

ВИМІРЮВАННЯ ТИМЧАСОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ ВІД РУХОМОГО СКЛАДУ МОСТІВ ТА ШЛЯХОПРОВІДІВ

Левтеров А. І., Фандєєва А. Є.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Розглянуті методи та пристрої для вимірювання тимчасових навантажень від суцільного транспортного потоку з неперіодичним тривалим навантаженням прогонових будов мостів та шляхопроводів із застосуванням оптичних лазерних систем, що розгортаються.

Ключові слова: деформація, коливання, міст та шляхопровід, оптична система, що розгортається, лазер, коліматор, фотоприймач, кроковий двигун.

Вступ

Сучасний розвиток автомобільного транспорту характеризується постійним оновленням номенклатури автомобілів, зокрема великовантажних, зростанням інтенсивності та швидкості їх руху, особливо у великих мегаполісах і на дорогах державного та місцевого значення (рис. 1, 2) [1, 2]. Це певною мірою ускладнює умови експлуатації прогонових будов автодорожніх мостів, призводить до їхніх пошкоджень і передчасного зносу. Погіршення технічного стану конструкцій прогонових будов значною мірою обумовлено підвищеним динамічним впливом автомобілів на мости [3, 4].



Рис. 1. Рух суцільного транспортного потоку на мосту Патона у м. Києві



Рис. 2. Рух суцільного транспортного потоку на Північному мосту в м. Києві

Аналіз публікацій

Нові споруди, на яких обмеження, як правило, не вводять, можуть також отримувати значні динамічні дії від проходження навантаження, пов'язані з недоліками конструкцій і статичної схеми прогонової будови [5].

Зазвичай у разі динамічних навантажень від суцільного транспортного потоку з неперіодичним тривалим навантаженням прогонових будов коливання цих будов мають характер складних коливань, серед яких найбільш вагомо проявляються такі два типи коливань [6]. Перший тип – коливання, що виникають унаслідок дій під час проїзду автомобілем нерівностей проїжджої частини мостової споруди. Величина цих коливань залежить від таких чинників:

- форми нерівностей покриття їздового полотна, особливо від їх ритмічності;
- схеми автомобіля (найбільші коливання виникають від двохосьових автомобілів – МАЗ, ЗІЛ тощо).

Іншим типом коливань на мостах є вплив коливань кузова автомобілів на ресорах і схлах. Зокрема для автомобіля КамАЗ-55111 загальною вагою 20 т ці коливання характеризуються низькою стабільною частотою коливань в інтервалі 2–4 Гц, яка визначається власною частотою коливань кузова [6–8].

Крім того, коливання прогонових будов автодорожніх мостів, що спричиняються тимчасовим навантаженням залежно від стану покриття мостової споруди, можна поділити на три види:

- коливання прогонової будови, що створюються в разі проїзду автомобіля на певній швидкості по прогінній будові великої довжини, близько 100 м, де існує ймовірність нав'язування автомобілем своїх власних коливань прогоною будовою. Такі прогонові

будови мають низьку першу власну частоту (1,0 Гц), яка не збігається з власною частотою підресореної маси автомашини, тому до резонансних явищ за першою формою коливань це не призводить;

– коливання прогонової будови, викликані проїздом тимчасового колісного навантаження по покриттю проїжджої частини з глибокими одиночними вибоїнами, розташованими приблизно посередині прогону (це явище називається – ударом). Ударна дія, як правило, створюється на балкових прогонових будовах малих мостів. Це здебільшого залізобетонні прогонові будови, що мають велику жорсткість;

– коливання прогонової будови, викликані проїздом навантаження по покриттю проїжджої частини мостової споруди з вибоїнами, що чергуються, чи хвилями (коліїний), здатними розгойдати прогонову будову і спричинити резонансні явища. Такий вплив переважає на прогонах середньої довжини (до 63 м) [6–8]. Варто зазначити, що за умови резонансних явищ значно зростають амплітуди коливань.

Мета і постановка завдання

Метою цієї статті є вимірювання амплітуди коливань мостової споруди від тимчасових навантажень у вигляді суцільного транспортного потоку з неперіодичним тривалим навантаженням оптичними методами. Відповідно до поставленої мети потрібно розробити пристрій і методику для вимірювання амплітуди коливань мостової споруди.

Побудова вимірювальної системи

Оптичні та оптико-фізичні методи вимірювання та прилади як найбільш точні застосовуються в багатьох галузях науки і виробництва та є основою науково-технічного прогресу [9].

Ґрунтуючись на принципі розгортання лазерного променя в горизонтальній або вертикальній площині [10], був розроблений пристрій для вимірювання тимчасових навантажень від рухомого складу мостів та шляхопроводів. Структурна схема цього пристрою наведена на рис. 3.

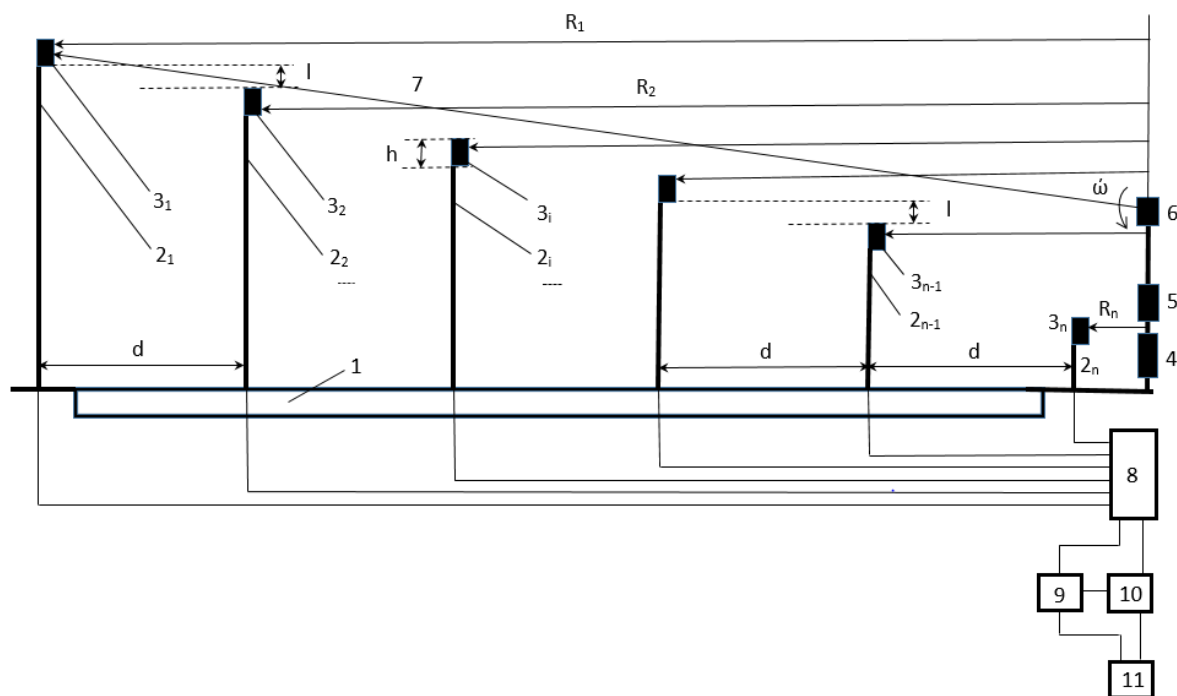


Рис. 3. Загальний вигляд пристрою і положення фотоприймачів на конструкції без деформації

Він містить лазер, оптичний коліматор, вузол розгортки лазерного променя та n фотоприймачів, зокрема всі n фотоприймачів є n послідовно розташованими датчиками динамічного навантаження мостової конс-

трукції, які знаходяться на опорах, розміщених на деякій певній рівній відстані один від одного по горизонталі впродовж конструкції, жорстко закріплених на конструкції, що деформується. Вихід кожного n фотоприймача

з'єднаний з відповідними n входами блоку комутації, зокрема вихід блоку комутації з'єднаний з входом перетворювача «час – лінійні переміщення». Вихід перетворювача з'єднаний із входом реєстратора, а кожний послідовний фотоприймач, що знаходиться на опорі, розташований на деякій певній рівній відстані один від одного по вертикалі, а фотоприймачі перший і n , лазер, оптичний коліматор і вузол розгортки лазерного променя винесені за межі мостової конструкції, що обстежується. Блок обчислення експлуатаційного навантаження автодорожніх мостів та шляхопроводів з'єднаний з виходом блоку комутації, а його вхід з'єднаний з виходом перетворювача «час – лінійні переміщення». Крім того вихід блоку обчислення експлуатаційного навантаження з'єднаний із входом реєстратора.

Працює пристрій таким чином. Для виміру деформації конструкції великих розмірів застосовуються n фотоприймачів $3_1, \dots, 3_n$, що є n послідовно розташованих датчиків деформації, які знаходяться на опорах $2_1, \dots, 2_n$, розміщених на деякій певній рівній відстані d один від одного по горизонталі впродовж конструкції 1, жорстко закріплених на конструкції (рис. 3). Зокрема фотоприймачі перший і n винесені за межі конструкції. Крім того за межі конструкції винесені лазер 4, оптичний коліматор 5 і вузол розгортки лазерного променя 7. У пристрої застосовується лазер з безперервним випромінюван-

ням променя певної довжини хвилі. Послідовно з лазером розташовується оптичний коліматор, який складається з об'єктива, у фокальній площині якого розміщується вихід лазерного променя. Оптичний коліматор 5 забезпечує паралельність лазерного променя, і тому за рахунок, практично, нульової розбіжності вся енергія лазерного променя буде зосереджена на чутливій поверхні кожного фотоприймача, виконаний з певного матеріалу, що без особливих перешкод пропускає лазерний промінь. Усі n фотоприймачів містять фотодіод або фотоелектричний помножувач (ФЕП), перед яким розташовуються чутлива поверхня та оптичний фільтр, що пропускає промінь тільки певної довжини хвилі лазера. Усі елементи фотоприймача розміщуються в герметичному корпусі. Вузол розгортки 6, наприклад, є двигуном, на валу якого розташовується дзеркало або призма із дзеркальною гранню, що знаходиться під кутом 45° до лазерного променя, або крутий оптичний клин, за рахунок чого промінь лазера розгортається у вертикальній площині.

Оптичний сигнал, що розгортається, з вузла розгортки 6 послідовно пробігає по чутливій поверхні кожного $3_1, \dots, 3_n$ фотоприймача певної довжини h (рис. 3). Електричний сигнал з фотодіода або ФЕП надходить на підсилювач електричного сигналу фотоприймача, який після підсилення надходить на блок комутації 8 (рис. 4).

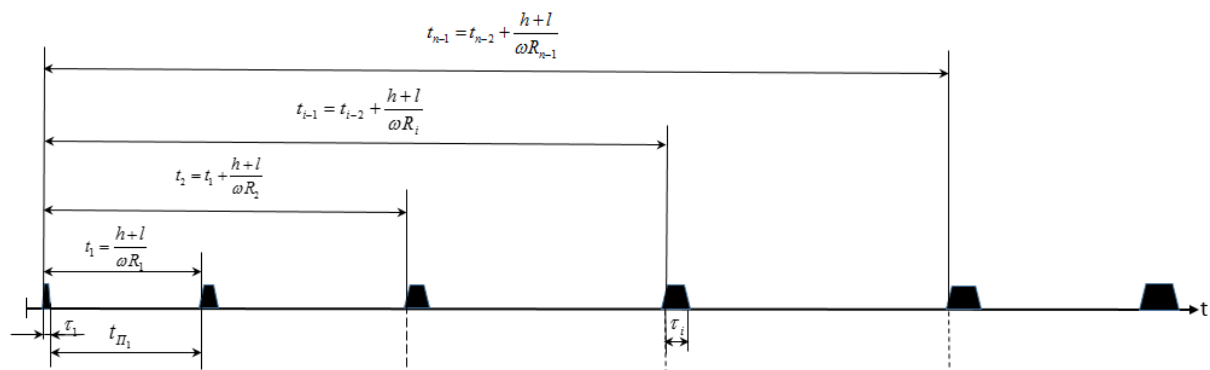


Рис. 4. Часові діаграми роботи пристрою без деформації конструкції

Тривалість електричного імпульсу з виходу фотоприймача буде визначатися швидкістю проходження лазерного променя по чутливій поверхні фотоприймача, яка у свою чергу буде визначатися кутовою швидкістю $\dot{\omega}$ двигуна вузла розгортки та відстанню R вузла розгортки до фотоприймача (рис. 3) [11].

$$\tau_1 = \frac{h}{\dot{\omega} R_1}, \quad (1)$$

де $\dot{\omega} = 2 \cdot \pi \cdot f$ – кутова швидкість обертів двигуна; R_1 – відстань між блоком розгортки лазерного променя та першим фотоприймачем.

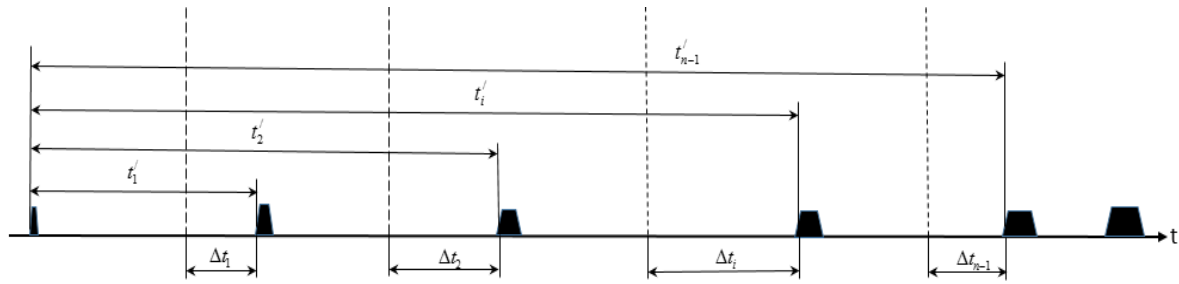


Рис. 6. Часові діаграми роботи пристрою з деформацією конструкції

Тоді з урахуванням виразу (5) вираз (7) можна записати у вигляді

$$l + \Delta l_i = \frac{l \cdot t'_i}{t_i}, \quad (8)$$

звідки

$$\Delta l_i = \frac{l \cdot t'_i - l t_i}{t_i} = \frac{l \cdot (t'_i - t_i)}{t_i}, \quad (9)$$

але $\Delta t_i = t'_i - t_i$ (рис. 6).

Тоді вираз (9) можна переписати у вигляді

$$\Delta l_i = \frac{l \cdot \Delta t_i}{t_i}. \quad (10)$$

Сигнали з фотоприймачів $3_1, \dots, 3_n$ через блок 8 комутації надходять на перетворювач 9 «час – лінійні переміщення», де після перетворення й обчислення надходять на перший вхід реєстратора 11.

Обчислення t_i і t'_i у виразі (9) проводиться певним методом, наприклад, заповненням інтервалів між двома передніми фро-

нтами імпульсів відповідних двох фотоприймачів імпульсами тактової частоти з тактового генератора або ноніусним методом, які знаходяться у перетворювачі 9, а l заздалегідь відома величина [9].

Під час руху суцільного транспортного потоку з неперіодичним тривалим навантаженням автодорожніх мостів і руху поїздів по залізничному мосту конструктивні елементи мостів будуть коливатися. Ці коливання показані непідсвіченими імпульсами ліворуч (нижня амплітуда коливання) та праворуч (верхня амплітуда коливання) на рис. 7 і 8.

Для обчислення тимчасових навантажень від рухомого складу (динамічних навантажень) мостів сигнали з фотоприймачів $3_1, \dots, 3_n$ через блок 8 комутації надходять і на перший вхід блоку 10 обчислення експлуатаційного навантаження автодорожніх та залізничних мостів, де з урахуванням статичних деформацій Δl_i , якщо вони є, які пропорційні відповідним Δt_i обчислюються нижня та верхня амплітуди коливань мостової конструкції.

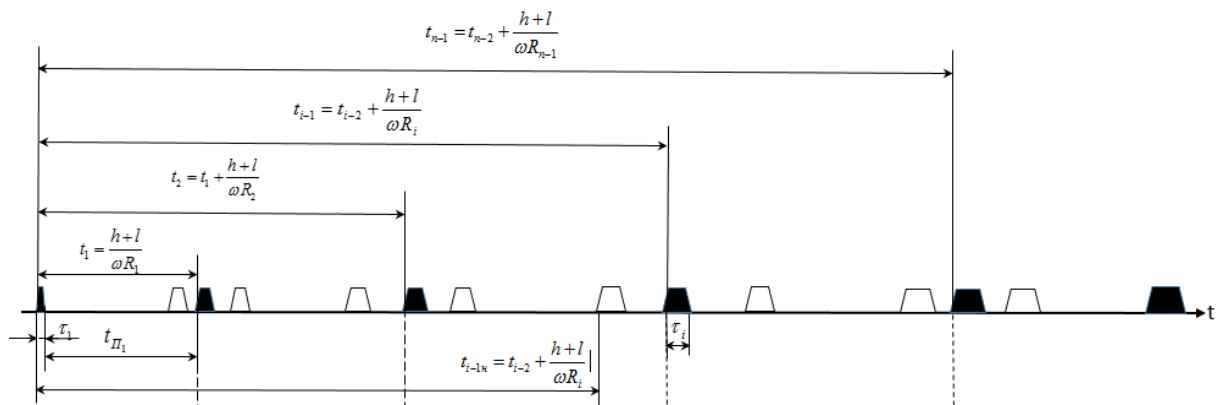


Рис. 7. Часові діаграми роботи пристрою з динамічним навантаженням мостів без деформації конструкції

На рис. 7 наведено t_{i-1n} для обчислення нижньої амплітуди коливань без статичної деформації (для верхньої амплітуди коливань це буде, відповідно, t_{i-1e} , тобто час розгортання лазерного променя до правого не підсвіченого імпульсу). На рис. 8 наведено t'_{ie} для обчислення верхньої амплітуди коливань з деформацією (для нижньої амплітуди коливань це буде, відповідно, t'_{in} , тобто час розгортання лазерного променя до лівого не підсвіченого імпульсу). Положення не підсвічених імпульсів на рис. 7 та 8 відповідає одному періоду обертання лазерного променя. Отже, амплітуда нижніх коливань мостової конструкції на одному періоді обертання лазерного променя буде обчислюватися як

$$\Delta l_{in} = \Delta l_{in} - \Delta l_i,$$

а амплітуда верхніх коливань як

$$\Delta l_{ie} = \Delta l_{ie} - \Delta l_i.$$

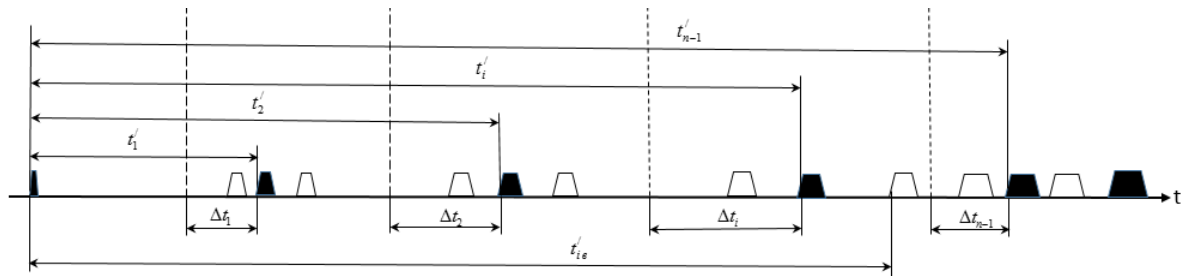


Рис. 8. Часові діаграми роботи пристрою з динамічним навантаженням мостів з деформацією конструкції

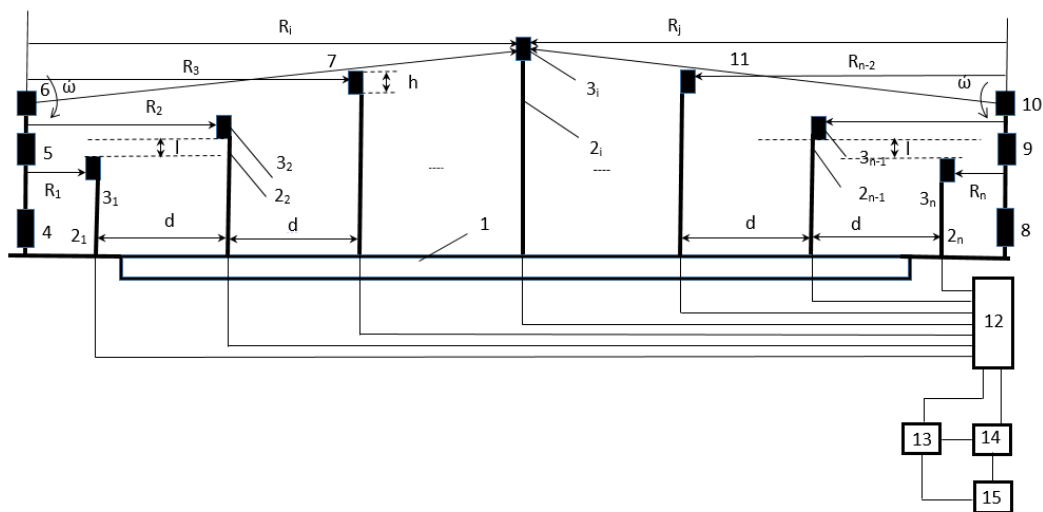


Рис. 9. Загальний вигляд пристрою і положення фотоприймачів на конструкції без деформації конструкції

Після обчислення амплітуд коливань відповідних мостових конструкцій дані з виходу блоку 10 надходять до другого входу реєстратора 11.

Можна зазначити, що для обчислення тимчасових навантажень від рухомого складу (динамічних навантажень) мостів та мостових конструкцій великих розмірів кількість фотоприймачів обмежена висотою опор, на яких знаходяться фотоприймачі, тому що за умови великої кількості фотоприймачів їхні чутливі поверхні будуть перекривати одна одну, тоді як у разі обмеженої кількості фотоприймачів постраждає точність виміру тимчасових (динамічних) навантажень.

Тому було прийнято рішення розроблений пристрій доповнити другим лазером, другим оптичним коліматором та другим вузлом розгортки лазерного променя, розташованими на опорі, що винесена за межі конструкції на протилежному кінці елемента конструкції, зокрема чутливі поверхні 1, 2, ..., i-1 фотоприймачів повернуті в напрямку лазерного променя, що розгортається першим вузлом розгортки, а i+1, i+2, ..., n фотоприймачів повернуті до лазерного променя, що розгортається другим вузлом розгортки (рис. 9, 10).

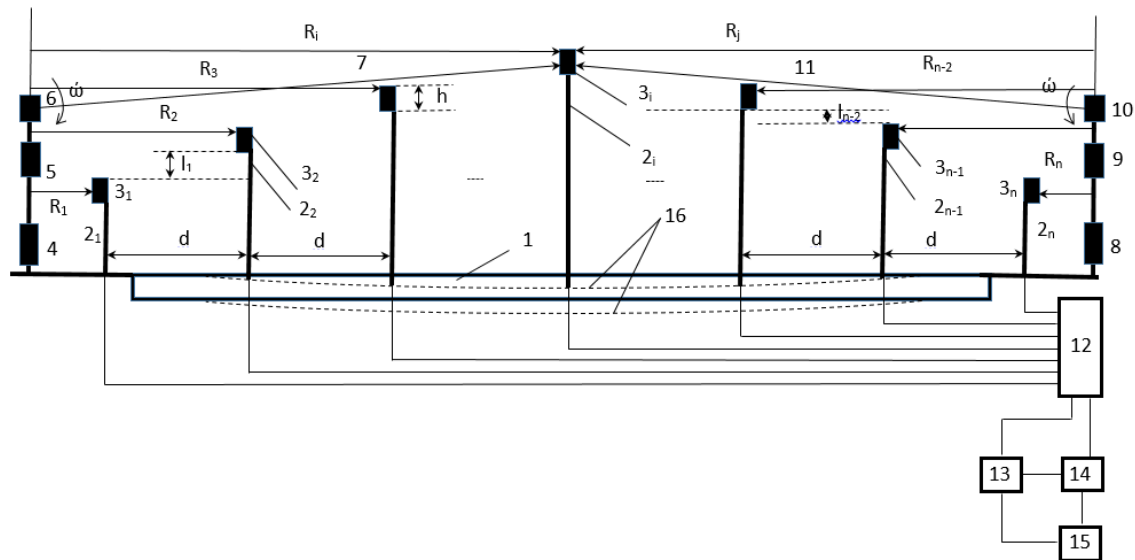


Рис. 10. Загальний вигляд пристрою та положення фотоприймачів на конструкції з деформацією конструкції

Зокрема фотоприймач i виконаний з дво-секційною чутливою поверхнею, одна секція якої повернута в напрямку лазерного променя, що розгортається першим вузлом розгортки (фотоприймач i), а друга секція повернута до лазерного променя, що розгортається другим вузлом розгортки (фотоприймач j) [12].

Тоді вираз (10) для однієї половини конструкції можна переписати у вигляді

$$\Delta l_i = \frac{l \cdot \Delta t_i}{t_i}, \quad (14)$$

а для другої половини конструкції – у вигляді

$$\Delta l_j = \frac{l \cdot \Delta t_j}{t_j}. \quad (16)$$

Зокрема, варто зазначити, що $\Delta l_i = \Delta l_j$.

Висновки

Пристрій може бути застосований в автоматизованій системі моніторингу деформацій мостової споруди (АСДМ), що дозволить оперативно контролювати їхній стан, зміщення і прогини, які виникають унаслідок впливу зовнішніх природно-кліматичних чинників, а також амплітуди коливань навантажень від суцільного транспортного потоку з неперіодичним тривалим навантаженням

прогонових будов мостів та шляхопроводів із застосуванням оптичних лазерних систем, що розгортаються.

Література

1. www.kiev.informator.ua
2. www.lenta.ua
3. Хазанов М.Л. Компьютерная измерительная система для испытаний мостовых и других инженерных сооружений // Приборы. 2006. № 9.
4. Сергеев А.А. Методика динамических испытаний автомобильных мостов // Научные труды ОАО ЦНИИС. Москва: 2004. Вып. 220. С. 35–45.
5. Этин П.Ю. Диагностика и испытания мостов: учеб.-метод. пособие / М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. Гомель: БелГУТ, 2010. 65 с.
6. Сергеев А.А. Методика экспериментальной оценки динамических воздействий подвижной нагрузки на пролетные строения автомобильных мостов: диссертация... кандидата технических наук: 05.23.11. Москва, 2007. 197 с. РГБ ОД, 61:07-5/3173.
7. URL: https://znaytovar.ru/gost/2/Metodicheskie_rekomendaciiMeto13.html
8. URL: https://www.irgups.ru/sites/default/files/irgups/modelirovanie_i_raschet_mostov_na_staticheskie_i_dinamicheskie_nagruzki_i_vozdeystviya.pdf
9. Кирилловский В.К. Оптические измерения. Часть 1. Введение и общие вопросы. Точность оптических измерений: учебное пособие. Санкт-Петербург: ГИТМО(ТУ). 2003. 47 с.

10. Темников Ф.Е. Методы и модели развертывающихся систем. Москва: Энергоатомиздат, 1987. 136 с.
11. Leverov A.I., Storchak M.O. Measuring system to monitor deformation of large size structure members // Bulletin of KNAHU. Collection of scientific works, issue 83. 2018. С. 66–73.
12. Пат. КМ 135379 Україна: МПК G01B11/16(2006.01). Левтеров А.І. Пристрій для вимірювання деформацій елементів конструкцій великих розмірів. Заявка у 2019 01026 31.01.2019. Опубл. 25.06.2019, бюл. № 12.

References

1. URL: www.kiev.informator.ua
2. URL: www.lenta.ua
3. Khazanov M.L. Computer measuring system for testing the bridge and other engineering structures // Devices. 2006, No. 9 [in Russia].
4. Sergeev A.A. Dynamic Testing Methodology for Road Bridges // Scientific works of TsNIIS OJSC. Moscow: 2004. Issue. 220. P. 35–45 [in Russia].
5. Etn P.Yu. Diagnostics and testing of bridges: study guide / MOE of Republic of Belarus, Belarus. state univ. of transp. Gomel: BelSUT, 2010. 65 p. [in Russia].
6. Sergeev A.A. Methodology for the experimental evaluation of the dynamic effects of rolling load on the spans of road bridges: the thesis... of Cand.Sc. (Engineering): 05.23.11 Moscow, 2007 197 p. RSL OD, 61: 07-5 / 3173 [in Russia].
7. URL: https://znaytovar.ru/gost/2/Metodicheskie_rekomendaciiMeto13.html
8. URL: https://www.irgups.ru/sites/default/files/irgups/modelirovanie_i_raschet_mostov_na_staticheskie_i_dinamicheskie_nagruzki_i_vozdeystviya.pdf
9. Kirrilovsky V.K. Optical measurements. Part 1. Introduction and general questions. The accuracy of optical measurements. Study guide. SPb: GITMO (TU). 2003. 47p.
10. Temnikov F.E. Methods and Models of Unfolding Systems. Moscow: EAP, 1987. 136 p. Pat. КМ 135379 Ukraine: IPC G01B11/16 (2006.01). Levterov A.I. The device for measuring the deformations of elements in constructions of large sizes. Application u 2019 01026 01/31/2019. Publ. 06/25/2019, bull. No.
11. Leverov A.I., Storchak M.O. Measuring system to monitor deformation of large size structure members // Bulletin of KNAHU. Collection of scientific works, issue 83. 2018. С. 66–73.
12. Пат. КМ 135379 Україна: МПК G01B11/16 (2006.01). Левтеров А.І. Пристрій для вимірювання деформацій елементів конструкцій великих розмірів. Заявка у 2019 01026 31.01.2019. Опубл. 25.06.2019, бюл. № 12.

Левтеров Андрій Іванович, к.т.н., професор, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25, тел. (057)707-36-58, lai@khadi.kharkov.ua

Фандєєва Аліна Євгенівна, к.е.н., доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25, тел. +380577073721, fandyasportik@outlook.com

Measurement of imposed loads from the rolling stock of bridges and overbridges

Abstract. Modern development of road transport is characterized by constant updating of the nomenclature of cars (including heavy-duty vehicles), by increasing of intensity and speed of their movement, especially in large metropolises and on roads of national and local significance. This complicates the operating conditions of spans of highway bridges to some extent, leads to their damage and early wear. The deterioration of the technical condition of the structures of the spans is largely due to the increased dynamic impact of the cars on the bridges. The oscillations of span of highway bridges caused by imposed loads, depending on the state of pavement of the bridge structure, can be divided into three types: the oscillations of the spans, which are created during the passage of the car at a certain speed along the span of long length (about 100 meters), where there is a probability of imposing the vibrations of the car to the span. Such spans have a low first natural frequency (1.0 Hz), which does not coincide with the natural frequency of the sprung mass of the car, so it does not lead to resonance phenomena in the first form of oscillation; the oscillations of the span caused by the passage of an imposed wheel load on the pavement of the road surface with deep isolated holes, located approximately in the middle of the span (this phenomenon is called a blow). The impact force is usually created on the girder spans of small bridges. These are usually concrete slab spans with high rigidity; the oscillations of the span, caused by the passage of load on the pavement of the road surface of the bridge structure with alternating holes or the waves (track), which are able to swing the span and to lead to the resonant phenomena. This effect is prevalent on the spans of average length (up to 63 m). It should be noted that with the resonance phenomena, the amplitudes of oscillations increase significantly. The purpose of this article is to measure the amplitude of oscillations of a pontilice from imposed loads in the form of the continuous traffic with nonperiodical constant load by optical methods. In accordance with this goal, the device and the technique for measuring the amplitude of oscillations of the pontilice should be developed. A device for measuring the imposed loads from the rolling stock of bridges and overbridges has been developed based on the principle of laser beam unfolding in a horizontal or a vertical plane. Methods and devices for

measuring the imposed loads from the continuous traffic with nonperiodical constant load of spans of bridges and overbridges with the use of unfolding optical laser systems have been considered. The devices can be applied in the automated system of monitoring of deformations of the pontilice (ASDP), which will allow to control quickly their condition, displacements and deflections caused by the influence of external natural and climatic effects, as well as by the amplitude of oscillations of loads from the continuous traffic with nonperiodical constant load of spans of bridges and overbridges with the use of unfolding optical laser systems.

Key words: deformation, vibrations, bridge and overpass, optical scanning system, laser, collimator, photodetector, stepper motor.

Levterov Andrey, PhD in Technical Sciences, Professor, Kharkiv National Automobile and Highway University, 25 Yaroslava Mudroho, Kharkiv, 61002, Ukraine, +380577073658, lai@khadi.kharkov.ua

Alina Yevhenivna, Cand. Sc. (Econ.) (PhD), Associate Professor, Kharkiv National Automobile and Highway University, 25 Yaroslava Mudroho,

Kharkiv, 61002, Ukraine, phone number +380577073721, fandyasportik@outlook.com

Измерение временных нагрузок от подвижного состава мостов и путепроводов

Аннотация.: Рассмотрены разработанные автором методы и устройства для измерения временных нагрузок от сплошного транспортного потока с непериодическими длительными нагрузками пролетных строений мостов и путепроводов с применением развертывающих лазерных систем.

Ключевые слова: деформация, колебания, мост и путепровод, оптическая развертывающая система, лазер, коллиматор, фотоприемник, шаговый двигатель.

Левтеров Андрей Иванович, к.т.н., профессор, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, 61002, г. Харьков, ул. Ярослава Мудрого, 25, (057)707-36-58,

Фандеева Алина Евгеньевна, к.э.н., доцент, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, 61002, г. Харьков, ул. Ярослава Мудрого, 25, +380577073721, fandyasportik@outlook.com
