

УДК 624.042

## КОНЦЕПЦІЇ РОЗРАХУНКІВ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ НА РУХОМІ НАВАНТАЖЕННЯ

Давидов Ігор, канд. техн. наук, доц.; Чабан Вячеслав, канд. техн. наук, доц.;  
Ковтун-Горбачова Тетяна, канд. техн. наук, доц.

*Державний вищий навчальний заклад*

*«Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»*

**Постановка проблеми.** Врахування динамічної роботи конструкцій, взаємодіючих з рухомих навантаженням можна виконати за загальноприйнятим спрощеним підходом з використанням схем завантажень по лініях впливу і динамічних коефіцієнтів. Точні методики для вирішення завдань моделювання рухомих навантажень, наприклад, від підресорених інерційних транспортних екіпажів складних конструкцій на пружно-дисипативній підставі (або на опорах) в даний час відсутні. Огляд аналітичних рішень задачі коливання будівельних конструкцій під впливом рухомих навантажень виконаний в [1]. Підхід нормативно-довідкових документів [2; 3] до розрахунку конструкцій на рухомі навантаження полягає в застосуванні схем завантажень з рівномірно-розподіленими еквівалентними статичними навантаженнями за спеціальними таблицями і графіками. Більшість рішень задачі взаємодії конструкцій з рухомими навантаженнями виконані для шарнірно опертої балки. При цьому в рішеннях вводять ряд припущень: нехтують масою балки і враховують масу рухомого вантажу, або враховують масу балки і нехтують масою вантажу, приймають постійну швидкість руху вантажу, спрощують задачу до побудови ліній впливу внутрішніх зусиль і т. п. від рухомих навантажень для кожного конкретного випадку. Але для складних об'єктів, наприклад, будівлі-паркінгу (не схожої на міст) потрібні не лінії впливу, а поверхні впливу. Залишається проблема визначення коефіцієнта динамічності.

**Мета дослідження.** Аналіз концепцій моделювання рухомих навантажень на будівельні конструкції і основних проблем, що виникають при врахуванні їх взаємодії.

**Основні результати.** Для вирішення завдань взаємодії різних конструкцій і рухомого навантаження можуть бути застосовані універсальні обчислювальні комплекси на основі методу скінченних елементів.

Рухоме навантаження в комплексі MicroFE (розробник ТЕХСОФТ, [www.techsoft.ru](http://www.techsoft.ru)) може бути представлено у вигляді зосередженої сили, яка пересувається по лінії. Недоліки такого підходу є неможливість моделювати взаємодію рухомого навантаження з урахуванням деформованої схеми конструкції.

У комплексі SELENA (<http://selenasys.com>) для виконання розрахунку на рухомі динамічні навантаження будуються маршрути накатки ліній впливу. Користувач може задати одночасно будь-яке число незалежних маршрутів і пустити по ним незалежні динамічні навантаження, синхронізувавши їх за часом. При такому підході рух підресореного екіпажу по конструкціях, що деформуються, з урахуванням їх динамічної взаємодія коректно змоделювати не виходить.

У комплексі ANSYS Workbench (компанія ANSYS, Inc.) спеціальна опція для завдання рухомого навантаження в інтерфейсі відсутня. Рухоме навантаження можна змоделювати за допомогою ANSYS Parametric Design Language (мова програмування в ANSYS, на якому можна створювати макроси). Застосування цієї функції дозволяє задати навантаження, описувані довільними функціями значення, які можуть розподілятися і в просторі, і в часі. Задаються величини навантаження в зазначеній точці а потім, ANSYS інтерполірує ці значення на вузли моделі, розташовані в

зазначеному діапазоні. Таким чином, можна отримати «рухливе» навантаження у вигляді системи сил, що моделюють транспортний засіб, який буде рухатися по моделі конструкції. Складність даного підходу полягає в необхідності завданні функції розподілу сил при русі, граничних умов, а також в попередній підготовці файлу із зовнішніми даними, які будуть використовуватися для завдання навантаження.

У комплексі SOFiSTiK (розробник SOFiSTiK AG) для моделювання мостів передбачений модуль CABD (рухливі навантаження), що дозволяє створювати параметричні моделі. Можна скористатися опцією побудови набору рухливих сил в SOFiPLUS (running imposed load) для створення набору сил. Існує можливість побудови поверхонь впливу в модулі ELLA шляхом інтерполяцій ліній впливу, прив'язаних до смуг руху (lanes). Розрахунково-теоретична оцінка динамічної реакції елементів на вплив «рухомого» навантаження як складного нелінійного в часі процесу здійснюється методом покрокових ітерацій. Для вирішення зазначеного завдання повинен бути написаний макрос, що описує рух навантаження із заданою швидкістю і відповідає за побудову нелінійного ітераційного процесу (розрахунок на послідовних тимчасових інтервалах). Написання таких макросів заздалегідь обумовлює результати розрахунку. Отримання достовірних результатів можливо тільки при наявності у користувача обчислювального комплексу досвіду аналітичних розрахунків і класичних методів.

Автори для вирішення завдань врахування взаємодії «рухомого» навантаження та конструкцій з пружно-дисипативними характеристиками, складних режимів гальмування та нерівномірного руху пропонують застосовувати однотипні підходи, які є усередненням між аналітичними рішеннями і МСЕ. Розвивається методика застосування дискретних динамічних моделей з вузловою передачею рухомих навантажень [4; 5]. Методика заснована на численних розрахунках систем диференційних рівнянь руху з використанням методів Рунге-Кутта 4...5 порядків.

Для підтвердження достовірності застосовуваного алгоритму виконано порівняння результатів розрахунків однопрогоноюю і двопрогоноюю балок із застосуванням описаних вище обчислювальних комплексів. При спрощенні завдання до статичної дії тривалого (статичного) імпульсу гарний збіг отримано для прогинів середнього перетину у всіх комплексах SCAD, ANSYS, SOFiSTiK. Розбіжність в прогинах становить до 5 %. При наростанні швидкості руху імпульсу на навантаженість балки впливають динамічні складові. При аналізі сумарних прогинів потрібно враховувати коливання, що виникають відносно рівня статичного прогину.

Зіставлення ліній пружною осі балки в окремі моменти її динамічного реагування на рухомий імпульс показало збіжність розрахунків у комплексах ANSYS, SOFiSTiK.

Для ілюстрації можливостей запропонованої методики розглянемо скіповий двоковшовий підйомник для перевантаження вантажів (див. рис. 1). Загальна висота підйомника становить 58.3 м, відстань між ходовими балками рейкових шляхів становить 1.8 м. Нижня частина складається з двох мостів, рознесених «у світлі» на 1 м. Кожен міст складається з двох плоских ферм, з'єднаних зв'язками по нижніх поясах і розпірками – по верхніх поясах. У фермах в якості нижніх поясів включені ходові балки скипів висотою 1.95 м, розмір панелі ферм становить 1.5 м. Перетин нижніх поясів – два швелера № 24П. Перетин розкосів і стійок решітки ферм – поодинокі куточки 75×6.

Конструкції сходів, оглядових майданчиків, огорожувальних сіток враховувалися тільки в якості навантажень. Вузли обпирання опор приймалися шарнірно нерухомими.

При швидкості руху 1 м/с максимальні прогини головних ферм мосту скіпового підйомника тільки від скіпа (ківш з заповненням 3 м<sup>3</sup>) складають до 4 мм. Прогини від несприятливого поєднання постійних навантажень, тимчасових корисних навантажень, вітрових навантажень і вплив температури складають до 10 мм і не перевищують

допустимі значення (1/500...1/600 прольоту). При цьому максимальні поздовжні зусилля в конструкціях мосту підйомника складають до 200 кН, а згинальні моменти – до 6 кНм. Нижчі форми коливань мосту характеризуються найбільшими відносними амплітудами згинально-крутильних коливань з власними частотами 2...3 Гц. За результатами перевірочних розрахунків міцність і стійкість конструкцій моста забезпечені.

З ростом швидкості руху перевантаженого скіпа (20 м/с і вище) збільшується вплив динамічної складової навантаженості. Наприклад, в результаті аварійних режимів роботи або при обриві канатів. При цьому максимальні прогини збільшуються до 30 мм, максимальні зусилля зростають в 2 рази. За результатами перевірочних розрахунків деформативність, міцність і стійкість конструкцій моста будуть не забезпечені.

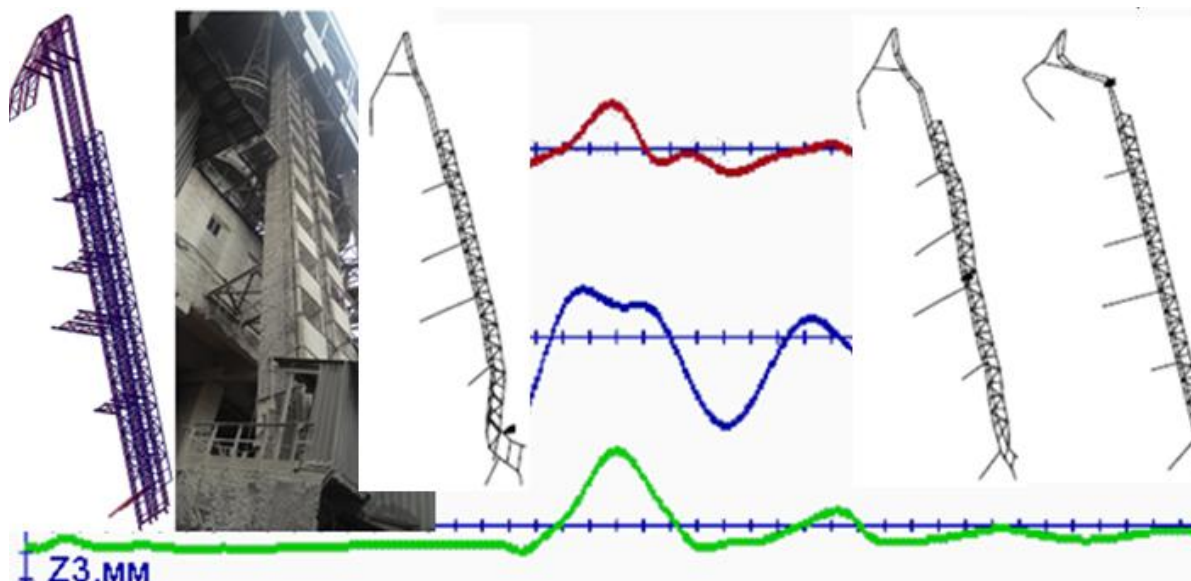


Рис. 1. Вид деформованої схеми при русі скіпа, віброграми коливань

**Висновки.** Виконано аналіз підходів до моделювання рухомих навантажень та їх взаємодії з конструкціями. У доповіді будуть надані приклади щодо ефективності запропонованого підходу до вирішення даного завдання.

### Список використаних джерел

1. Пановко Я. Г., Губанова И. И. Устойчивость и колебания упругих систем. Москва: Наука, 1987. 352 р.
2. ДБН В.1.2-15:2009. Мости та труби. Навантаження та впливи. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 83 с.
3. Барштейн М. Ф., Бородачев Н. М., Блюмина Л. Х. И др. Динамический расчет сооружений на специальные воздействия. Под ред. Б. Г. Коренева, И. М. Рабиновича. Москва : Стройиздат, 1981. 215 с.
4. Kulyabko V., Chaban V., Makarov A., Yaroshenko D. Taking account of nonlinear properties of subsystems in problems of dynamic interaction of structures with loads, bases and flows. *Nonlinear Dynamics-2016 : Proceedings of the 5th Intern. Conf.* Kharkov : National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", 2016. Pp. 125–132.
5. Kulyabko V. V., Davydov I. I. Dynamics, strength and diagnostics of road foundation, pavement and artificial structures, adjacent to road. *Durable and safe road pavements : IX Intern. Conf.* Kielce–Warszawa, 2003. Pp. 509–515.