

УДК 621.3.089

В.В. БАРЧАН, асис., ХНАДУ, Харків

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ДИНАМІЧНОСТІ МОСТОВИХ СПОРУД

У роботі синтезована оптимальна система вимірювань коефіцієнта динамічності мостових споруд. В основі оптимальної системи лежить методика комплексування вимірювачів, робота яких ґрунтується на різних фізичних принципах. Підвищення точності вимірювань коефіцієнта динамічності мостових споруд досягається за рахунок підвищення точності вимірювання динамічного прогину.

Ключові слова: синтез, оптимальна система, вимірювач, споруди мостові, коефіцієнт динамічності, комплексування вимірювачів.

В работе синтезирована оптимальная система измерений коэффициента динамичности мостовых сооружений. В основе оптимальной системы лежит методика комплексирования измерителей, построенных на различных физических принципах. Повышение точности измерений коэффициента динамичности мостовых сооружений достигается за счет более точного измерения динамических прогибов.

Ключевые слова: синтез, оптимальная система, сооружения мостовые, коэффициент динамичности, комплексирование измерителей.

An optimal system for dynamic amplification factor measuring has been presented in the paper. The techniques are based on complexing of devices which operate according different physical principles. The accuracy of measurements of the dynamic amplification factor for bridge structures is achieved at the expense of more accurate measuring of the dynamic deflections.

Keywords: accuracy, bridge constructions, sensor, complexing, near optimal system, dynamic amplification factor.

Вступ

Мостові споруди (МС) є незмінним структурним елементом системи транспортних сполучень будь-якої розвиненої держави світу. Належний технічний стан МС є запорукою безпечного пересування пасажирів, вантажів та стабільного економічного розвитку. Під час експлуатації мостові споруди перебувають під впливами та навантаженнями різного походження. Це обумовлено тим, що відбувається постійне зростання інтенсивності руху транспортних засобів та збільшення їх вантажності, що призводить до передчасного старіння вузлів та елементів споруд. Оцінка впливу рухомого транспортного засобу на споруду є складним науково-технічним завданням, оскільки система «МС – транспортний засіб» перебувають у нелінійній взаємодії і результати випробувань з визначення впливу транспортного потоку складно піддаються аналізу. Для контролю МС та перевірки здатності витримувати навантаження введено поняття коефіцієнт динамічності (КД) [1]. Цей параметр є інтегральною характеристикою, яка визначається із відношення динамічного до статичного прогинів плити або головних балок споруди [1, 3]. Від точності

вимірювань цих параметрів залежить якість діагностики та безпека подальшої експлуатації мосту. Таким чином, необхідним є підвищення точності вимірювань статичних та динамічних прогинів. Для вимірювання прогину (лінійних переміщень) існує велика кількість вимірювачів, зокрема цифровий прогиномір з механічним чутливим елементом та похибкою вимірювань 0,001 мм. Як правило, вимірювачі лінійних переміщень є інерційними і мають обмежену смугу пропускання цифрових індикаторів. При вимірюванні динамічних прогинів, вихідний сигнал датчика, що встановлений на МС, часто спотворюється. Отже, для проведення вимірювань потрібно використовувати малоінерційні датчики, до яких, зокрема, належать неконтактні датчики радіолокаційного типу, наприклад, лазерні далекоміри. На жаль, вони мають високу вартість і до того ж обмежену сферу застосування в МС, оскільки складна геометрія споруди, особливі вимоги до розташування датчиків, стан оптичного середовища ускладнюють їх використання.

Оскільки завади механічного характеру впливають на роботу механічних датчиків і не будуть впливати на лазерний віброметр, і навпаки, завади, що характерні для оптичного діапазону електромагнітних хвиль не впливатимуть на функціонування механічних датчиків. Таким чином, створюється вимірювальна система, яка є практично незалежною від завад, оскільки одночасна дія механічних і оптичних завад маловірогідне. Для підвищення точності вимірювань коефіцієнта динамічності можна скористатись відомим [2] методом комплексування вимірювачів, робота яких ґрунтується на різних фізичних принципах.

Аналіз публікацій

Підвищення точності вимірювань лінійних переміщень при проведенні динамічних випробувань МС є актуальним науково-технічним завданням [2], оскільки від коректності отриманих результатів вимірювань залежить якість діагностики МС і, як наслідок, безпечність та продуктивність їх експлуатації. Основні методи підвищення точності вимірювань приведені в [3], де на початковому етапі розв'язання задачі підвищення точності вимірювань аналізують вимірювальної інформації та визначають цілі її застосування. Після цього визначаються основні джерела похибок. Подальший аналіз вимірювальної інформації проводиться за домінуючими складовими похибок і розглядаються основні способи їх корекції. При визначенні КД обрання методик та засобів вимірювань є дуже важливим завданням. Для їх вимірювань існує велика кількість методів та засобів [4...6]. Важливим етапом діагностики є обрання засобів вимірювань, у даному випадку для оцінки динамічних прогинів прийнято використовувати цифрові індикатори лінійних переміщень, які мають цифровий інтерфейс передачі даних. Значна протяжність ліній зв'язку, атмосферні фактори, зокрема, термальний вплив, опади можуть виступати додатковим джерелом завад (матеріальних витрат).

Оскільки під час експлуатації МС перебувають під впливом транспортних потоків випадкового складу, в елементах конструкції, зокрема прогонових будовах, можуть виникати імпульсні коливання досить високої амплітуди. Такі

впливи порушують запроєктовані режими експлуатації МС та призводять до зміни характеру коливань [5].

Основна частина

Нехай корисним повідомленням, що знімається з датчика, є лінійне переміщення – прогин споруди. Запишемо апріорне повідомлення прогину плити МС у вигляді стохастичного диференціального рівняння, яке описує марковський процес [2]:

$$\frac{d\ell(t)}{dt} = -\alpha_0 \cdot \ell(t) + n_{01}, \quad (1)$$

де α_0 – ширина спектра прогину МС, $\ell(t)$ – прогин головної балки МС у вертикальній площині, n_{01} – незалежний гауссівський білий шум, що має двохсторонню спектральну щільність $N_{0d} / 2$.

Аналогічне апріорне повідомлення для радіолокаційного вимірювача представимо у вигляді двох рівнянь в квадратурах:

$$\frac{dS_1(t)}{dt} = -\alpha \cdot S_1(t) + n_{02}, \quad (2)$$

$$\frac{dS_2(t)}{dt} = -\alpha \cdot S_2(t) + n_{03}. \quad (3)$$

де α – ширина спектра повідомлення для радіолокаційного вимірювача, $S_1(t)$, $S_2(t)$ – квадратурні компоненти радіолокаційного сигналу, що несуть інформацію про прогин,

n_{02} , n_{03} – незалежні гауссівські білі шуми радіолокаційного вимірювача, що мають двохсторонню спектральну щільність $N_0 / 2$.

Процеси $S_1(t)$, $S_2(t)$ є вузькосмужними нормальними процесами. Обвідну цього процесу та фазу обчислюють за відомими формулами радіотехніки:

$$A(t) = \sqrt{S_1^2(t) + S_2^2(t)},$$

$$\varphi(t) = \operatorname{arctg} \frac{S_2(t)}{S_1(t)}. \quad (4)$$

Переміщення вузла $\ell(t)$ пов'язано з фазою $\varphi(t)$ простою залежністю:

$$\ell(t) = \frac{\lambda}{4\pi} \varphi(t). \quad (5)$$

В формулі (5) замість коефіцієнта $\lambda / 2\pi$ записаний коефіцієнт $\lambda / 4\pi$. Цим враховується той факт, що датчик забезпечує користувачів інформацією про переміщення точки $\ell(t)$, радіолокаційний датчик - про подвійне переміщення цієї точки для датчика.

На вході індикатора лінійних переміщень діє випадковий процес

$$\eta(t) = \ell(t) + n_d(t), \quad (6)$$

а на вході радіолокаційного вимірювача аналогічний процес представимо у вигляді:

$$\xi_1(t) = S_1(t) \cdot \cos \omega_0 t + n(t), \quad (7)$$

$$\xi_2(t) = S_2(t) \cdot \cos \omega_0 t + n(t), \quad (8)$$

де $\omega_0(t)$ – несуча частота коливань радіолокаційного сигналу,

$n_d(t), n(t)$ - шуми датчика та радіолокаційного вимірювача відповідно.

Для простоти в смузї пропускання обох вимірювачів ці шуми вважаємо білими з спектральною щільністю відповідно N_d та N .

Система лінійної фільтрації, яка є оптимальною за критерієм мінімуму дисперсії похибки, описується наступними рівняннями [2]

$$\frac{d\bar{\mu}}{dt} = A\bar{\mu} + RH^T N^{-1} (\bar{\zeta} - H\bar{\mu}), \quad (9)$$

$$\frac{dR}{dt} = AR + RA^T - RH^T N^{-1} HR + N_0. \quad (10)$$

Матриця коефіцієнтів системи рівнянь (1), (2), (3):

$$A = \begin{pmatrix} -\alpha_0 & 0 & 0 \\ 0 & -\alpha & 0 \\ 0 & 0 & -\alpha \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Вектор параметрів вимірювальної системи

$$\bar{\mu} = \begin{pmatrix} \ell \\ S_1 \\ S_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \ell(t) \\ S_1(t) \\ S_2(t) \end{pmatrix}. \quad (12)$$

$H(t)$ – матриця спостережень, яка має вигляд

$$H(t) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega_0 t & 0 \\ 0 & 0 & \sin \omega_0 t \end{pmatrix}. \quad (13)$$

N_0 – симетрична матриця поділених навпіл спектральних інтенсивностей, запишемо наступним чином

$$N_0 = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} N_{0d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{N_0}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{N_0}{2} \end{pmatrix}. \quad (14)$$

$\bar{\zeta}$ – вектор-стовпець спостережень,

$$\bar{\zeta} = \begin{pmatrix} \eta(t) \\ \xi_1(t) \\ \xi_2(t) \end{pmatrix}. \quad (15)$$

Матриця спектральних щільностей завад

$$N = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} N_d & 0 & 0 \\ 0 & \frac{N}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{N}{2} \end{pmatrix}. \quad (16)$$

де N_d – значення спектральної щільності повідомлення для індикатора,

N – значення спектральної щільності повідомлення радіолокаційного вимірювача,

R – кореляційна матриця похибок фільтрації, яка має вигляд:

$$R = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{pmatrix}.$$

Для даної задачі з фізичних міркувань $R_{22} = R_{33}$, $R_{12} = R_{13} = R_{21} = R_{31}$. Тоді

$$R = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{12} \\ R_{12} & R_{22} & R_{23} \\ R_{13} & R_{23} & R_{33} \end{pmatrix}. \quad (17)$$

Векторне рівняння (9) після підстановок перетворюється до трьох диференціальних рівнянь оцінок:

$$\frac{d\hat{\ell}(t)}{dt} = -\alpha_0 \hat{\ell} + \frac{2R_{11}}{N_d} (\eta - \hat{\ell}) + \frac{2R_{12}}{N} \cos w_0 t \cdot (\xi_1 - \mathfrak{F}_1 \cdot \cos w_0 t) + \frac{2R_{13}}{N} \sin w_0 t \cdot (\xi_2 - \mathfrak{F}_2 \sin w_0 t), \quad (18)$$

$$\frac{d\mathfrak{F}_1(t)}{dt} = -\alpha \cdot \mathfrak{F}_1 + \frac{2R_{12}}{N_d} (\eta - \hat{\ell}) + \frac{2R_{22}}{N} \cos w_0 t \cdot (\xi_1 - \mathfrak{F}_1 \cos w_0 t) + \frac{2R_{23}}{N} \sin w_0 t \cdot (\xi_2 - \hat{S}_2 \cdot \sin w_0 t), \quad (19)$$

$$\frac{d\mathfrak{F}_2(t)}{dt} = -\alpha \cdot \mathfrak{F}_2 + \frac{2R_{13}}{N_g} (\eta - \hat{\ell}) + \frac{2R_{23}}{N} \cdot \cos w_0 t (\xi_1 - \mathfrak{F}_1 \cos w_0 t) + \frac{2R_{33}}{N} \sin w_0 t \cdot (\xi_2 - \mathfrak{F}_2 \cdot \sin w_0 t). \quad (20)$$

Система диференціальних рівнянь дисперсій :

$$\frac{dR_{11}}{dt} = -2\alpha_0 R_{11} - \frac{2R_{11}^2}{N_d} - \frac{2R_{12}^2}{N} \cos^2 w_0 t - \frac{2R_{13}^2}{N} \sin^2 w_0 t + \frac{1}{2} N_{0,d}, \quad (21)$$

$$\frac{dR_{12}}{dt} = -\alpha_0 R_{12} - \alpha R_{12} - \frac{2}{N_d} R_{11} R_{12} - \frac{2R_{12} R_{22}}{N} \cdot \cos^2 w_0 t - \frac{2R_{13} R_{23}}{N} \sin^2 w_0 t, \quad (22)$$

$$\frac{dR_{13}}{dt} = -\alpha_0 \cdot R_{13} - \alpha \cdot R_{13} - \frac{2R_{11} \cdot R_{13}}{N_d} - \frac{2R_{12} R_{23}}{N} \cdot \cos^2 w_0 t - \frac{2R_{13} R_{33}}{N} \sin^2 w_0 t, \quad (23)$$

$$\frac{dR_{22}}{dt} = -2\alpha R_{22} - \frac{2R_{12}^2}{N_d} - \frac{2R_{22}^2}{N} \cos^2 w_0 t - \frac{2R_{23}^2}{N} \sin^2 w_0 t + \frac{1}{2} N_0, \quad (24)$$

$$\frac{dR_{23}}{dt} = -2\alpha R_{23} - \frac{2R_{12} R_{13}}{N_d} - \frac{2R_{22} R_{23}}{N} \cos^2 w_0 t - \frac{2R_{23} R_{33}}{N} \sin^2 w_0 t, \quad (25)$$

$$\frac{dR_{33}}{dt} = -2\alpha R_{33} - \frac{2R_{13}^2}{N_d} - \frac{2R_{23}^2}{N} \cos^2 w_0 t - \frac{2R_{33}^2}{N} \sin^2 w_0 t + \frac{1}{2} N_0. \quad (26)$$

Попередні результати моделювання показують, що типові засоби вимірювань при застосуванні цифрового індикатору лінійних переміщень задовольняють вимогам точності вимірювань статичних прогинів. Використання запропонованого вимірювача для оцінки значень статичних прогинів

нерациональне. Тому оцінки (16...18) та дисперсії (21...26) промодельємо для динамічного прогину МС.

Скориставшись рівнянням (1), представимо для прикладу модель статичного (крива 2) та динамічного прогинів (крива 1) плити (несучих балок) МС при визначенні КД амплітудою $\ell_c = 1,1$ мм та $\ell_\delta = 1,32$ мм [8] (рис. 1). Розглянемо три характерних випадки функціонування

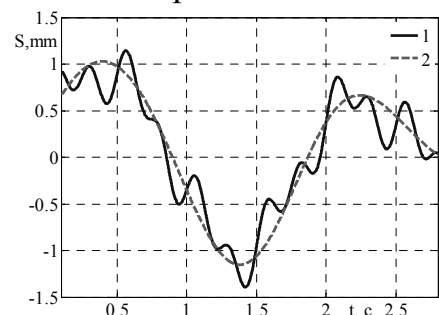


Рис. 1. Приклад реалізації динамічного (1) та статичного (2) прогинів плити МС

системи. Нехай у першому випадку сигнал повідомлення у суміші із завадами надходить на вхід вимірювача, коли працює тільки індикатор лінійних переміщень, коли радіотехнічний вимірювач не працює або на нього діють потужні електромагнітні завади.

В результаті моделюванні отримана часова залежність оцінки динамічного прогину (рис. 2, крива 3) та його дисперсії (рис. 3, крива 3), що набуває усталеного значення у момент часу $t=0,5$ с.

Можна зробити висновок, що система на основі тільки механічного датчика неякісно оцінює швидкі прогини плити МС згладжуючи при цьому флуктуації переміщення МС більш високої частоти. Якраз такі переміщення можуть визначати відмінність динамічного від статичного прогинів, шляхом коефіцієнта динамічності МС.

У другому випадку працює лише радіолокаційна система, механічний індикатор відключений або його використання неможливе по причині складності забезпечення реперних точок монтажу

Радіолокаційна система більш точно оцінює динамічний прогин (рис. 2, крива 2) та дисперсію його оцінки (рис. 3, крива 1), що набуває статичного значення на рівні $0,15 \text{ мм}^2$ за короткий проміжок часу.

Результати роботи оптимальної системи з оцінки динамічного прогину заданої форми та його дисперсії при сумісній роботі обох вимірювачів приведено на рис. 2 (крива 1) та рис. 3 (крива 2) відповідно. З цих рисунків випливає, що дисперсія вимірювання динамічного прогину МС зменшується порівняно з першими двома випадками в декілька разів.

Для визначення абсолютної похибки вимірювань коефіцієнта динамічності σ_{KD} скористаємося рівнянням:

$$\sigma_{KD} = K_d \cdot \left(\frac{\sigma_{d_{cm}}}{l_c} + \frac{\sigma_{d_{дин}}}{l_d} \right), \quad (27)$$

де K_d – вимірне значення коефіцієнту динамічності у даному випадку дорівнює 1,2; $\sigma_{d_{cm}}, \sigma_{d_{дин}}$ – абсолютні похибки (значення середньоквадратичної похибки) статичного та динамічного прогинів, відповідно, причому $\sigma_{d_{cm}} \ll \sigma_{d_{дин}}$,

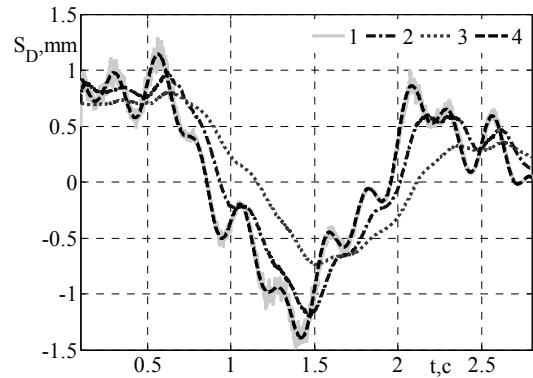


Рис. 2. Результати моделювання оцінок реалізації сигналу динамічного прогину з часом

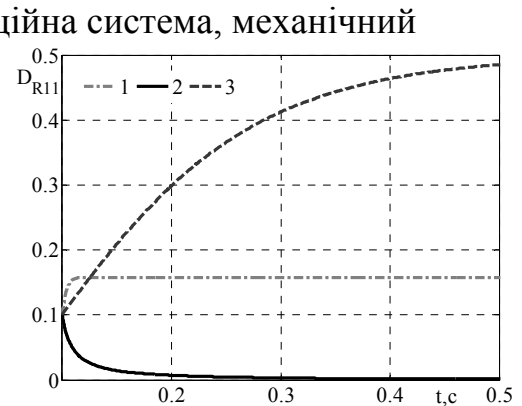


Рис. 3. Часова залежність зміни дисперсії R_{11} оцінки $f(t)$ при вимірюванні тільки радіолокаційною системою (крива 1), тільки цифровим індикатором (крива 3) та при використанні оптимальної системи (крива 2)

(при розрахунку складову $\frac{\sigma_{d_{cm}}}{\ell_c}$ не враховуємо).

Після простих обчислень параметр $\sigma_{кд}$ набуває значення $\sigma_{кд} = 0,63$ мм при використанні тільки індикатора лінійних переміщень; $\sigma_{кд} = 0,13$ мм при використанні тільки радіотехнічної системи і $\sigma_{кд} = 0,055$ мм для синтезованої оптимальної схеми, таким чином створена система істотно підвищує точність вимірювання.

Висновки

Синтезована в роботі оптимальна система за критерієм мінімуму дисперсії дозволяє підвищити точність вимірювання коефіцієнта динамічності на 42 % порівняно з кращим результатом вимірювань одним вимірювачем. Отриманий результат досягається за рахунок підвищення точності оцінки динамічного прогину. Таким чином, застосування синтезованої системи не обмежується її використанням для вимірювань коефіцієнта динамічності і може бути використаною при дослідженні динамічних характеристик МС.

Список літератури: 1. *Гибшман, Е. Е.* Методы динамических испытаний мостов: вопросы испытания и освидетельствования мостов / *Е. Е. Гибшман* [Электронный ресурс] – М. : Транспорт, 1941. – 195 с. 2. *Тихонов, В. И.* Оптимальный прием сигналов / *В. И. Тихонов* [Текст] – М. : Радио и связь, 1983. – 320 с. 3. *Архипенко, Ю. В.* Методика расчета динамического воздействия подвижных нагрузок с мостами с применением программных комплексов конечно-элементного анализа [Электронный ресурс] : дис. ... канд. техн. наук / *Ю. В. Архипенко*. – М., 2006. – 176 с. 4. *Редченко, В. П.* Динамічний коефіцієнт автодорожніх мостів: проблеми натурного визначення // Дороги та мости / *В. П. Редченко* [Електронний ресурс] : Зб. наук. ст. – Вип. 6. – К. : ДерждорНДІ, 2006. – С. 122–133. 5. *Редченко В. П.* Визначення структурних параметрів прогонових будов мостів за результатами їх випробувань рухомим навантаженням / *В. П. Редченко* [Електронний ресурс] // Автошляховик України. – 2009. – № 4. – С. 43–46. 6. EVACES'09. Experimental vibration analysis for civil engineering structures : Proceedings of the international conference. – Wroclaw, Poland, 2009. – 208 p. 7. ДБН В.2.3-6:2009 Мости та труби. Обстеження та випробування. – Введ. 2010-03-01 – К. Міненергобуд України, 2009. – 62 с. 8. *Сергеев, А. А.* Методика экспериментальной оценки динамических воздействий подвижной нагрузки на пролетные строения автодорожных мостов [Електронний ресурс] : дис. канд. техн. наук / *А. А. Сергеев*. – М., 2007. – 197 с.

Поступила в редколлегию 11.06.2012

УДК 004.832.38

М.В. ВОЛЧЕНКО, ассис, Институт информатики и искусственного интеллекта «Донецкий национальный технический университет»

ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА РЕЗОЛЮЦИИ В ЛОГИКЕ ВЫСКАЗЫВАНИЙ ПРИ ПОМОЩИ 0,1-НОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДИЗ'ЮНКТОВ

Роботу присвячено вирішенню задачі перевірки виконаності формул логіки висловлювань, що характеризуються великою потужністю. Запропоновано 0,1-не представлення диз'юнктив і матрична структура представлення зв'язків диз'юнктив, для яких розроблено алгоритм резолюції з евристичної функцією вибору зв'язку для резольвування. Наведено результати експериментальних досліджень, що підтверджують ефективність запропонованого алгоритму.