

## ІНФОРМАЦІЙНО-ДІАГНОСТИЧНІ СИСТЕМИ

УДК 621.891:620.11

С.Ф. Філоненко, д-р техн. наук, проф.

І.К. Корнієнко, асп.

Т.М. Косицька, канд. хім. наук, старш. наук. співроб.

### МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДІАГНОСТИКИ МОСТОВИХ КОНСТРУКЦІЙ

*Наведено огляд методів і засобів, які використовують під час технічної діагностики мостових конструкцій. Розглянуто загальні підходи до технічної діагностики, основні методи, первинні перетворювачі та апаратні засоби, використовувані у процесі статичних і динамічних випробувань мостових конструкцій.*

*In the paper is reviewed the methods and means, which used at technical diagnostic of bridge designs. The general approaches to technical diagnostic, the main methods, primary converters and hardwares, which used on static and dynamic tests of bridge designs are reviewed.*



а



б



в

Рис. 1. Деякі типи мостових конструкцій:

а – вантовий;

б – арковий;

в – залізобетонний балковий розрізний

### Постановка проблеми

Мостові конструкції є складними спорудами, які відрізняються одна від одної технічними рішеннями, габаритами, використаними матеріалами, масою та іншими характеристиками. Розрізняють аркові, консольні, підвісні, вантові та інші типи мостів (рис. 1), класифікацію яких розглянуто в працях [1; 2].

У процесі роботи вони зазнають різних навантажень, які призводять до розвитку дефектів і, у підсумку, до втрати несучої здатності конструкції. Для запобігання виникненню таких ситуацій використовують різні методи, що дозволяють оцінювати технічний стан конструкцій. Під цим поняттям мають на увазі комплекс або окремі характеристики й критерії, які дозволяють визначити відхилення локальних або інтегральних параметрів, що характеризують роботу конструкції, від деяких вихідних величин, наприклад, вид і розміри дефектів, напруження, деформації, величини прогинів, частоти коливань та ін.

Натепер не існує єдиної методики, відповідно до якої можна отримати всю потрібну інформацію про технічний стан мостових конструкцій [3; 4]. Однак загальноприйнятими етапами діагностики є їх періодичне обстеження і випробування. У першому випадку отримують вихідну інформацію про стан конструкцій, що дозволяє конкретизувати подальші напрями досліджень [5; 6]. До методів обстеження належать візуальний огляд конструкції і дефектоскопія – ультразвукова, магнітна та інші [7], які спрямовано на виявлення різного виду пошкоджень, і насамперед дефектів. За їх параметрами виконують розрахунки зміни характеристик міцності елементів конструкцій (їх несучої здатності). У другому випадку отримують інформацію про різні інтегральні характеристики в умовах статичних і динамічних видів випробувань.

Ці параметри використовують для оцінювання технічного стану конструкцій і розрахунків їх просторової роботи як у статичних, так і в динамічних режимах навантажень [8].

При цьому статичні й динамічні випробування мостових конструкцій зазвичай відбуваються одночасно, що дозволяє визначати загальну просторову роботу конструкцій і приймати рішення щодо подальшої їх експлуатації.

### Статичні випробування мостових конструкцій

Навантаження мостових конструкцій під час статичних випробувань здійснюється з використанням тимчасового навантаження одного рівня або східчасто зростаючих навантажень [1; 8]. Залежно від типу мостової конструкції найчастіше використовують автомобільний транспорт з баластом [8], рухомі локомотиви або залізничні вагони [1]. Крім цього, застосовують бетонні блоки, резервуари з водою, домкрати та ін. [9]. Відповідні значення максимальних навантажень визначають розрахунковими методами:

– за методом граничних станів виконують розрахунки зусиль від тимчасового вертикального навантаження за коефіцієнта надійності 0,95 і повного динамічного коефіцієнта;

– за допустимими напруженнями – розрахунки 110 % зусиль від тимчасового вертикального навантаження і за повного динамічного коефіцієнта.

На рис. 2, а показано прогонне навантаження мостової конструкції в центральній її частині поперек прогону, однобічне навантаження для створення максимальних зусиль у крайніх несучих балках – на рис. 2, б.

Під час статичних випробувань мостових конструкцій методики їх навантаження зазвичай ґрунтуються на використанні ступеневих навантажень. Залежно від типу мостової конструкції розробляють схеми [1; 8] їх завантаження, які ґрунтуються на тому, щоб конструкція або її елементи перебували в найбільш невідгідних умовах роботи, тобто випробовували найбільші деформації, напруження і т. ін. При цьому у сформованих схемах навантаження зазначено кількість використаних автомобілів і їх розташування на проїзній частині моста [10; 11].

Деякі варіанти схем навантаження мостових конструкцій під час проведення статичних випробувань [1] показано на рис. 3.

Так, для випробування балкових розрізних мостів використовують колону автомобілів, що розміщується на всьому прогоні моста (рис. 3, а, б).



а



б

Рис. 2. Фрагменти статичних випробувань мостових конструкцій:

а – навантаження поперек прогону;

б – однобічне навантаження для створення максимальних зусиль у крайніх несучих балках

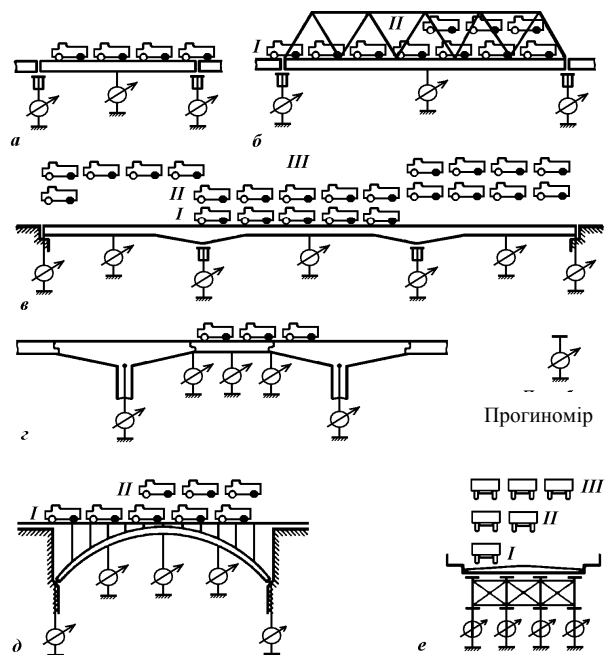


Рис. 3. Розміщення навантаження і прогиномірів на мостах:

а – розрізні балкові мости;

б – розрізні мости з фермами;

в – нерозрізні мости;

г – рамно-балкові мости з підвісними балками;

д – аркові мости;

е – завантаження мостів у поперечному перерізі

Якщо випробовують ферму, то прогін моста завантажується наполовину (рис. 3, б, схема навантаження II). Для нерозрізних прогонних мостів автомобільний транспорт розташовується уздовж прогону. При цьому використовують не менше трьох схем послідовного навантаження (рис. 3, в):

- завантаження середнього прогону (рис. 3, в, схема I);
- завантаження крайнього й середнього прогонів (рис. 3, в, схема II);
- завантаження двох прогонів одночасно (рис. 3, в, схема III).

Рамно-балкові мости випробовують один раз з використанням автомобільного транспорту, що розташовується уздовж прогону (рис. 3, г). Якщо треба визначити найбільші прогини замкового перетину і напружень у перетинах арок від найбільшого розпору, то використовують схему навантаження всього прогону (рис. 3, д, схема I).

Для створення S-подібної деформації осі арок і найбільших напружень у перетинах від прогину використовують схему II (рис. 3, д).

Під час статичних випробувань мостових конструкцій застосовують тільки послідовне навантаження прогонного створення однієї, двох й трьох колон автомобілів (рис. 3, е).

У процесі статичного навантаження конструкцій використовують методи, що дозволяють отримувати інформацію про деформації, напруження, переміщення, величини розкриття тріщин тощо [8; 12]. Це зумовлено тим, що статичні випробування характеризуються досить повільною зміною прикладеного навантаження. Попри широкого комплексу реєстрованих параметрів основними з них є напруження, деформації і переміщення (прогини). Ці параметри вимірюють у різних перетинах найбільш напружених елементів мостових конструкцій [13; 14]. Для визначення напружень, деформацій і переміщень використовують різні прилади і датчики механічного, електромеханічного та електричного типів [1; 15]. Застосування різних методів і приладів під час статичних випробувань пов'язано з тим, що мостові конструкції можна розміщувати у складних геологічних умовах (яри, ущелини, ріки і т. ін.), коли часто неможливо забезпечити опорні точки прив'язки, які не зв'язані із самою конструкцією. Це, з одного боку, зумовлює ускладнення методик визначення (розрахунку) дійсних значень параметрів, потрібних для оцінювання просторової роботи конструкції, а з другого боку – обмежує набір вимірюваних параметрів [16; 17].

До механічних приладів, використовуваних для вимірювання деформацій і прогинів, належать тензометри Гугенбергера й Аїстова [1; 8]. Вони мають базу, яка може змінюватись з використанням спеціальних механічних подовжувачів. Також застосовують механічні прогиноміри системи Максимова [18] та індикатори (мікроіндикатори) часового типу (месури) [18; 19]. На відміну від тензометрів, які безпосередньо встановлюють на досліджуваній мостовій конструкції, механічні прогиноміри і месури потребують використання розтяжок, які переміщуються відносно реперних точок, не пов'язаних з мостовою конструкцією. Для цього застосовують, наприклад, штирі, які забивають у ґрунт за межами випробовуваної конструкції.

Механічні прилади мають ряд істотних недоліків, одним з яких є людський фактор. У зв'язку з цим для вимірювання деформацій і переміщень найбільш поширені електромеханічні, електричні датчики і прилади – тензорезистори. Значно рідше використовують індукційні датчики переміщень. Через можливість розміщення датчиків безпосередньо на мостовій конструкції найбільш поширеними стали тензометри на основі тензорезисторів. Їх застосовують у різних варіантах схем увімкнення – одиночні тензорезистори і напівмостові схеми їх увімкнення, призначені для вимірювання мікро- й макродеформацій розтягування, стискування або зсуву, а також механічних напружень. Однак найчастіше вимірюють деформації, а напруження визначають розрахунковими методами.

У разі використання одиночних тензорезисторів з різною базою їх безпосередньо наклеюють (рис. 4, а) на необхідні елементи мостових конструкцій (бетонні або металеві балки) [19; 20], однак їх застосування одноразове.

Тензометри на основі тензорезисторів з напівмостовими схемами з'єднання розміщені в захисному металевому корпусі; їх можна використовувати неодноразово. Вони жорстко кріпляться (рис. 4, б) на елементах мостових конструкцій [17; 20]. При цьому чутливість тензометрів визначають за кількістю використовуваних тензорезисторів.

Значно чутливіші до деформацій оптоволоконні датчики. Їх наклеюють на елементи конструкцій [21] або закріплюють у спеціальних цангах [22], жорстко встановлених на конструкції.

Інформація, що реєструється датчиками електричного типу, зазвичай обробляється з використанням багатоканальних систем, серед яких можна виокремити системи типу MEGADAC 3108, Si425-500, STS, SHM, 3852A (HP) та інші [20; 21; 23; 24]. При цьому для кожної схеми випробувань (навантаження мостової конструкції) незалежне опрацювання даних, результати якого мають вигляд таблиць або графічних залежностей. Типові результати зміни деформацій по довжині прогону мостової конструкції для схем випробувань, коли автомобіль розміщується в центральній частині прогону показано на рис. 4, *в*, а на краю прогону – на рис. 4, *г*.

Датчики тензометричного типу використовують під час проведення вимірювань досить малих деформацій і переміщень, тобто для конструкцій з великою жорсткістю. У випадку великих переміщень мостових конструкцій (одиниці й десятки одиниць міліметрів) застосовують датчики індукційного типу з переміщуваним осердям, який своїм кінцем кріпиться до конструкції. Існуючі типи датчиків, наприклад, серії WA, дозволяють вимірювати переміщення до 500 мм. Попри високу чутливість і широкий динамічний діапазон, датчики цього типу мають недолік, зумовлений тим, що вони потребують опорних точок прив'язки, які не стосуються конструкції.

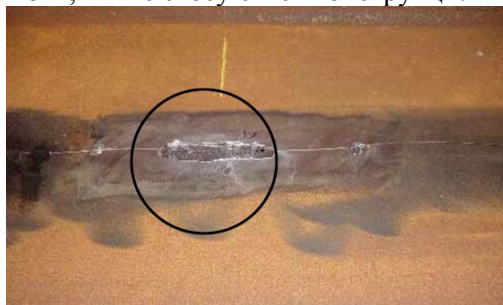
Для цього датчики установлюють у стійки, розташовані на землі, або закріплюють їх на металевих штирях, забитих у землю, або іншим чином [25; 26].

Для вимірювання переміщень мостових конструкцій під час їх статичних випробувань застосовують і лазерні системи типу PSM-R та інші [27]. Вони містять три основні елементи:

- джерело;
- відбивач;
- приймач світла.

Як джерело світла використовують лазер, що разом із приймачем відбитого світла, а також системою оброблення і подання інформації можна встановлювати на відстані від мостової конструкції до 300 м. Для відбиття світлового потоку використовують спеціальні блоки із дзеркалом, положення якого є регульованим відносно осі закріплення. При цьому відбивний блок жорстко кріпиться на мостовій конструкції в точці, де потрібно вимірювати переміщення.

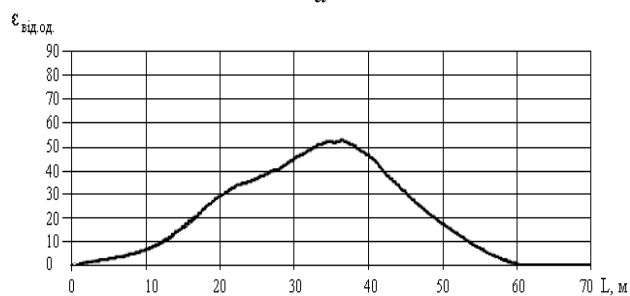
За результатами випробувань інформація подається у вигляді безпосередніх переміщень конструкції в заданій точці. Лазерні системи мають високу чутливість, але водночас високу вартість і обмежену кількість каналів (один або два).



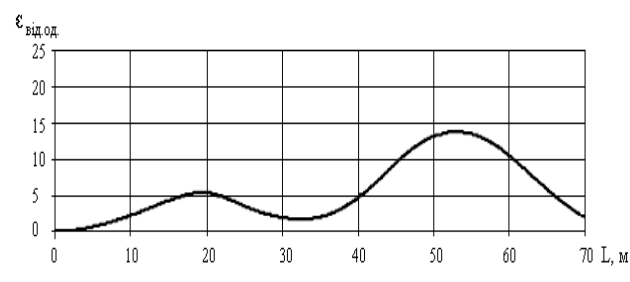
а



б



в



г

Рис. 4. Установлення датчиків деформації на елементах мостових конструкцій і подання результатів вимірювань:

*а* – наклеювання одиночного датчика;

*б* – закріплення датчика цангами;

*в* – залежність зміни деформацій по прогону в разі установлення автомобіля в його середині;

*г* – залежність зміни деформацій по прогону у разі установлення автомобіля на краю прогону;

$\epsilon_{\text{від.од}}$  – відносна деформація;

$L$  – довжина моста



Крім того, як і у випадку індукційних датчиків, лазерні системи також потребують забезпечення опорних точок прив'язки, не пов'язаних з конструкцією.

Розглянуті методи і системи, що застосовуються у процесі випробування мостових конструкцій, є традиційними і широко використовуються. Однак останніми роками використовують також інші методи. Один з них – метод акустичної емісії [1; 28; 29]. Його застосування дозволяє розширити потенціал традиційних методів.

На відміну від традиційних методів, використовуваних для вимірювання деформацій, переміщень і напружень, метод акустичної емісії спрямований на отримання інформації про кінетику процесів, що розвиваються в елементах мостових конструкцій, тобто процесів, які впливають на їх несучу здатність. Цей напрям є окремим в дослідженнях; його досить детально розглянуто в працях [30; 31].

З погляду діагностики мостових конструкцій отримані результати використовують, по-перше, для виконання розрахунків просторової роботи конструкції у статичних умовах (розрахунки напружено-деформованого стану), по-друге, – для оцінювання стану конструкції на підставі порівняння отриманих даних з результатами теоретичних досліджень [1; 13; 23; 27]. Однак для отримання комплексних оцінок стану мостових конструкцій їх випробовують з одночасним використанням статичних і динамічних видів навантажень.

### **Динамічні випробування мостових конструкцій**

Із погляду впливу на конструкцію, а також реєстрованої та оброблюваної інформації, динамічні випробування є більш складним видом випробувань. Під час їх проведення застосовують різні типи дій на конструкцію:

- динамічне навантаження, що переміщується;
- ударне динамічне навантаження;
- безперервне вібраційне навантаження, що не переміщується.

Унаслідок динамічних дій у мостових конструкціях виникають вертикальні та горизонтальні переміщення (коливання). Однак вони мають різні впливи на несучу здатність мостів, що залежить від їх конструктивних рішень і призначення. Наприклад, для автомобільних мостів здебільшого досліджують тільки вертикальні коливання, тому що горизонтальні коливання не є значущими.

Для підвісних мостів з невеликою горизонтальною жорсткістю важливо знати обидва типи коливань. Для залізничних мостів, поряд з горизонтальними, досліджують і вертикальні коливання. У загальному випадку інформація, яку отримують під час динамічних випробувань, використовують для визначення динамічного відгуку конструкції та для оцінювання просторової роботи конструкції в динамічному режимі.

Найбільш широко використовують випробування мостових конструкцій динамічним навантаженням, яке переміщується, що зумовлено наявністю загальноприйнятих показників експлуатаційної надійності. Перш за все визначають динамічний коефіцієнт і жорсткість.

Під час таких випробувань застосовують два види динамічних дій, які переміщуються:

- навантаження, що створюються природним потоком транспортних засобів [32; 33];
- і навантаження, які створюються спеціальними транспортними засобами [1; 34].

За природного транспортного потоку дії на конструкцію є неконтрольованими – випадкові види транспортних засобів, їх маса, кількість і швидкості руху і т. ін. При цьому напрям досліджень пов'язаний з моніторингом поточного стану конструкції на підставі контролю відхилення реєстрованих параметрів (деформацій, переміщень, прискорення) від середньостатистичних значень [35; 36]. Результати досліджень звичайно не використовують для виконання розрахунків, а дозволяють виявляти нестандартні ситуації в роботі конструкції.

До дії природними навантаженнями належать і дії, які створюються вітровими потоками і температурою [37], а також рухом пішоходів [38]. Під час досліджень зовнішні дії є контрольованими, не зважаючи на їх випадковий характер. Це зумовлено тим, що, наприклад, під час дії вітрових потоків вимірюються сили вітру і його напрямом, а також температура навколишнього середовища. Якщо рухаються пішоходи, контролюється їх кількість і загальна маса. Як і у випадку природного транспортного потоку, розглянуті види дій використовують переважно для моніторингу стану мостових конструкцій. Це стосується до конструкцій, розташованих у зонах значних вітрових потоків (каньйони, ущелини і т. ін.) і середньорічних перепадів температур (відповідні кліматичні зони).

З усіх видів динамічних дій найбільш поширені динамічні дії, які створюються спеціальним рухомих транспортним засобом. Найчастіше це вантажівки з баластом, тобто з піском, щебенем та іншими матеріалами [19; 20].

Під час випро-бувань мостових конструкцій автомобілі рухаються із заданою постійною швидкістю різними смугами руху (рис. 5).

Швидкість руху автомобілів змінюється в досить широких межах: 5–15 км/год [27]; 8, 16, 24 км/год [25]; 88 км/год [24]; 88, 96, 105 км/год [39]. Значення швидкості руху автомобілів визначають за навантажувальною здатністю моста, категоріями автомобільної дороги (автострада, першої категорії, другої категорії та ін.), завданнями діагностики та за іншими факторами.

Під час випробувань із використанням спеціального автомобільного транспорту з баластом динамічне навантаження, що переміщується, контрольоване, тобто відомі його параметри – маса завантаженого автомобіля і швидкість його руху. Використання тих самих автомобілів під час статичних і динамічних випробувань дозволяє виконувати розрахунки динамічного коефіцієнта, жорсткості мостової конструкції та інших параметрів.

Випробування з використанням динамічних дій, які не переміщуються, таких, як ударні та вібраційні навантаження, спрямовані на отримання інформації про власні коливання мостових конструкцій.

Ударні навантаження, найчастіше одиночні ударні навантаження, створюються (рис. 6, а, б) ударними молотами механічного і гідравлічного типів [40; 41], вантажем, що падає з певної висоти [42], спеціальними машинами для формування ударних коливань (застосовуються в геологічній розвідці) [1], пристроями, що скидають натяг [43], тощо. Їх вибір визначають за типом моста або особливостями його конструктивних рішень. Наприклад, для збудження прогону мостової конструкції (розрізні та нерозрізні мости) зручно використовувати ударні машини, а для збудження коливань вант (підвісні та вантові мости) – пристрої, що скидають натяг.

У процесі використання ударних дій створювані навантаження є контрольованими, що забезпечується завданням відповідної енергії і сили удару. З урахуванням точки прикладання (наприклад, середня частина прогону, 1/3 частина прогону, крайня несуча балка і т.ін.) це дозволяє виконувати теоретичні розрахунки параметрів коливань конструкцій – власних частот, мод і загасання коливань [44; 45].

Ударні навантаження створюються і спеціальними пристроями, що дозволяють генерувати безперервні періодичні дії [46]. Їх установлюють у заданій точці збудження коливань (рис. 6, в) на мостовій конструкції.

Під час роботи таких пристроїв контрольованими параметрами є швидкість обертання ексцентрика і сила удару. Ці параметри можуть змінюватись в деякому діапазоні значень, що дозволяє імітувати переміщення транспортного засобу із заданою швидкістю. Однак на відміну від одиночного удару безперервні періодичні дії приводять до розвитку складних гармонійних коливань у конструкції на заданій частоті.

Дослідження з використанням безперервних динамічних дій, які не переміщуються, спрямовані на вивчення резонансних явищ, що виникають у результаті накладання коливань зовнішнього джерела на власні коливання конструкції.

Крім зазначених типів динамічних дій на мостову конструкцію, використовують і ряд інших, що ґрунтуються на комбінації окремих видів збудження коливань. Наприклад, застосовується переїзд спеціального транспортного засобу (рис. 7) через “поріг”, установлений на проїжджій частині прогону мостової конструкції [1; 8]. Як “поріг” використовують дошку завтовшки 4–8 см.

Такий тип випробувань забезпечує одночасну дію на мостову конструкцію транспортного засобу, що рухається із заданою швидкістю, і удар із заданою масою.

Випробування з переїздом через “поріг” імітують ситуацію, коли транспортний засіб рухається по мостовій конструкції, на проїжджій частині якої є пошкодження дорожнього покриття (асфальтового або бетонного).

Наявність подібних пошкоджень з урахуванням швидкості руху транспортного засобу зумовлює збільшення динамічного навантаження на конструкцію і зміну умов її роботи. Подібні випробування спрямовані на формування прогнозів щодо зміни характеристик у нестандартних умовах роботи.

Для реєстрації інформації під час динамічних навантажень мостової конструкції, які розглянуто, використовують датчики тільки електричного типу, зокрема датчики деформацій, прогинів і напружень – тензорезисторні, індукційні, оптичні, п’езокерамічні, оптоволоконні [21; 22; 23; 32; 33], тобто ті самі датчики, що й під час статичних випробувань.



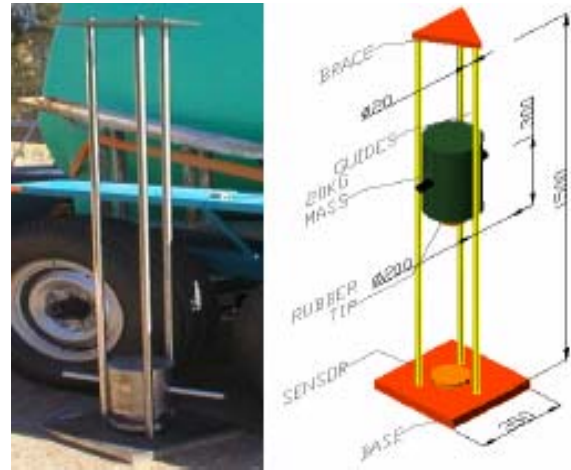
а



а



б



б



в



в

Рис. 5. Динамічне навантаження мостових конструкцій під час руху спеціального автомобільного транспорту, навантаженого піском (а, б) і колодами (в):  
 а - по центральній проїзній частині розрізного залізобетонного моста;  
 б - по крайній проїзній смузі розрізного залізобетонного моста;  
 в - по дерев'яному мосту

Рис. 6. Спеціальні пристрої для динамічного навантаження мостових конструкцій:  
 а - машина для збудження ударних навантажень;  
 б - копер з падаючим вантажем;  
 в - збудник безперервних навантажень із заданою частотою

Після статичних випробувань із переходом до динамічних випробувань розташування датчиків на мостовій конструкції зберігається незмінним. Це необхідно для забезпечення подальшого спільного оброблення інформації.

При цьому використовують прилади й системи типу MEGADAC 3108, Si425-500, STS, SHM, 3852A (HP), PSM-R.

Крім тензорезисторних датчиків за всіх видів переміщуваних динамічних навантажень широко використовують датчики швидкості, а також одноканальні, двоканальні і триканальні датчики прискорення.

Це забезпечує можливість реєструвати коливання у трьох напрямках – вертикальному, горизонтальному і поперечному.

Для реєстрації інформації за динамічних навантажень з використанням ударних навантажень використовують акселерометри, а також датчики тензометричного, оптоволоконного типів і датчики переміщень [19; 40; 42; 43; 44; 45].

Однак в останніх випадках реєструється імпульсний відгук мостової конструкції на ударну дію, а не виниклий коливальний процес.

Для реєстрації інформації у разі непереміщуваних динамічних дій (безперервно генеруючі дії) використовують акселерометри [46; 47], а також оптичні лазери [46].

Значно рідше застосовують датчики швидкості коливань [48; 49].

Як датчики прискорення і швидкості застосовують датчики V401CR, TCU102, Dytran 3100B, 5801A4, 353B03, WR-731A, PCB, CXL02, QA-700, CB, CG та інші виробництва Японії, США, Канади, Норвегії, Австралії, Фінляндії, Росії. Частотний діапазон використаних датчиків прискорення перебуває в межах 0,5–1000 Гц, а їх чутливість становить близько 0,1–5,0 В/м/с<sup>2</sup>.

Для датчиків швидкості, відповідно, частотний діапазон становить 5–400 Гц, а чутливість – 10–20 В/м/с.

Оброблення сигналів, зареєстрованих тензометричними, оптичними датчиками і прогиномірами, здійснюється з використанням систем, розглянутих раніше.

Для оброблення сигналів, зареєстрованих акселерометрами та датчиками швидкості коливань, використовують багато приладів і систем. Найчастіше це багатоканальні системи. До них належать системи типу TEACR-280 FM, SA-390,

MCBS, VFC-05, USS8, Diamos, Jaguar, Cougar, SigLab, VX2842, HP3566A та ін. Майже всі системи призначено для оброблення безперервних вібраційних сигналів, створених безупинно працюючим обладнанням, наприклад, верстатами, вентиляційними агрегатами, генераторами електроенергії та іншим устаткуванням.

Методи оброблення даних, закладені в системах, мають обмеження на обсяг реєстрованої інформації (не більше 1024 і 2048 точок на канал із заданою частотою дискретизації) з урахуванням використовуваної кількості каналів. Це зумовлено тим, що обладнання, яке працює в безперервному режимі, створює неперервні вібраційні сигнали, що забезпечує можливість їх наступного повторного запису та оброблення. Такі умови можуть створюватися непереміщуваним вібраційним навантаженням, що діє на мостову конструкцію. У цьому випадку повною мірою можуть застосовуватися зазначені системи.



а



б

Рис. 7. Збудження коливань із використанням переїзду спеціального транспортного засобу, що рухається, з баластом через “поріг”:

а – транспортний засіб до переїзду через “поріг”;

б – транспортний засіб після переїзду через “поріг”



У разі використання переміщувального динамічного або ударного навантажень у мостових конструкціях збуджуються загасальні коливання, частоти яких значно нижчі від частот, які виникають під час безупинно працюючого обладнання. Тому обмежений обсяг вибірки, зареєстрований із заданою частотою дискретизації, не тільки обмеження кількості оброблюваних параметрів, але й значні помилки в отриманих результатах. Це зумовлено таким.

Для забезпечення достовірності даних про частоти, моди і загасання коливань потрібно реєструвати кілька періодів результуючого сигналу.

Однак у випадку обмеженого обсягу вибірки, отриманого із заданою частотою дискретизації, зазначена умова не завжди виконується. Тому для реєстрації інформації про коливання, що виникли під час динамічних випробувань мостових конструкцій, широко застосовують системи, розроблені дослідниками. Вони зазвичай ґрунтуються на комп'ютерній техніці [20; 42; 45; 49].

Під час побудови таких систем використовують засоби технологій LabView, LabCard, різноманітні периферійні пристрої, які забезпечують збір, первинне оброблення інформації і передавання результатів у персональний комп'ютер.

Водночас для оброблення інформації застосовують стандартні математичні пакети, такі як Mathcad, Origin та інші, що мають вбудовані математичні додатки з оброблення даних, і, передусім, перетворення Фур'є (швидке перетворення Фур'є).

Як пристрої первинного збору і оброблення інформації використовують, наприклад, цифрові осцилографи розробок фірми Hulled Packard [50], які дозволяють передавати цифрові дані в персональний комп'ютер.

Існують і складніші системи, які ґрунтуються на сучасних супутникових технологіях. Вони призначені для постійного річного моніторингу мостових конструкцій [15; 35; 37].

У подібних системах використовують стаціонарну установку первинних перетворювачів на мостовій конструкції, а інформація передається через телефонні лінії зв'язку або із застосуванням GPS систем. Однак і в цих системах, попри їх високу вартість, реєструється стандартна інформація з таким застосуванням стандартних методів її оброблення.

## Висновки

Проведений огляд показує, що відносна простота методик статичного навантаження, засобів реєстрації та оброблення інформації, а також критерії з оцінок статичної придатності конструкцій забезпечили широке використання датчиків для вимірювання деформацій, напружень та прогинів. Однак визначення параметрів змушених і власних коливань конструкцій з використанням цих датчиків має значні труднощі. Це зумовлено тим, що у разі одночасної реакції датчиків на статичне і динамічне переміщення для виділення гармонійної складової результуючого сигналу потрібно використовувати фільтрацію. Вибір її параметрів не визначено через невизначеність резонансної частоти коливань і нелінійність зміни, умовно кажучи, "статичних переміщень", залежних від швидкості переміщення навантаження. Тому використовують датчики прискорення і рідше датчики швидкості коливань.

За результатами статичних випробувань виконують розрахунки реальних механічних характеристик мостових конструкцій та аналіз їх відхилень від теоретичних значень. Крім того, розраховують різні критеріальні оцінки придатності конструкцій. Однак однією з найбільш важливих оцінок є динамічний коефіцієнт (коефіцієнт динамічної придатності). Його розраховують за результатами вимірювання статичних та динамічних деформацій (прогинів). Якщо статичні величини можна визначити з високою достовірністю і точністю, то динамічні величини визначити досить складно. Це зумовлено тим, що переміщувальні навантаження з різною швидкістю викликають коливання конструкцій, які накладаються на статичні переміщення. Залежно від основної частоти коливань піки динамічного і статичного переміщень можуть не збігатися. Це призводить до невизначеності положення максимальної амплітуди динамічного переміщення. Усереднення значень статичних і динамічних переміщень за серією випробувань дозволяє зменшити похибку, однак не усуває невизначеності щодо визначення піка динамічних переміщень.

Цей недолік усунутий у мобільній системі, описаній в інструкції [51], яку побудовано на технології LabCard. У системі закладено ряд методик оброблення інформації [52–54], що дозволяє отримувати повний набір параметрів коливань під час реєстрації сигналів прискорення і швидкості, включаючи і динамічні зсуви.

## Література

1. *Мости: конструкції та надійність* / Й.Й.Лучко, П.М.Коваль, М.М.Корнієв та ін. – Л: Каменяр, 2005. – 989 с.
2. *Корнієв М.М.* Сталеві мости: теорет. і практ. посіб. з проектування. – К.: УТУ, 2003. – 547 с.
3. *Костюков В.Н.* Мониторинг безопасности производства. – М.: Машиностроение, 2002. – 224 с.
4. *Dyke S.I., Caicedo J.M., Johnson E.A.* Monitoring of a Benchmark Structure for Damage Identification / Proc. of the Eng. Mech. Speciality Conf.-Austin, Texas, USA. – May 2000. – P. 214–217.
5. *ІН.В. 3.2.-218-003449261.036-96.* Інструкція з організації догляду за штучними спорудами. – К: УД ВТП “Укрдортехнологія”, 1996. – 90 с.
6. *ВБН В.3.1-218-174-2002.* Мости та труби. Оцінка технічного стану автодорожніх мостів, що експлуатуються. – К.: ДСАДУ, 2002. – 74 с.
7. *Неразрушающий контроль металлов и изделий: справ.* / под ред. Г.С.Самойловича. – М.: Машиностроение, 1976. – 456 с.
8. *Лучко Й.Й., Коваль П.М., Дем’ян М.Л.* Методи дослідження та випробування будівельних матеріалів і конструкцій. – Л: Каменяр, 2001. – 436 с.
9. *Roebling suspension bridge. II: Ambient testing and live-load response/* W.-X.Ren, I.E.Harik, G.E.Blandford et al. // *J.of Bridge Eng.* – 2004. – № 9(2). – P. 119–126.
10. *Wipf T.J., Phares B.M.* Prediction and monitoring of a superload passage // Iowa State University. Technical Report. – Aug. 2003. – 5 p.
11. *Testing and evaluation of Iowa DOT FRP temporary bypass bridge /* Bridge Eng. Center / Test and evaluation report. – Nov. 2005. – 10 p.
12. *Смирнов А.В.* Прикладная механика дорожных и аэродромных конструкций // Омск: ОмГТУ, 1993. – 187 с.
13. *Гриценко Т.В., Фомиця Л.М.* Вимірювання прогинів ферми в середині прогону моста та оцінка його здатності // Діагностика довговічності та реконструкція мостів і будівельних конструкцій: зб. наук. пр. – Л: Каменяр, 2000. – Вип.2. – С. 28–31.
14. *Редченко В.П.* Оцінка просторової роботи прогновної будови моста за результатами її випробувань рухомих навантажень // Автомобільні дороги та дорожнє будівництво. – 2004. – № 69. – С. 210–214.
15. *Monitoring the Structural Behavior of the New Svinesund Bridge /*R.Karoumi, G.James, F.Myrvoll et al. / Materials of the sixth European Conf. on structural dynamics – “Eurodyn 2005”. – Sept. 2005, Paris, France. – P. 53–58.
16. *Development of bridge load testing process for load evaluation/* T.J. Wipf, B.M. Phares, F.W. Klaiber et al. // Final report No. TR-455. Center for transportation research and education Iowa State University. – Apr. 2003. – 154 p.
17. *Monitoring of the launched girder bridge over the Iowa river on US 20/* T.J. Wipf, B.M. Phares, R.A. Abendroth and other// Final report No. CTRE 01-108. Center for transportation research and education Iowa State Univ. – Mar. 2004. – 94 p.
18. *Испытание железобетонной балки /*Т.К.Чурадзе, Ю.В.Словинский, Б.М.Майсурадзе и др. // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2004. – № 3. – С. 34–36.
19. *Harlan M.D.* Field test of a bridge deck with glass fiber reinforced polymer bars as the top mat of reinforcement// Final report. – Jun. 2004. – Virginia Polytechnic Inst. – 110 p.
20. *Remote continuous evaluation of a bridge constructed using high-performance steel /* T. Wipf, B. Phares, L.F. Greimann et al.// Final report No. CTRE 02-123. Center for transportation research and education Iowa State Univ. – May 2006. – 141 p.
21. *Heals monitoring of bridge structures and components using smart-structure technology/* B.M.Phares, T.J.Wipf, L.F.Graimann et al. // Final report No.0092-04-14. Center for transportation research and education Iowa State Univ. – Jan. 2005. – 53 p.
22. *Hou T.C., Lynch J.P.* Rapid-to-deploy wireless monitoring systems for static and dynamic load testing of bridges: validation on the grove street bridge // Proc. of 13th annual Int. Symp. On smart Struct. And Mater. San Diego. – February 26 – Mar. 2. – 2006. – Vol. 6534. – P. 134–140.
23. *Structural load testing and flexure analysis of the route 701 bridge in louisiana county, Virginia /* J. Lucas, T.E. Cousins, M.C. Brown et al. // Final report VTRC 04-R12. Virginia Transportation research council. – Jun. 2004. – 31 p.
24. *Stallings J.M., Porter P.W.* Live load tests of Alabama’s HPC bridge // Final report TE-036. Auburn Univ. – 2002. – 57 p.
25. *Portable timber bridge systems for forest roads/* S.E. Taylor, M.A. Ritter, J.M. Franklin et al. / Proc. of the Int. Conf. On Forest Engin.: Forestry Engin. For Tomorrow: Roads. – Jun. 28–30, 1999. – Inst. of Agricult. Engin., Silsoe, UK. – P. 1–19.
26. *Static load and vibration performance of six timber bridges constructed using local species in north Michigan /* B.K.Brashaw, R.Vatalaro, X.Wang et al. // Final report No.NRRI/TR– 2006/08. Michigan Technological Univ. – 2006. – 11 p.
27. *Nowak A.S., Eom J., Ferrand D.* Verification of girder distribution factors for continuous steel girder bridges // Final report No.RC-1429. Michigan Univ. – May 2003. – 235 p.
28. *Holford K., Carter D.* Strategic considerations for the AE monitoring of bridges – a discussion and case study // NDT in civil engineering. – 1998. – P. 112–115.
29. *Коваль П.М., Філоненко С.Ф., Сташук П.М.* Дослідження автодорожнього мосту з використанням методу акустичної емісії // Автомобільні дороги і транспортне будівництво: міжвід. наук.-техн. зб. – 2002. – Вип. 64. – С. 114–118.

30. Филоненко С.Ф. Акустическая эмиссия. Измерение, контроль, диагностика. –К.: КМУГА, 1999. – 305 с.
31. Бабак В.П., Байса Д.Ф., Різак В.М., Філоненко С.Ф. / Конструкційні і функціональні матеріали. Ч.2: Основи фізики твердого тіла. Функціональні матеріали. –К.: Техніка, 2004. – 368 с.
32. Ren W.X., Zatar W., Harik I.E. Ambient vibration-based seismic evaluation of a continuous girder bridge// Eng. Struct. – 2004. – No. 26. – P. 631–640.
33. Bien J., Kmita J., Rawa P., Zwolski J. Test of swietokrzyski bridge over vistula river in Warsaw// Inzynieria i budownictwo. – 2002. – No. 3/4. – P. 166–170.
34. Редченко В.П. Оцінка просторової роботи прогновної будови моста за результатами її випробувань рухомим навантаженням // Автомобільні дороги та дорожнє будівництво. – 2004. – № 69. – С. 210–214.
35. Wong K., Man K., Chan W. Monitoring Hong Kong's bridges – real-time kinematic spans the Gap // GPS World. – 2001. – Vol. 12, No. 7. – P. 10–18.
36. Richter B., Euler H.J. Study of improved observation modeling for surveying type of applications in multipath environment / IONGPS 2001 Proc. (Salt Lake City, Sept. 11–14, 2001). – P. 2–9.
37. James G., Karoumi R. Monitoring of the new Svinesund bridge // Report 1. Dec. 2003., Norwegian Geotechn. Inst., KTH Stockholm, 2003. – 90 p.
38. London Millennium bridge: pedestrian-induced lateral vibration / P. Dallard, T. Fitzpatrick, A. Flint et al. // J. of bridge Engin. – 2001. – Vol. 6, No. 3. – P. 412–417.
39. Huckelbridge A., Zalewski B. Dynamic load environment of bridge mounted sing support structures // Final report No. St/SS/05-002. Sept. 2005. Case Western reserve Univ. – 2005. – 67 p.
40. Sohn H., Law K.H. Extraction of Ritz vectors from vibration test data // Mechan. Syst. And Signal processing. – 2001. – Vol. 15. – No. 1. – P. 213–226.
41. The pseudo dynamic test of RC bridge columns analyzed through the hilbert-huang transformer / Y.F. Li, S.Y. Chang, W.C. Tzeng et al. / 13th world Conf. On Earth. Engin. – Vancouver, Canada, Aug. 1–6, 2004. – Paper No. 3041. – 15 p.
42. Samali L.J., Crews K.I. Load rating of impaired bridges using dynamic method // EJSE Special issue: Loading on structures. – 2007. – P. 66–75.
43. Ko J.M., Sun Z.G., Ni Y.Q. Multi-stage identification scheme for damage in cable-stayed Kap Shui Mun bridge // Eng. Struct. – 2002. – Vol. 24. – No. 7. – P. 857–868.
44. Brincker R., Zhang L., Anderson P. Model identification of output-only systems using frequency domain decomposition // Smart Mater. And Struct. – 2001. – No – 10. – P. 441–445.
45. Doebling S.W., Farrar C.R. Estimation of statistical distribution for modal parameters identified from averaged frequency response function data// J. of vibration and control. – 2001. – No. 7. – P. 603–624.
46. Experimental study of bridge structure dynamic characteristics using periodic excitation/ J. Bien, J. Krzyzanowski J., W. Poprawski et al. // Proc. of the Inter. Conf. On Noise and Vibr. Eng. ISMA 2002. – Leuven, Belgium, 2002. – P. 555–562.
47. A study of the site vibration characteristics for the fechin institute in TAOS, NEW MEXICO /M.C.H. Rav, B. Hoerst, P.J. Cornwell et al. // Report No. 97-1. – Jun. 1998. – Los Alamos National laboratory. – 15 p.
48. Embedment of structural monitoring algorithms in a wireless sensing unit / J.P. Lynch, A. Sundararajan, K.H. Law et al. // Struct. Eng. And Mechan. – 2003. – Vol. 15, No. 3. – P. 285–297.
49. Ambient vibration study of the Gi-Lu cable-stay bridge application of wireless sensing units/ K.C.Lu, Y.Wang, J.P.Lynch et al. // Struct. Eng. And Mechan. – 2006. – Vol. 19, No. 4. – P. 174–185.
50. Dynamic response of stress-laminated-deck bridges / M.A. Ritter, D.L. Wood, T.J. Wipf et al. // Proc. of 4th Intern. Bridge Engin. Conf. – Aug. 28–30, 1995. – Washington. – Vol. 2. – P. 381–394.
51. Филоненко С.Ф., Корниенко–Мифтахова И.К. Информационно-измерительная система для анализа характеристик динамического поведения конструкций // Автоматика, автоматизация, электротехнические комплексы и системы. – 2006. – № 1. – С. 75–83.
52. Бабак В.П., Филоненко С.Ф., Корниенко–Мифтахова И.К., Пономаренко А.В. Определение коэффициента передачи датчиков преобразования смещений // Технологические системы. – 2006. – № 4 (36). – С. 6–12
53. Пат. № 79637, Україна, G 01N 29/11, G 01H 1/00. Спосіб визначення динамічних характеристик конструкцій / Бабак В.П., Філоненко С.Ф., Калита В.М., Корнієнко–Міфтахова І.К. – Опубл. 10.07.2007, Бюл. № 10.
54. Бабак В.П., Филоненко С.Ф., Корниенко–Мифтахова И.К., Пономаренко А.В. Обработка сигналов при динамических испытаниях объектов // Технологические системы. – 2007. – № 1(37). – С. 25–32.