	1,796
16,47		1581,0	4,195	0,727	17,00	1,682	1,758
18,53		2251,0	4,234	0,585	19,82	1,744	1,525
21,63		3581,0	4,262	0,435	31,53	1,948	1,397
23,68		4699,0	4,272	0,365	41,37	2,081	1,329
6		11,32	513,31	5,662	2,803	4,52	1,789
	12,35	666,56	6,044	2,685	5,87	1,903	4,076
	14,41	1059,0	6,785	2,485	9,32	2,111	3,695
	16,47	1581,0	7,499	2,324	17,00	2,228	3,208
	18,53	2251,0	8,192	2,191	19,82	2,527	3,203
	21,63	3581,0	9,200	2,028	31,53	2,829	2,947
	23,68	4699,0	9,846	1,938	41,37	3,028	2,815
	9	11,32	513,31	4,203	1,546	4,52	1,085
12,35		666,56	4,400	1,423	5,87	1,135	1,455
14,41		1059,0	4,820	1,254	9,32	1,275	1,409
16,47		1581,0	5,241	1,135	17,00	1,491	1,348
18,53		2251,0	5,630	1,035	19,82	1,555	1,213
21,63		3581,0	6,040	0,992	31,53	1,755	1,134
23,68		4699,0	7,046	0,874	41,37	1,862	1,062

Таблиця 3

Значення частотного параметра  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  та частоти вертикальних коливань

№ схеми	Довжина прогону, м	Відносна жорсткість опори	Параметр $\lambda_1$	Частота $\gamma_1$	Параметр $\lambda_2$	Частота $\gamma_2$	Параметр $\lambda_3$	Частота $\gamma_3$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	11,32	513,31	4,091	1,467	6,311	3,485	6,314	3,488
	12,35	666,56	4,137	1,258	6,527	3,131	6,572	3,175
	14,41	1059,0	4,196	0,950	6,843	2,528	6,971	2,623
	16,47	1581,0	4,230	0,739	7,038	2,047	7,240	2,166
	18,53	2251,0	4,250	0,589	7,159	1,673	7,417	1,809

1	2	3	4	5	6	7	8	9
	21,63 23,68	3581,0 4699,0	4,268 4,275	0,436 0,365	7,263 7,304	1,264 1,067	7,578 7,644	1,376 1,168
5	11,32 12,35 14,41 16,47 18,53 21,63 23,68	513,31 666,56 1059,0 1581,0 2251,0 3581,0 4699,0	3,744 3,910 4,110 4,195 4,234 4,262 4,272	1,226 1,124 0,912 0,727 0,585 0,435 0,364	7,537 7,540 7,548 7,561 7,583 7,649 7,745	4,970 4,179 3,076 2,363 1,877 1,402 1,199	7,999 8,002 8,011 8,024 8,044 8,098 8,165	5,598 4,707 3,465 2,661 2,113 1,571 1,333
6	11,32 12,35 14,41 16,47 18,53 21,63 23,68	513,31 666,56 1059,0 1581,0 2251,0 3581,0 4699,0	5,662 6,044 6,785 7,499 8,192 9,200 9,846	2,804 2,685 2,486 2,324 2,191 2,028 1,938	5,687 6,064 6,799 7,510 8,200 9,206 9,851	2,830 2,703 2,496 2,331 2,195 2,031 1,940	5,790 6,150 6,861 7,556 8,235 9,231 9,871	2,933 2,780 2,541 2,359 2,214 2,042 1,948
7	11,32 12,35 14,41 16,47 18,53 21,63 23,68	513,31 666,56 1059,0 1581,0 2251,0 3581,0 4699,0	3,903 4,166 4,677 5,171 5,647 6,342 6,788	1,343 1,275 1,181 1,105 1,041 0,963 0,921	3,920 4,180 4,687 5,177 5,653 6,346 6,791	1,344 1,284 1,186 1,108 1,043 0,965 0,922	3,992 4,240 4,729 5,209 6,363 6,677 6,805	1,394 1,321 1,207 1,121 1,322 1,068 0,926
9	11,32 12,35 14,41 16,47 18,53 21,63 23,68	513,31 666,56 1059,0 1581,0 2251,0 3581,0 4699,0	4,203 4,400 4,820 5,241 5,630 6,040 7,046	1,545 1,423 1,254 1,135 1,035 0,992 0,874	3,954 4,175 4,618 5,037 5,407 5,818 5,979	1,368 1,281 1,151 1,048 0,965 0,811 0,714	3,807 4,054 4,523 4,948 5,319 5,736 5,911	1,268 1,208 1,104 1,012 0,924 0,788 0,698

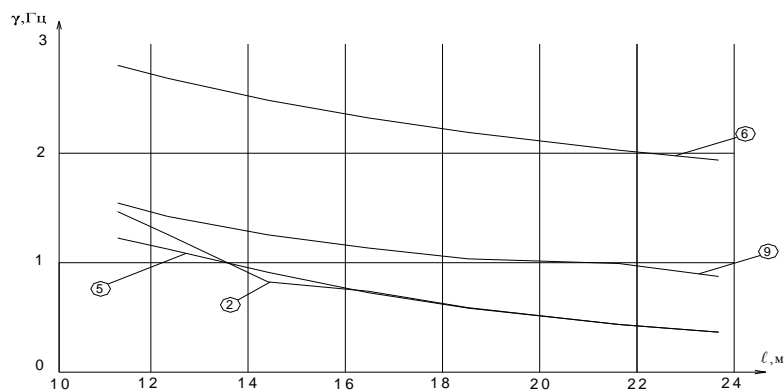


Рис. 2. Графік залежності частоти власних коливань від довжини прогону трипрогонової нерозрізної балки

$$\gamma_i = f(l) \text{ (вертикальні коливання):}$$

2 – багатопрогонова нерозрізна балка на пружних опорах; 5 – багатопрогонова балка на пружних опорах з зосередженими додатковими масами у місцях пружних опор; 6 – балка на суцільній пружній основі; 9 – шарнірний ланцюг з додатковими масами у місцях пружних опор

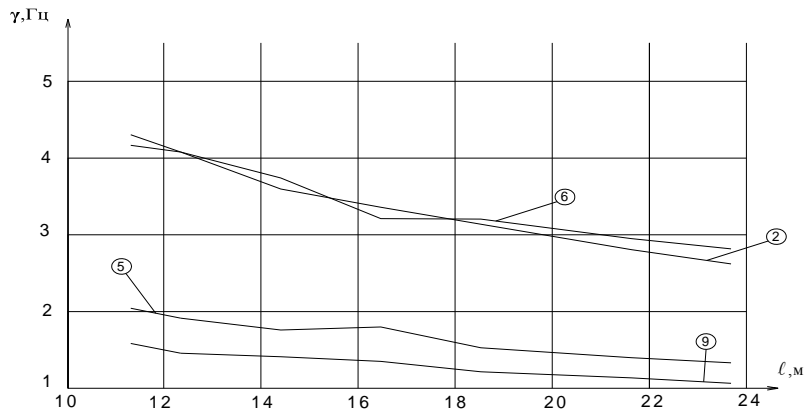


Рис.3. Графік залежності частоти власних коливань від довжини прогону трипрогонової нерозрізної балки  $\gamma_i = f(l)$  (горизонтальні коливання):

2 – багатопрогонова нерозрізна балка на пружних опорах; 5 – багатопрогонова балка на пружних опорах з зосередженими додатковими масами у місцях пружних опор; 6 – балка на суцільній пружній основі; 9 – шарнірний ланцюг з додатковими масами у місцях пружних опор

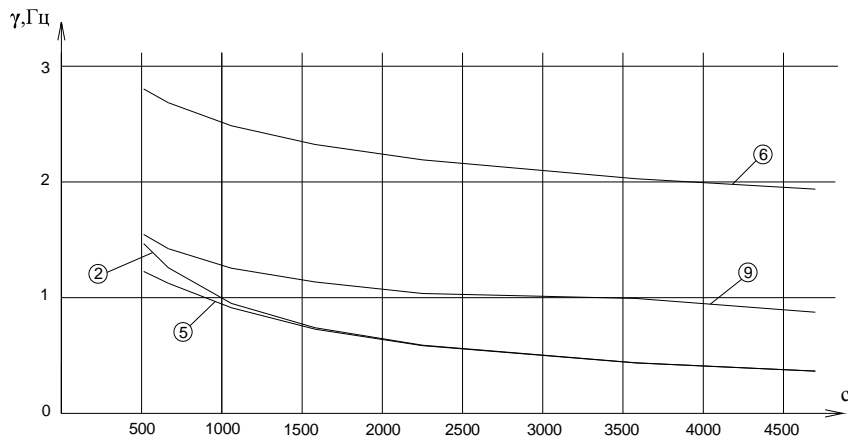


Рис.4. Графік залежності частоти власних коливань від відносної жорсткості проміжних опор трипрогонової нерозрізної балки  $\gamma_i = f(c')$  (вертикальні коливання):

2 – багатопрогонова нерозрізна балка на пружних опорах; 5 – багатопрогонова балка на пружних опорах з зосередженими додатковими масами у місцях пружних опор; 6 – балка на суцільній пружній основі; 9 – шарнірний ланцюг з додатковими масами у місцях пружних опор

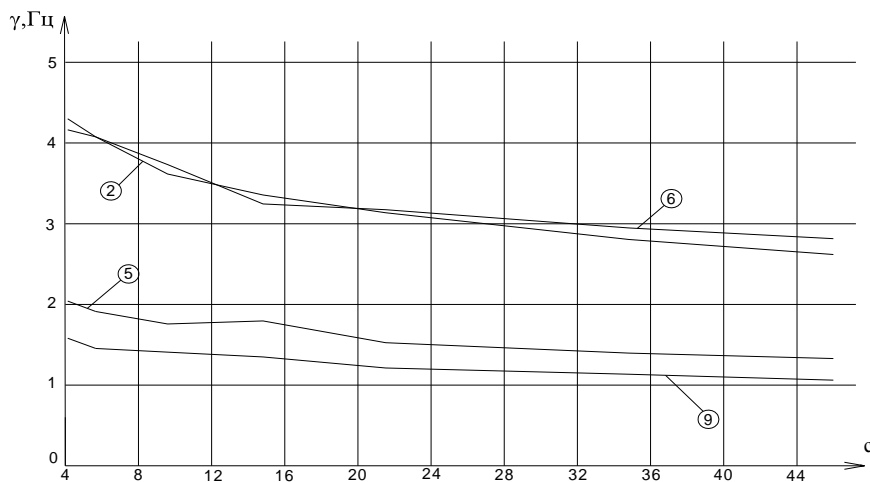


Рис.5. Графік залежності частоти власних коливань від відносної жорсткості проміжних опор трипрогонової нерозрізної балки  $\gamma_i = f(c')$  (горизонтальні коливання):

2 – багатопрогонова нерозрізна балка на пружних опорах; 5 – багатопрогонова балка на пружних опорах з зосередженими додатковими масами у місцях пружних опор; 6 – балка на суцільній пружній основі; 9 – шарнірний ланцюг з додатковими масами у місцях пружних опор



Розрахунки, виконані для п'яти розрахункових схем (де визначались частоти по перших трьох формах коливань) свідчать про те, що, як і в першому випадку, задовільні результати дають 2 та 5 розрахункові схеми. При цьому кращі результати дає схема у вигляді нерозрізної балки на пружних опорах з зосередженими масами у місцях пружних опор. Крім того явно просліджується особливість, яка була відмічена у роботі [5] при дослідженні роботи тимчасових мостів, що частота коливань по другій та третій формах дуже близькі. Це підтвердили і результати експериментів, виконані на двох тимчасових мостах (дані наведені в роботі [6]).

Отже для подальшого дослідження прийнята основна схема: балка на пружних опорах з зосередженими масами у місцях пружних опор.

#### БИБЛИОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Солдатов, К. И. Частные случаи задачи о собственных колебаниях регулярных упруго опертых балок [Текст] / К. И. Солдатов // Вопросы статической и динамической работы мостов: труды

ДИИТа – Днепропетровск, 1972. – Вып.127 – С. 72-79.

2. Солдатов, К. И. Свободные колебания регулярных балок и некоторых мостовых конструкций на упругих опорах. [Текст]: автореф. канд. дис. / К. И. Солдатов. – Днепропетровск, 1971 – 19 с.
3. Наплавной железнодорожный мост НЖМ-56 М [Текст]. – М.: Воен. изд-во, 1977 – С. 343.
4. ВСН 136-78. Инструкция по проектированию вспомогательных сооружений и устройств для строительства мостов [Текст]. – М.: 1978. – 300 с.
5. Солдатов, К. И. К вопросу о горизонтальной жесткости опор временных мостов [Текст] / К. И. Солдатов, В. П. Кисляк // Вопросы динамики мостов и теории колебаний: межвузовск. сб. науч. тр. – Д.: 1979. – Вып. 202/23. – С. 110-117.
6. Солдатов, К. И. Исследование динамической работы временных железнодорожных мостов [Текст] / К. И. Солдатов, В. П. Кисляк // Вопросы динамики мостов и теории колебаний: межвузовск. сб. научн. тр. – Д.: 1979. – Вып. 202/23. – С. 117-122.

Надійшла до редколегії 22.03.2012.

Прийнята до друку 02.04.2012.

К. И. СОЛДАТОВ, Ю. Н. ГОРБАТЮК, Д. А. КУРИЛЬЧЕНКО (ДИИТ)

### К ВОПРОСУ О ДИНАМИЧЕСКОЙ РАБОТЕ НАПЛАВНЫХ МОСТОВ

В публикации рассмотрено несколько ранее апробированных на мостах других систем расчетных схем (моделей) для определения частот собственных горизонтальных и вертикальных колебаний наплавных мостов, которые являются очень чувствительными к динамическим воздействиям. Предложена оптимальная методика расчета.

*Ключевые слова:* наплавные мосты, балка, собственные колебания, динамические расчеты

К. I. SOLDATOV, U. M. GORBATYUK, D. O. KURILCHENKO (Dniepropetrovsk National University of Railway Transport)

### ABOUT PROBLEM OF DYNAMIC WORK OF FLOATING BRIDGES

It is a review of several systems, previously tested on bridges of other design models, to determine frequencies and periods of own horizontal and vertical wavering (vibration) of floating bridges, which are extremely sensitive to dynamic effects. This publication shows the optimal method of calculations.

*Keywords:* floating bridges, beam, own wavering, dynamic calculations