

УДК 681.513.683(045)

В.М. Макаренко, асп.

СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВІБРОАКУСТИЧНИМ ВИПРОМІНЮВАННЯМ ГНУЧКОЇ КОНСТРУКЦІЇ

Національний авіаційний університет
E-mail: vitmakarenko@rambler.ru

Розглянуто синтезовану систему керування, яка здатна зменшувати сталу вібраційну відповідь тонкостінної гнучкої конструкції в широкій смузі низьких частот. Показано, що в основі алгоритму шаблонного пошуку лежить припущення про наявність зв'язку між сигналом, що утворюється системою керування та усталеною вібраційною відповіддю гнучкої конструкції. Ефективність запропонованої системи керування проілюстровано експериментально на прикладі затиснутої пластини.

Ключові слова: вібрація, гнучка конструкція, система керування, шаблонний пошук, шум.

Вступ

Адаптивний контроль низькочастотної вібрації і шуму для гнучких конструкцій досліджено у працях [1–5].

Найпоширенішим є застосування алгоритму фільтрованого сигналу відліку x з мінімальною середньоквадратичною похибкою (ФхМСКП), що є системою контролю з прямим зв'язком та H_∞ (зворотний зв'язок), алгоритм гібридного контролю [1], що складається з комбінації прямого та зворотного зв'язку.

Накаї обмежився розглядом виключно циклічних явищ, чим спростив ФхМСКП алгоритм до синхронізованого ФхМСКП алгоритму [5]. Однак використання таких систем керування вимагає ідентифікації динаміки шляху компенсуючого сигналу.

Мета роботи – розроблення системи керування для зменшення вібрації у широкій смузі частот.

Ідентифікація динаміки компенсуючого шляху в такому випадку вимагає значних витрат оперативної пам'яті комп'ютера.

Існуючі стандартні системи керування, що втілені за допомогою нейронних мереж у MatLab, є непридатними до керування гнучкою конструкцією, оскільки потребують використання вихідного сигналу, що пройшов через компенсуючий пристрій.

Під час експлуатації в режимі реального часу неможливо отримати цей сигнал, тому що дія компенсуючого пристрою додається до дії збуджуючого миттєво.

Розділ та вимірювання дії окремих пристроїв на гнучку конструкцію в режимі реального часу є неможливим.

Постановка задачі

Синтез адаптивної системи керування гнучкою конструкцією в широкій смузі низьких частот вимагає від системи керування здатності відслідковувати та компенсувати дію зовнішнього збудження з різними швидкостями, оскільки гнучка конструкція змінює вібраційну відповідь залежно від частоти зовнішнього збудження.

У зв'язку з тим, що конструкція є гнучкою, будь-які різкі зміни сигналу, що створюється системою керування, можуть призвести до пошкодження конструкції, виконуючих пристроїв та від'єднання об'єктів, що закріплені на цій конструкції.

Отже, додатковою вимогою до синтезованої системи керування є неперервність утвореного компенсуючого сигналу.

Як показали дослідження, існує лише один мінімум рівня звукової потужності, якому відповідає комбінація амплітуди та фази компенсуючого сигналу [6].

Подібний висновок справедливий і для рівня віброприскорення в окремій точці.

Отже, задача зменшення рівня віброприскорення зводиться до визначення амплітуди та фази компенсуючого сигналу. Будь-який алгоритм оптимізації, здатний знаходити локальний мінімум функції двох змінних, підходить для розв'язання поставленої задачі.

Однак для автоматизації даних дій необхідне створення системи керування, здатної працювати в реальному режимі часу.

Використання шаблонного пошуку для зменшення вібрації гнучкої конструкції

Метод шаблонного пошуку є одним із методів розв'язку задач оптимізації, що не потребує ніякої інформації щодо функції цілі, окрім її значення. Його можна використовувати для цільових функцій, які не мають похідних від амплітуди та фази, або які є кусково-безперервними.

Отже, створення системи керування на основі цього алгоритму не потребує ідентифікації об'єкта керування.

Метою керування гнучкою конструкцією є зниження віброприскорення в точці керування (ТК) шляхом пошуку оптимальних значень компенсуючої амплітуди та фази напруги, що подається на компенсуючий пристрій.

Оскільки напруга на аналогово-цифровому перетворювачі (АЦП) прямо пропорційна віброприскоренню в ТК, то використаємо середньоквадратичне значення вхідної напруги як цільову функцію для алгоритму пошуку.

Компенсуючий та збуджуючий сигнали надходять до цифрово-аналогового перетворювача (ЦАП) через блоки «Analog Output» (рис. 1).

Компенсуючий сигнал формується блоком «Smooth Sine Generator1» на основі сигналів контролера «Pattern Search», принцип дії якого показано на рис. 2.

Алгоритм забезпечує пошук із множини точок навколо поточної точки $(A_c; \varphi_c)$.

Мета алгоритму – визначення точки з мінімальним значенням цільової функції.

Алгоритм пошуку вимірює усталене віброприскорення затиснутої пластини (цільову функцію) в послідовності точок, що наближаються до оптимальної точки.

У кожному циклі алгоритм опитує набір точок, що називаються сіткою, навколо поточної точки, що розрахована в попередньому циклі алгоритму.

Сітка утворюється шляхом додавання поточної точки до добутку вектора кроків за амплітудою та фазою на набір векторів, що зветься шаблоном.

У дослідженні використано сітку з восьми точок.

Точці з номером дев'ять ($n = 9$) на рис. 2 відповідає точка, навколо якої розташовуються точки сітки.

Кожен вектор у шаблоні має різний напрям пошуку щодо початкової точки. Якщо алгоритм шаблонного пошуку знаходить точку в сітці, що зменшує цільову функцію, то на наступній ітерації точка стає поточною в циклі запропонованого алгоритму. Решта точок у сітці, що не були виміряні до знаходження точки з кращою цільовою функцією, не вимірюються.

Якщо знайдена точка з меншим середньоквадратичним віброприскоренням, то крок (кроки) за амплітудою та/або фазою перемножується на фактор розширення виставлений користувачем у блоці регульованого посилення «Expansion». Якщо знайдена точка відрізняється від поточної за амплітудою, то крок за амплітудою перемножується на фактор розширення, якщо за фазою, то перемножується на крок за фазою, якщо і за амплітудою, і за фазою, то перемножуються обидва кроки.

Якщо цикл був невдалим, тобто точка з меншим значенням цільової функції не була знайдена, то кроки перемножуються на фактор стиснення, що вказується в блоці «Contraction». Початковою точкою в наступному циклі алгоритму шаблонного пошуку залишається початкова точка з попереднього циклу.

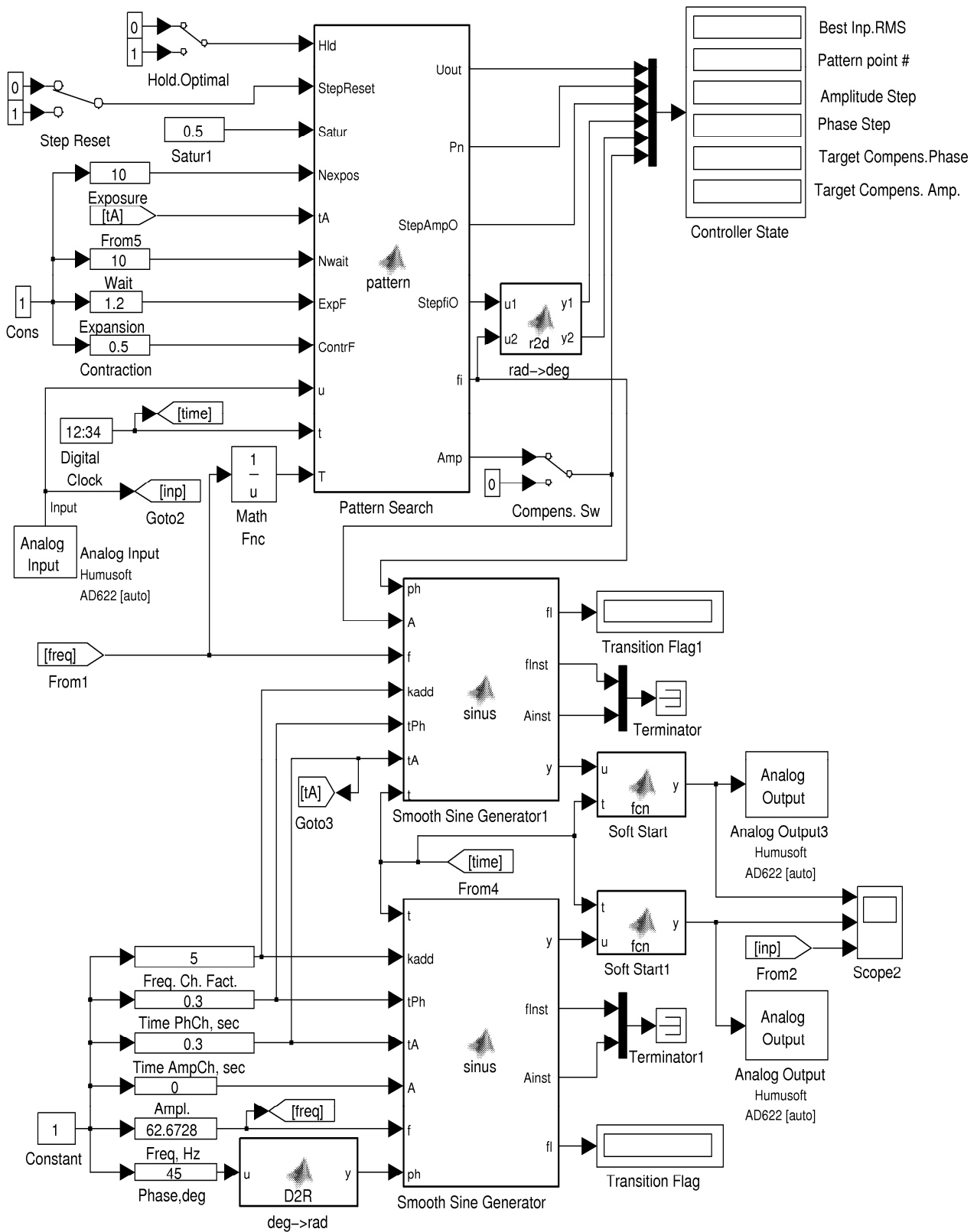


Рис. 1. Система керування на основі алгоритму шаблонного пошуку



Рис. 2. Принцип дії контролера, що реалізує алгоритм шаблонного пошуку:
 n – номер точки сітки;
 $U_{СКЗ}$ – виміряне середньоквадратичне значення віброприскорення;
 $U_{пот}$ – поточне найменше значення середньоквадратичного віброприскорення

Окрім того, проводиться повторне вимірювання цільової функції в початковій точці та заміна значення цільової функції для цієї точки новим результатом вимірювання.

Така заміна дає можливість системі керування адаптуватися до:

- змін характеристик об'єкта керування;
- умов навколишнього середовища;
- змін параметрів зовнішнього збудження;
- зміни формулювання цільової функції.

Таким чином, запропонована система керування є адаптивною.

З наближенням до оптимальної точки кроки за амплітудою та фазою зменшуються.

У випадку, якщо зміни в об'єкті керування є істотними, а кроки малими (вони відображаються на дисплеї «Controller State»), то перехід до нової оптимальної точки буде тривалим.

У системі керування передбачений перемикач «Step Reset» для скидання кроків за амплітудою та фазою в початкові значення, тобто 0,2 В та $\pi/12$ рад відповідно.

Для точок сітки, амплітуда яких перевищує максимально допустиму напругу на вході виконуючого пристрою, цільова функція не вимірюється. Ця напруга задається користувачем в блоці константи «Satur1».

Алгоритм автоматично переходить до наступних точок сітки, таким чином запобігаючи перевантаженню виконуючого пристрою та вихідних каналів ЦАП.

У зв'язку з тим, що різкі зміни дії компенсуючих та збуджуючих пристроїв призводять до псування обладнання, алгоритм здійснює поступові зміни амплітуди, фази та частоти як збуджуючих, так і компенсуючих коливань за лінійним законом.

Безперервність збуджуючого та компенсуючого сигналів забезпечують два блоки «Smooth Sine Generator».

Для виключення впливу перехідних процесів на результат вимірювання віброприскорення в точках сітки та врахування затримки сигналу на компенсуючому пристрої

після переходу до точки контролер очікує, поки коливання не стануть усталеними.

Час очікування задається користувачем в блоці «Wait» у періодах збуджуючих коливань.

Час, протягом якого відбувається усереднення вимірюного віброприскорення в ТК для точки сітки, задається в блоці «Exposure» також у періодах.

У Simulink моделі (рис. 1) передбачені перемикачі для плавного вимкнення компенсуючого сигналу «Compens. Sw» та для вимкнення пошуку «Hold. Optimal».

Перемикач для вимкнення пошуку спрацьовує після завершення циклу пошуку, після чого контролер «Pattern Search» підтримує незмінні величини амплітуди та фази, знайдені в цьому циклі.

Блоки «Pattern Search», «Soft Start», «Smooth Sine Generator», «Smooth Sine Generator1», «deg->rad», «rad->deg» (рис. 1) реалізовані за допомогою блоку «Embedded MatLab Function» призначені для:

- керування компенсуючим сигналом поступового збільшення величини сигналу при ввімкненні Simulink моделі;
- забезпечення плавності змін характеристик збуджуючого та компенсуючого сигналів;
- конвертації градусів у радіани та радіан в градуси відповідно.

Експериментальна перевірка роботи системи керування

Експериментальна верифікація роботи запропонованої системи керування здійснена на прикладі тонкої затиснутої пластини.

Параметри системи керування, які неможливо змінювати в режимі реального часу, прийняті рівними тим, що були визначені в результаті оптимізації за комбінованим методом [7].

Зокрема, до параметрів, що є незмінними в режимі реального часу належать координати точки прикладення компенсуючого збудження, координати та вага додаткової маси.

Віброприскорення в ТК вимірюється за допомогою спектрометра, наприклад, Брюль та К'єр 2120 та акселерометра КВ11.

Вихід спектрометра з'єднаний із входом АЦП (Humusoft AD622).

Експериментальні дослідження проведені на стенді, вага та жорсткість опор в якому значно перевищували відповідні характеристики затиснутої у стенді пластини зі сталі товщиною 0,53 мм.

Дослідним зразком гнучкої конструкції, а отже і об'єктом керування, є затиснута пластина (рис. 3) з прикріпленими масами.

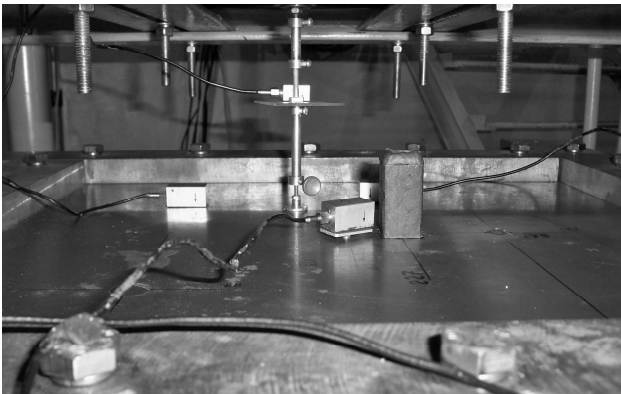


Рис. 3. Дослідний зразок гнучкої конструкції в експериментальному стенді

Як цільову функцію використано віброприскорення в точці з координатами (0,098 м; 0,263 м).

Параметри мас та пластини зведено в таблицю. За результатами експериментальних досліджень побудовані спектри рівнів віброприскорення (рис. 4) відповідно до ДСН 3.3.6.039-99.

Сумарний рівень віброприскорення $L_{\Sigma a}$ на основі експериментальних значень середньоквадратичного віброприскорення a_{RMS} визначено за формулою:

$$L_{\Sigma a} = 20 \lg \left(\frac{1}{a_0 (f_{кін} - f_{поч})} \int_{f_{поч}}^{f_{кін}} a_{RMS}(f) df \right),$$

де

$$a_0 = 3 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}^2;$$

$$f_{поч} = 25 \text{ Гц};$$

$$f_{кін} = 230 \text{ Гц}.$$

Характеристики дослідної пластини та прикріплених мас

Характеристика	Величина
Розмір активної площі, м×м	0,392×0,351
Товщина пластини, м	$0,53 \cdot 10^{-3}$
Густина пластини, кг/м ³	7362,6
Модуль Юнга, Па	$210 \cdot 10^9$
Коефіцієнт Пуассона	0,3
Коефіцієнт затухання	0,01
Маса з'єднання компенсуючої сили, кг	$2,47 \cdot 10^{-3}$
Маса з'єднання збуджуючої сили, кг	$7,55 \cdot 10^{-3}$
Маси акселерометрів (КВ11), кг	$14 \cdot 10^{-3}$
Розміри перерізу додаткової маси, м×м	0,02×0,02
Додаткова маса, кг	0,16107

Сумарний рівень віброприскорення для затиснутої пластини без застосування системи керування становив 76,2 дБ, а з застосуванням системи керування 75,1 дБ.

Із рис. 4 видно, що на переважній більшості частот рівень віброприскорення залишається незмінним або зменшується.

Відсутність впливу системи керування на окремих частотах на вібрацію пластини пояснюється розташуванням вузлової лінії в позиції кріплення компенсуючого пристрою.

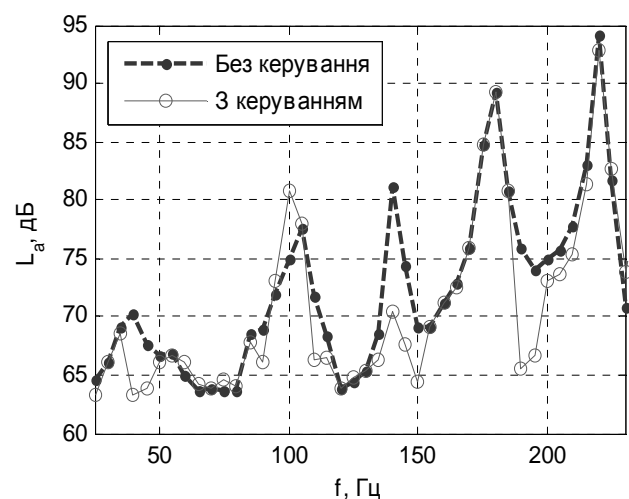


Рис. 4. Залежність рівня віброприскорення затиснутої пластини від частоти

Вплив розміщення вузлових ліній на ефективність використання компенсуючих пристроїв для зниження вібрації та шуму пластин детально досліджений у роботі [6].

Збільшення рівня віброприскорення при використанні системи керування на частоті 100 Гц пов'язане з високим фоновим рівнем, а отже, і похибкою при визначенні цільової функції системою керування.

Різним позиціям компенсуючих пристроїв відповідають різні набори частот, на яких використання компенсуючого пристрою є неефективним.

З'єднавши кілька компенсуючих пристроїв із гнучкою конструкцією в різних позиціях, можна досягти зменшення рівня віброприскорення в необхідному діапазоні частот.

Висновки

Створена адаптивна система керування вібрацією та шумом пластин в реальному часі на основі алгоритму оптимізації дозволяє знизити вібрацію та шум, що утворюється під дією зовнішнього гармонічного збудження на гнучку конструкцію, в широкій смузі низьких частот. Однак дослідження показало необхідність використання кількох компенсуючих пристроїв для істотного зменшення сумарного рівня віброприскорення.

Недоліком системи керування на основі алгоритму шаблонного пошуку є значні втрати часу на сходження алгоритму пошуку

до оптимальних величин компенсуючої фази та амплітуди, а отже, і шум та вібрація об'єкта керування під час сходження.

Література

1. *Jian-Da, Wu; Rong-Jun, Chen.* 2004. – Application of an active controller for reducing small-amplitude vertical vibration in a vehicle seat. – *Journal of Sound and Vibration.* Vol. 274: P. 939–951.
2. *Tokhi, M. O., Hossain, M. A.* 1994. Self-tuning active vibration control in flexible beam structures. – *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers.* Vol. 208: P. 263–278.
3. *Jing, Yuan.* 2006. Orthogonal adaptation for active noise control. – *JASA.* Vol. 120, N 1: P. 204–210.
4. *Hanson, C.H., Snyder, S.D.* 1997. *Active Control of Noise and Vibration.* – Spon. 1267 p.
5. *Yoshiharu, Nakaji; Shigeki, Satoh; Takeshi, Kimura.* 1999. Development of an active control engine mount system. – *Vehicle System Dynamics.* Vol. 32: P. 185–198.
6. *Макаренко В.М.* Моделювання та управління віброакустичним випромінюванням однорідної пластини під дією зовнішніх концентрованих сил / В.М. Макаренко // *Вісник НАУ.* – 2009. – № 3. – С. 227–237.
7. *Макаренко В.М.* Комбінований метод зниження вібрації та шуму гнучких конструкцій / В.М. Макаренко // 10-та Міжнародна науково-технічна конференція «Авіа-2011». Т.4. – С. 27.8.

Стаття надійшла до редакції 08.07.2011.