

# CHÍNH SÁCH BẢO TRÌ DỰ ĐOÁN DỰA TRÊN CƠ HỘI CHO HỆ THỐNG GỒM NHIỀU PHẦN TỬ CÓ SỰ PHỤ THUỘC VỀ CẤU TRÚC VÀ KINH TẾ

## OPPORTUNISTIC PREDICTIVE MAINTENANCE POLICY FOR MULTI-COMPONENT SYSTEM WITH STRUCTURAL AND ECONOMIC DEPENDENCES

**Đinh Đức Hạnh\***, Nguyễn Phạm Thế Nhân, Tào Quang Bằng, Nguyễn Linh Giang

*Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng<sup>1</sup>*

\*Tác giả liên hệ: ddhanh@dut.udn.vn

(Nhận bài: 26/9/2022; Chấp nhận đăng: 18/01/2023)

**Tóm tắt** - Chính sách bảo trì dự đoán dựa trên cơ hội được phát triển cho hệ thống gồm nhiều phần tử có sự phụ thuộc về cấu trúc và kinh tế. Theo đó, tình trạng hư hỏng của hệ thống được kiểm tra định kỳ tại  $T_k = k \cdot \Delta T$  ( $\Delta T > 0, k = 1, 2, \dots$ ). Tại thời điểm kiểm tra  $T_k$ , nếu phần tử bị hỏng ( $X_i(T_k) < L_i$ ), hoặc độ tin cậy của nó được dự đoán tại lần kiểm tra tiếp theo thấp hơn ngưỡng bảo trì phòng ngừa ( $R_i(T_{k+1}) < R_p$ ), phần tử sẽ được bảo trì. Do sự phụ thuộc về cấu trúc, bảo trì các phần tử nói trên có thể cần phải tháo rời các phần tử khác. Để giảm rủi ro hư hỏng xảy ra và tiết kiệm chi phí bảo trì, các phần tử bị tháo sẽ được bảo trì đồng thời cùng với các phần tử nói trên nếu như độ tin cậy của chúng thấp hơn ngưỡng bảo trì cơ hội ( $R_i(T_{k+1}) < R_o, 0 < R_o < R_p < 1$ ). Kết quả nghiên cứu cho thấy, chi phí bảo trì trung bình khi áp dụng chính sách bảo trì được đề xuất trong nghiên cứu này thấp hơn 9,1% so với khi áp dụng chính sách bảo trì dự đoán truyền thống.

**Từ khóa** - Bảo trì dự đoán; bảo trì dựa trên cơ hội; sự phụ thuộc về kinh tế; sự phụ thuộc về cấu trúc

### 1. Đặt vấn đề

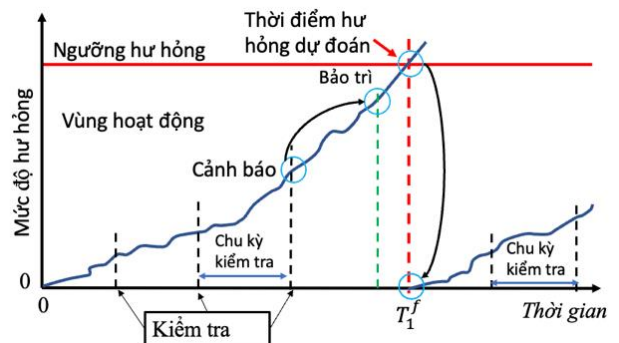
Một chính sách bảo trì hiệu quả là cần thiết để đảm bảo hệ thống sản xuất có độ tin cậy, khả năng sẵn sàng và năng suất cao. Nó có thể giảm chi phí bảo trì và tăng hiệu suất hoạt động của hệ thống sản xuất, cũng như giảm thiểu những rủi ro hư hỏng đột ngột có thể gây ra những thiệt hại to lớn về mặt kinh tế, thậm chí là sức khỏe và tính mạng con người [1]. Do đó, trong những thập kỷ gần đây, nhiều chính sách bảo trì tiên tiến đã được phát triển nhằm mục đích giảm chi phí bảo trì và giảm thiểu thời gian ngừng máy [2]. Trong đó, bảo trì dự đoán (Predictive maintenance - PdM) là nổi bật hơn cả. PdM ra quyết định bảo trì dựa trên tình trạng hư hỏng hiện tại và kết hợp với dự đoán tình trạng hư hỏng của thiết bị trong tương lai. Do đó, PdM giúp lập kế hoạch bảo trì đúng thời điểm, chỉ ngay trước khi hư hỏng xảy ra. Kết quả là nó có thể giảm chi phí bảo trì cũng như thời gian dừng máy. Hình 1 minh họa chính sách bảo trì dự đoán. Theo đó, hệ thống được kiểm tra định kỳ, và mức độ hư hỏng của thiết bị được xác định. Dựa trên mức độ hư hỏng hiện tại, PdM dự đoán thời điểm hư hỏng xảy ra và lập kế hoạch bảo trì trước khi hư hỏng xảy ra.

PdM bao gồm 3 quá trình: (1) Kiểm tra tình trạng thiết bị; (2) Mô hình hoá quá trình hư hỏng và dự đoán tuổi thọ; (3) Lập kế hoạch bảo trì [3]. Mức độ hư hỏng của thiết bị có thể quan sát được thông qua hoạt động kiểm tra các chỉ số như dao động máy, nhiệt độ, độ mòn, vv. Dựa trên mức

**Abstract** - An opportunistic predictive maintenance policy is developed for multi-component system with structural and economic dependences. According to this policy, system's components are periodically inspected at time  $T_k = k \cdot \Delta T$  ( $\Delta T > 0, k = 1, 2, \dots$ ). Upon inspection  $T_k$ , if the component is failed ( $X_i(T_k) < L_i$ ), or its predicted reliability at the next inspection is lower than the preventive maintenance threshold ( $R_i(T_{k+1}) < R_p$ ), maintenance is applied. Due to the structural dependence between components, maintenance of the above components may require disassembly of others. To reduce the risk of failure in the next inspection interval and save maintenance cost, the disassembled components are considered for maintenance if their predicted reliability at the next inspection is below the opportunistic maintenance threshold ( $R_i(T_{k+1}) < R_o, 0 < R_o < R_p < 1$ ). The simulation results show that the proposed maintenance policy is more effective than the conventional predictive maintenance one, with 9.1% maintenance cost rate lower.

**Key words** - Predictive maintenance; opportunistic maintenance; economic dependence; structural dependence

độ hư hỏng hiện tại, kết hợp với dữ liệu mức độ hư hỏng trong quá khứ, có thể xây dựng mô hình toán học để mô tả quá trình phát triển của tình trạng hư hỏng của thiết bị. Những mô hình này cũng cho phép dự đoán mức độ hư hỏng của thiết bị trong tương lai để đưa ra quyết định bảo trì hợp lý.



**Hình 1.** Minh họa chính sách bảo trì dự đoán

Tuy nhiên, hệ thống sản xuất ngày càng trở nên phức tạp, nó thường bao gồm nhiều chi tiết/bộ phận (gọi chung là các phần tử) với sự ràng buộc lẫn nhau. Các phần tử trong hệ thống sản xuất thường phụ thuộc với nhau theo ba khía cạnh [4]:

- *Sự phụ thuộc về kinh tế*: Thực hiện bảo trì nhiều phần tử đồng thời có thể giảm chi phí bảo trì trên mỗi phần tử;

<sup>1</sup> The University of Danang – University of Science and Technology (Dinh Duc Hanh, Nguyen Pham The Nhan, Tao Quang Bang, Nguyen Linh Giang)

- *Sự phụ thuộc về hư hỏng*: Hư hỏng của phần tử này có thể làm giảm tuổi thọ, hoặc gây ra hư hỏng cho các phần tử khác;

- *Sự phụ thuộc về mặt cấu trúc*: Diễn ra trong trường hợp để bảo trì một phần tử cần phải tháo dỡ các phần tử khác trong hệ thống.

Tối ưu hoá bảo trì cho hệ thống có các phần tử phụ thuộc về kinh tế đã được nghiên cứu rất sâu rộng. Để tận dụng sự phụ thuộc về kinh tế giữa các phần tử, chính sách bảo trì theo nhóm được đề xuất. Theo đó, nhiều phần tử được lập kế hoạch thực hiện bảo trì cùng nhau để tiết kiệm chi phí chuẩn bị và chi phí dừng máy, qua đó giảm chi phí bảo trì [5]. Gần đây, một số mô hình bảo trì cũng được đề xuất để nghiên cứu ảnh hưởng của sự phụ thuộc về hư hỏng đến chính sách bảo trì [6]. Cuối cùng, sự phụ thuộc về mặt cấu trúc diễn ra rất phổ biến trong thực tế, khi hầu hết các hệ thống cơ khí có cấu trúc phân cấp, để bảo trì các phần tử ở cấp thấp cần phải tháo rời các phần tử ở những cấp cao hơn. Ví dụ trong hộp giảm tốc, để bảo trì bánh răng, cần phải tháo ổ lăn. Mặc dù vậy thì nghiên cứu bảo trì cho hệ thống có sự phụ thuộc về cấu trúc vẫn chưa được thoả đáng. Sự phụ thuộc về cấu trúc thường được đơn giản hoá như một phần của sự phụ thuộc về kinh tế [7]. Zhou và cộng sự sau đó nghiên cứu chi tiết về sự phụ thuộc về cấu trúc, và xác định rằng bảo trì đồng thời các phần tử có sự phụ thuộc về cấu trúc có thể giảm thời gian bảo trì [8]. Tuy nhiên, nghiên cứu này xem xét tất cả các phần tử là như nhau khi lựa chọn phần tử để bảo trì mà chưa đề xuất một chính sách bảo trì riêng biệt cho các phần tử có sự phụ thuộc về cấu trúc. Điều này là chưa hợp lý khi xét đến đặc tính của sự phụ thuộc về cấu trúc. Đối với hệ thống có sự phụ thuộc về cấu trúc, khi bảo trì một phần tử, chỉ có một hoặc một số phần tử bị tháo, còn các phần tử khác thì không. Do đó, câu hỏi nên đặt ra là “Có nên bảo trì các phần tử bị tháo (trong trường hợp trên là ổ lăn) đồng thời với phần tử cần được bảo trì (bánh răng) hay không?”. Để trả lời câu hỏi này, nghiên cứu này đề xuất chính sách bảo trì dựa trên cơ hội cho hệ thống có sự phụ thuộc về cấu trúc và kinh tế. Theo đó, các nguyên tắc lựa chọn phần tử bảo trì cơ hội tại thời điểm mà có một hoặc một số phần tử khác đã được xác định phải bảo trì được xây dựng.

## 2. Mô hình hoá quá trình hư hỏng của hệ thống

### 2.1. Mô tả hệ thống

Hệ thống được xem xét trong nghiên cứu này bao gồm  $n$  phần tử. Các phần tử trải qua quá trình hư hỏng dần dần và liên tục, quá trình hư hỏng này có thể dẫn đến những sự cố hư hỏng đột ngột. Quá trình hư hỏng này có thể là quá trình mài mòn cơ học, ăn mòn hoá học, hay là quá trình phát triển của vết nứt, vv. [9]. Quá trình hư hỏng của các phần tử phát triển một cách liên tục và ngẫu nhiên. Do đó, mức độ xuống cấp của mỗi phần tử  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) theo thời gian được mô tả bằng biến ngẫu nhiên  $X_i(t)$ . Phần tử  $i$  được coi là hư hỏng khi mức độ hư hỏng của nó,  $X_i(t)$ , lớn hơn ngưỡng hư hỏng,  $L_i$ ,  $X_i(t) \geq L_i$ .

Để giảm thiểu tác hại của hư hỏng xảy ra, cũng như để khôi phục lại hệ thống khi có hư hỏng xảy ra, cả bảo trì phòng ngừa (PM) và bảo trì khắc phục hư hỏng (CM) đều được áp dụng. Bảo trì phòng ngừa là hành động bảo trì thực

hiện khi phần tử vẫn còn hoạt động, tức là mức độ hư hỏng của nó vẫn ở dưới ngưỡng hư hỏng,  $X_i(t) < L_i$ . Ngược lại, bảo trì khắc phục hư hỏng là hành động bảo trì thực hiện khi phần tử đã hỏng, tức là  $X_i(t) \geq L_i$ . Sau khi bảo trì, thiết bị có tình trạng như mới, tức là  $X_i(t) = 0$ .

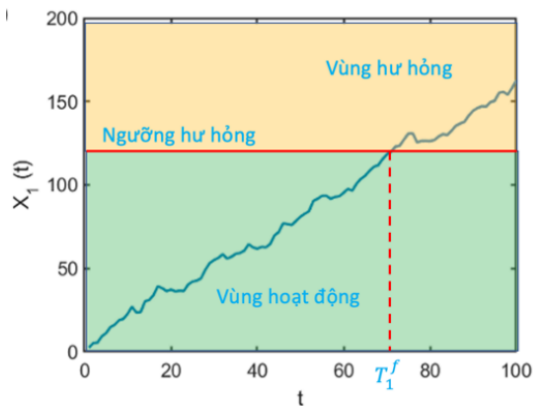
Các phần tử trong hệ thống được kết nối với nhau theo cấu trúc phân cấp gồm nhiều tầng lớp. Hệ thống có cấu trúc nối tiếp, tức là bảo trì bất cứ một phần tử nào đó thì yêu cầu dừng toàn bộ hệ thống.

### 2.2. Mô hình hoá quá trình hư hỏng

Quá trình hư hỏng của các phần tử có thể được mô tả bằng nhiều mô hình khác nhau, như mô hình Wiener, mô hình Markov, hay mô hình Gamma [10]. Trong đó, mô hình Wiener là phổ biến hơn cả. Mô hình Wiener mô tả quá trình hư hỏng không đơn điệu, với nhiễu có kiểu phân bố chuẩn. Mô hình này phù hợp để mô tả quá trình hư hỏng mà tình trạng hư hỏng được kiểm tra bởi các cảm biến có nhiễu. Mô hình Wiener đã được áp dụng rất phổ biến cả trong nghiên cứu và thực tiễn [10]. Theo đó, quá trình hư hỏng theo thời gian của phần tử  $i$  được mô tả như sau:

$$X_i(t) = x_i^0 + \mu_i \cdot t + \sigma_i \cdot B(t) \quad (1)$$

Trong đó,  $X_i(t)$  là mức độ hư hỏng tại thời điểm  $t$ ;  $x_i^0$  là mức độ hư hỏng ban đầu ( $t=0$ );  $\mu_i$  và  $\sigma_i$  là tốc độ và độ biến động của quá trình hư hỏng, các thông số này có thể ước lượng được từ hư hỏng trong quá khứ của thiết bị [11], trong nghiên cứu này nhóm tác giả giả sử  $\mu_i$  và  $\sigma_i$  là đã biết trước;  $B(t)$  là chuyển động Brownian chuẩn. Hình 2 mô tả quá trình hư hỏng của một phần tử với  $x_i^0 = 2,5$ ,  $\mu_i = 1,5$ ,  $\sigma_i = 1,2$  và ngưỡng hư hỏng  $L_i = 120$ .



Hình 2. Quá trình hư hỏng của thiết bị

Thời điểm hư hỏng của phần tử được xác định là thời điểm mà mức độ hư hỏng của nó vượt qua ngưỡng hư hỏng,  $X_i(t) \geq L_i$ , được xác định như sau:

$$T_i^f = \inf\{t: X_i(t) \geq L_i | x_i^0 \leq L_i\} \quad (2)$$

Khi đó,  $T_i^f$  tuân theo phân bố nghịch đảo Gaussian, với hàm mật độ xác suất được cho dưới đây:

$$f_i(t) = \frac{L_i - x_i^0}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2 t^3}} \exp\left(-\frac{(L_i - (x_i^0 + \mu_i t))^2}{2\sigma_i^2 t}\right) \quad (3)$$

Độ tin cậy của phần tử tại thời điểm  $t$  trong tương lai tương ứng với mức độ hư hỏng hiện tại  $x_i^0$  được định nghĩa là xác suất có điều kiện mà thiết bị đó vẫn còn hoạt động tại thời điểm  $t$ , tức là  $X_i(t) < L_i$ , được xác định như sau:

$$R_i(t) = P[X_i(t) \leq L_i | x_i^0] = \Phi \left( \frac{(L_i - (x_i^0 + \mu_i \cdot t))}{\sigma_i \cdot \sqrt{t}} \right) - \exp \left( \frac{2\mu_i(L_i - x_i^0)}{\sigma_i^2} \right) \Phi \left( -\frac{(L_i - x_i^0 + \mu_i \cdot t)}{\sigma_i \cdot \sqrt{t}} \right) \quad (4)$$

Trong đó,  $\Phi(\cdot)$  là hàm phân phối xác suất tích lũy của phân phối chuẩn Gaussian.

**2.3. Mô hình hoá sự phụ thuộc về kinh tế**

Thực hiện bảo trì phòng ngừa đối với phần tử  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) có chi phí là

$$C_i^p = c^s + c_i^p + c_i^d \quad (5)$$

Trong đó,

-  $c^s$  là chi phí chuẩn bị, bao gồm chi phí di chuyển, lắp đặt giàn giáo, vv. Chi phí này có thể được chia sẻ khi nhiều phần tử bảo trì đồng thời;

-  $c_i^p$  là chi phí bảo trì phòng ngừa tự nhiên của phần tử  $i$ , chỉ phụ thuộc vào đặc tính của phần tử này, ví dụ chi phí mua sắm vật tư thay thế.

-  $c_i^d$  là chi phí dừng máy, nó phụ thuộc vào thời gian bảo trì,  $\tau_i$ , và chi phí dừng máy đơn vị. Trong đó,  $\tau_i$  bao gồm thời gian sửa chữa  $\tau_i^r$ , và thời gian tháo lắp  $\tau_i^d$ .

$$c_i^d = c^d \cdot \tau_i = c^d \cdot (\tau_i^r + \tau_i^d) \quad (6)$$

Trong đó, thời gian tháo lắp  $\tau_i^d$  được tính bằng tổng thời gian tháo lắp của tất cả của những phần tử cần phải tháo để có thể bảo trì phần tử  $i$ , điều này sẽ được trình bày rõ hơn trong mục 2.4.

Tương tự, thực hiện bảo trì phản ứng hư hỏng (CM) với phần tử  $i$  có chi phí là:

$$C_i^c = c^s + c_i^c + c_i^d \quad (7)$$

Với  $c_i^c$  là chi phí bảo trì hư hỏng tự nhiên của phần tử  $i$ . Bởi vì, hư hỏng là ngẫu nhiên nên việc đặt hàng mua sắm vật tư thay thế có chi phí đắt hơn, do đó, ( $c_i^p < c_i^c$ ).

Khi thực hiện bảo trì đồng thời một nhóm nhiều phần tử cùng nhau, chi phí chuẩn bị bảo trì có thể được chia sẻ do sự phụ thuộc về kinh tế và cấu trúc giữa các phần tử. Do đó, chi phí bảo trì của nhóm gồm nhiều phần tử là:

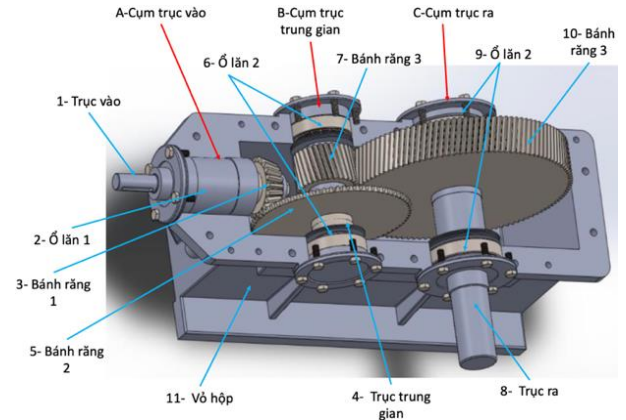
$$C_{G^k} = \sum_{i \in G^k} [C_i^c \cdot I_i^c + C_j^p \cdot (1 - I_j^c)] - (|G^k| - 1) \cdot c^s - \Delta \tau_{G^k} \cdot c^d \quad (8)$$

Trong đó,  $I_i^c = 1$  nếu hoạt động bảo trì là phản ứng hư hỏng, ngược lại  $I_i^c = 0$ ;  $|G^k|$  là số lượng phần tử trong nhóm  $G^k$  và  $(|G^k| - 1) \cdot c^s$  và  $\Delta \tau_{G^k}$  là chi phí và thời gian dừng máy tiết kiệm được khi bảo trì đồng thời nhiều phần tử cùng nhau nhờ sự phụ thuộc về kinh tế và cấu trúc giữa các phần tử.

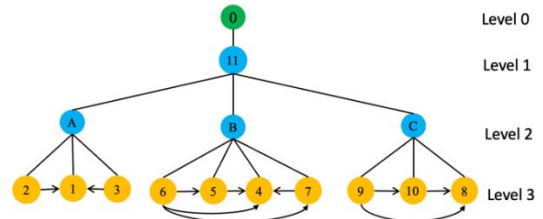
**2.4. Mô hình hoá sự phụ thuộc về cấu trúc**

Các phần tử trong hệ thống được kết nối với nhau theo cấu trúc phân cấp gồm nhiều tầng. Có trật tự trong việc tháo lắp các phần tử. Thứ tự tháo lắp giữa các phần tử được biểu diễn bằng sơ đồ tháo lắp. Sơ đồ này bao gồm các nút mô tả các phần tử hoặc cụm phần tử, và các cạnh có hướng hoặc không có hướng để biểu diễn thứ tự tháo lắp giữa các phần tử. Có 3 loại nút, nút ruột, ký hiệu là 0, dùng để mô tả hệ

thống, nút trung gian, ký hiệu bằng chữ cái, mô tả cụm phần tử, và nút lá, ký hiệu bằng số, dùng để mô tả phần tử có mức thấp nhất. Các phần tử được kết nối bởi các cạnh, trong đó cạnh kết nối phần tử từ nút ở tầng cao hơn xuống nút ở tầng thấp hơn có nghĩa là để bảo trì nút thấp hơn, cần phải tháo nút ở tầng cao hơn. Đối với các nút nằm cùng tầng, cạnh có mũi tên nghĩa là để bảo trì nút có mũi tên hướng đến thì cần tháo nút ở đầu mũi tên. Ngược lại, nếu cạnh không có mũi tên nghĩa là tháo một nút thì nút còn lại cũng bị tháo. Hình 4 minh hoạ sơ đồ tháo lắp của một hộp giảm tốc côn-trụ 2 cấp, biết rằng cấu trúc của nó được mô tả trong Hình 3. Theo sơ đồ này, để bảo trì chi tiết 5-bánh răng 2 ở cụm trục trung gian-B, đầu tiên cần phải tháo nắp vỏ hộp-11, sau đó tháo chi tiết 6-ổ lăn 2.



Hình 3. Hộp giảm tốc



Hình 4. Sơ đồ tháo lắp của hộp giảm tốc

Để biểu diễn bằng toán học thứ tự tháo lắp của hệ thống, ma trận tháo lắp được áp dụng. Ma trận tháo lắp của hệ thống được xác định là  $D = [D_{ij}]_{n \times n}$ , với  $D_{ij} = 1$  nếu bảo trì phần tử  $i$  cần phải tháo phần tử  $j$ , ngược lại  $D_{ij} = 0$ . Ví dụ, Hình 5 biểu diễn ma trận tháo lắp của hộp giảm tốc.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1
2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
4	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1
5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
6	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1
7	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1
8	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Hình 5. Ma trận tháo lắp của hộp giảm tốc

Khi đó, thời gian tháo lắp của phần tử  $i$  được xác định như sau:

$$\tau_i^d = \sum_{j=1}^n D_{ij} \cdot \tau_j^{d0} \quad (9)$$

Với,  $\tau_j^{d0}$  là thời gian tháo lắp của riêng phần tử  $j$  mà không tính đến các phần tử khác.

Khi bảo trì đồng thời một nhóm  $G^k$  gồm nhiều phần tử thì thời gian tháo lắp tiết kiệm được so với bảo trì riêng rẽ từng phần tử là:

$$\Delta\tau_{G^k} = \sum_{j=1}^n \tau_j^{d0} \cdot \max(\sum_{i \in G^k} D_{ij} - 1, 0) \quad (10)$$

### 3. Chính sách bảo trì dự đoán dựa trên cơ hội

#### 3.1. Mô tả chính sách bảo trì

Theo chính sách bảo trì dự đoán, tình trạng hư hỏng của các phần tử được kiểm tra định kỳ tại thời điểm  $T_k = k \cdot \Delta T$ , ( $k = 1, 2, \dots$ ), với  $\Delta T$  là chu kỳ kiểm tra. Do việc kiểm tra tiêu tốn một khoản chi phí kiểm tra là  $c_{kt}$ , nên giá trị của  $\Delta T$  cũng ảnh hưởng đến tổng chi phí bảo trì trong suốt vòng đời của phần tử. Vì thế cần phải xác định giá trị tối ưu của  $\Delta T$  để chi phí bảo trì là thấp nhất. Tại thời điểm kiểm tra thứ  $k^{th}$ , mức độ hư hỏng của mỗi phần tử được xác định, sau đó độ tin cậy của thiết bị tại thời điểm kiểm tra thứ  $k+1$ ,  $R_i(T_{k+1})$ , ( $T_{k+1} = (k+1) \cdot \Delta T$ ) được dự đoán theo công thức (4). Độ tin cậy của thiết bị là chỉ số liên quan mật thiết đến dự đoán thời điểm hư hỏng của thiết bị. Dựa trên mức độ xuống cấp hiện tại và kết quả dự đoán độ tin cậy của phần tử trong tương lai, quyết định bảo trì được thực hiện gồm 2 bước như sau:

- *Bước 1. Bảo trì hư hỏng và/hoặc bảo trì phòng ngừa:* Nếu phần tử được xác định là đã hư hỏng ( $X_i(T_k) \geq L_i$ ), hành động bảo trì phản ứng hư hỏng (CM) được áp dụng ngay lập tức hoặc nếu phần tử vẫn còn hoạt động ( $X_i(T_k) < L_i$ ) nhưng độ tin cậy của nó tại thời điểm  $T_{k+1}$  bé hơn ngưỡng bảo trì phòng ngừa  $R_p$ , ( $R_i(T_{k+1}) < R_p$ ),  $0 < R_p < 1$ , phần tử này sẽ được bảo trì phòng ngừa (PM) tại lần kiểm tra thứ  $k^{th}$ .  $R_p$  cũng là một thông số cần được tối ưu để giảm thiểu chi phí bảo trì.

Nếu trong bước 1, có ít nhất một phần tử cần phải thực hiện bảo trì (PM hoặc CM) tại lần kiểm tra thứ  $k^{th}$ . Để bảo trì phần tử này, yêu cầu cả hệ thống phải dừng hoạt động, đồng thời có thể có một hoặc một số phần tử sẽ bị tháo rời. Khi đó, các phần tử bị tháo rời này được xem xét bảo trì cơ hội nhằm giảm thiểu rủi ro hư hỏng xảy ra và tiết kiệm chi phí dừng máy cũng như chi phí chuẩn bị bảo trì nhờ sự phụ thuộc về kinh tế và cấu trúc giữa các phần tử.

- *Bước 2. Bảo trì cơ hội:* Nếu phần tử  $j$  ( $j \neq i$ ) bị tháo rời để bảo trì cho phần tử  $i$  trong bước 1 và độ tin cậy của nó tại thời điểm kiểm tra thứ  $T_{k+1}$  thấp hơn ngưỡng bảo trì cơ hội  $R_o$ ,  $R_p < R_j(T_{k+1}) < R_o < 1$ , nó sẽ được bảo trì cơ hội cùng với phần tử  $i$  trong lần kiểm tra thứ  $k^{th}$ ,  $R_o$  cũng là một thông số cần được tối ưu.

Thuật toán ra quyết định bảo trì tại thời điểm kiểm tra thứ  $k$  được cho dưới đây:

**Thuật toán 1:** Ra quyết định bảo trì tại thời điểm kiểm tra thứ  $k$ :

**Input:** Mức độ xuống cấp của các phần tử  $X_i(T_k)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $L_i$ ,  $R_p$ , ma trận tháo lắp  $D$ .

**Output:** Nhóm các phần tử cần được bảo trì tại thời điểm kiểm tra thứ  $k$ ,  $G^k$

**for** ( $i = 1 \rightarrow n$ ) **do**

**if**  $X_i(T_k) \geq L_i$  **do**

$i \in G^{CM}$ ,  $X_i(T_k) \leftarrow 0$

**elseif**  $R_i(T_{k+1}) < R_p$  **do**

$i \in G^{PM}$ ,  $X_i(T_k) \leftarrow 0$

**end if**

$G^{PM/CM} \leftarrow G^{PM} \cup G^{CM}$

**end for**

Kết quả là nhóm các phần tử cần được bảo trì hư hỏng hoặc phòng ngừa tại thời điểm kiểm tra thứ  $k$ ,  $G^{PM/CM}$

**for** ( $j = 1 \rightarrow n$ ) **do**

**if**  $D_{ij} = 1, \exists i \in G^{PM/CM} \ \&\& \ R_j(T_{k+1}) < R_p$  **do**

$j \in G^{OM}$ ,  $X_j(T_k) \leftarrow 0$

**end if**

**end for**

$G^k \leftarrow G^{OM} \cup G^{PM/CM}$

**Return**  $G^k$

#### 3.2. Tối ưu hoá kế hoạch bảo trì

Như đã mô tả trong Mục 2, chính sách bảo trì bao gồm 3 thông số cần được tối ưu, bao gồm chu kỳ kiểm tra  $\Delta T$ , ngưỡng bảo trì phòng ngừa,  $R_p$ , và ngưỡng bảo trì cơ hội  $R_o$ . Để xác định giá trị tối ưu của các thông số này, chi phí bảo trì trung bình của hệ thống được dùng làm hàm mục tiêu để tối ưu hoá. Chi phí bảo trì trung bình được xác định như sau:

$$C_\infty(\Delta T, R_p, R_o) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{C^t(\Delta T, R_p, R_o)}{t} \quad (11)$$

Trong đó,  $C^t(\Delta T, R_p, R_o)$  là tổng chi phí bảo trì trong khoảng thời gian  $(0, t)$ . Theo lý thuyết phục hồi, chi phí bảo trì trung bình có thể được viết lại thành:

$$C_\infty(\Delta T, R_p, R_o) = \frac{\mathbb{E}[\sum_{k=1}^N (C_{kt}^k + C_{G^k} + C_{lost}^k)]}{\mathbb{E}[t_{end}]} \quad (12)$$

Trong đó,  $\mathbb{E}[\cdot]$  là ký hiệu kỳ vọng của biến ngẫu nhiên;  $t_{end}$  là độ dài của vòng đời đầu tiên của hệ thống, tức là thời điểm mà toàn bộ phần tử trong hệ thống được bảo trì cùng lúc. Vì phần tử chỉ có thể bảo trì tại thời điểm kiểm tra, nên chúng ta giả sử rằng  $t_{end} = N \cdot \Delta T$ , với  $N$  là số lần kiểm tra trong suốt vòng đời của hệ thống;  $C_{kt}^k$  là chi phí kiểm tra lại lần kiểm tra thứ  $k$ ;  $C_{G^k}$  là chi phí bảo trì tại lần kiểm tra thứ  $k$ , được xác định theo công thức (8);  $C_{lost}^k$  là chi phí do hư hỏng của hệ thống xảy ra giữa lần kiểm tra thứ  $(k-1)$  và  $k$ , được xác định bởi

$$C_{lost}^k = (\tau - \max(T_k - T_i^f)) \cdot c^{lost} \quad (13)$$

Với,  $c^{lost}$  là chi phí đơn vị do hư hỏng của hệ thống gây ra.

Giá trị tối ưu của các thông số bảo trì bao gồm  $\Delta T$ ,  $R_p$ , và  $R_o$  được xác định bằng cách tối thiểu hoá chi phí bảo trì trung bình,

$$C_\infty^*(\Delta T^*, R_p^*, R_o^*) = \min_{(\Delta T, R_p, R_o)} C_\infty(\Delta T, R_p, R_o), (0 < \Delta T < \Delta T_{max}, 0 < R_p < 1, R_p < R_o < 1) \quad (14)$$

Vì mỗi phần tử cần được kiểm tra ít nhất một lần trong



vòng đời của nó, do đó  $\Delta T_{max} = \mathbb{E}[T_i^f | x_i^0 = 0]$ .

Để xác định giá trị tối ưu của các tham số bảo trì phương pháp mô phỏng Monte Carlo được tiến hành. Thuật toán mô phỏng Monte Carlo như sau:

**Thuật toán 2:** Mô phỏng Monte Carlo

**Input:** Số lần mô phỏng  $M$ , tổng số lần kiểm tra  $N$ , các thông số về quá trình hư hỏng và chi phí bảo trì,  $\mu_i$ ,  $\sigma_i$ ,  $D$ ,  $C_i^p$ ,  $C_i^c$ ,  $c^{lost}$ ,  $c_{kt}$ .

**Output:** Chu kỳ kiểm tra  $\Delta T$ , ngưỡng bảo trì phòng ngừa và bảo trì cơ hội,  $R_p$  và  $R_o$

**for** ( $z = 1 \rightarrow M$ ) **do**

$\Delta T^z \leftarrow \Delta T_{max}.rand()$ ,  $R_p^z \leftarrow rand()$ ,  $R_o^z = (1 - R_p^z).rand() + R_p^z$

**for** ( $k = 1 \rightarrow N$ ) **do**

$X_i(T_k) \leftarrow X_i(T_{k-1}) + \mu_i \cdot \Delta T^z + \sigma_i \cdot B(\Delta T^z)$

Xác định các phần tử cần bảo trì tại thời điểm kiểm tra thứ  $k$ ,  $G^k$  bằng **thuật toán 1**

$C^z \leftarrow C^z + C_{kt}^k + C_{G^k} + C_{lost}^k$

**end for**

$C_{\infty}^z(\Delta T, R_p, R_o) \leftarrow \frac{C^z}{N \cdot \Delta T^z}$

**end for**

$C_{\infty}^*(\Delta T^*, R_p^*, R_o^*) \leftarrow \min_{(\Delta T, R_p, R_o)} C_{\infty}^z(\Delta T, R_p, R_o)$

**Return**  $\Delta T^*, R_p^*, R_o^*$

Kết quả là giá trị tối ưu của chu kỳ kiểm tra,  $\Delta T^*$ , ngưỡng bảo trì phòng ngừa và bảo trì cơ hội  $R_p^*$  và  $R_o^*$  tương ứng với chi phí bảo trì trung bình thấp nhất  $C_{\infty}^*(\Delta T^*, R_p^*, R_o^*)$ .

## 4. Kết quả nghiên cứu

### 4.1. Số liệu ban đầu

Chính sách bảo trì đề xuất trong nghiên cứu này được áp dụng cho hệ dẫn động cơ khí có cấu tạo, sơ đồ và ma trận tháo lắp được trình bày trong các Hình 2, 3 và 4. Các thông số về quá trình xuống cấp và chi phí liên quan đến bảo trì được trình bày trong Bảng 1. Các thông số này có thể được xác định dựa vào quá trình bảo trì trong quá khứ.

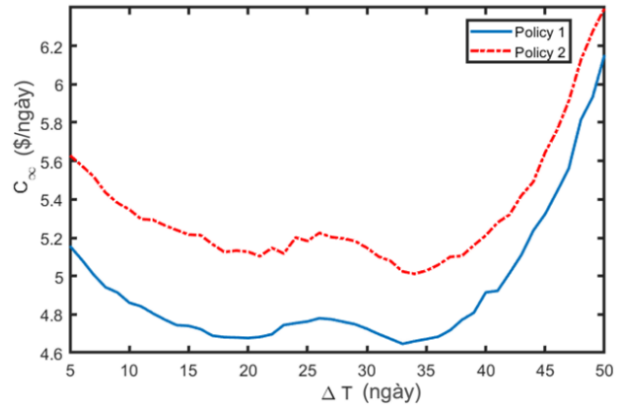
**Bảng 1.** Các thông số của mô hình bảo trì

Phần tử	$\mu_i$	$\sigma_i$	$L_i$	$c_i^p$ (\$)	$c_i^c$ (\$)	$\tau_i^{d0}$ (h)	$\tau_i^r$ (h)	$c^{lost}$ (\$/ngày)	$c_{kt}$ (\$)	$c^s$ (\$)	$c^d$ (\$/h)
1	1,2	1,5	180	15	45	2	2	15	4	8	4
2	2,2	2	100	4	12	1	1				
3	1,5	1,8	120	10	30	2	2				
4	1,1	1,5	180	16	50	2	2				
5	1,8	2,0	100	4,5	15	1	1				
6	1,6	1,6	120	20	60	2	2				
7	1,4	1,5	120	10	30	2	2				
8	1,0	1,4	180	18	52	2	2				
9	1,6	1,8	100	5	16	1	1				
10	1,2	1,5	120	18	58	2	2				
11	0,4	0,6	200	25	68	5	5				

### 4.2. Kết quả nghiên cứu

Sau khi thực hiện thuật toán mô phỏng Monte Carlo trình bày trong Mục 3.2, các thông số tối ưu của mô hình bảo trì được xác định, chu kỳ kiểm tra  $\Delta T^* = 33,0$  (ngày), ngưỡng bảo trì phòng ngừa và bảo trì cơ hội  $R_p^* = 0,70$  và  $R_o^* = 0,86$  tương ứng với chi phí bảo trì trung bình tối ưu  $C_{\infty}^*(\Delta T^*, R_p^*, R_o^*) = 4,62$  (\$/ngày). Hình 6 (đường nét liền) biểu diễn chi phí trung bình tương ứng với các giá trị khác nhau của chu kỳ kiểm tra khi áp dụng chính sách bảo trì dự đoán dựa trên cơ hội được đề xuất trong nghiên cứu này (Policy 1). Ta thấy rằng, chi phí bảo trì trung bình thấp nhất tại  $\Delta T^* = 33,00$  (ngày).

Để kiểm tra tính ưu việt của chính sách bảo trì dự đoán dựa trên cơ hội được đề xuất trong nghiên cứu này, nhóm tác giả thực hiện so sánh chi phí bảo trì trung bình tối ưu đạt được trong nghiên cứu này với chi phí bảo trì trung bình khi áp dụng chính sách bảo trì dự đoán thông thường được áp dụng trong nhiều nghiên cứu trước đó như trong Zhao và cộng sự [12] (Policy 2). Đối với chính sách bảo trì dự đoán thông thường, việc ra quyết định bảo trì tương tự bước 1 của chính sách bảo trì dự đoán dựa trên cơ hội, tức là không áp dụng bảo trì cơ hội. Như vậy, các thông số của mô hình bảo trì này bao gồm chu kỳ kiểm tra  $\Delta T$  và ngưỡng bảo trì phòng ngừa  $R_p$ . Thuật toán mô phỏng Monte Carlo cũng được áp dụng để xác định thông số tối ưu của chính sách bảo trì dự đoán thông thường, với các giá trị tối ưu thu được là  $\Delta T^* = 34,00$  (ngày),  $R_p^* = 0,72$  tương ứng với chi phí bảo trì trung bình là  $C_{\infty}^*(\Delta T^*, R_p^*) = 5,04$  (\$/ngày). Giá trị chi phí bảo trì trung bình của chính sách bảo trì này cao hơn (9,1%) so với chính sách bảo trì phòng ngừa dựa trên cơ hội được đề xuất trong nghiên cứu này.



**Hình 6.** Chi phí bảo trì trung bình

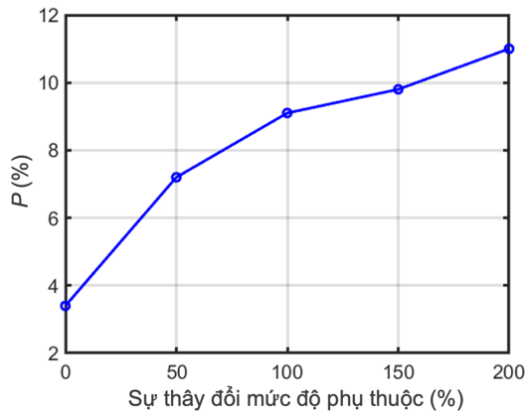
Hình 6 (đường nét đứt) thể hiện chi phí bảo trì trung bình của chính sách bảo trì dự đoán truyền thống (Policy 2) tương ứng với các giá trị khác nhau của chu kỳ kiểm tra. Ta thấy rằng, chính sách bảo trì dự đoán dựa trên cơ hội luôn có chi phí bảo trì trung bình thấp hơn so với chính sách bảo trì phòng ngừa thông thường.

Để khảo sát ảnh hưởng của mức độ phụ thuộc về cấu trúc giữa các phần tử đến tính hiệu quả của chính sách bảo trì dự đoán dựa trên cơ hội, tính hiệu quả của chính sách bảo trì được khảo sát với các giá trị khác nhau của mức độ phụ thuộc về cấu trúc. Tính hiệu quả của chính sách bảo trì cơ hội, ký hiệu là  $P$ , được xác định như sau:

$$P = \frac{C_{\infty}^*(\Delta T^*, R_p^*) - C_{\infty}^*(\Delta T^*, R_p^*, R_o^*)}{C_{\infty}^*(\Delta T^*, R_p^*, R_o^*)} \cdot 100\% \quad (14)$$

Trong đó,  $C_{\infty}^*(\Delta T^*, R_p^*)$  và  $C_{\infty}^*(\Delta T^*, R_p^*, R_o^*)$  là chi phí bảo trì trung bình tối ưu khi áp dụng chính sách bảo trì dự đoán truyền thống và chính sách bảo trì dựa trên cơ hội.

Lưu ý rằng, mức độ phụ thuộc về cấu trúc giữa các phần tử được thể hiện thông qua thời gian tháo lắp của các phần tử,  $\tau_i^{d0}$ . Hình 7 diễn tả sự thay đổi của tính hiệu quả của chính sách bảo trì với các giá trị khác nhau (0%, 50%, 100%, 150%, 200%) của thời gian tháo lắp. Mức X% nghĩa là giá trị của thời gian tháo lắp tương đương X% so với dữ liệu  $\tau_i^{d0}$  cho trong Bảng 1. Kết quả cho thấy, khi tăng mức độ phụ thuộc về cấu trúc, tính hiệu quả của chính sách bảo trì dự đoán dựa trên cơ hội so với chính sách bảo trì dự đoán truyền thống tăng lên. Điều này có thể được giải thích là do mức độ tiết kiệm chi phí bảo trì của chính sách bảo trì dự đoán dựa trên cơ hội chủ yếu phụ thuộc vào thời gian tháo lắp tiết kiệm được khi bảo trì cơ hội. Một điều đáng chú ý nữa là khi mức độ phụ thuộc giảm về 0, tính hiệu quả của chính sách bảo trì dựa trên cơ hội không giảm về 0. Điều này có thể được lý giải là vì ngoài tiết kiệm chi phí dừng máy nhờ sự phụ thuộc về cấu trúc, bảo trì cơ hội cũng giúp tiết kiệm chi phí chuẩn bị nhờ sự phụ thuộc về kinh tế.



Hình 7. Tính hiệu quả của chính sách bảo trì cơ hội khi mức độ phụ thuộc về cấu trúc thay đổi

## 5. Kết luận

Nghiên cứu này đã xây dựng thành công chính sách bảo trì dự đoán dựa trên cơ hội cho hệ thống cơ khí bao gồm nhiều phần tử có sự phụ thuộc về cấu trúc và kinh tế. Kết quả mô phỏng số cho thấy, chi phí bảo trì trung bình của hệ thống khi áp dụng chính sách bảo trì được phát triển trong bài báo này thấp hơn đáng kể (9,1% trong trường hợp hợp giảm tốc với dữ liệu được cho) so với khi áp dụng

chính sách bảo trì dự đoán truyền thống. Trong các nghiên cứu tiếp theo, nhóm tác giả sẽ tiếp tục khảo sát chính sách bảo trì dự đoán cho hệ thống nhiều phần tử có sự phụ thuộc cả về cấu trúc, kinh tế và hư hỏng.

## Lời cảm ơn:

Bài báo này được tài trợ bởi Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng với đề tài có mã số: T2022-02-32.

Các tác giả cũng cảm ơn những người phản biện đã có những nhận xét hữu ích, giúp các tác giả nâng cao chất lượng bài báo.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] De Jonge, Bram, and Philip A. Scarf. "A review on maintenance optimization". *European journal of operational research* 285.3, 2020, 805-824.
- [2] Nguyen, Kim-Anh, Phuc Do, and Antoine Grall. "Multi-level predictive maintenance for multi-component systems". *Reliability engineering & system safety* 144, 2015, 83-94.
- [3] Dinh, Duc-Hanh. *Opportunistic predictive maintenance for multi-component systems with multiple dependences*. Diss. Université de Lorraine, 2021.
- [4] Keizer, Minou CA Olde, Simme Douwe P. Flapper, and Ruud H. Teunter. "Condition-based maintenance policies for systems with multiple dependent components: A review". *European Journal of Operational Research* 261.2, 2017, 405-420.
- [5] Keizer, Minou CA Olde, Ruud H. Teunter, and Jasper Veldman. "Clustering condition-based maintenance for systems with redundancy and economic dependencies". *European Journal of Operational Research* 251.2, 2016, 531-540.
- [6] Shi, Hui, and Jianchao Zeng. "Real-time prediction of remaining useful life and preventive opportunistic maintenance strategy for multi-component systems considering stochastic dependence". *Computers & Industrial Engineering* 93, 2016, 192-204.
- [7] Van Horenbeek, A., & Pintelon, L., A dynamic predictive maintenance policy for complex multi-component systems. *Reliability engineering & system safety*, 120, 2013, 39-50.
- [8] Zhou, X., Huang, K., Xi, L., & Lee, J., Preventive maintenance modeling for multi-component systems with considering stochastic failures and disassembly sequence. *Reliability Engineering & System Safety*, 142, 2015, 231-237.
- [9] Nguyen, Khanh TP, Mitra Fouladirad, and Antoine Grall. "Model selection for degradation modeling and prognosis with health monitoring data". *Reliability Engineering & System Safety* 169, 2018, 105-116.
- [10] Letot, Christophe, et al. "A degradation model for maintenance improvement in respect of cost and availability". *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 21.1, 2015, 55-69.
- [11] Wang, Wenbin, et al. "A model for residual life prediction based on Brownian motion with an adaptive drift". *Microelectronics Reliability* 51.2, 2011, 285-293.
- [12] Zhao, Zhen, et al. "Predictive maintenance policy based on process data". *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 103.2, 2010, 137-146.