



DYNAMIC ANALYSIS OF MONOPILE RESPONSE DUE TO WIND TURBINE BLADE BREAKAGE

Huynh Van Quan

Campus in Ho Chi Minh City, University of Transport and Communications, No. 450-451 Le Van Viet Street, Tang Nhon Phu A Ward, Thu Duc, Ho Chi Minh City, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 06/05/2024

Revised: 24/07/2024

Accepted: 08/08/2024

Published online: 15/08/2024

<https://doi.org/10.47869/tcsj.75.6.5>

* *Corresponding author*

Email: quanhv_ph@utc.edu.vn

Abstract. Wind turbine structures are usually designed with absolute safety and reliability in mind. However, incidents like a broken blade while in use are still possible. A broken blade generates a large force and moment at the top of the foundation due to the tall tower and heavy blades. This paper proposes a monopile model to study the impact of a broken blade on the dynamic response of the foundation. The monopile is represented in this model as a rigid bar that moves in a general plane, including both rotation and horizontal translation. The model is described by a system of differential equations for planar motion and integrated using Matlab-Simulink tools. Numerical studies were carried out on a 5 MW offshore wind turbine supported by a monopile embedded in multi-layered soil. For four instances of broken blades, the dynamic responses of the model-rotation and horizontal displacement-are computed and plotted over time. Compared to the finite element method using FP-Multiplier software, the peak responses display a maximum deviation of 7.01%.

Keywords: wind turbine, blade breakage, monopile, dynamic response, general plane motion.

@ 2024 University of Transport and Communications



PHÂN TÍCH ỨNG XỬ ĐỘNG CỦA MÓNG CỌC ĐƠN KHI CÁNH QUẠT CỦA TRỤ ĐIỆN GIÓ BỊ GÃY

Huỳnh Văn Quân

Phân hiệu tại Thành Phố Hồ Chí Minh, Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 450-451 Lê Văn Việt, Phường Tăng Nhơn Phú A, TP. Thủ Đức, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 06/05/2024

Ngày nhận bài sửa: 24/07/2024

Ngày chấp nhận đăng: 08/08/2024

Ngày xuất bản Online: 15/08/2024

<https://doi.org/10.47869/tcsj.75.6.5>

* Tác giả liên hệ

Email: quanhv_ph@utc.edu.vn

Tóm tắt. Do tính chất quan trọng trong khai thác mà các công trình điện gió thường được thiết kế với mức độ an toàn và tin cậy gần như tuyệt đối. Tuy nhiên, các sự cố bất thường, như gãy cánh quạt trong quá trình khai thác, vẫn có thể xảy ra. Bài báo phân tích ứng xử động của móng cọc đơn do sự cố gãy cánh quạt điện gió gây ra. Lực và mô-men phát sinh do cánh quạt bị gãy được tổ hợp đến đỉnh móng, các giá trị này rất lớn vì trụ tháp cao và cánh quạt nặng. Bài báo đề xuất một mô hình giản đơn để phân tích cho móng cọc đơn. Mô hình này là một thanh cứng tuyệt đối, có chuyển động tịnh tiến ngang và xoay của vật rắn chuyển động song phẳng. Chuyển động của mô hình móng được mô tả bằng hệ phương trình vi phân vật chuyển động song phẳng và tích phân bằng công cụ Matlab-Simulink. Trong tính toán số, bài báo khảo sát trụ điện gió có công suất 5 MW đặt trên hệ móng cọc đơn với đất nền nhiều lớp. Chuyển vị ngang và góc xoay theo thời gian của mô hình móng được lượng hóa tương ứng với bốn trường hợp cánh quạt bị gãy. Giá trị cực đại của các phản ứng có độ lệch lớn nhất là 7,01% khi so sánh với kết quả phân tích từ phương pháp phần tử hữu hạn thông qua phần mềm FP-Multipier.

Từ khóa: điện gió, gãy cánh quạt, móng cọc đơn, phản ứng động, song phẳng.

@ 2024 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ngày nay, năng lượng điện từ các nguồn tái tạo như ánh sáng mặt trời, gió, sóng biển, ... đang được chú tâm khai thác trên thế giới cũng như tại Việt Nam [1,2]. Thống kê đến tháng 5 năm 2024, nước ta có hơn 100 dự án điện gió đã được khai thác và đăng ký thử nghiệm để vận hành thương mại [2,3].

Với vai trò quan trọng trong khai thác cũng như giá thành xây dựng cao, các bộ phận của công trình điện gió được thiết kế để đảm bảo hư hỏng trong vận hành là thấp nhất. Tuy nhiên, sự cố hư hỏng các bộ phận trong quá trình vận hành là không tránh khỏi [4-8]. Trong hệ thống điện gió, cánh quạt là bộ phận tiếp nhận năng lượng trực tiếp từ gió, hình dáng cánh quạt có độ mảnh lớn nên dễ bị hư hỏng. Theo Pérez (2013) [7], với trụ điện gió có công suất 2 MW, chi phí cho hạn mục cánh quạt chiếm tỷ trọng 24,9% của công trình.

Mặc dù có giá thành cao, tầm quan trọng lớn nhưng thực tế cánh quạt có tần suất hư hỏng là cao nhất. Theo Bussel (2001) [9], qua theo dõi các sự cố trong thời gian bốn năm, tần suất hư hỏng của cánh quạt là cao nhất; theo McMillan (2007) [10], với số liệu thống kê tại nước Đức, hư hỏng của hộp số, máy phát, cánh quạt và trục đỡ chiếm tỷ lệ 67,0%; theo Koutoulakos (2008) [11], tiến hành nghiên cứu với nhiều hãng sản xuất thiết bị điện gió khác nhau, bộ phận cánh quạt có tỷ trọng hư hỏng khá cao; theo Spinato (2009) [12], qua theo dõi số liệu trong thời gian hơn mười năm tại Đan Mạch và Đức, hư hỏng bộ phận cánh quạt đứng vị trí thứ hai trong các loại sự cố.



Hình 1. Gãy cánh quạt điện gió tại dự án Ia Le 1-Gia Lai vào tháng 4/2024 [13].

Tại Việt Nam, gần đây đã liên tiếp xảy ra các sự cố gãy cánh quạt, xem hình 1. Một số dự án có xảy ra sự cố được thống kê ở bảng 1. Ví dụ, trong thời gian ngắn của tháng 11 năm 2021, hai sự cố gãy cánh quạt điện gió liên tiếp xảy ra tại tỉnh Sóc Trăng [14]. Trong tháng 3 và tháng 4 của năm 2024, ba trụ điện gió tại tỉnh Bạc Liêu và một trụ điện gió tại tỉnh Gia Lai lại xảy ra sự cố gãy cánh quạt [13,14].

Khi xảy ra sự cố gãy cánh quạt, yếu tố bị ảnh hưởng trực tiếp ngay tức thì đó chính là ổ trục đỡ cánh quạt và các ổ trục của hệ thống hộp số chuyển đổi tốc độ quay do khối tâm của hệ cánh quạt bị lệch khỏi vị trí thiết kế. Chuyên vị đột ngột phát sinh do cánh quạt bị gãy làm rung lắc mạnh đỉnh trụ tháp, có thể gây hỏng các thiết bị điện tử đặt tại vị trí này. Lực quán tính phát sinh gây ra dao động cho công trình, có thể làm nứt trụ tháp, bê, móng. Ngoài ra, dao động làm cho hệ móng phát sinh biến dạng dư, công trình có thể bị lệch khỏi vị trí thiết kế, có thể ảnh hưởng đến an toàn khai thác.

Bảng 1. Một số sự cố gãy cánh quạt điện gió tại Việt Nam.

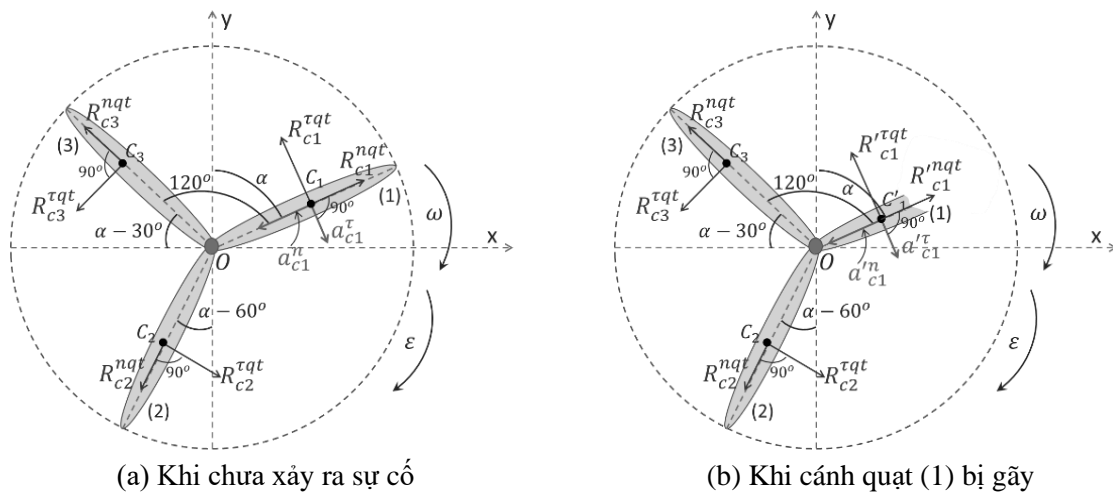
TT	Thời điểm	Dự án điện gió	Địa điểm
1	Tháng 4 năm 2024	Ia Le 1	Huyện Chư Pưh, Tỉnh Gia Lai [13]
2	Tháng 3 năm 2024	Hòa Bình 5	Huyện Hòa Bình, Tỉnh Bạc Liêu [14]
3	Tháng 11 năm 2022	Đông Hải 1	Huyện Duyên Hải, Tỉnh Trà Vinh [14]
4	Tháng 11 năm 2021	Hòa Đông 2	Thị xã Vĩnh Châu, Tỉnh Sóc Trăng [14]
5	Tháng 11 năm 2021	Vĩnh Hải	Thị xã Vĩnh Châu, Tỉnh Sóc Trăng [14]

Tuy nhiên, nghiên cứu ảnh hưởng do sự cố hư hỏng các thiết bị, ví dụ như sự cố gãy cánh quạt, đến phản ứng của công trình điện gió chưa được các tác giả quan tâm. Với công trình điện gió xa bờ, giải pháp móng cọc đơn khá phổ biến. Nghiên cứu này thực hiện với trường hợp trụ điện gió xa bờ đặt trên móng cọc đơn, vì chúng có độ mảnh khá lớn nên dễ bị ảnh hưởng khi cánh quạt bị gãy. Về tải trọng gây ra dao động đột ngột cho công trình, bài báo đặt ra sự cố một phần của cánh quạt điện gió bị gãy. Khi đó, hệ mất cân bằng về lực do phát sinh lực quán tính tác dụng lên công trình. Các lực này được tổ hợp đến đỉnh móng trong mặt phẳng khảo sát, các lực khác như sóng biển, tải trọng động đất chưa được khảo sát đồng thời với hệ lực quán tính trong nghiên cứu này. Móng được mô hình dưới dạng thông số tập trung, được mô phỏng bằng hệ phương trình vi phân của vật rắn chuyển động song phẳng. Bằng công cụ Matlab-Simulink, ứng xử của móng dưới dạng chuyển vị ngang và góc xoay được phân tích và biểu diễn theo thời gian. Kết quả mô phỏng số được kiểm chứng bằng phương pháp phần tử hữu hạn của phần mềm FP-MultiPier.

2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH NGHIÊN CỨU

2.1. Lực phát sinh từ sự cố gãy cánh quạt

Theo Tavner (2006) [4] và Pérez (2013) [7], tại Đan Mạch và Đức, số cánh quạt của một trụ điện gió được quy định phải là ba cánh. Xu hướng ba cánh quạt là công nghệ hiện đại mà các hãng đang sản xuất (Schubel, 2012) [15] và được các dự án điện gió tại Việt Nam đang áp dụng [2]. Chính vì vậy, bài báo này thực hiện phân tích cho mô hình trụ điện gió có ba cánh quạt như hình 2.



Hình 2. Hệ lực quán tính tác dụng lên các cánh quạt.

Khảo sát chuyển động của hệ gồm ba cánh quạt gắn chặt nhau như hình 2 (a), các cánh quạt có cấu tạo như nhau, đồng chất, khối lượng m , khối tâm tại C_i ($i = 1; 2; 3$) cách trục quay O một đoạn u , chuyển động cùng vận tốc góc ω và gia tốc góc ε . Tại thời điểm khảo sát, khối tâm C_i có véc-tơ gia tốc $\vec{a}_{Ci} = \vec{a}_{Ci}^n + \vec{a}_{Ci}^\tau$, tương ứng với véc-tơ lực quán tính được hình thành theo nguyên lý Đa-lam-be $\vec{R}_{Ci}^{qt} = \vec{R}_{Ci}^{nqt} + \vec{R}_{Ci}^{\tau qt}$. Trong đó, \vec{a}_{Ci}^n và \vec{a}_{Ci}^τ tương ứng là véc-tơ gia tốc pháp tuyến và tiếp tuyến của cánh quạt thứ i . Giá trị $a_{Ci}^n = u\omega^2$ và $a_{Ci}^\tau = u\varepsilon$. $\vec{R}_{Ci}^{nqt} = -m\vec{a}_{Ci}^n$ và $\vec{R}_{Ci}^{\tau qt} = -m\vec{a}_{Ci}^\tau$ là véc-tơ lực quán tính pháp tuyến và tiếp tuyến, \vec{R}_{Ci}^{nqt} và $\vec{R}_{Ci}^{\tau qt}$ ngược chiều \vec{a}_{Ci}^n và \vec{a}_{Ci}^τ , $R_{Ci}^{nqt} = ma_{Ci}^n = mu\omega^2$, $R_{Ci}^{\tau qt} = ma_{Ci}^\tau = mu\varepsilon$. Ba cánh quạt được lắp đặt cân đối trên hình tròn (góc 360°) nên các cánh quạt tạo góc 120° với nhau. Tại thời điểm bất kỳ, cánh quạt (1) và (2) tương ứng tạo góc α (rad) và $\alpha - \pi/3$ (rad) so với phương thẳng đứng. Trong khi đó, cánh quạt (3) tạo góc $\alpha - \pi/6$ (rad) so với phương ngang, xem hình 2 (a).

Tổng hình chiếu các lực quán tính lên trục x và trục y như phương trình (1) và (2), các lực quán tính tạo thành hệ lực cân bằng.

$$R_x^{qt} = \sum F_{kx}^{qt} = -R_{C1}^{\tau qt} \cos \alpha + R_{C1}^{nqt} \sin \alpha + R_{C2}^{\tau qt} \cos(\alpha - \pi/3) - R_{C2}^{nqt} \sin(\alpha - \pi/3) - R_{C3}^{\tau qt} \sin(\alpha - \pi/6) - R_{C3}^{nqt} \cos(\alpha - \pi/6) = 0 \quad (1)$$

$$R_y^{qt} = \sum F_{ky}^{qt} = R_{C1}^{\tau qt} \sin \alpha + R_{C1}^{nqt} \cos \alpha - R_{C2}^{\tau qt} \sin(\alpha - \pi/3) - R_{C2}^{nqt} \cos(\alpha - \pi/3) - R_{C3}^{\tau qt} \cos(\alpha - \pi/6) + R_{C3}^{nqt} \sin(\alpha - \pi/6) = 0 \quad (2)$$

Rút gọn biểu thức (1) và (2), ta được:

$$R_x^{qt} = -ma\varepsilon[\cos \alpha - \cos(\alpha - \pi/3) + \sin(\alpha - \pi/6)] + ma\omega^2[\sin \alpha - \sin(\alpha - \pi/3) - \cos(\alpha - \pi/6)] = 0 \quad (3)$$

$$R_y^{qt} = ma\varepsilon[\sin \alpha - \sin(\alpha - \pi/3) - \cos(\alpha - \pi/6)] + ma\omega^2[\cos \alpha - \cos(\alpha - \pi/3) + \sin(\alpha - \pi/6)] \quad (4)$$

Xét trường hợp một phần cánh quạt (1) bị gãy đột ngột như hình 2 (b), khi đó, khối tâm C_1 dời về vị trí C'_1 cách O một đoạn $u_1 = k_1u$, khối lượng còn lại của cánh quạt là $m_1 = k_2m$, với $(k_1, k_2) < 1$. Khi đó, lực quán tính tiếp tuyến và pháp tuyến của cánh quạt (1) sẽ giảm đột ngột, hệ lực quán tính trong 2 cánh quạt còn lại vẫn không đổi nên phương trình (3) và (4) sẽ mất cân bằng. Lực quán tính tác dụng lên công trình được xác định như sau:

$$R_x^{qt} = -mu\varepsilon[k_1k_2 \cos \alpha - \cos(\alpha - \pi/3) + \sin(\alpha - \pi/6)] + ma\omega^2[k_1k_2 \sin \alpha - \sin(\alpha - \pi/3) - \cos(\alpha - \pi/6)] \quad (5)$$

$$R_y^{qt} = mu\varepsilon[k_1k_2 \sin \alpha - \sin(\alpha - \pi/3) - \cos(\alpha - \pi/6)] + ma\omega^2[k_1k_2 \cos \alpha - \cos(\alpha - \pi/3) + \sin(\alpha - \pi/6)] \quad (6)$$

Cánh quạt liên kết với tua-bin là trục quay, nên được mô hình dưới dạng bản lề (khớp nối). Liên kết khớp không truyền mô-men nên tải trọng quán tính thu gọn về trục quay O của trụ tháp chỉ có lực quán tính \vec{R}_x^{qt} và \vec{R}_y^{qt} . Do chỉ khảo sát chuyển động theo phương ngang và chuyển động góc xoay nên tổ hợp lực quán tính về đỉnh móng như công thức (5), h là khoảng cách từ đỉnh tháp O đến đỉnh móng A.

$$\begin{cases} H_x = R_x^{qt} \\ M = R_x^{qt} \cdot h \end{cases} \quad (7)$$

2.2. Mô phỏng chuyển động của mô hình móng

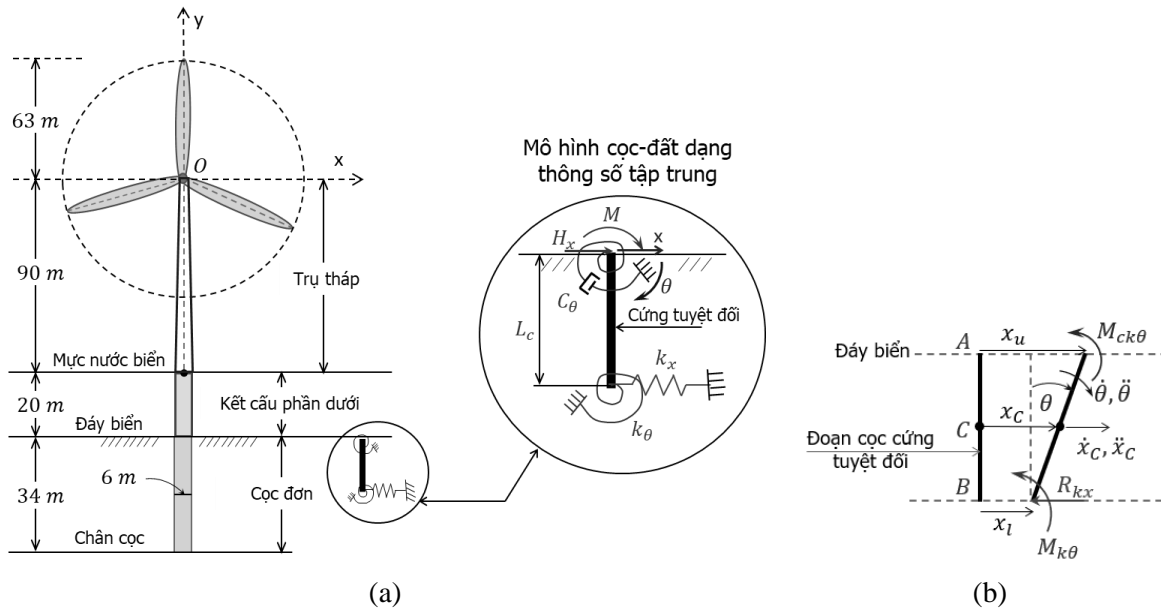
Khảo sát một công trình điện gió xa bờ, đặt trên móng cọc đơn, có mô hình hệ đất nền-móng dưới dạng thông số tập trung như hình 3 (a) [16-18]. Mô hình móng có mặt cắt chính là mặt cắt thực của móng cọc đơn, chiều dài tính từ đáy biển và kéo dài sâu xuống dưới một đoạn L_C . Theo Gazetas (1991) [19], L_C được gọi là chiều dài có hiệu. Theo đó, chuyển vị ngang của cọc nằm phía dưới chiều dài L_C có giá trị rất bé nên có thể bỏ qua. Giá trị L_C xác định theo công thức (8); có độ cứng tuyệt đối; lực thu gọn tại đầu cọc gồm lực cắt H_x và mô-men M ; có chuyển vị ngang x và góc xoay θ ; có liên kết tại đầu cọc là một thiết bị cản xoay có hệ số cản C_θ xác định theo công thức (9), liên kết tại chân cọc gồm một lò xo thẳng có độ cứng k_x xác định theo công thức (10) và một lò xo xoắn có độ cứng k_θ xác định theo công thức (11). Các tham số này có thể được xác định bằng kết quả phân tích theo phương pháp phần tử hữu hạn như Carswell (2015) [16] hoặc xác định bằng các công thức có sẵn như được đề xuất bởi Gazetas (1991) [19]. Trong đó, E_h phân năng lượng nhớt bị tiêu tán, f là tần số của tải trọng; x_u , x_C và x_l tương ứng là chuyển vị ngang tại đỉnh cọc-điểm A, tại khối tâm của mô hình-trung điểm C và tại chân mô hình-điểm B, xem hình 3 (b).

$$L_C = \frac{x_u - x_l}{\theta} \quad (8)$$

$$C_\theta = \frac{E_h}{2\theta^2 \pi^2 f} \quad (9)$$

$$k_x = \frac{H_x}{x_l + L_C \theta} \quad (10)$$

$$k_\theta = \frac{M - H_x L_C}{\theta} \quad (11)$$



Hình 3. (a) Trụ điện gió xa bờ và mô hình móng cọc đơn, (b) Sơ đồ chuyển động song phẳng của mô hình móng.

Trong các nghiên cứu của Carswell (2015) [16], Page (2017) [17] và Aasen (2017) [18], mô hình móng trong hình 3 (a) chỉ là một phần tử nút. Trong đó, nút được đại diện bằng một ma trận độ cứng, kích thước ma trận là 3×3 hoặc 6×6 , đặt ngay tại chân của kết cấu phần trên.

Quá trình tính toán được các tác giả này thực hiện thông qua phần mềm ADINA, FAST và INFIDEL mà chưa xét đến khối lượng cọc.

Trong thực tế, mô hình cọc đơn có kích thước và khối lượng của chính đoạn cọc được khảo sát, được coi như thanh rắn, có các đặc trưng của vật rắn chuyển động song phẳng (chuyển động tịnh tiến theo phương ngang cùng với khối tâm và quay quanh khối tâm C) và chịu tác dụng của hệ lực là (H_x, M) nằm trong mặt phẳng đó.

Móng cọc đơn được mô hình dưới dạng vật rắn chuyển động song phẳng đã được Quân (2022) [20] đề xuất, kiểm chứng so với các công cụ phần tử hữu hạn và cho kết quả đáng tin cậy. Chính vì vậy, bài báo tiếp tục sử dụng đề xuất của Quân (2022) [20] để khảo sát mô hình cọc đơn trong hình 3 (b). Ngoại lực tác dụng lên hệ là (H_x, M) , các lực liên kết $(R_{kx}, M_{k\theta}, M_{c\theta})$ cũng được coi là ngoại lực. Khi đó, phương trình vi phân chuyển động của cọc theo bậc tự do chuyển vị ngang và theo bậc tự do góc xoay, có dạng như sau:

$$\begin{cases} M_C \ddot{x}_C = H_x - R_{kx} \\ J_C \ddot{\theta} = M + H_x \frac{L_C}{2} + R_{kx} \frac{L_C}{2} - M_{k\theta} - M_{c\theta} \end{cases} \quad (12)$$

Với H_x và M là kết quả thu gọn hệ lực quán tính về đỉnh móng trong công thức (7), $M_{k\theta} = k_\theta \theta$, $M_{c\theta} = C_\theta \dot{\theta}$, $R_{kx} = k_x x_l = k_x \left(x_c - \frac{L_C}{2} \theta \right)$, M_C và J_C tương ứng là khối lượng và mô-men quán tính khối lượng của mô hình.

Công thức (12) được viết dưới dạng phân ly biến số của phương trình vi phân cấp 2 như công thức (13) và dạng véc-tơ như công thức (14).

$$\begin{cases} \ddot{x}_C = -\frac{k_x}{M_C} x_C + \frac{k_x L_C}{2M_C} \theta + \frac{H_x}{M_C} \\ \ddot{\theta} = -\frac{C_\theta}{J_C} \dot{\theta} + \frac{k_x L_C}{2J_C} x_C - \frac{k_x(L_C)^2 + 4k_\theta}{4J_C} \theta + \frac{2M + H_x L_C}{2J_C} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{Bmatrix} \ddot{x}_C \\ \ddot{\theta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{C_\theta}{J_C} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_C \\ \dot{\theta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{k_x}{M_C} & \frac{k_x L_C}{2M_C} \\ \frac{k_x L_C}{2J_C} & -\frac{k_x(L_C)^2 + 4k_\theta}{4J_C} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_C \\ \theta \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \frac{H_x}{M_C} \\ \frac{2M + H_x L_C}{2J_C} \end{Bmatrix} \quad (14)$$

3. PHÂN TÍCH SỐ

3.1. Các thông số của mô hình

Theo Carswell (2015) và Jonkman (2009) [21], công trình điện gió ngoài khơi với công suất 5 MW có các kích thước cơ bản như hình 3 (a). Trụ điện gió đặt trên móng cọc đơn, móng cọc có dạng hình ống trụ tròn, chiều dài cọc là 34 m, đường kính ngoài của cọc là $D_n = 6$ m, bề dày thành cọc là $t_w = 0,09$ m. Do kể đến khối lượng của lớp sơn bảo vệ và bu-lông mà trọng lượng riêng của cọc được xác định là $\gamma = 85$ kN/m³. Địa chất đất nền xung quanh móng là hệ ba lớp. Lớp đất thứ nhất, tính từ đáy biển, có chiều sâu 14 m, mô-đun chịu cắt $G_0 = 20$ MPa, cường độ chịu cắt không thoát nước $S_u = 33$ kPa, hệ số Poát-xông $\nu = 0,498$; lớp đất kế tiếp sâu 10 m, $G_0 = 100$ MPa, $S_u = 125$ kPa, $\nu = 0,490$; lớp đất cuối cùng sâu 28 m, $G_0 = 600$ MPa, $S_u = 500$ kPa, $\nu = 0,470$. Các lớp đất đều có trọng lượng riêng là 20 kN/m³.

Bảng 1. Các thông số tương đương của hệ đất-cọc đơn [19].

Đại lượng	L_C (m)	k_x (kN/m)	k_θ (kNm/rad)	C_θ (kNms/rad)
-----------	-----------	--------------	----------------------	-----------------------

Giá trị	7,60	$3,89 \times 10^6$	$1,14 \times 10^8$	$9,34 \times 10^5$
----------------	------	--------------------	--------------------	--------------------

Với điều kiện địa chất đất nền và kích thước móng như trên, Carswell (2015) [16] thực hiện phân tích bằng phần mềm ADINA để suy ra các thông số của mô hình như bảng 1, các thông số này cũng được Song (2020) [22] tin cậy sử dụng. Bài báo này sử dụng lại các thông số ở bảng 1 để thực hiện cho các tính toán tiếp theo.

Với các thông số ở trên, suy ra đường kính trong của móng cọc $D_t = D_n - t_w = 6 - 0,09 = 5,91$ m; khối lượng của mô hình cọc, $m_c = L_c \frac{\pi}{4} (D_n^2 - D_t^2) \gamma = 7,6 \times \frac{\pi}{4} \times (6^2 - 5,91^2) \times 8500 = 54357,12$ kg; mô-men quán tính khối lượng của mô hình cọc đối với khối tâm C, $J_c = m_c \frac{L_c^2}{12} = 54357,12 \times \frac{7,6^2}{12} = 261638,94$ kgm²; chiều cao từ đỉnh móng A đến đỉnh tháp O, $h = 90 + 20 = 110$ m.

Theo Song (2020) [22], dự án điện gió ngoài khơi có công suất 5 MW có vận tốc góc = $12,1 \frac{\text{vòng}}{\text{phút}} = \frac{12,1 \times 2 \times 3,14}{60} = 1,27$ rad/s, bài báo khảo sát với trường hợp $\omega = \text{const}$ nên gia tốc góc của cánh quạt $\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = 0$, tương ứng với góc quay $\alpha = \omega t$ (xem hình 3). Giả sử cánh quạt (1) bị gãy tại thời điểm có đường trục nằm trùng với trục y, góc $\alpha = 0$.

Theo Jonkman (2009) [21], mỗi cánh quạt có khối lượng $m = 17740$ kg, chiều dài 61,5 m. Khoảng cách từ khối tâm đến chân cánh quạt là 23,06 m, khoảng cách từ chân cánh quạt đến trục quay O của tua-bin là 1,5 m. Do đó, khoảng cách từ khối tâm mỗi cánh quạt đến trục quay O là $u = 23,06 + 1,5 = 24,56$ m.

Như đã đề cập ở mục 2.1, khi cánh quạt bị gãy, phần còn lại của cánh quạt này được xác định bằng cách nhân với hệ số triệt giảm $k_1 k_2$. Hệ số $k_1 k_2$ vừa triệt giảm về kích thước (chiều dài cánh quạt) và vừa triệt giảm về khối lượng của cánh quạt. Khi phần cánh quạt bị gãy càng dài thì phần khối lượng mất đi càng lớn. Bài báo khảo sát bốn trường hợp (TH), với giá trị $k_1 k_2$ được liệt kê như bảng 2. Giá trị $k_1 k_2$ tỷ lệ nghịch với phần cánh quạt bị gãy, nên từ TH 1 đến TH 4 tương ứng là các trường hợp cánh quạt bị gãy ít nhất đến nhiều nhất.

Bảng 2. Các trường hợp $k_1 k_2$ dự kiến xảy ra.

TH 1	TH 2	TH 3	TH 4
0,95	0,90	0,85	0,80

Thay các thông số của mô hình phân tích vào công thức (5) và (6). Khi đó, lực quán tính thu gọn về đỉnh cọc trong phương trình vi phân chuyển động của móng, công thức (14), trở thành:

$$H_x = 6,89 \times 10^3 [k_1 k_2 \sin 1,27t - \sin(1,27t - \pi/3) - \cos(1,27t - \pi/6)] \text{ (kN)} \quad (15)$$

$$M = 0,76 \times 10^6 [k_1 k_2 \sin 1,27t - \sin(1,27t - \pi/3) - \cos(1,27t - \pi/6)] \text{ (kNm)} \quad (16)$$

Với vận tốc góc của cánh quạt $\omega = 1,27$ rad/s, thời gian để ro-to quay được 1 vòng (một chu kỳ) là $T = 2 \times 3,14 / 1,27 = 4,94$ s. Quan sát sự cố của trụ điện gió trong [23,24] cho thấy, sau khi một phần cánh quạt bị gãy, hệ cánh quạt vẫn tiếp tục quay. Do đó, với tải trọng tuần hoàn như trong công thức (15) và (16), để thuận lợi cho quan sát trên biểu đồ, bài báo thực hiện phân tích với thời gian 2 vòng quay, tương ứng $2T = 4,94 \times 2 = 9,88$ s.

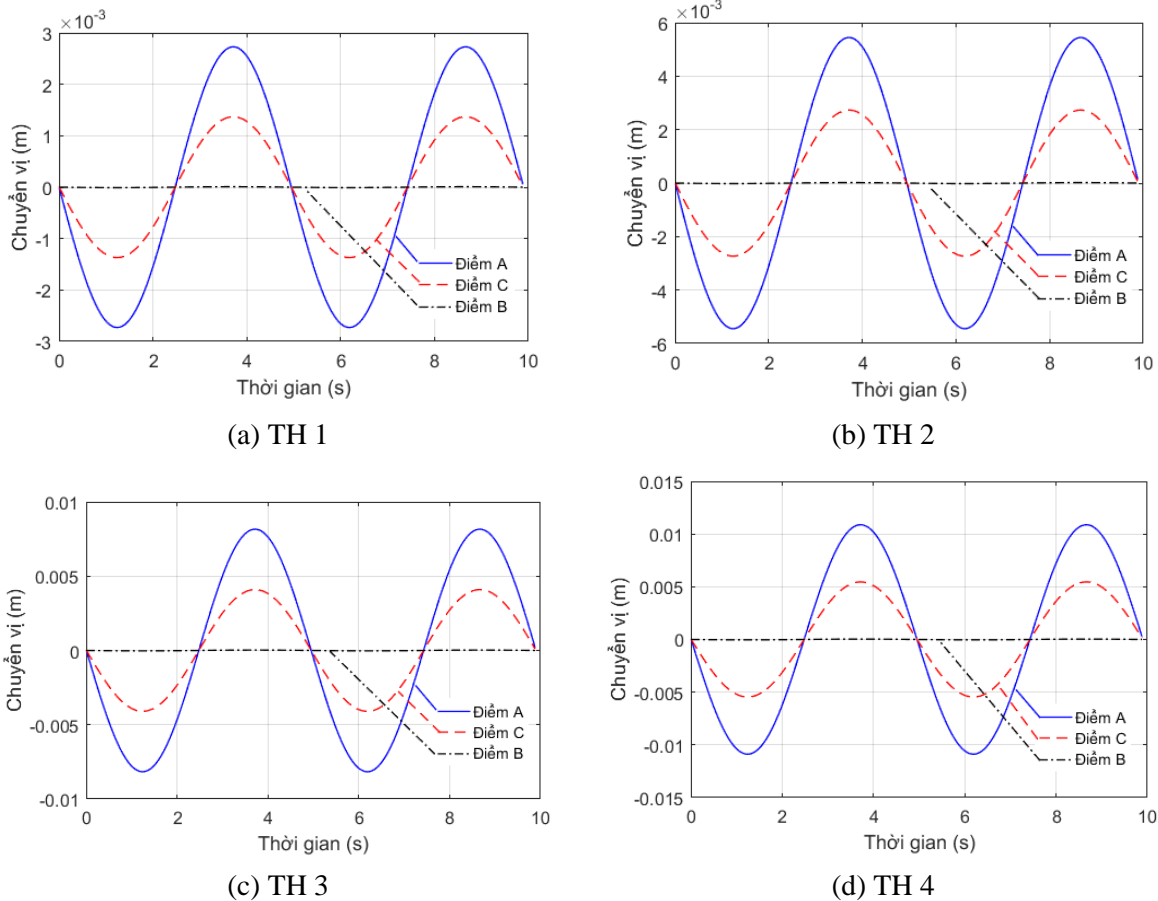
Theo Chopra (1995) [25], khi tính toán với tải trọng động theo chu kỳ (T), để đảm bảo tính chính xác của tích phân số, yêu cầu bước thời gian tối thiểu có giá trị là $\Delta t_{\min} = 0,1T =$

$0,1 \times 4,94 = 0,494$ s. Trong nghiên cứu này, phương trình (14) được tích phân số bằng phương pháp Euler của phần mềm Matlab-Simulink. Bài báo chọn bước thời gian phân tích $\Delta t = 0,0001$ s, giá trị này bé hơn rất nhiều so với $\Delta t_{min} = 0,494$ s.

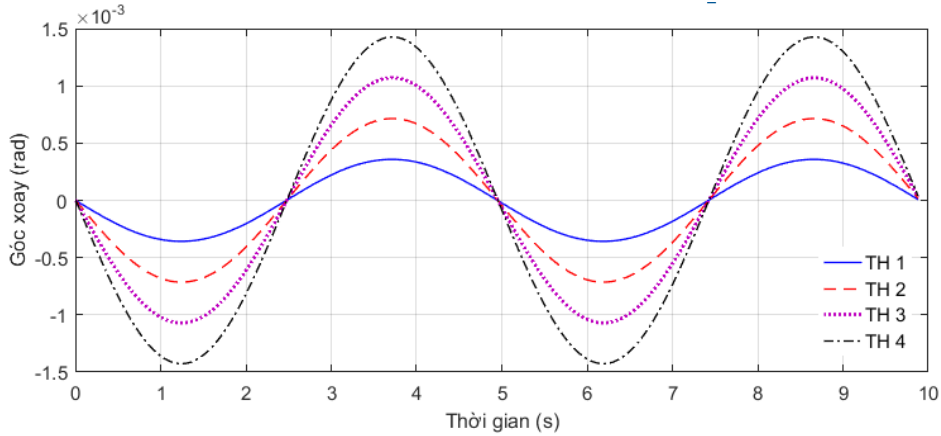
3.2. Kết quả số

Với các thông số của mô hình và công cụ mô phỏng đã trình bày ở mục 3.1, tích phân số phương trình (14) là phản ứng của cọc dưới dạng chuyển vị ngang của khối tâm x_C và góc xoay θ . Khi đó, chuyển vị tại đỉnh và chân móng cọc (x_A, x_B) xác định theo quan hệ: $x_A = x_C + \frac{L_c}{2}\theta$ và $x_B = x_C - \frac{L_c}{2}\theta$. Tương ứng với 4 trường hợp phân tích, kết quả được biểu diễn theo thời gian như hình 4 và hình 5. Giá trị cực đại của các phản ứng được tổng hợp trong cột (3) và (6) của bảng 3.

Kết quả phân tích cho thấy, với bốn trường hợp phân tích, phần cánh quạt bị gãy càng nhiều thì các chuyển vị của cọc càng lớn, TH 2 tăng gần như 100% so với TH 1. Chuyển vị tại chân mô hình (điểm B) rất bé, với 4 trường hợp nghiên cứu, giá trị cực đại chỉ là $3,55 \times 10^{-5}$ m, giá trị này xấp xỉ gần bằng không. Kết quả này phù hợp với giả thiết của mô hình như đã trình bày ở mục 2.2: tại chân mô hình (điểm B) chuyển vị ngang vẫn tồn tại nhưng có giá trị rất bé, nên trong mô hình có liên kết gối đàn hồi chống cắt và chống xoay.



Hình 4. Chuyển vị ngang của mô hình cọc.



Hình 5. Chuyển vị góc xoay của mô hình cọc.

Giá trị cực đại của tải trọng (H_x, M) tổ hợp tại đỉnh cọc được tổng hợp trong cột số (2) của bảng 3. Các giá trị này cùng với mô hình móng ở trên được đưa vào phần mềm phân tích nền móng công trình FP-MultiPier. Việc phân tích mô hình móng bằng FP-MultiPier đã được Quân (2022) [20] thực hiện và kiểm chứng kết quả, bài báo tiếp tục kế thừa các bước mô phỏng này để tiến hành nghiên cứu. Kết quả phân tích từ FP-MultiPier được trình bày ở cột (4) và (7). Giá trị ở cột (3) và (6) được so sánh với cột (4) và (7), độ lệch giữa hai phương phân tích được trình bày ở cột (5) và (8) của bảng 3. Độ lệch lớn nhất giữa hai phương pháp phân tích là 7,01%, ứng với chuyển vị ngang tại đỉnh móng của TH 4.

Bảng 3. Giá trị phản ứng cực đại của cọc.

TH	Giá trị H_x^{max} (kN) M^{max} (kNm)	Chuyển vị x_u^{max}			Góc xoay θ^{max}		
		Phương pháp đề xuất ($\times 10^{-3}$ m)	FP-MultiPier ($\times 10^{-3}$ m)	Độ lệch (%)	Phương pháp đề xuất ($\times 10^{-4}$ rad)	FP-MultiPier ($\times 10^{-4}$ rad)	Độ lệch (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
1	$H_x^{max} = 3,46 \times 10^2$ $M^{max} = 3,82 \times 10^4$	2,73	2,92	6,51	3,58	3,76	4,79
2	$H_x^{max} = 6,91 \times 10^2$ $M^{max} = 7,62 \times 10^4$	5,45	5,83	6,52	7,14	7,51	4,93
3	$H_x^{max} = 10,35 \times 10^2$ $M^{max} = 11,42 \times 10^4$	8,16	8,75	6,74	10,70	11,30	5,31
4	$H_x^{max} = 13,80 \times 10^2$ $M^{max} = 15,22 \times 10^4$	10,88	11,70	7,01	14,27	15,00	4,87

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã thành lập được các công thức xác định lực quán tính tác dụng lên công trình điện gió khi có sự cố gãy cánh quạt. Tải trọng phát sinh do sự cố gãy cánh quạt được tổ hợp đến đỉnh móng, từ đó thành lập được hệ phương trình vi phân chuyển động của móng cọc đơn dạng chuyển động song phẳng. Trong ví dụ tính toán số, bài báo đã khảo sát công trình điện gió

xa bờ có công suất 5 MW đặt trên móng cọc đơn, nền đất nhiều lớp. Lực quán tính phát sinh tương ứng với bốn trường hợp gãy cánh quạt khác nhau đã được lượng hóa. Thông qua tích phân số của phần mềm Matlab-Simulink, các phản ứng của móng cọc dưới dạng chuyển vị ngang và góc xoay đã được xác định. Giá trị cực đại được so sánh với kết quả phân tích từ phương pháp phần tử hữu hạn thông qua phần mềm FP-MultiPier, độ lệch lớn nhất giữa hai phương pháp là 7,01%. Bên cạnh các ứng xử theo phương ngang và góc xoay của móng, sự cố gãy cánh quạt còn gây ra hiệu ứng làm hư hỏng cho các thiết bị khác. Lực phát sinh từ sự cố gãy cánh quạt có thể kết hợp với các loại tải trọng động khác như sóng biển hoặc tải trọng động đất. Các điều kiện địa chất nền đất và móng thay đổi cũng ảnh hưởng đến ứng xử của hệ. Do đó, bài báo đề xuất cần thực hiện các nội dung này ở các nghiên cứu tiếp theo.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông Vận tải (ĐH GTVT) trong đề tài mã số T2024-PHII_CT-006.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. F. Porte-Agel, M. Bastankhah, S. Shamsoddin, Wind-turbine and wind-farm flows: A review, *Boundary-layer meteorology*, 174 (2020) 1-59. <https://doi.org/10.1007/s10546-019-00473-0>
- [2]. Offshore Wind farms in Vietnam. <https://www.4coffshore.com/windfarms/>, truy cập ngày 05 tháng 5 năm 2024
- [3]. Thêm một số dự án điện gió được công nhận vận hành thương mại, <https://moit.gov.vn/tin-tuc/phat-trien-nang-luong/them-mot-so-du-an-dien-gio-duoc-cong-nhan-van-hanh-thuong-mai.html>, truy cập ngày 05 tháng 5 năm 2024
- [4]. P. Tavner, C. Edwards, A. Brinkman, F. Spinato, Influence of wind speed on wind turbine reliability, *Wind Engineering*, 30 (2006) 55-72. <https://doi.org/10.1260/03095240677641441>
- [5]. J. Lindsay, D. Briand, R.R. Hill, J.A. Stinebaugh, A. S. Benjamin, Wind turbine reliability: A database and analysis approach, Sandia National Laboratories, United States, 2008. <https://doi.org/10.2172/1028916>
- [6]. K. Alewine, W. Chen, A review of electrical winding failures in wind turbine generators, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 28 (2012) 8-13. <https://doi.org/10.1109/MEI.2012.6232004>
- [7]. J.M.P. Pérez, F.P.G. Márquez, A. Tobias, M. Papaalias, Wind turbine reliability analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23 (2013) 463-472. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.018>
- [8]. J.S. Chou, C.K. Chiu, I. K. Huang, K.N. Chi, Failure analysis of wind turbine blade under critical wind loads, *Engineering Failure Analysis*, 27 (2013) 99-118. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2012.08.002>
- [9]. G.J.W. Van Bussel, M.B. Zaaijer, Reliability, availability and maintenance aspects of large-scale offshore wind farms, a concepts study, in *Proceedings of MAREC, 2001*, U.K. Institute of Marine Engineers, pp.119-126.
- [10]. D. McMillan, G.W. Ault, Towards quantification of condition monitoring benefit for wind turbine generators, in *European Wind Energy Conference & Exhibition, 2007*, Strathprints, pp.1-11.
- [11]. E. Koutoulakos, Wind turbine reliability characteristics and offshore availability assessment, Master's thesis, TU Delft, 2008.
- [12]. F. Spinato, P.J. Tavner, G.J.W. Van Bussel, E. Koutoulakos, Reliability of wind turbine subassemblies, *IET Renewable Power Generation*, 3 (2009) 387-401. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2008.0060>

- [13]. Hiện trường vụ gãy cánh quạt điện gió ở Gia Lai, <https://tienphong.vn/hien-truong-vu-gay-canh-quat-dien-gio-o-gia-lai-post1633159.tpo#&gid=1&pid=1>, truy cập ngày 05 tháng 5 năm 2024
- [14]. Điềm lại những sự cố cánh quạt điện gió bị rơi ở miền Tây, <https://dantri.com.vn/xa-hoi/diem-lai-nhung-su-co-canh-quat-dien-gio-bi-roi-o-mien-tay-20240302180047398.htm>, truy cập ngày 05 tháng 5 năm 2024
- [15]. P.J. Schubel, R.J. Crossley, Wind turbine blade design, *Energies*, 5 (2012) 3425-3449. <https://doi.org/10.3390/en5093425>
- [16]. W. Carswell, J. Johansson, F. Løvholt, S.R. Arwade, Foundation damping and the dynamics of offshore wind turbine monopiles, *Renewable Energy*, 80 (2015) 724-736. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.02.058>
- [17]. A.M. Page, K.S. Skau, H.P. Jostad, G.R. Eiksund, A new foundation model for integrated analyses of monopile-based offshore wind turbines, *Energy Procedia*, 137 (2017) 100-107. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.337>
- [18]. S. Aasen, A.M. Page, K. Skjolden Skau, T.A. Nygaard, Effect of foundation modelling on the fatigue lifetime of a monopile-based offshore wind turbine, *Wind Energ. Sci.*, 2 (2017) 361-376. <https://doi.org/10.5194/wes-2-361-2017>
- [19]. G. Gazetas, Foundation Vibrations, in H.Y. Fang, (Eds), *Foundation Engineering Handbook*, Springer, Boston, (1991) 553-593. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-5271-7_15
- [20]. H.V. Quân, T.H. Thiệp, Đề xuất giải pháp phân tích ứng xử động của móng cọc đơn trụ điện gió xa bờ, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ-Đại học Thái Nguyên*, 227 (2022) 223-230. <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.6280>
- [21]. J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial, G. Scott, Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore systems development, No. NREL/TP-500-38060, National Renewable Energy Lab, Golden CO, U.S., 2009. <https://doi.org/10.2172/947422>
- [22]. W. Song, C. Sun, Y. Zuo, V. Jahangiri, Y. Lu, Q. Han, Conceptual study of a real-time hybrid simulation framework for monopile offshore wind turbines under wind and wave loads, *Frontiers in Built Environment*, 6 (2020) 1-20. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2020.00129>
- [23]. Cánh quạt điện gió bị gãy 'có thể do lỗi thiết kế', <https://vnexpress.net/canh-quat-dien-gio-bi-gay-co-the-do-loi-thiet-ke-4393436.html>, truy cập ngày 05 tháng 5 năm 2024
- [24]. Nhà đầu tư nói gì về việc cánh quạt điện gió bị rơi?, <https://dantri.com.vn/xa-hoi/nha-dau-tu-noi-gi-ve-viec-canh-quat-dien-gio-bi-roi-20211123201110172.htm#&gid=1&pid=1>, truy cập ngày 05 tháng 5 năm 2024
- [25]. A.K. Chopra, *Dynamics of structures*, first ed., Prentice Hall, New Jersey, 1995.