

Г.С. ЖЕЛЕЗНЯК (Днепрпроектстальконструкция), К.И. СОЛДАТОВ (Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. акад. В. Лазаряна)

ИССЛЕДОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ МОСТОВ ПРИ НАВЕСНОМ УРАВНОВЕШЕННОМ МОНТАЖЕ

В работе на примере навесного монтажа двухпролетного строения по схеме 110+110 м по двум различным схемам исследовано влияние на частоту собственных вертикальных и горизонтальных колебаний изменение длины консолей. Даны рекомендации по изменению периодов собственных колебаний в случае нахождения их в диапазоне, ограниченном СНиП.

У роботі на прикладі навісного монтажу двопрогенової будови за схемою 110 +110 м за двома різними схемами досліджено вплив на частоту власних вертикальних і горизонтальних коливань зміни довжини консолей. Надані рекомендації щодо зміни періодів власних коливань у випадку перебування їх у діапазоні, обмеженому СНиП.

In this paper, the example of hinged mounting two-span structure of the scheme 110 +110 m for two different schemes studied the influence on the frequency of vertical and horizontal vibrations of change in the length of the consoles. Recommendations to change the frequency of natural oscillations in the case of finding them in a range bound SNiP's.

Действующий нормативный документ ДБН В.2.3-14:2006 «Мости та труби. Правила проектування», как и его предшественник СНиП 2.05.03-84 «Мосты и трубы», вводит следующие ограничения по периодам горизонтальных и вертикальных колебаний мостов (п.1.48):

- для балочных разрезных металлических и сталежелезобетонных пролетных строений железнодорожных мостов периоды горизонтальных колебаний не должны быть более $0.01L$ (L – пролет в метрах) и не превышать 1.5 с.;

- в пролетных строениях городских и пешеходных мостов расчетные периоды (в неразгруженном состоянии) по двум низшим формам они не должны быть в диапазоне от 0.45 до 0.60 с в вертикальной плоскости и от 0.9 до 1.2 с - в горизонтальной;

- периоды вертикальных и горизонтальных колебаний на стадии монтажа пролетных строений не должны превышать 2 с, а крутильных - 1.5 с.

В работе [7] была найдена допустимая длина консоли исходя из ограничения допустимых прогибов и периодов вертикальных и горизонтальных колебаний. Расчетная схема

соответствовала навесной сборке пролетного строения с анкерным пролетом.

В данном исследовании пролетное строение 110+110 м монтируется способом навесного уравновешенного монтажа [9]. Учитывается влияние на собственные частоты: веса (массы) монтажных кранов на концах консолей монтируемого пролетного строения, возможного (допускаемого) опережения монтажа на длину одной панели одного из пролетных строений. С этих позиций определены необходимые условия опирания пролетного строения при монтаже на временные опоры для исключения попадания периодов колебаний в указанный выше диапазон.

Рассмотрены следующие варианты монтажа пролетных строений с помощью уравновешенной навесной сборки - симметричный и несимметричный, которые технологически допускаются.

На Рис.1 приведены две схемы монтажа. Каждой из схем соответствует дополнительная подсхема расположения временной опоры. В дальнейшем будем называть схему, приведенную на Рис.1 А) схемой А, схему на Рис.1 В) – схемой В. В случае сборки по схеме А производится обстройка опоры на длину 2,5 длины

панели, затем сборка первых 2-х панелей, на верхних поясах монтируются два деррик-крана с последующей навесной сборкой пролетных строений данными кранами. По схеме Б сборка первых 2-х панелей осуществляется с использованием

дополнительных временных опор (коротких подмостей такой же длины). Кроме того по схеме Б исследовано влияние опережения монтажа в одну из сторон на одну панель.

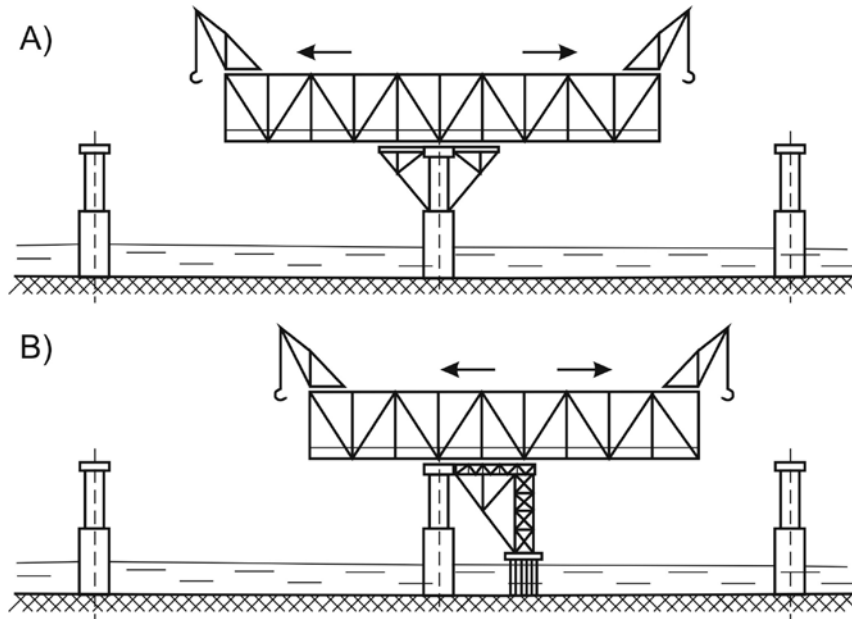


Рис. 1. Схемы навесного монтажа пролетного строения 110+110 м.

А – симметричный уравновешенный монтаж пролетного строения; В – несимметричный.

На Рис. 2 А) приведена расчетная схема пролетного строения – четырехпролетная балка, крайние пролеты которой представляют собой консоли, с жесткими средними опорами. На Рис.2 В) А)

приведена расчетная схема пролетного строения при завершении монтажа на одной из сторон от исходной опоры. Схема соответствует действительной работе пролетного строения по схеме В. В)

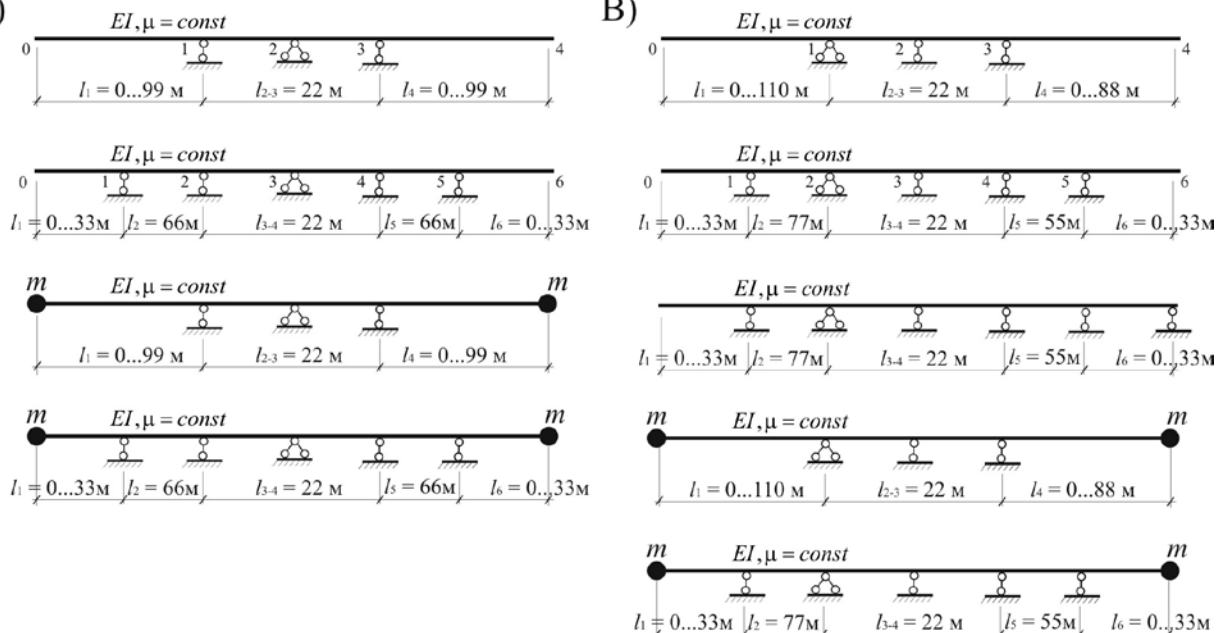


Рис. 2. Расчетные схемы пролетного строения 110+110 м при навесном монтаже.

А – симметричный уравновешенный монтаж пролетного строения; В – несимметричный.

Для обеих схем монтажа необходимо учитывать расположение

промежуточной опоры, т.к. на практике допустимая длина консоли принимается не

более 88 м. Для схемы А расчетная схема представляет собой четырехпролетную балку на жестких опорах при монтаже до временной опоры, и шестипролетную - после нее. Для схемы В сборка правого пролета идет с опережением в одну панель. Таким образом, абсолютное суммарное опережение монтажа правой части пролетного строения равно двум панелям и относительное - одной панели.

Возможное расположение временных опор предполагается в 4х местах (для обоих случаев монтажа) – на расстоянии 33, 44, 55 и 66 метров от оси обстройки капитальной опоры. Для

уменьшения количества возможных вариантов нахождения промежуточной опоры, примем симметричное расположение временной опоры относительно капитальной опоры, с которой начинается монтаж.

Чтобы оценить влияние масс монтажных кранов на собственные частоты, для каждой из схем проведено два расчета – с учетом присоединенных масс и без.

В таблице 1 приведены характеристики монтируемого типового пролетного строения, которые учитывались при расчетах.

Таблица 1

Характеристики	Ед. изм.	Значения
		110+110 м
Расстояние между главными фермами	м	5.80
Полная длина пролетного строения	м	221.14
Высота балки проезжей части	м	1.85
Высота фермы	м	15.0
Вес пролетного строения	т	994
Погонная вес	т/м.п.	5.43
Момент инерции фермы (по формуле работы [7])	м ⁴	5.456

Вес монтажного крана УМК-2 равен 34.2 тонны.

Для составления частотного уравнения воспользуемся методом записи уравнений с помощью ассоциированных матриц, описанном в [5].

Ввиду громоздкости записи уравнений с учетом масс монтажных кранов на консолях, ниже приведена только запись уравнения для четырехпролетной балки с консолями без масс монтажных кранов, соответствующее верхним расчетным схемам на Рис.2. Частотное уравнение для нее запишется в следующем виде:

$$V_{1,2-3}^{0-1} \times M_{2,2}^{1-2} \times M_{2,2}^{2-3} \times V_{1,2-7}^{3-4} = 0, \quad (1)$$

где $V_{1,2-3}^{0-1}, M_{2,2}^{1-2}, M_{2,2}^{2-3}, V_{1,2-7}^{3-4}$ - матрицы соответственно участков 0-1, 1-2, 2-3 и 3-4 балки (фермы). Матрица $V_{1,2-3}^{0-1}$ для первого участка 0-1 имеет вид:

$$V_{1,2-3}^{0-1} = \begin{vmatrix} E(\lambda_1) & EI_1 \times k_1 \times B(\lambda_1) \end{vmatrix}, \quad (2)$$

Для второго и третьего участков матрицы $M_{2,2}^{1-2}$ и $M_{2,2}^{2-3}$ будут отличаться

только значением подставляемого в них частотного коэффициента, и коэффициента k ($k=$):

$$M_{2,2}^{1-2} = \begin{vmatrix} \frac{1}{EI_i \times k^3} B(\lambda_i) & \frac{1}{k_i^3} S(\lambda_i) \\ \frac{1}{EI_i^2 \times k_i^3} D(\lambda_i) & \frac{1}{EI_i \times k_i^3} B(\lambda) \end{vmatrix}, \quad (3)$$

Для последнего пролета матрица $V_{4,2-7}^{3-4}$ будет выглядеть:

$$V_{4,2-7}^{3-4} = \begin{vmatrix} \frac{1}{k_4^2} S(\lambda_4) \\ \frac{1}{EI_4 \times k_4^3} B(\lambda_4) \end{vmatrix}, \quad (4)$$

где E, B, S, D – функции Прагера $E(\lambda) = 1 + ch(\lambda) \cos(\lambda)$,

$$B(\lambda) = ch(\lambda) \sin(\lambda) - sh(\lambda) \cos(\lambda),$$

$$S(\lambda) = 2sh(\lambda) \sin(\lambda),$$

$$D(\lambda) = ch(\lambda) \cos(\lambda) - 1. \quad (5)$$

При рассмотрении симметричной схемы возможно раздельное нахождение собственных частот (симметричных и кососимметричных). Учет симметричной и

кососимметричной форм колебаний основан на свойствах стержневых систем, имеющих оси (плоскости) симметрии. При симметричных колебаниях в сечениях стержневой системы, проведенных через оси симметрии, равны нулю кососимметричные статические и кинематические параметры $\phi(\ell_{сим})=0$, $Q(\ell_{сим})=0$, при кососимметричных колебаниях - равны нулю симметричные факторы $v(\ell_{сим})=0$, $M(\ell_{сим})=0$

Воспользовавшись данными свойствами, возможно проводить расчеты для двух- или трехпролетной балки, тем самым снизив порядок матрицы. К примеру, матрица для определения частотного коэффициента при симметричных колебаниях будет представлять в развернутом виде матрицу 8×8 вместо 16×16 , необходимую для расчета по полной четырехпролетной схеме:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{EIk_1^2}U_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{EIk_1}T_1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & k_1V_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{k_2}T & \frac{1}{EIk_2^2}U_2 & \frac{1}{EIk_2^3}V_2 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & S_2 & \frac{1}{EIk_2}T_2 & \frac{1}{EIk_2^2}U_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & EIk_2V_2 & S_2 & \frac{1}{k_2}T_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & EIk_2^2U_2 & k_2V_2 & S_2 \end{vmatrix} = 0, \quad (6)$$

В (6) U, T, S, V – круговые функции Крылова.

В более компактном виде по методу, предложенному в [2], та же матрица (6) имеет вид:

В настоящей работе данные методы разделения колебаний приемлемы только для части исследования (схемы А), так как рассматриваемый случай с опережающим или несимметричным монтажом (по схеме Б) на одном конце пролетного строения представляет собой несимметричную схему, что требует для определения собственных частот полной записи частотного уравнения.

Из уравнения (1) определены частотные коэффициенты λ_i и далее по известной формуле круговая частота:

$$\Delta = \left| \frac{1}{EIk_1^2}U(\lambda_1) \right| \times \left| \frac{\frac{1}{k_2^2}S(\lambda_2)}{\frac{1}{EIk_2^3}B(\lambda_2)} \right| = 0. \quad (7)$$

$$\omega = \frac{\lambda^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad (8)$$

где ω – круговая частота колебаний, рад/с; λ_i – частотный коэффициент; l – длина пролета, м; m – погонная масса участка, $m/n.m.$; EI – жесткость участка, $m \cdot m^2$. Момент инерции сечения пролетного строения в горизонтальной плоскости найден по известной полуэмпирической формуле, используемой в работе [8] для определения периодов вертикальных и горизонтальных колебаний. Формула позволяет выразить момент инерции в горизонтальной

плоскости через момент инерции в вертикальной. После преобразований получена зависимость:

$$I_{\text{гор}} = I_{\text{ср}} \times \left[\frac{B}{H} \times \frac{0.9}{1.93 - 0.01l} \right]^2 \quad (9)$$

где B – ширина пролетного строения, м; H – высота пролетного строения, м; L – полная длина пролетного строения, м; $I_{\text{ср}}$ – момент инерции в вертикальной плоскости, м^4 . Определенный по формуле (9) момент инерции пролетного строения в горизонтальной плоскости равен 1.334 м^4 .

Полученные в результате расчета периоды вертикальных колебаний по первой форме в случае учета масс монтажных кранов для симметричной схемы находятся в диапазоне от 0.013 с до 1.115 с, и в диапазоне от 0.058 с до 1.122 с – для несимметричной схемы. Таким образом, в вертикальной плоскости не происходит превышения означенной выше границе периодов колебаний по СНиП $T = 2$ с. Поэтому далее рассматривались только колебания в горизонтальной плоскости, поскольку в этой плоскости жесткость пролетного строения значительно меньше.

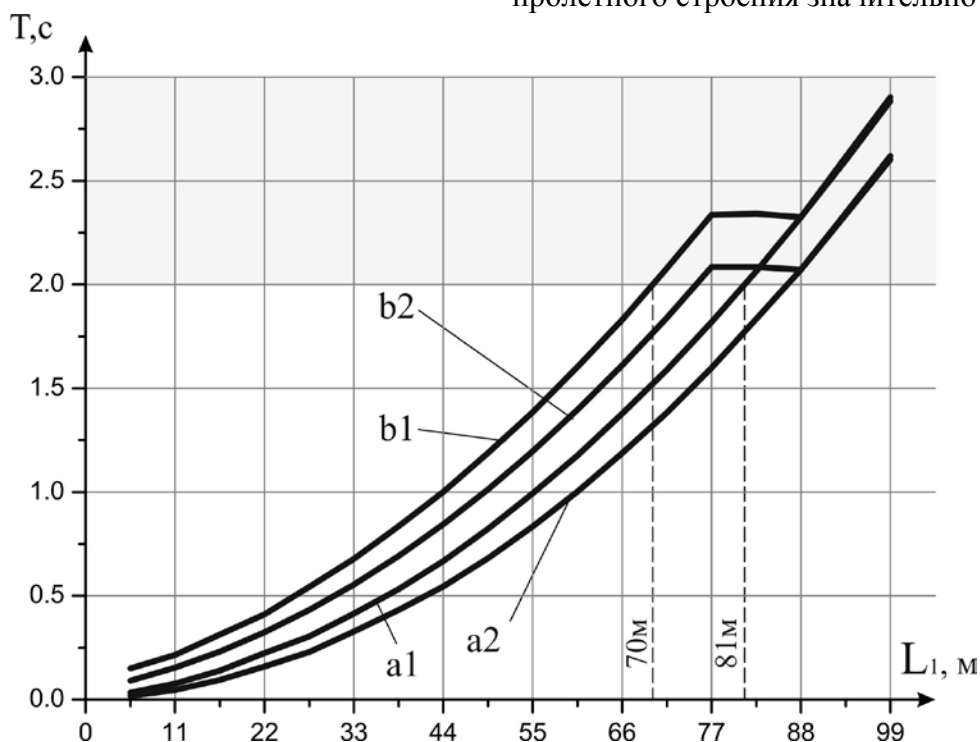


Рис. 3. График изменения периодов горизонтальных колебаний при монтаже пролетного строения в зависимости от длины консольных частей

a1 – для симметричной схемы с учетом масс монтажных кранов, a2 – без учета
b1 – для несимметричной схемы с учетом масс монтажных кранов, b2 – без учета

Схема представляет собой чисто теоретический случай, однако позволяет очертить тот диапазон длин консолей, при которых происходит превышение периодов.

График на Рис.3 показывает изменение периодов собственных горизонтальных колебаний по схемам монтажа А и В в зависимости от учета собственного веса монтажных кранов или же в случае пренебрежения ими. Как видно из графиков, допустимая длина консолей в

случае монтажа по схеме А составляет 81 метров, по схеме В – 70 м. В работе [7] допустимая длина консоли при навесном монтаже (с учетом анкерного пролета) составила 45.1 м, однако в том случае расчетная схема представляла собой двухпролетную балку с консольным правым пролетом.

Тем не менее оба результата свидетельствуют о возможности опасных колебаний именно в горизонтальной плоскости.

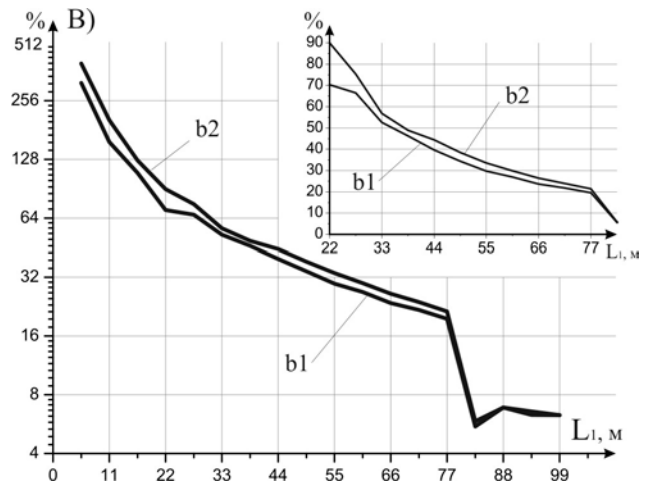
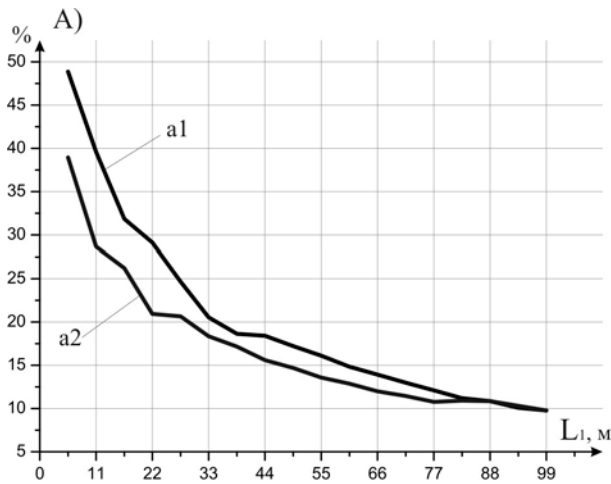


Рис. 4. А - график погрешности определения периодов собственных колебаний без учета масс монтажных кранов в зависимости от длин консолей

1а – для симметричной схемы, 2а – для несимметричной схемы.

В – логарифмический график погрешности определения периодов собственных колебаний несимметричной схемы как для симметричной при горизонтальных колебаниях

1b – для симметричной схемы, 2b – для несимметричной схемы.

На Рис.4 А приведен график относительной погрешности при определении периодов собственных вертикальных и горизонтальных колебаний без учета масс монтажных кранов. Как и ожидалось, наибольшее влияние на период колебаний массы монтажных кранов оказывают в начале уравновешенного монтажа, с последующим уменьшением. Как видно по графику, пренебрегать массой

кранов нельзя, так как даже в завершающей стадии монтажа погрешность в случае не учета масс кранов составляет около 10%. График В показывает существенное влияние опережения при монтаже одной из консольных частей. Ошибка при таком определении периодов горизонтальных колебаний достигает 300% (для начальной стадии монтажа) и 5% (завершающей стадии).

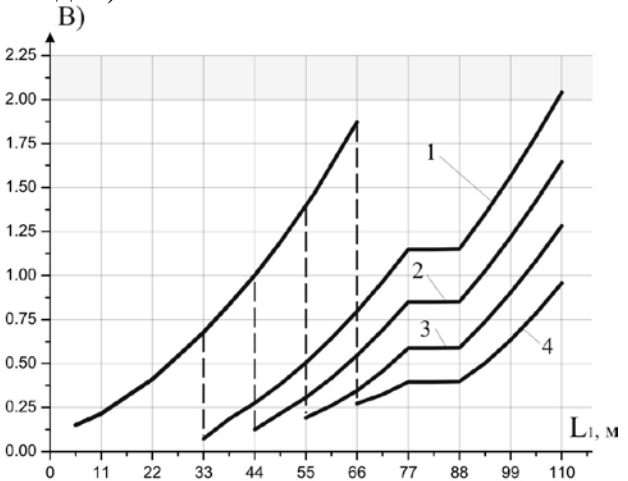
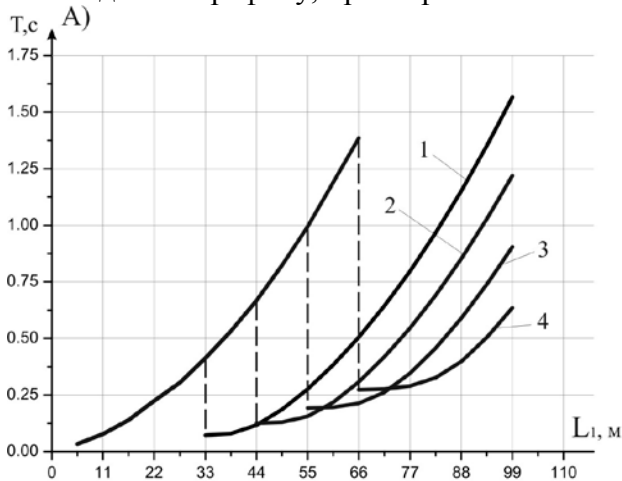


Рис. 5. График изменения периодов собственных горизонтальных колебаний зависимости от положения временной опоры

А – по симметричной схеме (схеме А), В – по несимметричной (схеме Б) 1 – на расстоянии 33 м по обе стороны от оси обстройки центральной опоры, 2 – 44 м, 3 – 55 м, 4 – 66 м.

На Рис.5 приведен график изменения периодов собственных колебаний в горизонтальной плоскости при наличии дополнительной временной опоры, обеспечивающей промежуточное опирание пролетного строения во время

навесного монтажа. При расчете учитывалось влияние массы монтажных кранов.

Дополнительная опора резко увеличивает частоту собственных колебаний и пропорционально уменьшает

период, уводя его из диапазона, очерченного СНиП.

Как видно из графиков Рис. 5 местоположение промежуточной опоры влияет незначительно на изменение периода собственных колебаний и при всех заданных положениях промежуточной опоры, период собственных колебаний меньше 2 с.

Подводя итог исследованию, прежде всего необходимо отметить:

- необходимость учета веса монтажных кранов в расчетных схемах при определении частот собственных колебаний (вертикальных и горизонтальных);

- необходимость определения частот именно горизонтальных колебаний, так как

в вертикальной плоскости допустимый пролет исходя из ограничения периода собственных колебаний (вылет консоли) достигает более ста метров (в данном случае решающая роль принадлежит прочности);

- о принципиально существенном влиянии промежуточных опор по длине пролетного строения, однако о несущественном влиянии их местоположения. Несмотря на довольно значительную разницу в периодах собственных колебаний по схеме А и В, последний вывод относительно независимости местоположения промежуточной опоры для них одинаков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1.Распопов А.С. Свободные колебания неразрезных ферм железнодорожных мостов / А.С. Распопов, К.И. Солдатов // Межвузовский сборник научных трудов «Вопросы статической и динамической работы мостов», - Д., 1989, -С.47-53.

2.Железняк Г.С. Исследование собственных колебаний квазирегулярной трехпролетной балки / Г.С. Железняк, К.И. Солдатов // Вісник ДІТУ, - Д., 2005, -С. 166-173.

3.Каплан В. Взаимодействие подвижного состава с неразрезными пролетными строениями железнодорожных мостов / В. Каплан, Ю.Г. Козьмин, Э.А. Шраер // Вопросы динамики мостов и теории колебаний. Межвузовский сборник научных трудов, ДИИТ, -Д., 1980.

4.Ананьев И.В. Справочник по расчету собственных колебаний упругих систем; Москва, 1946г., 224 с.

5.Эйхе Г.Н. Анализ структуры уравнения частот и форм колебаний прямолинейных цепных стержневых систем и свободные колебания радиально-вантовых мостов, Дисс. к.т.н., 183 с.

6.Солдатов К.И. Дослідження динаміки нерегулярних по довжинах прольотів мостових конструкцій / К.И. Солдатов, Г.С. Железняк, К.В. Гуржий// Вісник ДІТУ, - Д., 2004, -С. 221-226.

7.Солдатов К.И. О допустимой длине консоли при навесном монтаже пролетных

строений / К.И. Солдатов, А.А. Хохлов, А.Ю. Крисько // Межвузовский сборник научных трудов «Вопросы статической и динамической работы мостов», - Д., 1991, -С.52-58.

8.Бондарь Н.Г. и др. Динамика железнодорожных мостов, М.: Транспорт, 1965 г., 412 с.

9.Бобриков Б.В., Русаков И.М., Царьков А.А. Строительство мостов, М.: Транспорт, 1978 г., 296 с.