

# Điều khiển chủ động dao động bằng kết hợp giải pháp điều khiển không gian mode độc lập và giải pháp điều khiển trạng thái giới hạn

## Active vibration control by combining the independent mode space control solution and bounded state control solution

Nguyễn Thị Bích Thủy<sup>1,2</sup>, Ngô Vi Long<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Khoa Kỹ thuật Xây Dựng, Trường Đại học Bách khoa Tp. HCM

<sup>2</sup> Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

<sup>3</sup> Khoa Xây Dựng, VLTECH-Đại học Văn Lang

\*Corresponding author E-mail: [ntbthuy@hcmut.edu.vn](mailto:ntbthuy@hcmut.edu.vn); [ngovilong@vanlanguni.vn](mailto:ngovilong@vanlanguni.vn)

### Abstract

Adjusting construction vibrations is always a challenge for construction engineers. People have proposed many different control solutions, either by passive control, or by actively controlling the vibrations of the structure. In each control solution, there are many methods offered. In this article, the authors present a method combining the Independent Mode Space Control solution - IMSC and the Bounded State Control solution - BSC to solve the problem of active control of vibrations of an oscillating system with many degrees of freedom, taking the advantages of each solution to improve control efficiency such as the intuitiveness and simplicity of the BSC solution, and replacing the solution of the system of mutually constrained differential equations with the system of separate differential equations of the IMSC solution. The authors have relied on an example of active vibration control of a five-storey frame subjected to external loads to illustrate the method, clearly show the effectiveness of the method and provide necessary comments on the combination control method.

**Keywords:** Active control of vibration, Independent Modal Space Control (IMSC), Bounded State Control (BSC), Combination method, Vibration energy accumulation process.

### Ký hiệu

Ký hiệu	Đơn vị	Mô tả
$v$	m (mét)	Chuyển vị
$V_L$	m (mét)	Chuyển vị giới hạn
$t$	s (giây)	Thời gian
$p, f_3^*, f_5^*$	N (Niu-ton)	Lực tác dụng

### Các từ viết tắt

IMSC	Independent Mode Space Control
BSC	Bounded State Control
SDOF	Hệ một bậc tự do
MDOF	Hệ nhiều bậc tự do
ATMD	Giảm chấn khối lượng điều hòa chủ động

### Tóm tắt

Việc điều chỉnh dao động của công trình luôn luôn là một thách thức đối với các kỹ sư xây dựng. Người ta đã đưa ra nhiều giải pháp điều khiển khác nhau, hoặc bằng cách điều khiển thụ động, hoặc bằng cách điều khiển chủ động dao động của công trình. Trong mỗi giải pháp điều khiển, có nhiều phương pháp được đưa ra. Trong bài báo này, các tác giả trình bày phương pháp kết hợp giữa giải pháp điều khiển không gian mode độc lập (IMSC) và giải pháp điều khiển trạng thái giới hạn (BSC) nhằm giải quyết bài toán điều khiển chủ động

dao động của một cơ hệ dao động nhiều bậc tự do, tận dụng ưu điểm của mỗi giải pháp để nâng cao hiệu quả điều khiển như tính trực quan, đơn giản của giải pháp BSC, và thay thế việc giải hệ phương trình vi phân ràng buộc lẫn nhau bằng hệ gồm các phương trình vi phân tách rời nhau của giải pháp IMSC. Các tác giả đã dựa trên một ví dụ về điều khiển chủ động dao động của một khung năm tầng chịu tải trọng bên ngoài để minh họa các bước tiến hành, chỉ rõ hiệu quả và đưa ra những nhận xét cần thiết về phương pháp điều khiển kết hợp.

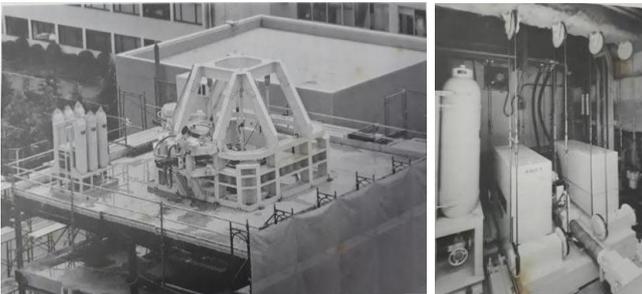
### 1. Đặt vấn đề

Dưới tác động từ môi trường bên ngoài như gió, động đất, công trình sẽ được truyền năng lượng và dao động. Tuy nhiên, do yêu cầu về an toàn cho kết cấu công trình, cũng như về tiện nghi khi sử dụng công trình, quy phạm thiết kế kết cấu của các nước đều không chế một số các biến đáp ứng của kết cấu dao động nằm trong những giới hạn cho phép, chẳng hạn người ta sẽ yêu cầu không chế chuyển vị ở đỉnh công trình hay chuyển vị tương đối giữa các tầng do quan niệm về tính an toàn cho hệ kết cấu, hay gia tốc dao động tuyệt đối ở đỉnh công trình sẽ được không chế do yêu cầu về tiện nghi cho người sử dụng.

Để hạn chế dao động cho công trình, người ta đã đưa ra nhiều giải pháp điều khiển khác nhau. Ngay từ những năm đầu thế kỷ 20, nhiều tác giả đã nghiên cứu khả năng điều khiển dao động [1][2][3]. Khoảng trước những năm 90 thế kỷ trước,

người ta hay sử dụng các giải pháp bị động, trong đó dùng chính năng lượng dao động của công trình để điều khiển dao động, mục tiêu là làm sao cho năng lượng dao động được tiêu tán ra môi trường bên ngoài nhanh chóng nhất. Chẳng hạn, người ta có thể xây dựng các bể nước ở trên đỉnh công trình với các thông số kích thước, đặc tính cơ học theo yêu cầu, nguyên lý của giải pháp này là khi công trình dao động, nước trong bể sẽ dao động theo, tương tác qua lại giữa công trình và nước trong bể sẽ làm cho năng lượng dao động của công trình sẽ dần chuyển sang cho nước, và sẽ tiêu tán dưới dạng nhiệt năng. Hoặc đặt hệ thống piston-xylanh trong kết cấu chịu lực chính, các hệ thống này sẽ hấp thụ và tiêu tán năng lượng dao động của kết cấu và làm giảm chuyển vị cho kết cấu. Tuy nhiên, do những hạn chế của giải pháp điều khiển bị động dao động công trình, người ta dần chuyển sang sử dụng giải pháp điều khiển chủ động nhằm nâng cao hiệu quả chống dao động. Các thiết bị điều khiển này hoạt động được là nhờ vào các nguồn năng lượng cấp từ bên ngoài.

Vào năm 1990, tại Tokyo, người ta đã tiến hành xây dựng một công trình thí nghiệm cao 11 tầng, tòa nhà Kyobashi Seiwa building tại Tokyo, Hình 1.a [3]. Người ta đã tiến hành lắp đặt và thử nghiệm đầu tiên về ATMD (Active Tuned Mass Damper - giảm chấn khối lượng điều hòa chủ động). Thiết bị giảm chấn chủ động ATMD có dạng hai con lắc đơn, một con lắc có khối lượng 4 tấn, dùng điều khiển dao động thẳng theo hai phương chính của tòa nhà, và con lắc thứ hai có khối lượng 1 tấn dùng điều khiển chuyển động xoay của tòa nhà, Hình 1.b [3]. Biên độ dao động của con lắc có thể lên tới 1m. Thiết bị này có thể tạo ra lực điều khiển tới 100 kN.



a. Thí nghiệm đặt ATMD trên nóc tòa nhà 11 tầng Kyobashi Seiwa Building, Tokyo, 1990.

b. Cận cảnh thiết bị ATMD của tòa nhà.

**Hình 1.** Hình ảnh thiết bị ATMD trên nóc tòa nhà 11 tầng Kyobashi Seiwa Building, Tokyo.

Trong vòng thập niên 90 của thế kỷ trước, trên thế giới đã có ít nhất 40 công trình được xây dựng có tích hợp kỹ thuật điều khiển chủ động dao động kết cấu. Có thể kể ra một số công trình sau:

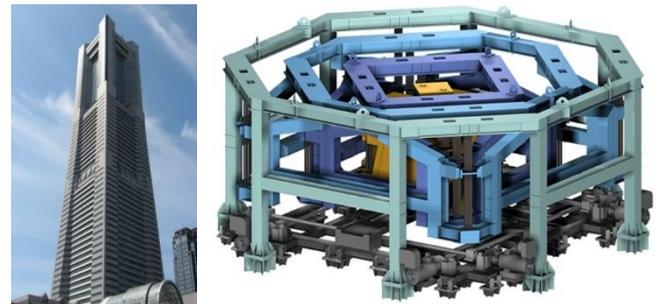
- Toà tháp Taipei 101 (Đài Bắc, Đài Loan, Hình 2): Toà tháp cao 101 tầng, tổng trọng lượng tòa nhà khoảng 700.000 tấn. Tòa nhà được thiết kế chống các dao động do tải trọng gió bão hoặc động đất gây ra bằng một hệ thống thiết bị ATMD có dạng là các con lắc hình quả cầu thép. Trong đó, một con lắc nặng đến 660 tấn, treo lơ lửng từ tầng 92 xuống đến tầng 87, dao động của nó được điều chỉnh bằng một hệ thống các piston - xy lanh thủy lực, hoạt động nhờ một trung tâm xử lý tín hiệu thu thập từ các cảm biến điện tử gắn trên tòa nhà. Hệ thống ATMD này đã được trải nghiệm thực tế một trận động đất 6.8 độ Richter ngày 31/03/2002 khi đang trong quá trình thi công công trình và gần đây là trận động đất 7.4 độ Richter ngày 03/04/2024, đã chứng tỏ có khả năng hoạt động hoàn

hảo. Hai con lắc thép khác, mỗi cái nặng 6 tấn, cũng được điều khiển bởi thiết bị ATMD, được đặt tại đỉnh của chóp để giúp tránh tổn thất cho cấu trúc do gió mạnh.



**Hình 2.** Toà tháp Taipei 101 và hệ thống con lắc giảm chấn chủ động nặng 660 tấn.

- Toà cao ốc Yokohama Landmark Tower (Yokohama, Kanagawa, Nhật Bản, Hình 3): Toà tháp được xây dựng từ tháng 3 năm 1990 và hoàn thành tháng 7 năm 1993 với chiều cao 296m, nặng 260.610 tấn, cao 70 tầng. Kết cấu chính khung thép, có sử dụng bê tông cốt thép ở một số kết cấu phụ. Đây là công trình cao nhất Nhật Bản. Công trình được điều khiển bởi hệ thống giảm chấn khối lượng gồm 2 khối với tổng trọng lượng 340 tấn, điều khiển bằng hệ thống sec-vô mô-tơ. Công trình được thiết kế để chống lại các cơn gió mạnh và các trận động đất trung bình.



**Hình 3.** Toà tháp Yokohama Landmark Tower và thiết bị giảm chấn.

Ở Việt Nam, cũng đã có các nghiên cứu tương đối đa dạng về kỹ thuật điều khiển dao động công trình (cả chủ động và bị động) từ những năm đầu của thế kỷ 21 [4][5][6][7][8][9][10]. Về ưu nhược điểm của hai giải pháp chống dao động bị động và chống dao động chủ động, ta có thể thấy: Tuy giải pháp chống dao động bị động có ưu điểm là thiết bị đặt vào công trình không cần đến nguồn năng lượng bên ngoài mà dùng chính nguồn năng lượng dao động để hoạt động và trang thiết bị tương đối đơn giản, nhưng hiệu quả của giải pháp này còn hạn chế, nhiều khi không thỏa mãn các yêu cầu kỹ thuật của công trình (chẳng hạn, không khống chế được chuyển vị của công trình nằm trong giới hạn cho phép), hơn nữa mỗi thiết bị giảm chấn bị động chỉ có khả năng chống dao động ở một mode dao động nhất định của công trình, cho nên để chống dao động ở một số mode dao động khác nhau, ta có thể phải bố trí một loạt các thiết bị giảm chấn, mỗi thiết bị được thiết kế để hoạt động tại một mode dao động riêng biệt của công trình. Ngược lại, giải pháp điều khiển chủ động có ưu thế hơn hẳn do cần sử dụng số lượng thiết bị ít hơn để điều khiển dao động của công trình ở nhiều mode khác nhau, nên ít chiếm không gian mặt bằng hơn. Song ở đây cần lưu ý là giải pháp này cần tới nguồn năng lượng bên ngoài để có thể hoạt động,

kèm theo đó là các trang thiết bị cũng phức tạp hơn [18][19][20][21][22]. Các công trình được nêu trong các ví dụ trên (Toà tháp Taipei 101, Toà cao ốc Yokohama Landmark Tower) đều sử dụng giải pháp điều khiển chủ động để chống dao động cho công trình.

Nhằm nâng cao hiệu quả của giải pháp giảm chấn chủ động, người ta đã đề xuất khá nhiều các phương pháp điều khiển thiết bị giảm chấn khác nhau, trong đó có phương pháp điều khiển không gian mode độc lập - IMSC [11] [12][14][15] và phương pháp điều khiển trạng thái giới hạn - BSC [12][13][16][17]. Trong bài báo này, chúng tôi sẽ kết hợp hai phương pháp này để điều khiển dao động của một cơ hệ nhiều bậc tự do - MDOF, chịu tải trọng bên ngoài tác động, sao cho biên độ chuyển vị ở các tầng được không chế trong giới hạn cho phép. Các tác giả cũng chú ý tới thực tế là số lượng các cơ chấp hành (actuator) thường ít hơn số bậc tự do của hệ, như vậy sẽ cần tới kiến thức về ma trận giả nghịch đảo trong tính toán.

## 2. Phương pháp kết hợp giữa giải pháp điều khiển không gian mode độc lập - IMSC và giải pháp trạng thái giới hạn - BSC

### 2.1. Sơ lược về phương pháp điều khiển không gian mode độc lập - IMSC

Ưu điểm của IMSC là có thể chuyển hệ phương trình vi phân n ẩn mô tả dao động của hệ thành một hệ bao gồm n phương trình vi phân tách rời (độc lập nhau) trong không gian mode nên việc giải bài toán sẽ nhanh và hệ dao động sẽ đáp ứng tốt hơn [11][12][14][15].

Xem xét một cơ hệ dao động có n bậc tự do. Hệ phương trình vi phân MDOF có đưa lực điều khiển vào, viết trong không gian vật lý, như sau [11][12]:

$$M\ddot{v}(t) + C\dot{v}(t) + Kv(t) = Dp^*(t) + Ef^*(t) \quad (1)$$

với  $M, C, K$  là các ma trận khối lượng, độ cản và độ cứng của hệ;  $\ddot{v}(t), \dot{v}(t), v(t)$  là các vec-tơ gia tốc, vận tốc và chuyển vị của hệ;  $D$  và  $E$  là các ma trận định vị lực điều khiển và tải trọng bên ngoài;  $p^*(t)$  và  $f^*(t)$  là các vec-tơ lực điều khiển và tải trọng tác dụng lên hệ. Nếu gọi  $\Phi$  là ma trận hàm dạng, với cột thứ  $j$  là vec-tơ dạng của mode thứ  $j$ , thì ta viết được:

$$v(t) = \Phi y(t) \quad (2)$$

$y(t)$  vec-tơ chuyển vị suy rộng trong không gian mode. Vec-tơ điều khiển trong không gian mode  $p(t) = \{p_1(t) \ p_2(t) \ \dots \ p_n(t)\}$  liên hệ với vec-tơ điều khiển trong không gian vật lý  $p^*(t)$  theo quan hệ:

$$p(t) = \Phi^T D p^*(t) = L p^*(t) \text{ với } L = \Phi^T D \quad (3)$$

$$\text{Nếu biểu diễn } f_j(t) = g_{1j} y_j(t) + g_{2j} \dot{y}_j(t) \quad (4)$$

thì ta sẽ thu được hệ phương trình vi phân bậc 2 trong không gian mode, mỗi phương trình trong hệ đều độc lập với các phương trình khác:

$$m_j \ddot{y}_j(t) + c_j \dot{y}_j(t) + k_j y_j(t) = p_j(t) + f_j(t) \quad (5)$$

Từ phương trình (3), nếu số lượng thiết bị điều khiển  $m$  và số lượng mode bị điều khiển  $n$  bằng nhau, thì ma trận  $L$  vuông, có thể xác định  $p^*(t)$  bằng phương trình:

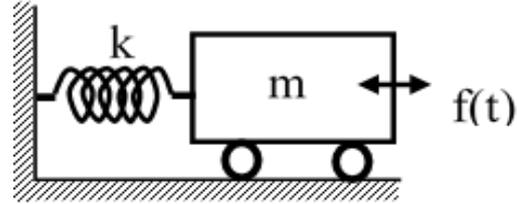
$$p^*(t) = L^{-1} p(t) \quad (6)$$

Trường hợp  $m < n$ , ta phải sử dụng ma trận giả nghịch đảo:

$$p^*(t) = L^+ p(t) \quad (7) \text{ với } L^+ = (L^T L)^{-1} L^T \quad (8)$$

### 2.2. Sơ lược về phương pháp điều khiển trạng thái giới hạn - BSC

Ưu điểm của BSC là việc tính toán điều khiển xung tương đối đơn giản, các hệ số để tính toán biên độ xung cần thiết đều có thể tính toán trước (offline). Mặt khác, giải pháp điều khiển này thích hợp để áp dụng cho các kết cấu không đàn hồi, hệ thống giảm chấn chỉ hoạt động một khi biên độ dao động vượt qua giới hạn, do vậy một nguồn năng lượng tương đối nhỏ cũng đủ cho các tác động chỉnh sửa dao động theo chu kỳ. Xem xét một cơ hệ một bậc tự do - SDOF cấu tạo gồm một khối lượng  $m$ , liên kết với trái đất qua một liên kết lò xo có độ cứng  $k$ , Hình 4.



Hình 4. Sơ đồ mô hình hệ một bậc tự do SDOF.

Ở đây giả thiết thành phần cần của cơ hệ có thể bỏ qua. Ở thời điểm  $t_i$ , hệ chịu tác động của tải bên ngoài có giá trị là  $f(t_i)$ , hệ có chuyển vị  $v(t_i)$ , vận tốc dao động  $\dot{v}(t_i)$ . Ta có thể dự báo được chuyển vị của hệ tại thời điểm  $t_j = t_i + \Delta t$  theo các quan hệ trong lý thuyết động lực học công trình [16][17], bao gồm đáp ứng dao động tự do của hệ với chuyển vị ban đầu  $v(t_i)$  và vận tốc ban đầu  $\dot{v}(t_i)$ , cộng với đáp ứng dao động cưỡng bức của hệ khi chịu tải trọng  $f(t_i)$ :

$$v(t_j) = Z_v v(t_i) + Z_{vt} \dot{v}(t_i) + Z_f f(t_i) \quad (9)$$

$$\text{với } Z_v = \cos(\omega_0 \Delta t), \quad Z_{vt} = \frac{1}{\omega_0} \sin(\omega_0 \Delta t), \quad Z_f \approx \frac{1}{k} [1 - \cos(\omega_0 \Delta t)] \quad (10)$$

$\omega_0$  là tần số riêng của hệ SDOF. Trong công thức tính  $Z_f$ , việc tiên đoán chính xác hàm  $f(t)$  trong khoảng thời gian  $(t_i, t_j)$  là khó khả thi, mặt khác ta nhận định trong khoảng thời gian tương đối nhỏ  $\Delta t$ , tải trọng  $f(t)$  biến đổi rất ít và để đơn giản, ta giả định tải trọng không đổi trong khoảng thời gian đó và bằng giá trị  $f(t_i)$ . Giá trị  $f(t_i)$  có thể được xác định dựa vào phương trình dao động của  $m$  như sau:

$$m\ddot{v}(t) + kv(t) = f(t), \text{ từ đó ta có } : f(t_i) = m\ddot{v}(t_i) + kv(t_i) = \frac{k}{\omega_0^2} \ddot{v}(t_i) + kv(t_i) \quad (11)$$

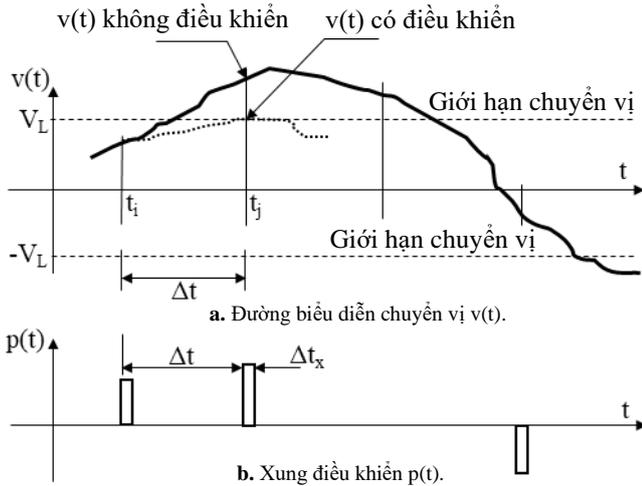
Nếu  $v(t_j)$ , tính theo (9) vượt quá giới hạn chuyển vị cho phép như trên Hình 5.a, thì ta sẽ áp đặt một xung lực  $p(t_i)$  tại  $t_i$  có bề rộng là  $\Delta t_x$  để điều chỉnh chuyển vị tại  $t_j$  về ngưỡng cho phép, Hình 5.b, giá trị xung lực này là một hàm của  $v(t_i)$ ,  $\dot{v}(t_i)$ ,  $f(t_i)$  và giới hạn chuyển vị  $V_L$ . Theo [12][13][16], ta có thể xác định  $p(t_i)$  theo:

$$p(t_i) = \frac{1}{z_p} V_L + \alpha v(t_i) + \beta \dot{v}(t_i) + \gamma f(t_i) \quad (12)$$

$$\text{Với } Z_p = \frac{1}{k} [\cos[\omega_0(\Delta t - \Delta t_x)] - \cos(\omega_0 \Delta t)],$$

$$\alpha = -\frac{Z_v}{z_p}, \quad \beta = -\frac{Z_{vt}}{z_p}, \quad \gamma = -\frac{Z_f}{z_p}$$

Quá trình lặp lại ở mỗi bước thời gian  $\Delta t$ .



Hình 5. Chuyển vị của hệ và xung điều khiển tương ứng.

**2.3. Kết hợp phương pháp IMSC và phương pháp BSC để điều khiển dao động hệ nhiều bậc tự do MDOF**

Trong bài báo này, các tác giả sẽ kết hợp hai phương pháp trên để điều khiển chủ động dao động của một hệ nhiều bậc tự do, mục đích tận dụng ưu điểm của giải pháp IMSC là chỉ phải giải hệ phương trình vi phân độc lập theo từng mode, thay vì phải giải một hệ phương trình vi phân có liên quan tới nhau, mặt khác tận dụng các ưu điểm của giải pháp BSC như trực quan, tương đối đơn giản, ít tính toán trực tuyến, đòi hỏi ít năng lượng điều khiển hơn so với các giải pháp khác. Việc kết hợp hai giải pháp IMSC và BSC trong điều khiển dao động công trình được thể hiện ở lưu đồ dưới đây, Hình 6 (xem ở trang 46).

Từ hệ phương trình vi phân trong không gian vật lý, ta có thể xác định các thông số như tần số dao động riêng, dạng dao động riêng, từ đó có thể chuyển thành hệ phương trình vi phân trong không gian mode. Ta chia thời gian thành các khoảng  $\Delta t$ , thời điểm đầu là  $t_0$ , thời điểm cuối là  $t_2$ . Sau khi giải hệ phương trình vi phân trong không gian mode ở thời điểm  $t_0$ , ta tổng hợp lại để dự đoán được các biến trong không gian vật lý như chuyển vị, vận tốc ở thời điểm  $t_2$  trong tương lai. Kiểm tra xem các biến này (chẳng hạn chuyển vị) có thỏa mãn các giới hạn đã đặt ra trước hay không, nếu không đạt thì ta quay lại không gian mode để tính toán xác định các giá trị xung lực điều khiển cần thiết ở mỗi mode và tổng hợp thành giá trị xung lực điều khiển ở không gian vật lý, tác dụng ở thời điểm  $t_0$  thông qua phương trình (6) hoặc (7).

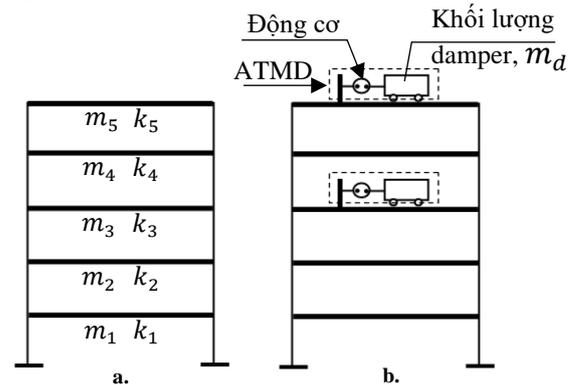
**3. Mô phỏng điều khiển dao động cho khung năm tầng bằng phương pháp kết hợp IMSC và BSC**

Ta xem xét một kết cấu khung 5 tầng, có sơ đồ như Hình 7.a. Khối lượng của khung được quy về các dầm ngang, giả định khối lượng của cột rất nhỏ, có thể được bỏ qua. Dầm được coi có độ cứng tuyệt đối, nên các cột làm việc giống như các lò xo theo phương ngang. Khối lượng và độ cứng của các tầng cho trong Bảng 1.

**Bảng 1:** Khối lượng và độ cứng các tầng

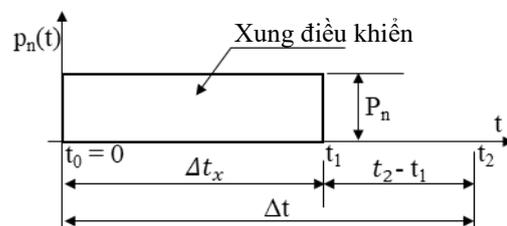
Tầng	Khối lượng m mỗi tầng	Độ cứng k mỗi tầng
	Đơn vị : kg	Đơn vị : N/m
5	$m_5 = 50000$	$k_5 = 12000000$
4	$m_4 = 50000$	$k_4 = 12000000$
3	$m_3 = 50000$	$k_3 = 15000000$
2	$m_2 = 50000$	$k_2 = 15000000$
1	$m_1 = 50000$	$k_1 = 15000000$

Ta bỏ qua tính cân của hệ dao động. Tại các tầng 3 và 5 chịu các tải ngoài  $f_3^*(t) = 1.8 \times 10^4 \sin(4t)$ ,  $f_5^*(t) = 1.35 \times 10^4 \sin(4t)$ . Dưới tác dụng của các tải trọng trên, khung dao động theo phương ngang. Ta có thể mô hình khung như một hệ kết cấu dao động năm bậc tự do, có năm mode dao động riêng khác nhau. Ở đây, ta sẽ thực hiện điều khiển dao động của hệ theo ý tưởng của phương pháp BSC như sau: Ta sẽ gắn một số thiết bị chấp hành ATMD ở tầng 3 và tầng 5, Hình 7.b. Thiết bị ATMD gồm có một khối lượng  $m_d$ , có khả năng di chuyển theo phương ngang, được điều khiển bởi một động cơ gắn vào khung để đẩy/kéo khối lượng  $m_d$  chuyển động, tạo ra phản lực tác dụng lên khung. Đó chính là xung lực điều khiển dao động, có giá trị và hướng theo tính toán và trong một khoảng thời gian  $\Delta t_x$  theo yêu cầu.



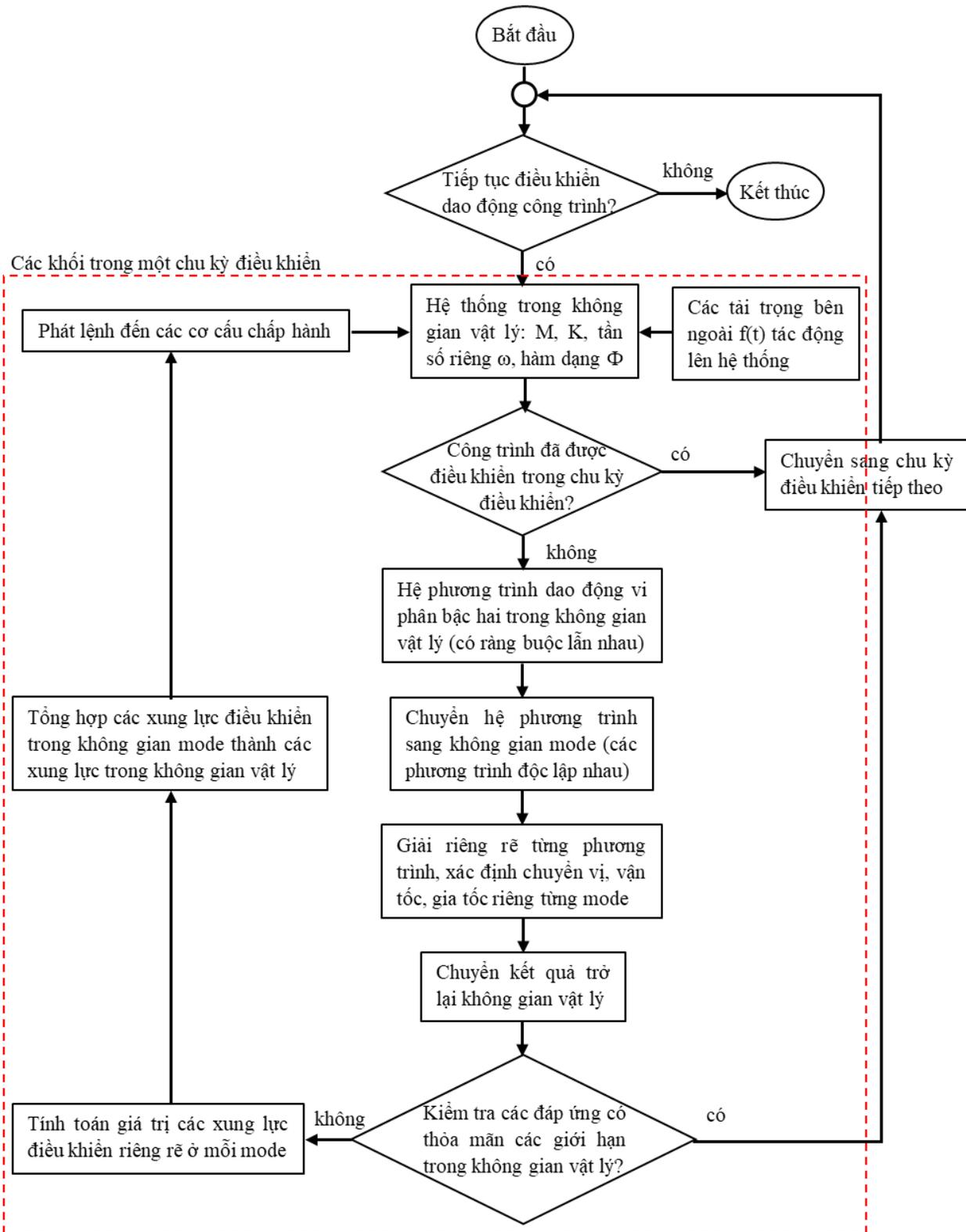
Hình 7. Sơ đồ khung và sơ đồ gắn thiết bị chấp hành.

Ta chia thời gian thành các khoảng  $\Delta t$ , trong mỗi khoảng ta phân ra làm 2 giai đoạn:  $\Delta t_x = (t_1 - t_0)$  là khoảng thời gian tồn tại xung điều khiển và  $(t_2 - t_1)$  là khoảng thời gian sau khi tắt xung, Hình 8.



Hình 8. Sơ đồ mô tả xung điều khiển

Trong quá trình dao động, ở thời điểm ban đầu  $t_0$ , các cảm biến gắn tại các tầng sẽ phát tín hiệu và cung cấp thông tin chi tiết về chuyển vị, vận tốc dao động, gia tốc dao động về trung tâm xử lý. Căn cứ trên các thông tin này, tại thời điểm ban đầu  $t_0$  của mỗi khoảng thời gian  $\Delta t$ , bộ xử lý trung tâm tính toán và dự báo được ở cuối khoảng thời gian đó - thời điểm  $t_2$ , có



Hình 6. Sơ đồ giải thuật kết hợp giải pháp IMSC và giải pháp BSC.

thể chuyển vị ở một hoặc vài tầng nào đó vượt quá giới hạn, như trên Hình 9.a, thì trung tâm xử lý sẽ tính toán, phát lệnh điều khiển tới các thiết bị chấp hành, tạo ra một bộ xung lực có giá trị và hướng theo tính toán ngay thời điểm  $t_0$ , Hình 9.b, để điều khiển dao động của công trình về nằm trong giới hạn ở thời điểm  $t_2$ .

Trình tự tiến hành:

Từ hệ phương trình vi phân của hệ không cản trong không gian vật lý [17]:

$$M\ddot{v}(t) + Kv(t) = f^*(t) \quad (13)$$

ta xác định các tần số riêng  $\omega$  từ phương trình

$$\det(K - \omega^2 M) = 0 \quad (14)$$

Từ (14), lập đa thức bậc 5 đối với  $\omega^2$ , và ma trận M, K, ta xác định được vec tơ tần số riêng  $\Omega$ :

$$\omega^2 = \begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \\ \omega_5^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 23.5 \\ 181.5 \\ 471.9 \\ 743.0 \\ 1040.1 \end{bmatrix} \rightarrow \Omega = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \\ \omega_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4.847 \\ 13.472 \\ 21.724 \\ 27.257 \\ 32.20 \end{bmatrix} \text{ rad/s}$$

Thay  $\omega^2$  tương ứng vào ma trận  $K - \omega^2 M$  (15) và dùng Matlab để xác định và chuẩn hoá vec-tơ riêng, chính là hàm dạng. Dưới đây là ma trận hàm dạng của khung, với mỗi cột là một vec-tơ hàm dạng ứng với một tần số riêng, được chuẩn hoá theo chuyển vị ở tầng 5:

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 \\ 0.9021 & 0.2437 & -0.9664 & -2.0957 & -3.3336 \\ 0.7159 & -0.6969 & -1.0325 & 1.2964 & 6.7795 \\ 0.5109 & -1.0277 & 0.5389 & 0.7995 & -8.6340 \\ 0.2659 & -0.7368 & 1.2625 & -1.6774 & 5.8858 \end{bmatrix}$$

Ta tiến hành thiết lập hệ phương trình tách rời (mỗi phương trình có thể giải riêng rẽ) trong không gian mode, mỗi phương trình tương đương một hệ SDOF:

$$M_n \ddot{Y}_n(t) + K_n Y_n(t) = F_n(t) \quad (16)$$

với các tham số:

$$M_n = \Phi_n^T M \Phi_n; K_n = \Phi_n^T K \Phi_n; F_n(t) = \Phi_n^T f(t) \quad (17)$$

Nghiệm của phương trình (16):

$$Y_n(t) = Y_n(0) \cos \omega_n t + \frac{\dot{Y}_n(0)}{\omega_n} \sin \omega_n t + \frac{F_n}{K_n} \left( \frac{1}{1-\beta^2} \right) (\sin \bar{\omega} t - \beta \sin \omega t) \quad (18)$$

$$\dot{Y}_n(t) = -\omega_n Y_n(0) \sin \omega_n t + \dot{Y}_n(0) \cos \omega_n t + \frac{F_n}{K_n} \left( \frac{1}{1-\beta^2} \right) (\bar{\omega} \cos \bar{\omega} t - \omega \beta \cos \omega t) \quad (19)$$

Giả sử hệ (16) chịu tải xung chữ nhật có giá trị  $P_n$  trong khoảng  $(t_0, t_1)$ , sau đó dỡ tải, hệ tiếp tục dao động từ  $t_1$  trở đi đến  $t_2$ . Ta chia thành hai pha [17]:

Pha 1, chịu lực  $P_n$ :

$$Y_n(t) = \frac{P_n}{K_n} (1 - \cos \omega t) \quad t_0 \leq t \leq t_1 \quad (20)$$

Pha 2, sau khi dỡ bỏ  $P_n$ :

$$Y_n(t) = \frac{P_n}{K_n} (1 - \cos \omega t_1) \cos \omega (t - t_1) \quad t_1 \leq t \leq t_2 \quad (21)$$

Ta xác định được vec-tơ chuyển vị

$$v(t) = \Phi_1 Y_1 + \dots + \Phi_m Y_m = \sum_1^m \Phi_n Y_n \quad (22)$$

Ở thời điểm  $t_0 = 0$ , ta có các tham số đầu vào  $v(t_0), \dot{v}(t_0), f(t_0)$  trong không gian vật lý. Từ đây, ta xác định được các tham số đầu vào cho mỗi mode dựa theo các quan hệ sau:

$$Y_n(t) = \frac{\Phi_n^T m v(t)}{\Phi_n^T m \Phi_n}; \dot{Y}_n(t) = \frac{\Phi_n^T m \dot{v}(t)}{\Phi_n^T m \Phi_n}; F_n(t) = \Phi_n^T f^*(t) \quad (23)$$

Dựa trên các số liệu này, ta tính được vec-tơ chuyển vị  $v(t_2)$  theo các bước như sau: Tính các  $Y_n(t_2)$  từ hệ phương trình (21), tiếp theo, tính vec-tơ  $v(t_2)$  theo (22).

Giả sử ta dự báo được tại  $t_2 = t_0 + \Delta t$ , vec-tơ chuyển vị  $v(t_2)$  có một hoặc vài phần tử nào đó vượt quá  $V_L$  (đường chấm chấm trên Hình 9.a, trung tâm xử lý sẽ ra lệnh phát xung có độ dài  $\Delta t_x$ , Hình 9.b (trang 6), đến các thiết bị chấp hành ở thời điểm  $t_0$  để đưa chuyển vị về lại giới hạn tại  $t_2 = t_0 + \Delta t$  (đường đứt đoạn).

Việc tính toán độ lớn của xung như sau:

Giả sử ta sẽ gắn thiết bị ở tầng 5 và tầng 3. Khi các thiết bị chấp hành phát xung, ta thu được vec-tơ xung lực tại  $t_0$  trong không gian vật lý:

$$p^*(t_0) = \begin{bmatrix} P_5^* \\ P_4^* = 0 \\ P_3^* \\ P_2^* = 0 \\ P_1^* = 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

Chuyển sang không gian mode, ta có các lực tác dụng tại mỗi mode là  $P_n(t_0) = \Phi_n^T p^*(t_0)$  (25)

kéo dài trong khoảng thời gian  $\Delta t_x = t_1 - t_0$ . Lúc này, hệ phương trình (16) trở thành:

$$M_n \ddot{Y}_n(t) + K_n Y_n(t) = F_n(t) + P_n(t) \quad (26)$$

Ta có thể xác định các đại lượng  $Y_n(t_2)$ ,  $\dot{Y}_n(t_2)$  trong không gian mode theo công thức:

$$Y_n(t_2) = \cos \omega_n \Delta t Y_n(t_0) + \frac{1}{\omega_n} \sin \omega_n \Delta t \dot{Y}_n(t_0) + \frac{F_n(t_0)}{K_n} \left( \frac{1}{1-\beta^2} \right) (\sin \omega \Delta t - \beta \sin \omega_n \Delta t) + \frac{P_n(t_0)}{K_n} (1 - \cos \omega \Delta t) \cos \omega (\Delta t - \Delta t_x), \text{ trong đó } \beta = \omega / \omega_n \quad (27)$$

$$\text{và } \dot{Y}_n(t_2) = \frac{[\dot{Y}_n(t_2) - \dot{Y}_n(t_0)]}{\Delta t} \quad (28)$$

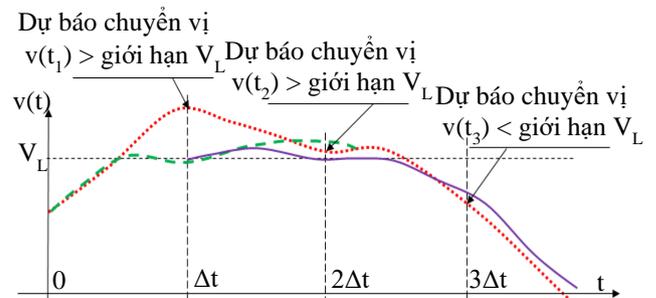
Do khoảng thời gian  $\Delta t$  tương đối nhỏ (so với chu kỳ của tải), ta có thể coi lực  $f^*(t)$  thay đổi giá trị không đáng kể và bằng giá trị  $f^*(t_0)$  trong khoảng  $\Delta t$ , dẫn tới:

$$F_n(t_0) = \frac{K_n}{\omega_n^2} \dot{Y}_n(t_0) + K_n Y_n(t_0) \quad (29)$$

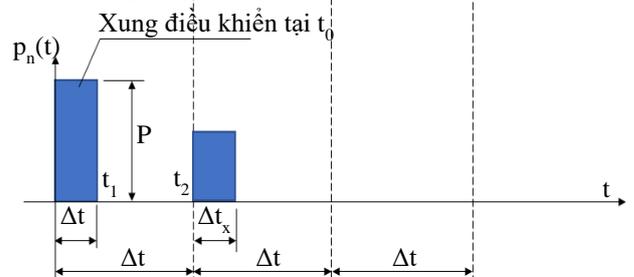
Mặt khác, cũng do khoảng thời gian  $\Delta t$  tương đối nhỏ so với chu kỳ của hệ, nên có thể coi vận tốc chuyển động trong khoảng thời gian này là tuyến tính, dẫn tới công thức (28) có thể viết lại thành:

$$Y_n(t_2) = a_n Y_n(t_0) + b_n \dot{Y}_n(t_0) + c_n F_n(t_0) + d_n P_n(t_0) \quad (30)$$

trong đó,  $a_n$  là hệ số ảnh hưởng của chuyển vị ở mode  $n$  ở thời điểm  $t_0$  tới chuyển vị ở mode  $n$  ở thời điểm  $t_2$ ;  $b_n$  là hệ số ảnh hưởng của vận tốc ở mode  $n$  ở thời điểm  $t_0$  tới chuyển vị ở mode  $n$  ở thời điểm  $t_2$ ;  $c_n$  là hệ số ảnh hưởng của tải trọng ở mode  $n$  ở thời điểm  $t_0$  tới chuyển vị ở mode  $n$  ở thời điểm  $t_2$ ;  $d_n$  là hệ số ảnh hưởng của xung điều khiển ở mode  $n$  ở thời điểm  $t_0$  tới chuyển vị ở mode  $n$  ở thời điểm  $t_2$ .



a. Quá trình tính toán dự báo đáp ứng chuyển vị ở thời điểm cuối mỗi khoảng thời gian  $\Delta t$ .

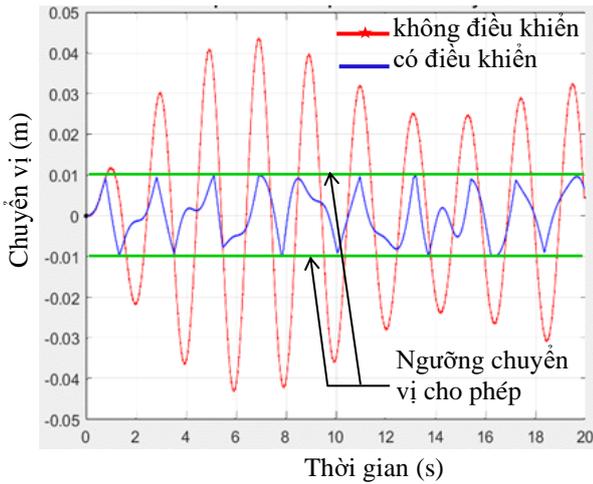


b. Quyết định phát xung điều khiển ở thời điểm đầu khoảng thời gian  $\Delta t$ .

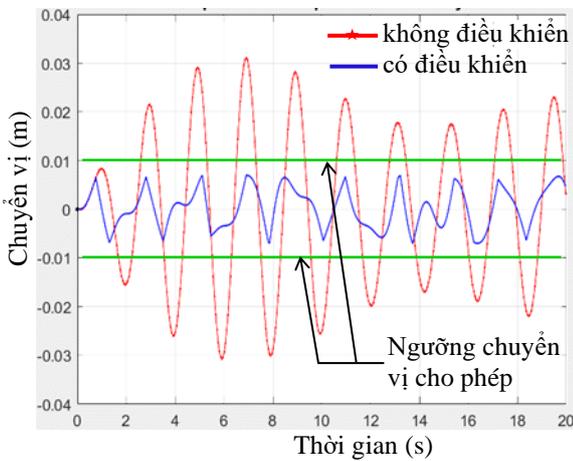
Hình 9. Tính toán dự báo đáp ứng chuyển vị và quyết định phát xung điều khiển.

### 4. Kết quả mô phỏng điều khiển dao động bằng phương pháp kết hợp IMSC và BSC

Dưới đây là một số biểu đồ, biểu diễn kết quả tính toán bài toán dao động của khung 5 tầng nêu trên cùng kết quả điều khiển dao động của khung khảo sát trên Matlab. Trên Hình 10.a và 10.b thể hiện chuyển vị các tầng 5 và 3 của hệ (trong không gian vật lý) được điều khiển sẽ không vượt qua được giá trị giới hạn định trước là 0.01m. Mỗi khi chuyển vị có xu hướng vượt ra khỏi giới hạn, ta thấy xuất hiện các xung điều khiển tại các tầng 5 và 3 để điều chỉnh lại chuyển vị, Hình 11.a và 11.b.

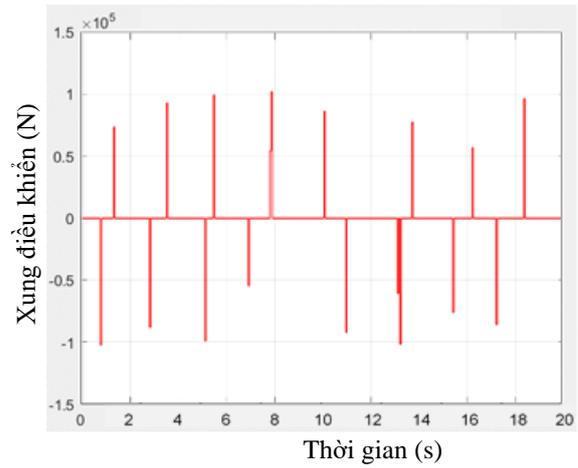


a. Chuyển vị tại tầng 5 trước và sau khi có điều khiển.

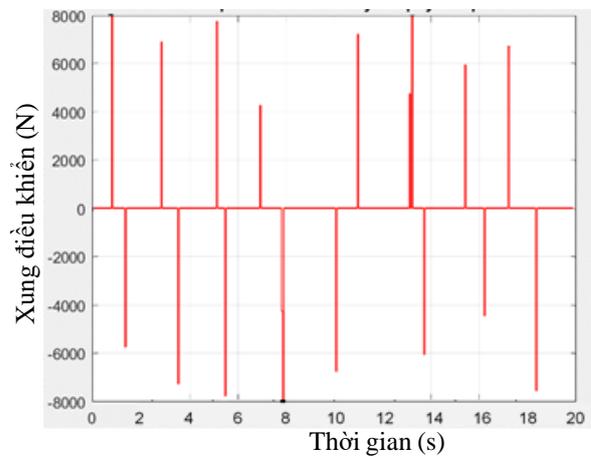


b. Chuyển vị tại tầng 3 trước và sau khi có điều khiển.

**Hình 10.** Đáp ứng chuyển vị của hệ tại tầng 5 và tầng 3 khi có điều khiển và không có điều khiển



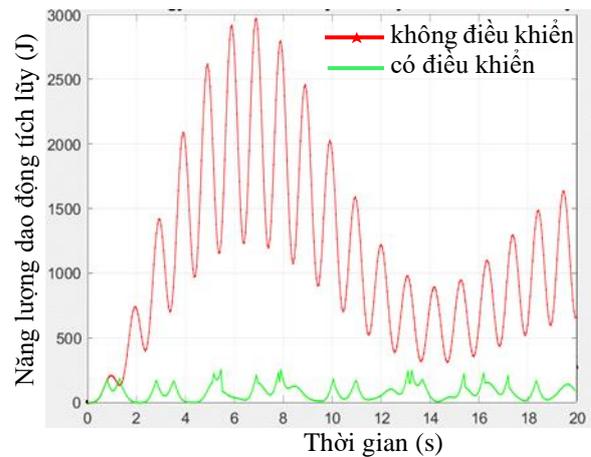
a. Xung lực điều khiển tại tầng 5.



b. Xung lực điều khiển tại tầng 3.

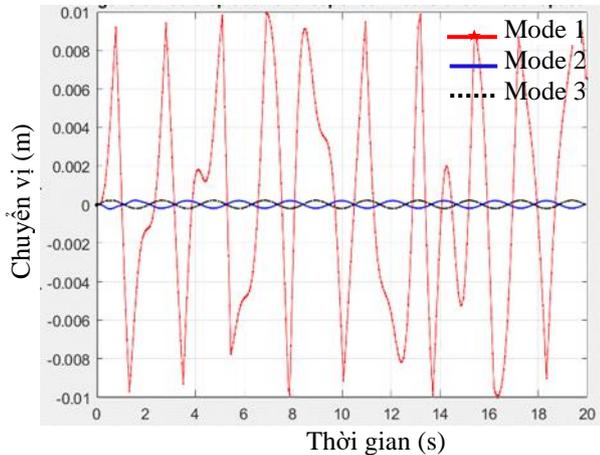
**Hình 11.** Trường hợp thiết bị điều khiển được bố trí ở tầng 5 và tầng 3.

Trên Hình 12 biểu diễn sự thay đổi cơ năng trong hệ dao động. Có thể thấy trong hệ được điều khiển, các xung lực điều khiển phá vỡ quá trình tích lũy năng lượng trong hệ, do đó không chế được chuyển vị của hệ nằm trong giới hạn định trước.



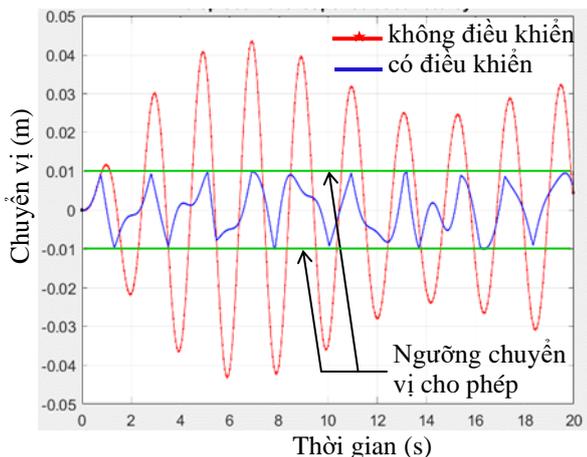
**Hình 12.** Sự thay đổi cơ năng tích lũy trong hệ động học.

Ta cũng thấy vai trò chủ đạo của thiết bị điều khiển bố trí ở tầng 5, khi giá trị xung lực ở tầng 5 theo tính toán thường gấp hơn 10 lần so với xung lực ở tầng 3, Hình 13. Khi xem xét các đáp ứng chuyển vị suy rộng tại các mode như trên hình 13, trong đó ta thấy đáp ứng của mode 1 là chủ đạo, lấn át hết đáp ứng của các mode khác, do vậy có thể chỉ cần điều khiển mode 1 là có thể đạt yêu cầu về chuyển vị của các tầng không vượt quá giới hạn cho phép.

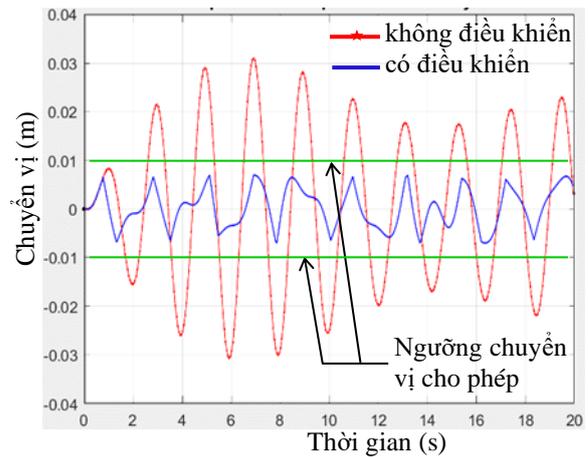


Hình 13. Chuyển vị suy rộng ở 3 mode đầu tiên của hệ được điều khiển.

Tại mode 1, biên độ dao động lớn nhất đạt được tại tầng 5, nên ta xét trường hợp đặt thiết bị điều khiển duy nhất tại tầng 5. Ta có thể thấy hệ có đáp ứng chuyển vị, Hình 14.a, 14.b, và giá trị xung điều khiển, Hình 15, tương tự như khi bố trí thiết bị điều khiển ở cả hai tầng 5 và 3, hoàn toàn thoả mãn yêu cầu đặt ra về chuyển vị, mà giá trị xung điều khiển thay đổi không đáng kể và cũng giảm công tính toán và năng lượng điều khiển. Như vậy, chỉ cần bố trí thiết bị điều khiển tại tầng 5 là hoàn toàn hợp lý, vừa bớt được thiết bị, giảm được sự phức tạp trong thiết kế và thi công, vừa giảm chi phí đầu tư.

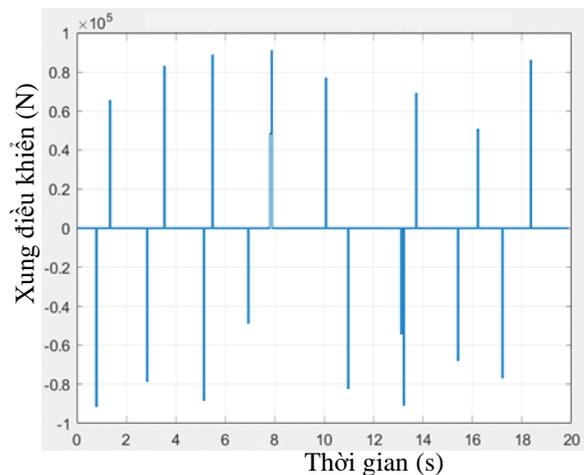


a. Chuyển vị tại tầng 5 trước và sau khi có điều khiển ở tầng 5.



b. Chuyển vị tại tầng 3 trước và sau khi có điều khiển ở tầng 5.

Hình 14. Đáp ứng chuyển vị của hệ tại tầng 5 và tầng 3 khi chỉ đặt thiết bị điều khiển ở tầng 5.



Hình 15. Xung điều khiển khi chỉ bố trí một thiết bị điều khiển ở tầng 5.

## 5. Kết luận

Việc kết hợp hai giải pháp IMSC và BSC để điều khiển dao động của hệ động học rất có khả năng để triển khai trong thực tế nhờ tính trực quan, đơn giản của giải pháp BSC với nhiều thông số được tính toán off-line, cũng như việc thay thế hệ phương trình vi phân trong không gian vật lý bị ràng buộc lẫn nhau bằng hệ phương trình vi phân độc lập trong không gian mode, và áp dụng ma trận giả nghịch đảo để tính toán trong trường hợp số thiết bị điều khiển ít hơn số mode cần điều khiển trong giải pháp IMSC. Việc áp dụng giải pháp BSC có thể giúp tiết kiệm được năng lượng vận hành hệ thống điều khiển dao động, nhờ vào việc thiết bị điều khiển chỉ phát xung khi các biến động học của hệ theo dự báo có khả năng vượt ra khỏi giới hạn. Trong thiết kế công trình thực tế, trong các điều kiện bình thường, ta có thể thiết kế sao cho bản thân hệ kết cấu đủ chống chịu, không dao động vượt quá giới hạn, do đó hệ thống điều khiển không phải phát các xung lực điều khiển. Chỉ khi gặp những điều kiện cực đoan (bão lớn, động đất lớn), lúc này hệ thống chống dao động mới thực sự vận hành. Vấn đề về số lượng các thiết bị điều khiển cần thiết đối với một hệ dao động cụ thể cần được nghiên cứu chi tiết, cụ thể hơn, do liên quan tới vấn đề ổn định của hệ, vấn đề chi phí thiết bị và vận hành.

Chủ động chống dao động cho công trình là một giải pháp có nhiều hứa hẹn, mặc dù chỉ mới được ứng dụng vào xây dựng khoảng 40 năm trở lại nhưng hiện nay và trong tương lai sẽ còn phát triển, đặc biệt cho các công trình cao, công trình có quy mô lớn. Vấn đề tìm tòi sáng tạo các giải thuật mới và các kỹ thuật mới cho phương pháp chủ động điều khiển dao động vẫn luôn là bài toán được đặt ra cho các kỹ sư thiết kế, nhất là phương pháp điều khiển chủ động liên quan tới nhiều lĩnh vực như động lực học, điện tử học, tin học, cơ điện tử, cơ khí... Ở đây, các tác giả cố gắng đưa ra phương pháp kết hợp hai giải pháp nhằm tận dụng ưu điểm của từng giải pháp, cũng như khắc phục các khó khăn khi tính toán trực tuyến và làm tăng tính khả thi khi chúng ta áp dụng vào thực tiễn xây dựng. Việc còn nhiều hướng nghiên cứu mở rộng như trên trình bày còn mở ra nhiều bài toán có nội dung thực tiễn phong phú, việc giải đáp được các bài toán này có thể làm sâu sắc hơn hiểu biết của chúng ta trong lĩnh vực điều khiển dao động, cũng như làm tăng tính khả thi khi chúng ta áp dụng vào thực tiễn xây dựng.

## Lời cảm ơn

Các tác giả xin trân trọng cảm ơn các đơn vị: Trường Đại học Bách khoa - Đại học Quốc Gia Thành phố Hồ Chí Minh, VLTECH - Đại học Văn Lang đã tạo điều kiện và hỗ trợ để các tác giả hoàn thành nghiên cứu này.

## Tài liệu tham khảo

- [1] Frahm H (1909). *Device for Damping Vibrations of Bodies*. U.S. Patent No. 989958.
- [2] Ormondroyd J. and Den Hartog J. P. (1928). *Theory of the Dynamic Vibration Absorber*. Trans. ASME, 50, pp. 9–22.
- [3] Den Hartog, J. P. (1934). *Mechanical Vibrations*. McGraw Hill, NY, Chap. 3 eprint by Dover Publications.
- [4] ND Anh, H Matsuhisa, LD Viet, M Yasuda (2007). Vibration control of an inverted pendulum type structure by passive mass-spring-pendulum dynamic vibration absorber. *Journal of Sound and Vibration*, volume 30 (Issue 1&2), 187-201
- [5] Phạm Hoàng Anh (2016). *Xác định thông số tối ưu của thiết bị chế ngự dao động nói hai kết cấu liên kế*. Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, Đại học Xây dựng Hà nội, số 27 (1-2016).
- [6] Phạm Hoàng Anh (2002). *Một phương pháp điều khiển tương tác phân ứng của hai kết cấu song song chịu tải trọng động đất*. Tuyển tập các Công trình hội nghị cơ học toàn quốc lần thứ 7, Đại học Quốc Gia Hà nội, tập I (12-2002), 30-36.
- [7] Ngô Vi Long (2022). *Kết cấu tự thích nghi trong xây dựng*. Tạp chí Khoa học Đại học Văn Lang, Đại học Văn Lang, số 32 (03-2022), 129-133.
- [8] Ngô Vi Long (2003). *Chống dao động cho công trình bằng kỹ thuật điều khiển chủ động*. Tuyển tập báo cáo khoa học hội nghị khoa học toàn quốc lần thứ hai về sự cố và hư hỏng công trình xây dựng, Đại học Quốc Gia Hà nội (10/2003), 249-256.
- [9] Ngô Vi Long (2000). *Thế hệ kết cấu mới: thế hệ kết cấu tự thích nghi*. Tạp chí Phát triển khoa học và Công nghệ, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, tập 3 (tháng 9&10/2000).
- [10] Ngô Vi Long, Phan Ngọc Châu, Nguyễn Văn Yên, Chu Quốc Thắng (2007). *Điều khiển dao động của một dầm chịu tải di động bằng kỹ thuật điều khiển chủ động*. Tạp chí Cầu đường Việt nam, số 3/2007.
- [11] Baruh H. & Meirovitch L. (1982). *Implementation of the IMSC method by Means of a Varying Number of Actuators*. AIAA/AAS/ Astrodynamics Conference, San Diego C.A., paper No 82-1035.
- [12] Lee S.K & Kozin F (1986). *Bounded State Control of Structures with Uncertain Number of Parameters*. In Hart G.C & Nelson G.B Dynamic Response of Structures ASCE, New York, pp 788-94.
- [13] Lee S.K & Kozin F (1987). *Bounded State Control of Linear Structures*, In Leipholz H.H.E (ed) Structural Control Martinus Nijhoff, Amsterdam, pp 347-407.
- [14] Masri S.F, Berkeley G.A & Uwadia F.E (1980). *On-line Pulse Control of Tall building*. In Leipholz H.H.E Structural Control, North Holland, Amsterdam, pp 471-92.
- [15] Prucz Z., Soong T.T and Reihorm A.M (1985). *An Analysis of Pulse Control for Simple Mechanical System*. ASME Journal Dynamic System Measurement Control, No 107, pp 123-31.
- [16] Soong T.T (1990). *Active Structural Control – Theory and Practice*. Longman Scientific & Technical, Copublished in USA with Jhon Wiley & Sons, Inc, NewYork.
- [17] Ray W. Clough, Joseph Penziens (1995). *Dynamic of Structures*. Third Edition – Computer and Structures Inc., University Ave. Berkeley, CA94704, USA. Copyright © 2003 by Computer and Structures Inc.
- [18] Soo-Min Kim, Dae W.Kim, Moon K.Kwak (2023). *Design and Implementation of an Active Vibration Control Algorithm Using Servo Actuator Control Installed in Series with a Spring-Damper* – Applied Sciences 2023, Volume 13, Issue 5, 10.3390; <https://doi.org/10.3390/app13053349>
- [19] Dubravko Miljković (2009). *Review of Active Vibration Control* - [https://www.researchgate.net/publication/304081320\\_Review\\_of\\_Active\\_Vibration\\_Control](https://www.researchgate.net/publication/304081320_Review_of_Active_Vibration_Control)
- [20] Dirk Mayer, Seven Herond (2017). *Passive, Adaptive, Active Vibration Control, and Integrated Approaches* <https://www.intechopen.com/chapters/57787>
- [21] Christoph Paulitsch<sup>1</sup>, Paolo Gardonio, Stephen J Elliott (2006). *Active vibration control using an inertial actuator with internal damping* - <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16642828>
- [22] Jinxin Liu, Xingwu Zhang, Chenxi Wang, Ruqiang Yan (2022). *Active Vibration Control Technology in China* - IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, Volume: 25, Issue: 2, April 2022 - <https://ieeexplore.ieee.org/document/9756383>