

---

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

---

УДК 624.21.036.6:624.042.8

С. М. ЗАГОРУЛЬКО<sup>1\*</sup>, М. К. ЖУРБЕНКО<sup>2</sup>, В. А. МИРОШНИК<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup> СПКТБ «Инфратранспроект-ДИИТ», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (095) 137 32 12, эл. почта zaga1010@mail.ru

<sup>2</sup> ОНИЛ искусственных сооружений, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (067) 122 71 63

<sup>3</sup> ОНИЛ искусственных сооружений, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (097) 828 64 87, эл. почта miroshnik\_vetal@mail.ru

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ АВТОДОРОЖНОЙ НЕРАЗРЕЗНОЙ КРИВОЛИНЕЙНОЙ В ПЛАНЕ ЭСТАКАДЫ

**Цель.** Исследование динамического поведения, определение форм и частот собственных колебаний мостовых конструкций, которые были запроектированы и построены в период, когда динамический расчёт сложных сооружений выполнялся путём упрощения расчётных схем. **Методика.** Для получения точных динамических характеристик конструкции при действии колёсных транспортных средств на мостовой переход, было принято решение использовать в расчёте метод математического моделирования конструкции, а именно метод конечных элементов. Моделирование и расчёт данного сооружения проводился в среде программного комплекса «Лира». Составленная модель полностью отвечает всем геометрическим и линейным характеристикам реального сооружения, что подтверждается полученными результатами и значениями, полученными в ходе испытаний, которые проводились ОНИЛ динамики мостов. **Результаты.** На основании выполненных расчётов следует: что все формы свободных колебаний эстакады являются взаимно-связными между собой и таким образом, разделить собственные формы колебаний сооружения на вертикальные, горизонтальные и крутильные можно лишь условно. Принятая схема конечно-элементной модели эстакады позволяет решить задачи, связанные не только с динамическими характеристиками, но и позволяет определить фактические значения внутренних сил (нормальных, поперечных, моментов) в любом заданном элементе конструкции при воздействии на него одиночной фиксированной силы или группы сил. **Научная новизна.** Как известно, современные тенденции отечественного и зарубежного мостостроения связаны с широким внедрением новых высокопрочных материалов, совершенствованием конструктивных и технологических форм, а также методов расчета. Вызванные этими факторами изменения в конструкциях, привели к уменьшению жесткости, повышению чувствительности их к динамическим воздействиям. В связи с этим (а также с ростом интенсивности и величины нагрузок) возросла роль динамических расчетов, исследований динамического поведения мостовых конструкций. **Практическая значимость.** Основываясь на полученных результатах математического моделирования нетиповой конструкции пролётного строения моста, можно утверждать, что использование МКЭ является эффективным способом определения динамических характеристик. Также положительным отличием рассмотренного метода от других, является возможность визуализации полученных результатов, что позволяет определить характерные особенности в работе сооружения.

**Ключевые слова:** эстакада; габарит; пролётное строение; крутящий момент; расчётная схема; главная балка; ортотропная плита; диафрагма; динамические характеристики; метод конечных элементов; моделирование; собственные колебания; частота

#### Введение

Объектом исследования стала металлическая автодорожная эстакада рамно-неразрезной системы запроектирована проектным институтом «Укрпроектстальконструкция» г. Киев, по схеме 2×56+2×64+2×56 м расположена в плане

на кривой радиусом 200 м и введена в постоянную эксплуатацию в октябре 1978 г. Конструкция рассчитана в соответствии с требованиями СН200-62 [1] на пропуск четырех полос автомобильного движения по схеме Н30 и НК80 и пешеходов по двум тротуарам шириной по

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

2,25 м каждый. Габарит проезжей части (15,64 м) принят из условия пропуска автомобильной нагрузки со скоростью до 60 км/час.

Поперечное сечение блока эстакады приведено на рис. 1.

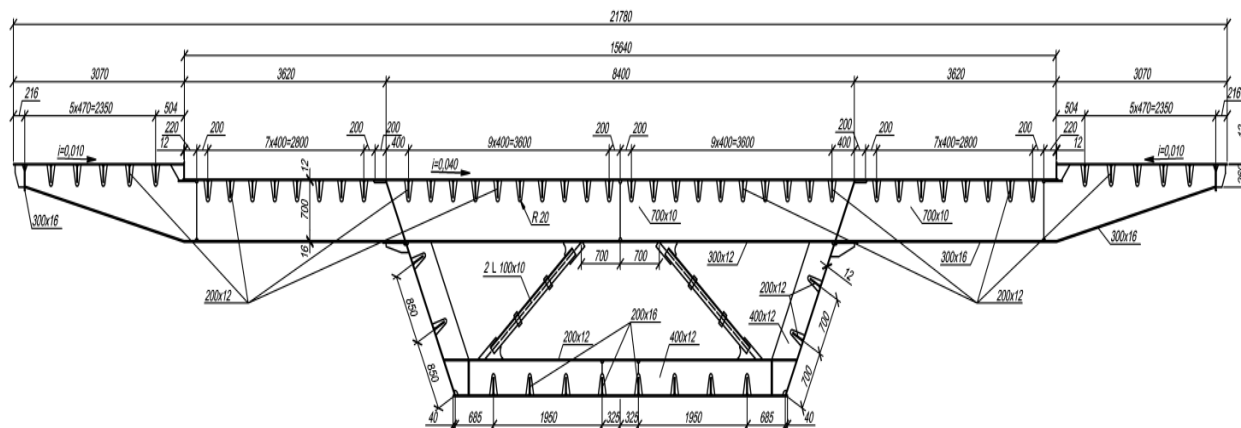


Рис. 1. Поперечное сечение эстакады в середине пролёта

При проектировании эстакады была разработана и применена новая статическая схема использующая кривизну пролётного строения, как положительный фактор, повышающий эффект пространственной работы сооружения, а также принятое инженерное решение конструкции эстакады должно было обеспечить высокое эстетическое вписывание сооружения в существующий ландшафт. Новая статическая схема отличается тем, что концы криволинейного в плане пролётного строения закрепляются к устоям шарнирами, подвижными в вертикальной плоскости и с ограниченной подвижностью в горизонтальной. Расчётная схема эстакады приведена на рис. 2.

Такое закрепление заставляет сооружение работать как пространственную систему: на вертикальное воздействие – как шестипролётную неразрезную криволинейную в плане раму, на горизонтальные нагрузки – как двухшарнирную арку, поддерживаемую в ортогональной плоскости стойками. Крутящие моменты пролётное строение воспринимает как криволинейная в плане балка, защемленная по концам и упруго опертая на промежуточные стойки. Главная балка пролётного строения стальная, коробчатого трапециевидного сечения высотой 2,5 м с шириной понизу 6,0 м и сверху 8,4 м. Собрана из отдельных блоков (на сварке) длиной по оси проезда 12,0 м и 13,0 м приопорных блоков на опоре № 0 и № 6. Габарит проезда обеспечивается устройством двухсторонних консольных свесов ортотропной плиты, которая опирается на поперечные балки. Односторонний поперечный уклон проезжей части  $i = 0,04$  создается за счет разной высоты боковых стенок коробки и их углов наклона к горизонту.

Поперечная жесткость пролётного строения и неизменяемость контура сечения главной балки обеспечивается постановкой поперечных ребер и уголкового связей внутри коробки. Угловые связи, совместно с поперечными ребрами боковых стенок, нижнего горизонтального листа и поперечной балки верхней ортотропной плиты образуют жесткий контур. Такие связи поставлены через 2...4 м по длине

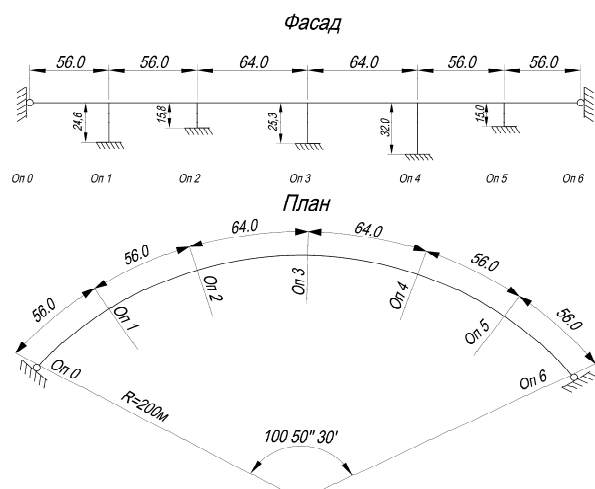


Рис. 2. Расчётная схема эстакады

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

пролёта. В местах опирания на промежуточные стойки и устои в балке устроены сплошные опорные диафрагмы. В диафрагмах предусмотрены овалы для прохода внутри коробки и отверстия для пропуска кабелей инженерных коммуникаций проходящих по мосту.

Промежуточные опоры (стойки) выполнены в виде одиночных металлических колонн коробчатого прямоугольного поперечного сечения с размерами в плане  $2000 \times 1000$  мм, меньшей стороной вдоль продольной оси эстакады. Высота колонн различна от 13,0 до 32,0 м. В верхней части у сопряжения с главной балкой колонны имеют раструбное уширение в виде пилястр  $2000 \times 2000$  мм. Поперечное сечение колонн замкнутое, составлено четырьмя листами-стенками. Изнутри листы стенки усилены поперечными рёбрами жёсткости из стальной полосы  $100 \times 10$  мм, установленными с шагом 2 м. Монтажный стык колонн с коробчатой главной балкой выполнен непосредственно приваркой их к днищу короба с полным проваром. Закрепление колонн к фундаментам выполнено путём полного их закрепления при помощи 4-х анкерных болтов по углам периметра. Монтажный стык колонн с нижним листом коробчатой главной балкой выполнен непосредственно приваркой их к днищу короба с полным проваром.

### Цель

Целью данной статьи является исследование динамического поведения, определение форм и частот собственных колебаний мостовых конструкций, которые были запроектированы и построены в период, когда динамический расчёт сложных сооружений выполнялся путём упрощения расчётных схем.

### Методика

Конструкция этой уникальной в своём роде эстакады, имея подобную расчётную схему и характеристики, практически полностью исключает возможность ручного счёта, а именно: определение точных динамических характеристик, которые бы адекватно, а главное с достаточной точностью характеризовали действительную работу сооружения на конкретных этапах эксплуатации конструкции.

Последние несколько десятилетий в силу стремительного развития компьютерных технологий абсолютным лидером среди методов расчёта инженерных конструкций стал метод конечных элементов (МКЭ). Для получения точных динамических характеристик конструкции при действии колёсных транспортных средств на мостовой переход, было принято решение использовать в расчёте метод математического моделирования конструкции, а именно метод конечных элементов. Моделирование и расчёт данного сооружения проводился в среде программного комплекса «Лира». Была смоделирована оптимальная пространственная конечно-элементная модель всей эстакады, в которую вошло 141755 отдельных конечных элементов объединённых между собой внутренними связями. Составленная модель полностью отвечает всем геометрическим и линейным характеристикам реального сооружения, что подтверждается полученными результатами и значениями, полученными в ходе испытаний, которые проводились ОНИЛ динамики мостов. На рис. 3 и 4 приведены конечно-элементные модели конструктивно отличающихся секций сооружения, а на рис. 5 показана модель всей эстакады.

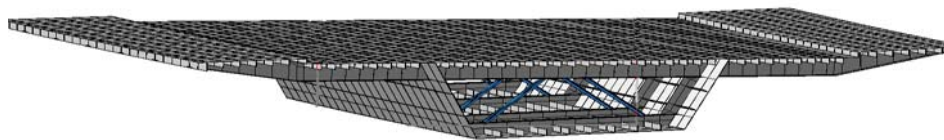


Рис. 3. Конечно-элементная модель среднего блока пролётного строения

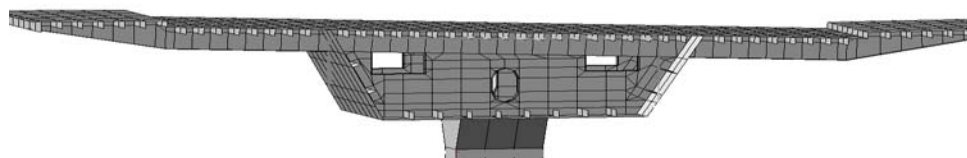


Рис. 4. Конечно-элементная модель ригеля пролётного строения в местах опирания на промежуточные стойки



Рис. 5. Конечно-элементная модель эстакады

При моделировании конечно-элементной модели эстакады, использовались универсальный пространственный стержневой КЭ (№ 10 в библиотеке КЭ программного комплекса «Лира») для моделирования угловых связей и тела промежуточных стоек; универсальный четырехугольный КЭ оболочки (№ 44) и универсальный треугольный КЭ оболочки (№ 42) для моделирования всех остальных элементов конструкции. Изучение динамических видов воздействия нагрузки на мосты предшествует предварительное изучение параметров свободных колебаний конструкции. Определения форм и частот собственных колебаний сооружения – является одной из задач данного исследования.

Колебаниями называются движения или процессы, которые характеризуются определенной повторяемостью во времени. Колебания широко распространены в окружающем мире и могут иметь самую различную природу. Это могут быть механические (маятник), электромагнитные (колебательный контур) и другие виды колебаний.

Собственными (свободными) называются колебания конструкции или его элемента, происходящие без воздействия внешних сил, или колебания, происходящие после некоторого начального нарушения состояния равновесия механической системы, которая затем остается представленной самой себе и движется под действием восстанавливающих сил и сил внутреннего трения.

Как известно, современные тенденции отечественного и зарубежного мостостроения связаны с широким внедрением новых высокопрочных материалов, совершенствованием конструктивных и технологических форм, а также методов расчета. Вызванные этими факторами изменения в конструкциях, привели к уменьшению жесткости, повышению чувствительности их к динамическим воздействиям. В связи с этим (а также с ростом интенсивности и величины нагрузок) возросла роль динамических расчетов, исследований динамического

поведения мостовых конструкций, особенно сооружений, которые были запроектированы и построены в период, когда динамический расчет сложных сооружений выполнялся путём упрощения расчётных схем, что непосредственно влияло на полученные результаты.

На начальном этапе расчёта было получено 7 значений частот собственных колебаний эстакады, которые приведены в табл. 1, а формы этих колебаний приведены на рис. 7.

Таблица 1

Частоты собственных колебаний эстакады

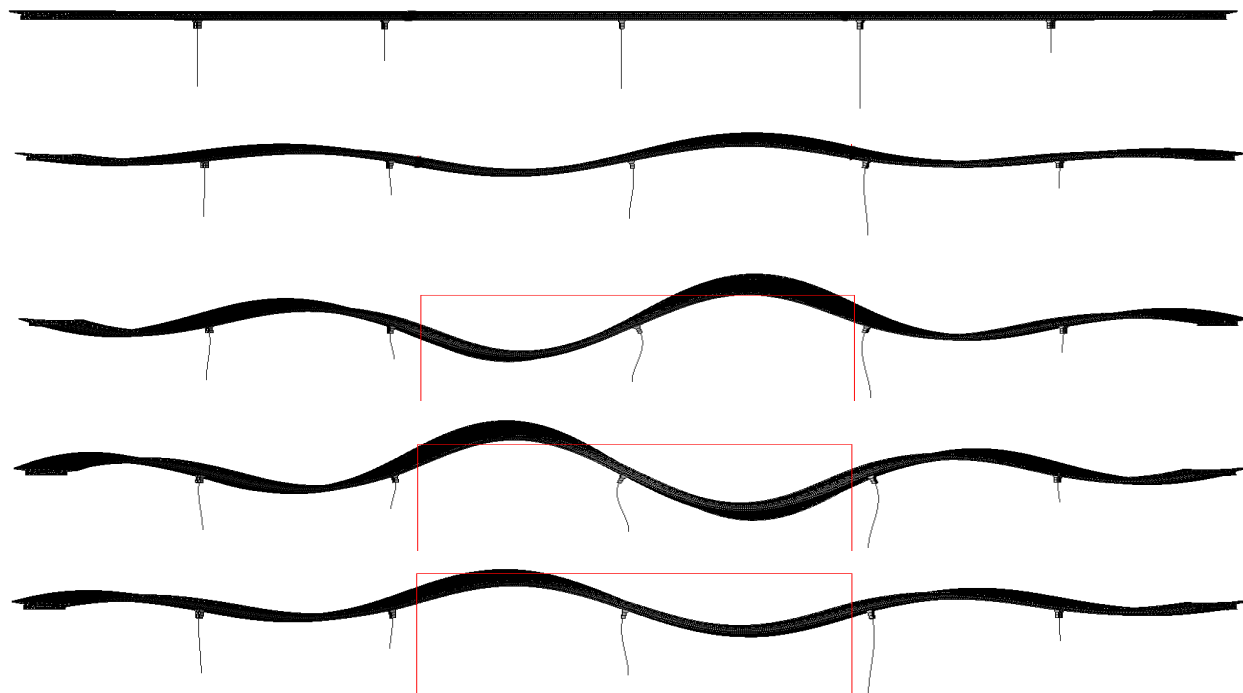
№ п/п	Частоты		Периоды
	рад/с	Гц	
1	11,36	1,81	0,5528
2	13,13	2,09	0,4782
3	13,33	2,12	0,4710
4	13,96	2,22	0,4499
5	14,24	2,27	0,4411
6	15,69	2,50	0,4002
7	16,55	2,64	0,3794

### Результаты

Проводя анализ форм собственных колебаний по результатам выполненных расчётов следует: что все формы свободных колебаний эстакады являются взаимно-связными между собой и таким образом, разделить собственные формы колебаний сооружения на вертикальные, горизонтальные и крутильные можно лишь условно. Так при частоте колебаний 1,81 Гц преобладают вертикальные колебания, которые сопровождаются закручиванием и горизонтальным поперечным перемещениями; при частоте 2,12 Гц преобладают горизонтальные колебания, которые сопровождаются вертикальными и крутильными; при частоте собственных колебаний 2,22 Гц можно выделить крутильные колебания конструкции, которые в свою очередь сопровождаются двумя основными формами колебания сооружения.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

а)



б)

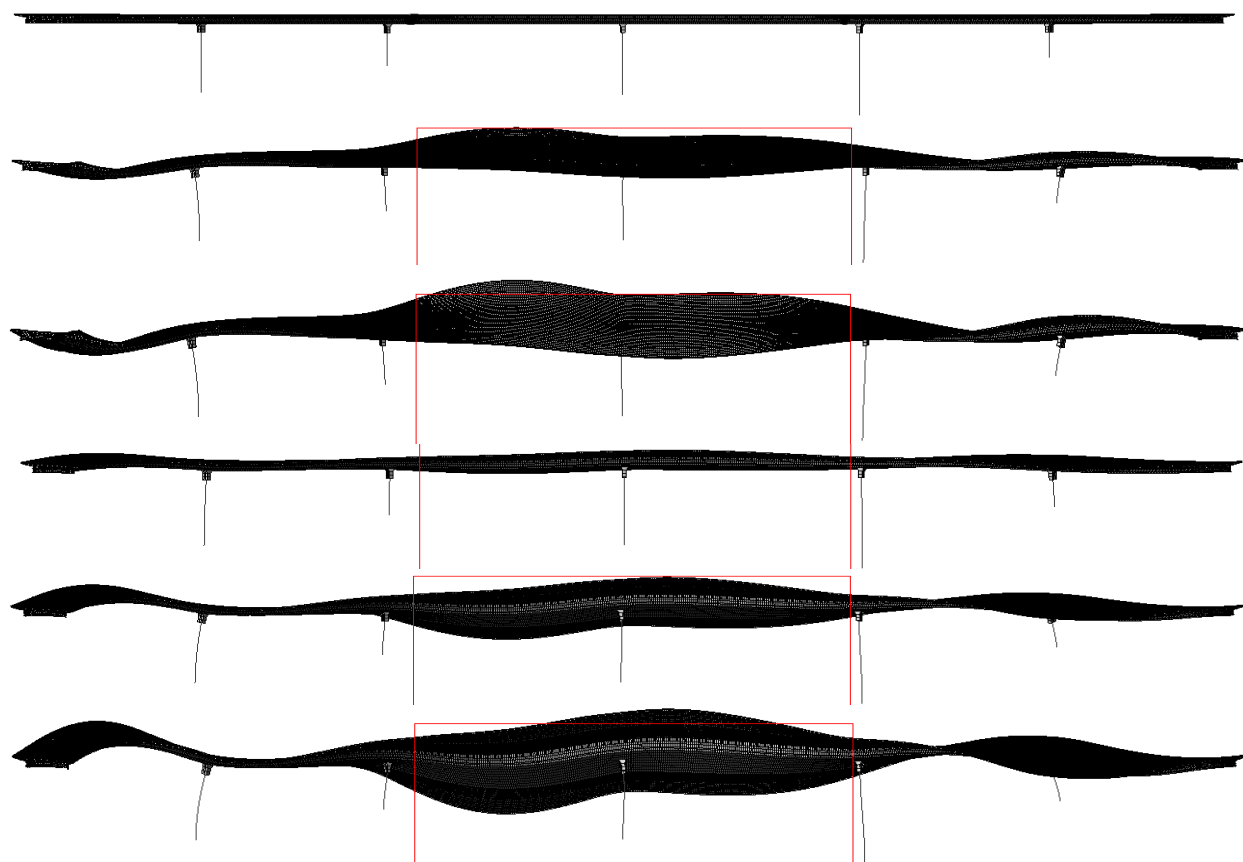


Рис. 7. Формы собственных колебаний:  
а – преобладающих вертикальных; б – преобладающих крутильных

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

В табл. 2 для сравнения приведенных значений частот полученных при испытании сооружения и рассчитанных.

Абсолютного совпадения (судя из таблицы) не наблюдается, но их близость очевидна. При математическом моделировании эстакады невозможно учесть всех параметров сооружения, которые необходимо ввести в конечно-элементную модель, а именно: инженерных коммуникаций, которые проходят по мосту;

наличие барьерного ограждения; перильного ограждения; осветительных мачт и мачт троллейбусной линии; толщину асфальтового покрытия, смотровые приспособления и др. Все выше перечисленные факторы влияют на массу и жесткость конструкции, внося фоновые искажения, которые в свою очередь непосредственно влияют на частоты собственных колебаний сооружения.

Таблица 2

Сравнения приведенных значений частот собственных колебаний

Форма собственных колебаний	Значения частот полученных из испытаний, Гц	Значения частот полученных из расчёта, Гц	Разность, %
Вертикальные	1,83	1,81	1,1
Горизонтальные	2,15	2,12	1,4
Крутильные	2,47	2,22	11,3

## Выводы

1. Основываясь на полученных результатах математического моделирования нетиповой конструкции пролётного строения моста, можно утверждать, что использование МКЭ является эффективным способом определения динамических характеристик.

2. Также положительным отличием рассмотренного метода от других, является возможность визуализации полученных результатов, что позволяет определить характерные особенности в работе сооружения.

3. Принятая схема конечно-элементной модели эстакады позволяет решить задачи, связанные не только с динамическими характеристиками, но и позволяет определить фактические значения внутренних сил (нормальных, поперечных, моментов) в любом заданном элементе конструкции при воздействии на него одиночной фиксированной силы или группы сил.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. СН200-62 Технические условия проектирования железнодорожных, автодорожных и городских мостов и труб [Текст]: – Введ. 1962.04.23. – М.: Трансжелдориздат, 1962. – 308 с.
2. Обследование и испытание автодорожного перехода по сооружениям ДнепроГЭСа в г. Запорожье [Текст]: отчёт по НИР (заключ.) / Дне-

- пропетровский ин-т инженеров жел. дор. транспорта; рук. Загора А. Л. испол.: Сухоруков Б. Д. [и др.]. – Д., 1980. – 100 с. – № ГР 78072829. – Инв. № Б862384.
3. Артемов, В. Е. К вопросу о точности вычислений в расчетах строительных конструкций [Текст] / В. Е. Артемов, А. С. Распопов // 36. наук. праць Дніпропетровського нац. ун-ту залізн. тр-ту. – Д., 2012. – Вип. 3. – с. 6-8.
  4. Современные технологии расчета и проектирования металлических и деревянных конструкций [Текст]: монография / за ред. М. С. Барабаша. – М.: Издательство АСВ, 2008. – 328 с.
  5. Стрелец-Стрелецкий, Е. Б. Лира 9.4. Учебное пособие [Текст]: Под ред. академика РААСН, докт. техн. наук, проф. А. С. Городецкого – К.: Издательство «ФАКТ», 2008. – 164 с.
  6. Распопов, А. С. Особенности компьютерного моделирования динамической загруженности конструкций железнодорожных мостов [Текст] / А. С. Распопов, В. Е. Артемов, С. П. Русу // 36. наук. праць Укр. держ. акад. залізн. тр-ту. – Х., 2010. – Вип. 114.-с. 123-132.
  7. Распопов, О. С. Автоматні та топологічні методи динамічного аналізу просторових стержневих систем [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.17 / Распопов Олександр Сергійович. – Д., 2009. – 38 с.
  8. Dion, Cassandra Real-Time Dynamic Substructuring Testing of a Bridge Equipped with Friction-Based Seismic Isolators [Текст] / Cassandra Dion, Najib Bouaanani, M. ASCE, Robert Tremblay and Charles-Philippe Lamarche). – J. Bridge Eng, 17:4-14. – 2012.

С. М. ЗАГОРУЛЬКО<sup>1\*</sup>, М. К. ЖУРБЕНКО<sup>2</sup>, В. А. МИРОШНИК<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup> СПКТБ «Інфратранспроєкт-ДІТ», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (095) 137 32 12, ел. пошта zaga1010@mail.ru

<sup>2</sup> ГНДЛ штучних споруд, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (067) 122 71 63

<sup>3</sup> ГНДЛ штучних споруд, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (097) 828 64 87, ел. пошта miroshnik\_vetal@mail.ru

## ВИЗНАЧЕННЯ ВЛАСНИХ КОЛИВАНЬ АВТОДОРОЖНЬОЇ НЕРОЗРІЗНОЇ КРИВОЛІНІЙНОЇ В ПЛАНІ ЕСТАКАДИ

**Мета.** Дослідження динамічної поведінки, визначення форм і частот власних коливань мостових конструкцій, які були запроектовані і побудовані в період, коли динамічний розрахунок складних споруд виконувався шляхом спрощення розрахункових схем. **Методика.** Для отримання точних динамічних характеристик конструкції при дії колісних транспортних засобів на мостовий перехід, було прийнято рішення використовувати в розрахунку метод математичного моделювання конструкції, а саме метод скінчених елементів. Моделювання та розрахунок даної споруди проводився в середовищі програмного комплексу «Лира». Складена модель повністю відповідає всім геометричним і лінійним характеристикам реальної споруди, що підтверджується отриманими результатами і значеннями, отриманими в ході випробувань, які проводилися ГНДЛ динаміки мостів. **Результати.** На підставі виконаних розрахунків слід вважати, що всі форми вільних коливань естакади є взаємно зв'язаними між собою і таким чином, розділити власні форми коливань споруди на вертикальні, горизонтальні і крутильні можливо лише умовно. Прийнята схема скінчено-елементної моделі естакади дозволяє вирішити завдання, пов'язані не тільки з динамічними характеристиками, але і дозволяє визначити фактичні значення внутрішніх сил (нормальних, поперечних, моментів) в будь-якому заданому елементі конструкції при впливі на нього одиночної фіксованої сили або групи сил. **Наукова новизна.** Відомо, що сучасні тенденції вітчизняного і зарубіжного мостобудування пов'язані з широким впровадженням нових високоміцних матеріалів, вдосконаленням конструктивних і технологічних форм, а також методів розрахунку. Викликані цими факторами зміни в конструкціях, призвели до зменшення жорсткості, підвищення чутливості їх до динамічних впливів. У зв'язку з цим (а також із зростанням інтенсивності і величини навантажень) зросла роль динамічних розрахунків, досліджень динамічної поведінки мостових конструкцій. **Практична значимість.** Аналізуючи отримані результати математичного моделювання нетипової конструкції прогонової будови моста, можна стверджувати, що використання МСЕ є ефективним способом визначення динамічних характеристик. Також позитивною відмінністю розглянутого методу від інших, є можливість візуалізації отриманих результатів, що дозволяє визначити характерні особливості в роботі споруди.

**Ключові слова:** естакада; габарит; прогонова будова; крутячий момент; розрахункова схема; головна балка; ортотропна плита; діафрагма; динамічні характеристики; метод скінчених елементів; моделювання; власні коливання; частота

SERGEY ZAGORULKO<sup>1\*</sup>, MIHAIL GURBENKO<sup>2</sup>, VITALIY MIROSHNIK<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup> STDEB «Infratransproekt-DIIT», Dnipropetrovsk national university of railway transport named after academician V. Lazaryan, 2 Lazaryana Str., Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (095) 137 32 12, e-mail zaga1010@mail.ru

<sup>2</sup> BSRL Structure, Dnipropetrovsk national university of railway transport named after academician V. Lazaryan, 2 Lazaryana Str., Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (067) 122 71 63

<sup>3</sup> BSRL Structure, Dnipropetrovsk national university of railway transport named after academician V. Lazaryan, 2 Lazaryana Str., Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (097) 828 64 87, e-mail miroshnik\_vetal@mail.ru

## DETERMINATION NATURAL VIBRATIONS OF THE CONTINUED PLACED ON CURVE FLYOVER IN OPERATION

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

**Purpose.** The study of the dynamic behavior, the definition of shapes and natural frequencies of the bridge structure, which were designed and built at a time when the dynamic calculation of complex structures carried by simplifying the design schemes. **Methodology.** To obtain accurate dynamic characteristics of the structure under the action of wheeled vehicles on the bridge crossing, it was decided to use the calculation method of mathematical modeling of structures, namely finite element method. Simulation and calculation of this structure was carried out in an environment of « Lira." Drafted model meets all geometric and linear characteristics of the real structure, which is confirmed by the results obtained and the values obtained in the tests that were conducted BSRL of Dynamics bridges. **Findings.** On the basis of the calculations it follows that all forms of free oscillations of the overpass are mutually connected with each other and thus share the eigen modes of structures on vertical, horizontal and torsional only conditionally. Accepted scheme of the finite element model flyover solves problems related not only to the dynamic characteristics, but also to determine the actual values of internal forces ( normal , transverse moments) in any given structural member when subjected to a single fixed force or group of forces. **Originality.** As is known, the current trends of domestic and foreign bridge construction associated with the widespread introduction of new high-strength materials, the improvement of the design and technological forms and methods of calculation. Changes these factors in structures resulted in a reduction of rigidity , increased sensitivity to their dynamic effects . In this regard (as well as the intensity and magnitude of load) increased the role of dynamic calculations, studies the dynamic behavior of the bridge structure. **Practical value.** Based on the results of mathematical modeling of atypical superstructure of the bridge, it can be argued that the use of the finite element method is an effective way to determine the dynamic characteristics. Also positive difference of this method from others is the ability to visualize the results, allowing you to identify the characteristic features in the building.

**Keywords:** overpass; clearance; span; torsion moment; design model; main beam; orthotropic slab; diaphragm; dynamic behavior; finite-element method; modeling; natural vibrations; frequency

*Стаття рекомендована к публікації д.т.н., проф. В. Д. Петренко (Україна).*

Поступила в редколлегию 11.08.2013.

Принята к печати 10.10.2013.