

ЛАЗЕРНА СКАНУВАЛЬНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ДЕФОРМАЦІЙ МОСТОВИХ СПОРУД ТА ПІДМОСТОВОГО ГАБАРИТУ

Проф. Левтеров А.І., ХНАДУ

Для контролю та прогнозування стану мостової споруди (мосту, шляхопроводу і ін.) з метою завчасного попередження про тенденції змін геометричних параметрів споруди, необхідно періодично проводити обстеження конструкції мосту.

Традиційно періодичний моніторинг стану споруди виконується з використанням різних геодезичних засобів:

- оптичні високоточні нівеліри (визначення вертикальних осідань);
- електронні тахеометри TPS (визначення горизонтальних і вертикальних зсувів);
- супутникові приймачі GPS (визначення горизонтальних і вертикальних зсувів);
- далекоміри (визначення горизонтальних зміщень);
- датчики нахилу, акселерометри, тензометри, щелемери і інші засоби збору даних [1].

Однак, в автоматизованих системах деформаційного моніторингу (АСДМ) мостової споруди необхідно використовувати інші методи, прилади та системи вимірювання деформації, що дозволяють 24 години на добу і 365 днів на рік проводити моніторинг із заданою дискретністю [2].

Сучасні АСДМ затребувані, вони широко впроваджуються і використовуються як в нашій країні, так і за кордоном.

Вартість АСДМ може становити до 0,01% вартості зведення самої споруди, а всі експлуатаційні витрати, включаючи витрати на електроживлення, забезпечення роботи каналів комунікації, планове обслуговування автоматизованої системи моніторингу, значно менше витрат на періодичне обстеження традиційними геодезичними засобами [1].

Застосування АСДМ мостової споруди дозволяє оперативно контролювати стан мостової конструкції, зміщення і прогини, що виникають в результаті впливу зовнішніх природно-кліматичних впливів, інтенсивного автомобільного навантаження, а також у випадках з великим динамічним навантаженням шляхопроводів літаками (Рис.1) [3] та залізничним транспортом (Рис.2) [4].

Слід зазначити, що зміщення і прогини конструкцій мостової споруди впливають і на висотний (підмостовий) габарит. Згідно з ДБН В.2.3.-22:2009 (Додаток В) висотний габарит H шляхопроводу над поверхнею проїзду на автомобільних дорогах загального користування і вулицях населених пунктів приймають не менше 5,5м.



Рис. 1. Динамічне навантаження шляхопроводів літаками



Рис. 2. Динамічне навантаження шляхопроводів залізничним транспортом

Але існують ділянки доріг, для яких вводяться обмеження габаритів транспортних засобів по висоті. Для обмеження руху габаритного транспорту на даних ділянках виставляється знак «Обмеження висоти». І якщо висота транспортного засобу (як з вантажем, так і без такого) перевищує встановлену знаком межу, то проїзд по даній ділянці дороги категорично забороняється (рис. 3) [5].



Рис. 3. Обмежений рух габаритного транспорту

Проте, деякі водії транспортних засобів або не помічають знак «Обмеження висоти», або ігнорують його, і це приводить до зіткнення транспортного засобу з мостовою спорудою. Це, у свою чергу, приводить до пошкодження і транспортного засобу, і мостової споруди (рис.4).



Рис. 4. Невиконання водієм знаку «Обмеження висоти»

Якщо пошкодження габаритного транспортного засобу призведе до можливого травмування водія, то пошкодження мостової споруди (шляхопроводу) з відповідним великим навантаженням (рис. 1, рис. 2), може привести до фатальної катастрофи з багатьма людськими жертвами.

На погляд авторів цієї статті, треба встановлювати на певній відстані від мостової споруди інформаційні конструкції балочної або рамної системи з встановленими на них відповідними знаками і з габаритом по висоті рівним підмостовому габариту мостової споруди (рис. 5) [3]. І хоча в цьому випадку при невиконанні водієм знаку «Обмеження висоти» буде пошкодження габаритного транспортного засобу і інформаційної конструкції, але це дасть можливість уникнути пошкодження мостової споруди.



Рис. 5. Інформаційна конструкція балочної та рамкової системи

Застосування АСДМ мостової споруди повинна включати набір датчиків, встановлених в критичних точках елементів конструкції мостової споруди.

Останнім часом широке розповсюдження набувають методи та пристрої для деформаційного моніторингу мостових споруд з застосуванням волоконно – оптичних датчиків інтенсивності лазерного випромінювання. Однак, виробникам датчиків ще необхідно розв'язати такі задачі: ефективна компенсація втрат у кабелях і з'єднаннях в квазістатичних вимірювальних системах; реалізація методів мультиплексування датчиків інтенсивності в волоконно - оптичних мережах передачі даних; визначення на практиці меж точності і повторюваності [6, 7].

Метою роботи є визначення найбільш ефективних методів та вимірювальної системи для моніторингу деформацій елементів конструкцій мостових споруд та підмостового габариту. Для технічної реалізації цієї задачі треба розробити вимірювальну систему, яка забезпечить контроль параметрів деформації мостових конструкцій та підмостового габариту у складі АСДМ.

Починаючи з кінця 70-х років минулого століття широке розповсюдження у вимірювальній техніці та наукових дослідженнях набули оптичні розгортуючі системи, в основу яких покладений принцип розгортання лазерного променю в горизонтальній або вертикальній площині [8]. Базуючись на цьому принципі, пропонується пристрій для вимірювання деформацій елементів конструкцій мостів та підмостового габариту. Даний пристрій містить: послідовно розташовані на опорі джерело світла у вигляді лазера ІЧ - діапазону; коліматор та вузол розгортки лазерного променю; перший фотоприймач, який закріплюється до наміченої точки мостової прольотної балки; другий фотоприймач, який встановлюється на ґрунті в одній вертикальній площині з першим фотоприймачем, встановлений на опорі на певній відстані від мосту. Виходи першого і другого фотоприймачів з'єднані відповідно з першим та другим входом блоку комутації, а вихід якого з'єднаний з блоком обробки і реєстрації, який представляє собою блок обчислень деформацій мостової конструкції та підмостового габариту, вихід якого з'єднаний з блоком реєстрації.

Працює пристрій наступним чином. Для виміру підмостового габариту та виміру деформації прольотної балки 1 мостової споруди (Рис. 7) застосовуються перший фотоприймач 3, встановлений в середині прольотної балки мосту. Другий фотоприймач 4, встановлений на опорі на певній відстані від мостової споруди. Послідовно розташовані лазер 5, оптичний коліматор 6 і вузол 7 розгортки лазерного променю 8, встановлені на опорі на певній відстані від другого фотоприймача 4 і відповідно на певній відстані від мостової споруди, причому другий фотоприймач 4 та вузол 7 розгортки лазерного променю 8 знаходяться в одній вертикальній площині з першим фотоприймачем 3. Для вибору точок встановлення першого фотоприймача 3 посередині прольотної балки мостової споруди та виміру підмостового габариту l (низ фотоприймача 3 на прольотній балці 1 мосту та точка 4' на дорозі 2 на рис. 7) застосовується, наприклад, тахеометр. Другий фотоприймач 4 встановлюється на опорі таким чином, що б точка 4' була його продовженням 9 на дорозі 2.

У пристрої застосовується лазер (лазерний діод) з безперервним випромінюванням променю інфрачервоного (ІЧ) діапазону певної довжини хвилі. Послідовно з лазером розташовується оптичний коліматор, який складається з об'єктива, у фокальній площині якого розміщується вихід лазерного променю

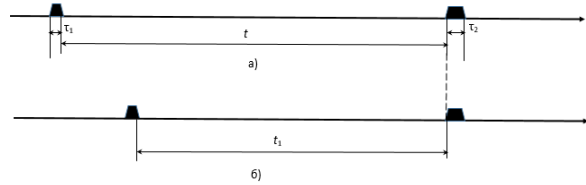


Рис. 8. Часові діаграми роботи пристрою без деформації прольотної балки мостової споруди (а) і після деформації (б).

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

де $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ – кутова швидкість обертів двигуна;

R_1 – відстань між блоком розгортки лазерного променя та першим фотоприймачем.

Тоді для другого фотоприймача тривалість імпульсу буде, відповідно,

$$\tau_2 = \frac{h}{\omega R_2}. \quad (2)$$

Тривалість часу t проходження лазерного променя від першого фотоприймача до другого фотоприймача буде відповідати довжині l підмостового габариту при відсутності деформації прольотної балки мостової споруди. Слід зазначити, що тривалість часу t береться від заднього фронту імпульсу першого фотоприймача 3 до переднього фронту імпульсу другого фотоприймача 4 (Рис. 9, а).

Якщо конструкція мостової споруди буде деформована 13 (пунктирні лінії на рис. 8), то підмостовий габарит зміниться, відповідно, до l_1 (Рис. 8), що відповідатиме часу t_1 проходження лазерного променя від першого фотоприймача 3 до другого фотоприймача 4 (Рис. 9, б), причому тривалість імпульсів буде такою ж, як і для конструкції до деформації (Рис. 9, а).

Після надходження імпульсів з фотоприймачів 3 і 4 відповідно до деформації прольотної балки мостової споруди і після її деформації через блок 10 комутації до блоку 11 обчислення, який виконує обчислення спочатку t і t_1 , а потім підмостового габариту з виразу

$$\frac{t}{t_1} = \frac{l}{l_1}, \quad (3)$$

$$l_1 = \frac{l \cdot t_1}{t}. \quad (4)$$

де l_1 – величина підмостового габариту після деформації прольотної балки мостової споруди.

Звідки величина деформації прольотної балки мостової споруди буде

$$\Delta l = l - l_1, \quad (5)$$

Після перетворення і обчислення інформація про величину підмостового габариту та величину деформації прольотної балки мостової споруди з блоку 11 обчислень надходить на реєстратор 12 (Рис 7, Рис. 8).

Слід зазначити, що у запропонованому пристрої фотоприймач закріплюється на прольотній балці мостової споруди тільки в одній точці (посередині прольотної балки), а це не дає повної картини про деформацію конструкції по всій її довжині. Тому був розроблений пристрій з розподіленими і закріпленими фотоприймачами по всій довжині прольотної балки мостової конструкції, що дозволяє обчислювати інформацію з датчиків про деформацію прольотної балки і мостового габариту по всій довжині конструкції.

Працює пристрій наступним чином. Для виміру деформації прольотної балки 1 мостової споруди та підмостового габариту (Рис. 10) застосовуються фотоприймачі $3_1, 3_2, \dots, 3_i, \dots, 3_n$, розподілені і закріплені по всій довжині прольотної балки мостової конструкції, фотоприймачі $4_1, 4_2, \dots, 4_i, \dots, 4_n$, що встановлені на опорі на певній відстані від мосту, кожний з яких знаходиться в одній вертикальній площині з відповідними $3_1, 3_2, \dots, 3_i, \dots, 3_n$ фотоприймачами, що закріплені на прольотній балці мостової конструкції. Кроковий двигун 5, який програмно управляється блоком 6 управління кроковим двигуном, встановлюється на опорі на певній відстані від мостової споруди і відповідно на певній відстані від фотоприймачів $4_1, 4_2, \dots, 4_i, \dots, 4_n$. На валу крокового двигуна закріплена платформа 7, на якій встановлені послідовно розташовані джерело світла 8 у вигляді лазера ІЧ - діапазону, коліматор 9 та вузол 10 розгортки лазерного променя. Для вибору точок встановлення фотоприймачів $3_1, 3_2, \dots, 3_i, \dots, 3_n$ по всій довжині прольотної балки мостової конструкції та виміру підмостового габариту l_i (низ фотоприймачів $3_1, 3_2, \dots, 3_i, \dots, 3_n$ на прольотній балці 1 мостової споруди та точки $4_1', 4_2', \dots, 4_i', \dots, 4_{n-1}', 4_n'$ на дорозі 2 (Рис. 10) застосовується, наприклад, тахеометр.

Точки встановлення фотоприймачів $3_1, 3_2, \dots, 3_i, \dots, 3_n$ та $4_1, 4_2, \dots, 4_i, \dots, 4_n$ обираються в залежності від кута повороту (кроку) валу серійного крокового двигуна (наприклад, $\gamma = 0,9^\circ$ або $1,8^\circ$), який встановлюється на місті тахеометру на опорі. Фотоприймачі $4_1, 4_2, \dots, 4_i, \dots, 4_n$, встановлюється на опорі таким чином, що б точки $4_1', 4_2', \dots, 4_i', \dots, 4_{n-1}', 4_n'$ були їх продовженням 12 на дорозі 2 (Рис. 10, Рис. 11).

Як і у попередньо розглянутому пристрої, у запропонованому пристрої застосовується лазер 8 (лазерний діод) з безперервним випромінюванням променя інфрачервоного (ІЧ) діапазону певної довжини хвилі. Послідовно з

лазером 8 розташовується оптичний коліматор 9, який складається з об'єктива, у фокальній площині якого розміщується вихід лазерного променя 11.

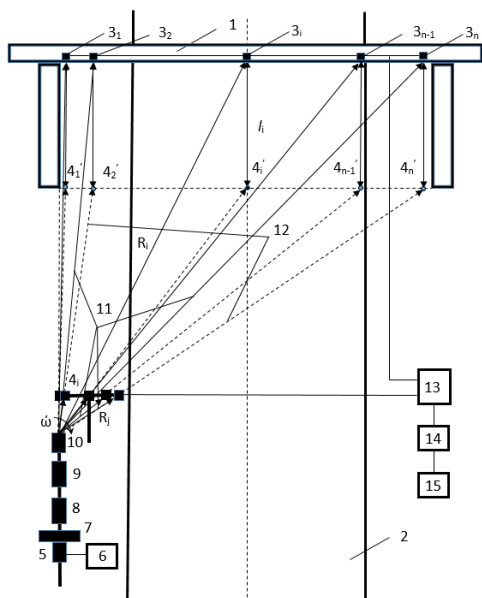


Рис. 9. Схематичне відображення пристрою з n фотоприймачами без деформації прольотної балки мостової споруди

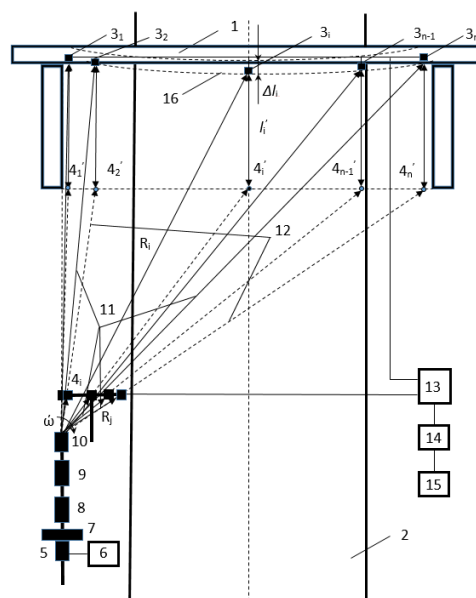


Рис. 10. Схематичне відображення пристрою з n фотоприймачами і з деформацією прольотної балки мостової споруди

Оптичний коліматор 9 забезпечує паралельність лазерного променя 11 і тому, за рахунок, практично, нульової розбіжності, вся енергія лазерного променя буде зосереджена на чутливій поверхні кожного фотоприймача, виконаного із певного матеріалу, що без особливих перешкод пропускає лазерний промінь. Фотоприймачі $3_1, 3_2, \dots, 3_i, \dots, 3_n$ та $4_1, 4_2, \dots, 4_i, \dots, 4_n$ містять фотодіод, перед яким розташовуються чутлива поверхня і оптичний фільтр, що пропускає промінь тільки певної довжини хвилі лазера. Всі елементи фотоприймача розміщуються у герметичному корпусі. Вузол розгортки 10, наприклад, представляє собою двигун, на валу якого розташовується дзеркало, що знаходиться під кутом 45° до лазерному променю, або крутий оптичний клин, за рахунок чого промінь лазера розгортається у вертикальній площині.

Лазер 8, оптичний коліматор 9 та вузол розгортки 10 лазерного променя розміщуються на платформі 7, встановленій на валу крокового двигуна 5, який по програмі з блоку 6 управління кроковим двигуном, здійснює поворот валу крокового двигуна і, відповідно, платформи на один крок (кут рівний γ). Через деякий час з блоку 6 управління кроковим двигуном поступає команда на кроковий двигун, в результаті чого його вал повертається на другий кут γ і т. д. до моменту поки кут повороту крокового двигуна від нульової точки не досягне величини $\alpha = n\gamma$, встановленої тахеометром та внесеної у програму блоку 6

управління кроковим двигуном. Після чого вал крокового двигуна повертається до початкової (нульової) точки і процес повторюється.

Таким чином, оптичний сигнал 11, що розгортається, з вузла розгортки 10 послідовно пробігає по чутливій поверхні $3_1, 3_2, \dots, 3_i, \dots, 3_n$ та $4_1, 4_2, \dots, 4_i, \dots, 4_n$ фотоприймачів певної довжини h (довжина фотоприймачів h така, як і на рис. 7). Електричний сигнал з фотодіодів кожного з фотоприймачів $3_1, 3_2, \dots, 3_i, \dots, 3_n$ та $4_1, 4_2, \dots, 4_i, \dots, 4_n$ поступають на підсилювач електричного сигналу відповідного фотоприймача, який, після підсилення, поступає на блок комутації 13 (Рис. 10, Рис. 11). Тривалість електричного імпульсу з виходу фотоприймача буде визначатися швидкістю проходження лазерного променя по чутливій поверхні фотоприймача, яка, у свою чергу, буде визначатися кутовою швидкістю ω двигуна вузла розгортки і відстанню R вузла розгортки до відповідного фотоприймача. Тому тривалість імпульсів з $3_1, 3_2, \dots, 3_i, \dots, 3_n$ та $4_1, 4_2, \dots, 4_i, \dots, 4_n$ фотоприймачів буде різною і в міру наближення фотоприймача до вузла розгортки буде збільшуватись (Рис. 12). Тоді, аналогічно, виразу (1) можна записати

$$\tau_{3_i} = \frac{h}{\omega R_i}, \quad (6)$$

де $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ – кутова швидкість обертів двигуна;

R_i – відстань між блоком розгортки лазерного променя та фотоприймачем 3_i , де $i = 1, 2, \dots, n$.

Тоді для фотоприймача 4_i тривалість імпульсу буде, відповідно,

$$\tau_{4_i} = \frac{h}{\omega R_j}, \quad (7)$$

де $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, n$.

Тривалість часу t проходження лазерного променя від фотоприймача 3_i до фотоприймача 4_i буде відповідати довжині l_i підмостового габариту при відсутності деформації прольотної балки мостової споруди. Слід зазначити, що тривалість часу t береться від заднього фронту імпульсу фотоприймача 3_i до переднього фронту імпульсу фотоприймача 4_i (Рис. 12, а).

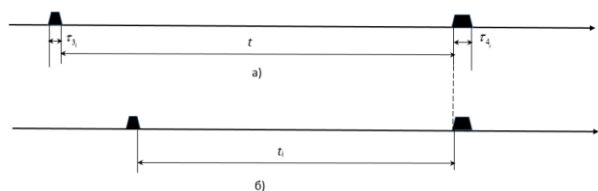


Рис. 15. Часові діаграми роботи пристрою з n фотоприймачами без деформації прольотної балки мостової споруди (а) і після деформації (б).

Якщо конструкція мосту буде деформована 16 (пунктирні лінії на Рис. 11), то підмостовий габарит зміниться, відповідно, до l_i' (Рис. 11), що відповідатиме часу t_i проходження лазерного променя від фотоприймача 3_i до другого фотоприймача 4_i (Рис. 12, б), причому тривалість імпульсів буде такою ж, як і для конструкції без деформації (Рис. 12, а).

Після надходження імпульсів з фотоприймачів 3 і 4 відповідно до деформації прольотної балки мостової споруди і після її деформації через блок 10 комутації до блоку 11 обчислення, який виконує обчислення спочатку t і t_i , а потім підмостового габариту з виразу

$$\frac{t}{t_i} = \frac{l_i}{l_i'}, \quad (8)$$

де $i = 1, 2, \dots, n$.

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

де l_i' – величина підмостового габариту після деформації прольотної балки мостової споруди.

Звідки величина деформації прольотної балки мостової споруди буде

$$\Delta l = l_i - l_i', \quad (10)$$

Після перетворення і обчислення інформація про величину підмостового габариту та величину деформації прольотної балки мостової споруди з блоку 14 обчислень надходить на реєстратор 15 (Рис. 10, Рис. 11).

Слід зазначити, що при розташуванні блоку розгортання лазерного променя та крокового двигуна на узбіччі дороги з одного боку мостової споруди приведе до дуже не рівномірного розташування фотоприймачів на прольотній балці мостової споруди. Тобто на прольотній балці мостової споруди, з боку якої розташовується блок розгортання лазерного променя, якщо відстань між фотоприймачами складатиме сантиметри, то з протилежного боку прольотної балки – декількох метрів. Це, у свою чергу, приведе до значної похибки при обчисленні деформації прольотної балки та підмостового габариту тієї її частини, де відстань між фотоприймачами обчислюється метрами. Тому пропонується кроковий двигун, блок розгортання лазерного променя та фотоприймачі 4₁, 4₂, ..., 4_i, ..., 4_n (рис. 13 та рис. 14) розташовувати посередині дороги, що проходить під мостовою спорудою, на інформаційній конструкції балочної або рамної системи (рис. 5, рис. 6) на певній відстані від мостової споруди. Тобто інформаційні конструкції балочної або рамної системи, у цьому випадку, несуть подвійну функцію: встановленню знаків, що

інформують водіїв та захищають мостову споруду від пошкодження габаритним транспортом (рис. 6), і розміщенню, вказаного вище, обладнання для виміру деформації мостової споруди та підмостового габариту.

Висновки. Пристрій може бути застосований в автоматизованій системі моніторингу деформацій мостової споруди (АСДМ), що дозволить оперативно контролювати їхній стан, зміщення і прогини, що виникають в результаті впливу зовнішніх природно-кліматичних впливів, а також суцільного транспортного потоку на автодорожніх мостах, навантаження шляхопроводів літаками та поїздів на залізничних мостах.

Література

1. Деформационный мониторинг мостов. Значение и задачи. 2015. URL: https://www.icentre-gfk.ru/article/a_def_mon_bridges.htm.
2. Автоматизированный деформационный мониторинг - инновационные технологии на службу обеспечения безопасности в горнодобывающей, нефтяной и газовой промышленности. 2010. URL: http://www.gfk-leica.ru/pyblikacii/avtomatizirovannyi_deformacionnyi_monitoring_innovacionnyye/
3. Редченко В.П. Динамічні випробування мостів. Частина 2: вільні коливання, модальний контроль. Дніпро, Пороги, 2017. 216 с.
4. URL: <https://diman7777.livejournal.com>
5. URL: <http://autoass.ru/dorozhnye-znaki/3-13-ogranichenie-vysoty.html>
6. Э. Удд. Волоконно – оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников. Москва, Техносфера, 2008. 520с.
7. URL: <http://www.electronics.ru/journal/article/692>
8. Гитис Э.И., Пискулов Е.А. Аналого-цифровые преобразователи – Москва, Энергоиздат, 1981. 360 с.
9. Пат. КМ 134607 Україна. Вимірювальна система для моніторингу деформацій мостових споруд та підмостового габариту. Опубл. 27.05.2019.