

# BẢO TRÌ DỰ ĐOÁN VỚI MÔ HÌNH KIỂM TRA CÓ CHU KỲ THAY ĐỔI

## PREDICTIVE MAINTENANCE WITH NON-PERIODIC INSPECTION MODEL

Đinh Đức Hạnh\*, Tào Quang Bằng, Trần Minh Trí, Nguyễn Phạm Thế Nhân

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

\*Tác giả liên hệ / Corresponding author: ddhanh@dut.udn.vn

(Nhận bài / Received: 09/12/2024; Sửa bài / Revised: 05/02/2025; Chấp nhận đăng / Accepted: 20/02/2025)

DOI: 10.31130/ud-jst.2025.501

**Tóm tắt** - Bảo trì dự đoán (PdM) là một hướng đi tiềm năng giúp giảm khả năng hư hỏng xảy ra. Đối với PdM, giám sát tình trạng (GSTT) hư hỏng của thiết bị đóng vai trò quan trọng. Thông tin có được nhờ GSTT được sử dụng để dự đoán tuổi thọ và lập kế hoạch bảo trì cho thiết bị. Tuy nhiên, chi phí cho GSTT tương đối đắt đỏ, chiếm tỉ trọng đáng kể trong tổng chi phí bảo trì. Nhằm giảm thiểu chi phí GSTT, bài báo này phát triển mô hình GSTT với chu kỳ thay đổi dựa trên mức độ hư hỏng của thiết bị. Theo đó, khi mức độ hư hỏng của thiết bị còn thấp, chu kỳ GSTT có thể dài nhằm mục đích giảm chi phí giám sát. Khi mức độ hư hỏng tăng lên, chu kỳ GSTT ngắn lại, giảm khả năng hư hỏng xảy ra. Để đánh giá tính hiệu quả, mô hình này được áp dụng cho kiểm tra và bảo trì cánh tua bin nhà máy thủy điện. Kết quả cho thấy, mô hình được đề xuất trong nghiên cứu này giảm thiểu đáng kể chi phí bảo trì.

**Từ khóa** - Bảo trì dự đoán; kiểm tra tình trạng; kiểm tra có chu kỳ thay đổi; tối ưu hoá bảo trì

### 1. Đặt vấn đề

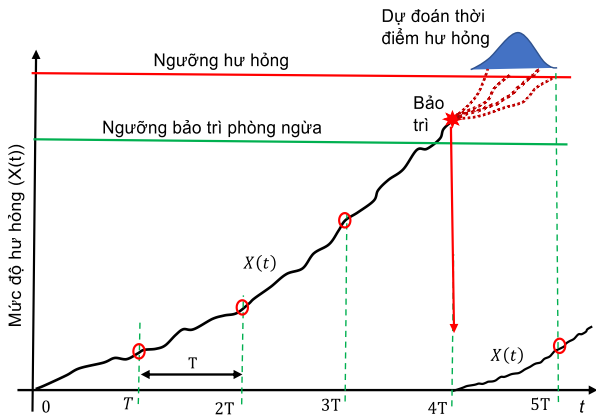
Bảo trì dự đoán lập kế hoạch bảo trì dựa trên thông tin dự đoán về thời điểm hư hỏng xảy ra. Do đó, bảo trì dự đoán có thể thực hiện bảo trì thiết bị trước khi hư hỏng xảy ra, nhưng lại gần thời điểm hư hỏng xảy ra. Điều này cho phép phòng ngừa tối đa hư hỏng xảy ra và kéo dài tối đa tuổi thọ của thiết bị. Để có thể dự đoán được thời điểm thiết bị hư hỏng, tình trạng hư hỏng của thiết bị cần phải được kiểm tra thường xuyên. Do đó, kiểm tra tình trạng thiết bị đóng vai trò quan trọng, đảm bảo cho sự thành công của bảo trì dự đoán [1]. Tuy nhiên, chi phí cho GSTT thiết bị tương đối đắt đỏ, chiếm tỉ trọng đáng kể trong tổng chi phí bảo trì hệ thống. Nghiên cứu của Kim và cộng sự chỉ ra rằng, bảo trì dự đoán chi thật sự hiệu quả hơn bảo trì phòng ngừa định kỳ nếu chi phí kiểm tra không quá đắt đỏ [2]. Do đó, nhiều mô hình kiểm tra đã được đề xuất hướng đến mục tiêu tối giản chi phí kiểm tra [3]. Các mô hình kiểm tra hiện nay có thể được chia thành ba loại: kiểm tra liên tục, kiểm tra gián đoạn với chu kỳ cố định và kiểm tra gián đoạn với chu kỳ thay đổi. Kiểm tra liên tục có thể nói là mô hình kiểm tra hiệu quả nhất để có thể phát hiện những dấu hiệu hư hỏng của thiết bị, trên cơ sở đó, thực hiện bảo trì trước khi hư hỏng xảy ra [4-5]. Đối với mô hình này, thông tin về tình trạng hư hỏng của thiết bị được cung cấp liên tục theo thời gian thực thông qua các cảm biến lắp trực tiếp bên trong thiết bị. Tuy nhiên, việc lắp đặt các cảm biến có thể khiến giá thành thiết bị tăng cao. Hơn nữa, việc lắp đặt các cảm biến lên các thiết

**Abstract** - Predictive maintenance (PdM) is a promising approach for preventing the system failure. In PdM, health condition monitoring plays an important role in system lifetime prediction and maintenance planning. However, inspection may be costly, representing a significant proportion of overall maintenance cost. To reduce inspection cost, this study proposes a non-periodic inspection model. Accordingly, when systems's degradation level is low, the inspection interval is long to reduce the inspection cost. As the system's degradation increases, the inspection interval should be shortened to reduce system's failure risk. To demonstrate the benefits and applicability of the proposed model, a study on maintenance optimization for turbine's propeller is conducted. The findings indicates that, the suggested model can substantially lower the maintenance costs of the system.

**Key words** - Predictive maintenance; health condition monitoring; non-periodic inspection; maintenance optimization

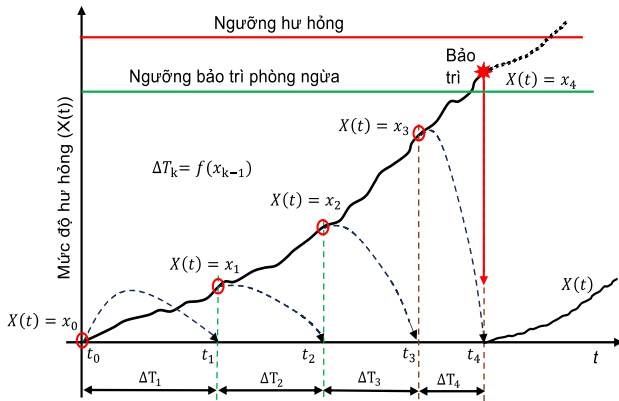
bị có sẵn là rất khó, trong một số trường hợp là không thể [6-7]. So với mô hình kiểm tra liên tục, mô hình kiểm tra gián đoạn có chu kỳ cố định có chi phí thấp hơn và dễ dàng áp dụng vào thực tế hơn [8]. Theo đó, quá trình kiểm tra được thực hiện theo định kỳ với một chu kỳ cố định (Hình 1). Thiết bị sẽ được bảo trì phòng ngừa khi mức độ hư hỏng vượt ngưỡng bảo trì phòng ngừa nhưng chưa vượt ngưỡng hư hỏng. Ngưỡng bảo trì phòng ngừa được xác định dựa vào dự đoán tuổi thọ của thiết bị, sao cho nếu mức độ hư hỏng của thiết bị dưới ngưỡng bảo trì phòng ngừa thì xác suất mà thiết bị hư hỏng trước khi đến lần kiểm tra tiếp theo là rất thấp và chấp nhận được. Ngược lại, nếu mức độ hư hỏng của thiết bị vượt ngưỡng bảo trì phòng ngừa thì xác suất thiết bị hư hỏng trước khi đến thời điểm kiểm tra tiếp theo là không chấp nhận được. Đối với mô hình này, hai thông tin quan trọng cần xác định là chu kỳ kiểm tra (T) và ngưỡng bảo trì phòng ngừa. Nếu chu kỳ T ngắn, giảm xác suất thiết bị hư hỏng trước khi được bảo trì phòng ngừa nhưng làm tăng tần suất kiểm tra, tăng chi phí kiểm tra. Ngược lại, nếu chu kỳ T dài có thể giảm chi phí kiểm tra nhưng tăng xác suất thiết bị hư hỏng giữa các lần kiểm tra. Tương tự, nếu ngưỡng bảo trì phòng ngừa thấp có thể giảm xác suất hư hỏng xảy ra, tuy nhiên khiến cho thiết bị bảo trì phòng ngừa quá sớm khi mà mức độ hư hỏng của nó vẫn thấp. Ngược lại, nếu ngưỡng bảo trì phòng ngừa quá cao có thể làm tăng khả năng hư hỏng xảy ra trước khi đến lần kiểm tra tiếp theo. Do đó, đây là hai thông số cần được tối ưu hoá.

<sup>1</sup> The University of Danang - University of Science and Technology, Vietnam (Đinh Duc Hanh, Tao Quang Bang, Tran Minh Tri, Nguyen Pham The Nhan)



**Hình 1.** Mô hình kiểm tra gián đoạn với chu kỳ cố định

Tuy nhiên, mô hình kiểm tra với chu kỳ cố định có thể dẫn đến việc lãng phí nguồn lực kiểm tra. Ở giai đoạn đầu, khi mức độ hư hỏng của thiết bị còn thấp, do đó không nhất thiết phải kiểm tra quá thường xuyên. Để tránh nhược điểm này, mô hình kiểm tra gián đoạn với chu kỳ thay đổi được phát triển. Theo đó, ở giai đoạn đầu, khi mà mức độ hư hỏng của thiết bị còn thấp, chu kỳ kiểm tra có thể dài để giảm chi phí kiểm tra. Ngược lại, ở giai đoạn sau, khi mức độ hư hỏng của thiết bị tăng lên, chu kỳ kiểm tra nên được rút ngắn, tần suất kiểm tra tăng lên, để giảm thiểu khả năng hư hỏng xảy ra. Để thực hiện được điều này, lần kiểm tra tiếp theo thường được xác định dựa trên mức độ hư hỏng hiện tại của thiết bị (Hình 2).



**Hình 2.** Mô hình kiểm tra gián đoạn với chu kỳ thay đổi

Điều này có nghĩa là chu kỳ kiểm tra lần tiếp theo là một hàm số của mức độ hư hỏng tại thời điểm hiện tại ( $\Delta T_k = f(x_{k-1})$ ). Tuy nhiên, việc xác định được dạng hàm số phù hợp để biểu diễn mối quan hệ giữa mức độ hư hỏng và chu kỳ kiểm tra là một thách thức. Đã có nhiều dạng hàm số khác nhau được dùng để biểu diễn mối quan hệ giữa chu kỳ kiểm tra và mức độ hư hỏng của thiết bị. Thông thường, hàm số này phải là hàm giảm, tức là khi mức độ hư hỏng của thiết bị càng cao thì chu kỳ kiểm tra càng ngắn. Zhu và cộng sự đề xuất dùng hàm số dạng lũy thừa để biểu diễn mối quan hệ giữa chu kỳ kiểm tra và mức độ hư hỏng hiện tại của thiết bị [9]. Trong khi đó, Zhao và cộng sự đề xuất dùng dạng hàm phi tuyến để xác định chu kỳ kiểm tra [10]. Tuy nhiên, các mô hình này đều không sử dụng thông tin về dự đoán tuổi thọ thiết bị trong việc xác định chu kỳ kiểm tra tiếp theo. Điều đó có

nghĩa là nguy cơ về hư hỏng xảy ra không được sử dụng trong việc xác định chu kỳ kiểm tra. Để khắc phục những nhược điểm trên, chúng tôi sử dụng thông tin về dự đoán tuổi thọ của thiết bị trong việc xác định chu kỳ kiểm tra tiếp theo.

**2. Mô hình hoá quá trình hư hỏng và dự đoán tuổi thọ của thiết bị**

Nghiên cứu này hướng đến các thiết bị có quá trình hư hỏng diễn ra từ từ, liên tục và ngẫu nhiên. Mức độ hư hỏng theo thời gian được biểu diễn bởi một biến ngẫu nhiên  $X(t)$ . Khi tín hiệu hư hỏng vượt quá ngưỡng cho phép  $L$ , tức là  $X(t) > L$ , thì thiết bị được xác định là hỏng hoàn toàn. Giả sử rằng tín hiệu hư hỏng theo thời gian có thể được biểu diễn bằng mô hình Wiener như sau:

$$X(t) = x_s + \mu \cdot \Delta t + \sigma \cdot B(\Delta t) \tag{1}$$

Trong đó,  $\Delta t = t - s, 0 < s < t$ ,  $x_s$  là mức độ hư hỏng tại thời điểm  $s, s < t$ ;  $\mu$  là tốc độ hỏng và  $\sigma$  là độ lệch của tín hiệu hư hỏng. Trong thực tế,  $\mu$  và  $\sigma$  thường được ước lượng dựa trên dữ liệu kiểm tra hư hỏng thực tế của thiết bị, sử dụng các phương pháp như là ước lượng hợp lý nhất, bình phương tối thiểu, vv. Thuật toán ước lượng giá trị của  $\mu$  và  $\sigma$  được trình bày trong Phụ lục A. Tuy nhiên, việc ước lượng các tham số này không thuộc phạm vi nghiên cứu của bài báo này. Giả sử rằng, giá trị của  $\mu$  và  $\sigma$  là biết trước. Bạn đọc muốn tìm hiểu về phương pháp ước lượng tham số quá trình hư hỏng có thể tham khảo trong nghiên cứu của Li và cộng sự [11];  $B(\Delta t)$  là chuyển động Brow,  $B(\Delta t)$  có quy luật phân bố xác suất là phân bố chuẩn với kỳ vọng bằng không và phương sai bằng  $\Delta t$ , tức là  $B(\Delta t) \sim N(0, \Delta t)$ .

Như vậy, mức độ hư hỏng tại thời điểm  $t, X(t)$ , có quy luật phân bố xác suất là phân bố chuẩn, có kỳ vọng là  $x_s + \mu \cdot \Delta t$  và phương sai là  $\sigma^2 \Delta t$ . Khi đó, hàm mật độ xác suất của  $X(t)$  là:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi \Delta t}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{x - (x_s + \mu \Delta t)}{\sigma \sqrt{\Delta t}}\right)^2\right) \tag{2}$$

Thời điểm thiết bị hư hỏng được xác định bởi thời gian mà tín hiệu hư hỏng vượt ngưỡng cho phép, tức là:

$$T_f = \text{inf}\{t: X(t) \geq L | x_s \leq L\} \tag{3}$$

Vì  $X(t)$  là biến ngẫu nhiên có quy luật phân bố xác suất là phân bố chuẩn với kỳ vọng và phương sai lần lượt là  $x_s + \mu \cdot \Delta t$  và  $\sigma^2 \Delta t$  nên  $T_f$  là biến ngẫu nhiên có quy luật phân bố xác suất là phân bố chuẩn nghịch đảo. Hàm mật độ xác suất và hàm phân bố xác suất (cdf) của  $T_f$  là:

$$f_T(t) = \frac{L - x_s}{\sqrt{2\pi \sigma^2 \Delta t^3}} \exp\left(-\frac{(L - (x_s + \mu \Delta t))^2}{2\sigma^2 \Delta t}\right) \tag{4}$$

$$F_T(t) = 1 - \Phi\left(\frac{L - (x_s + \mu \Delta t)}{\sigma \sqrt{\Delta t}}\right) + \exp\left(\frac{2 \cdot \mu \cdot L}{\sigma^2}\right) \Phi\left(\frac{-L + x_s - \mu \Delta t}{\sigma \sqrt{\Delta t}}\right) \tag{5}$$

Khi đó, độ tin cậy của thiết bị tại thời điểm  $t$  là:

$$R(t) = \Phi\left(\frac{L - (x_s + \mu \Delta t)}{\sigma \sqrt{\Delta t}}\right) - \exp\left(\frac{2 \cdot \mu \cdot L}{\sigma^2}\right) \Phi\left(\frac{-L + x_s - \mu \Delta t}{\sigma \sqrt{\Delta t}}\right) \tag{6}$$

Như vậy,  $F_T(t)$  hoặc  $R(t)$  biểu thị khả năng hư hỏng xảy ra tại thời điểm  $t$ . Do đó, các thông số này nên được dùng để xác định chu kỳ kiểm tra và ra quyết định bảo trì.

### 3. Bảo trì dự đoán với mô hình kiểm tra gián đoạn có chu kỳ thay đổi

#### 3.1. Mô tả mô hình kiểm tra và bảo trì dự đoán

Để giám sát mức độ hư hỏng của thiết bị và bảo trì trước khi nó bị hư hỏng quá mức, thiết bị được kiểm tra tại các thời điểm  $t_k, k = 0, 1, \dots, n$ , với chu kỳ kiểm tra là  $\Delta T_k = t_k - t_{k-1}$ . Chi phí cho mỗi lần kiểm tra là  $c_i$ . Giả sử mức độ hư hỏng tại thời điểm  $t_k$  là  $X(t_k) = x_k$ . Dựa vào mức độ hư hỏng tại thời điểm này, quyết định bảo trì và kế hoạch kiểm tra tiếp theo được thực hiện như sau:

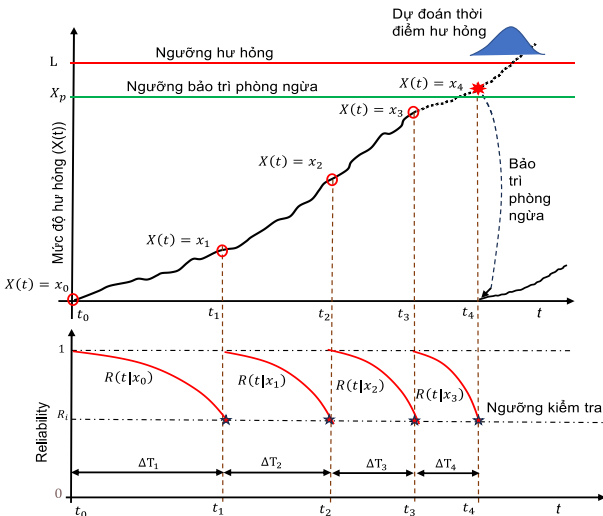
- Nếu mức độ hư hỏng của thiết bị vượt ngưỡng cho phép, tức là  $x_k > L$ , thiết bị được xác định là đã hỏng hoàn toàn, và cần phải thực hiện bảo trì ngay lập tức với chi phí bảo trì là  $c_f$ .

- Nếu mức độ hư hỏng của thiết bị chưa vượt ngưỡng cho phép nhưng đã vượt ngưỡng bảo trì phòng ngừa, tức là  $X_p \leq x_k \leq L$ , thiết bị sẽ được bảo trì phòng ngừa với chi phí là  $c_p$  ( $c_i \ll c_p < c_f$ ).  $X_p$  được gọi là ngưỡng bảo trì phòng ngừa. Nếu  $X_p$  quá thấp có thể dẫn đến việc thực hiện bảo trì phòng ngừa quá sớm, khi mà mức độ hư hỏng của thiết bị vẫn còn thấp. Ngược lại, nếu  $X_p$  quá cao làm tăng khả năng hư hỏng xảy ra trước khi đến lần kiểm tra tiếp theo. Do đó,  $X_p$  là một biến ra quyết định và giá trị của nó cần được tối ưu để đạt được chi phí bảo trì là thấp nhất.

- Nếu  $x_k < X_p$ , quá trình ra quyết định bảo trì sẽ được trì hoãn cho đến lần kiểm tra tiếp theo. Thời điểm kiểm tra tiếp theo ( $t_{k+1}$ ) được xác định là thời điểm mà độ tin cậy của thiết bị chạm ngưỡng kiểm tra, tức là  $R(t|x_k) = R_i$ , tức là:

$$t_{k+1} = \max_t(R(t|x_k) = R_i) \quad (7)$$

Như vậy, quá trình kiểm tra sẽ được kích hoạt khi mà xác suất mà thiết bị hỏng lớn hơn  $1 - R_i$ . Nếu  $R_i$  quá cao, dẫn đến kiểm tra quá mức cần thiết, khi mà xác suất hư hỏng xảy ra là rất thấp. Ngược lại, nếu  $R_i$  quá thấp, làm tăng khả năng thiết bị hư hỏng trước khi đến lần kiểm tra tiếp theo. Do đó, giá trị của  $R_i$  cũng là một biến ra quyết định cần được tối ưu hoá.



Hình 3. Minh họa mô hình kiểm tra

Hình 3 minh họa mô hình bảo trì dự đoán với mô hình kiểm tra có chu kỳ thay đổi. Giả sử mức độ hư hỏng tại thời

điểm  $t_0$  là  $x_0$ . Khi đó, độ tin cậy của thiết bị tại thời điểm  $t, t > t_0$ , ký hiệu là  $R(t|x_0)$ , được dự đoán theo công thức (6). Thời điểm kiểm tra tiếp theo ( $t_1$ ) được xác định theo công thức (7), tức là  $t_1 = \max_t(R(t|x_0) = R_i)$ . Vì mức độ hư hỏng tại  $t_1$  bé hơn ngưỡng bảo trì phòng ngừa, tức là  $x_1 < X_p$ , nên thiết bị sẽ chưa được bảo trì tại  $t_1$  và lần kiểm tra tiếp theo  $t_2$  được lên kế hoạch tương tự. Một cách tương tự, thiết bị được kiểm tra tại các thời điểm  $t_3$  và  $t_4$ . Tại thời điểm  $t_4$ , thiết bị được kiểm tra và cho thấy mức độ hư hỏng của thiết bị lớn hơn ngưỡng bảo trì phòng ngừa, tức là  $x_4 > X_p$ , do đó, thiết bị sẽ được bảo trì phòng ngừa tại thời điểm  $t_4$ . Sau khi được bảo trì, tình trạng của thiết bị được phục hồi lại như lúc ban đầu. Quá trình kiểm tra và bảo trì được lặp lại.

#### 3.2. Tối ưu hoá kế hoạch kiểm tra và bảo trì

Như được trình bày ở mục 3.1, mô hình kiểm tra và bảo trì có hai tham số là ngưỡng kiểm tra ( $R_i$ ), và ngưỡng bảo trì phòng ngừa ( $X_p$ ). Giá trị của các tham số này cần được tối ưu để đạt được chi phí bảo trì trung bình là thấp nhất. Chi phí này được xác định như sau:

$$C_\infty(R_i, X_p) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{C^t(R_i, X_p)}{t} \quad (8)$$

Trong đó,  $C^t(R_i, X_p)$  là toàn bộ chi phí bảo trì trong khoảng thời gian  $(0, t)$ . Theo lý thuyết phục hồi [10], công thức (8) được viết lại như sau:

$$C_\infty(R_i, X_p) = \frac{\mathbb{E}[\sum_{k=1}^N (C_m^k + c_i + c_{lost}^k)]}{t_N} \quad (9)$$

Trong đó,  $N$  là tổng số lần kiểm tra;  $c_i$  là chi phí kiểm tra;  $C_m^k$  là chi phí bảo trì tại lần kiểm tra thứ  $k$ , được xác định như sau:

$$C_m^k = \begin{cases} c_p & \text{nếu } X_p \leq X(t_k) \leq L \\ c_f & \text{nếu } X(t_k) > L \\ 0 & \text{nếu } X(t_k) < X_p \end{cases} \quad (10)$$

$C_{lost}^k$  là chi phí thất thoát do hư hỏng của thiết bị gây ra, tính từ thời điểm thiết bị hư hỏng cho đến khi thiết bị được bảo trì. Điều này là do khi thiết bị hư hỏng, nó có thể hoạt động dưới công suất thiết kế hoặc tạo ra nhiều phế phẩm hơn.  $C_{lost}^k$  được xác định như sau:

$$C_{lost}^k = (t_k - T_f) \cdot c^{lost} \quad (11)$$

Với,  $c^{lost}$  là chi phí thất thoát do hư hỏng gây ra trên mỗi đơn vị thời gian;  $T_f$  là thời điểm thiết bị hư hỏng, được ước lượng như sau:

$$T_f = \mathbb{P}[X(t_{k+1}) > L] \cdot \int_{t_k}^{t_{k+1}} t dF_T(t) \quad (12)$$

Phương pháp mô phỏng Monte Carlo được áp dụng để tối ưu chi phí bảo trì và tìm giá trị tối ưu của các tham số  $R_i$  và  $X_p$  với hàm mục tiêu cho trong công thức (13).

$$C_\infty^*(R_i^*, X_p^*) = \min_{(R_i, X_p)} C_\infty(R_i, X_p), \quad (0 \leq R_i \leq 1; 0 \leq X_p \leq L) \quad (13)$$

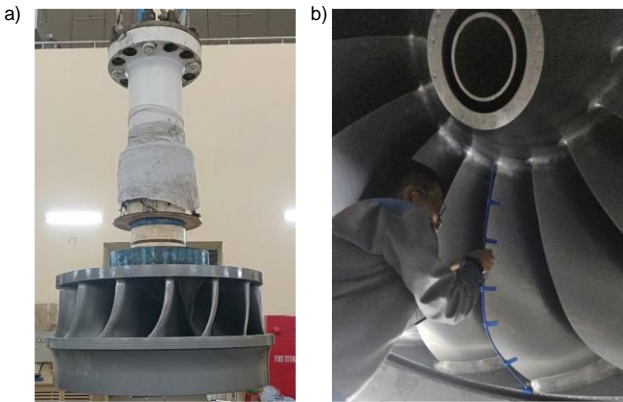
### 4. Kết quả nghiên cứu

Để kiểm nghiệm sự hiệu quả của mô hình được đề xuất, mô hình kiểm tra gián đoạn với chu kỳ thay đổi được áp dụng cho kiểm tra độ mòn của cánh tua-bin nhà máy thủy

điện. Cánh tua-bin là một bộ phận quan trọng của tổ máy phát điện nhà máy thủy điện. Cánh tua-bin làm việc trong môi trường mài mòn mạnh, do các hạt cát, sỏi lẫn trong dòng nước chảy xiết. Quá trình mài mòn này có thể dẫn đến hư hỏng hoàn toàn cánh tua-bin, gây ra những thiệt hại lớn về kinh tế, thậm chí là an toàn lao động. Theo quy định, mức mài mòn tối đa cho phép của cánh tua-bin là 40% chiều dày ban đầu của nó. Để tránh hư hỏng của tua-bin, mức độ mài mòn của cánh tua bin cần được kiểm tra. Để kiểm tra độ mài mòn của cánh tua-bin, tua-bin cần phải được tháo ra. Quá trình này cần nhiều thời gian và nguồn lực, do đó chi phí kiểm tra là rất lớn. Hình 4 trình bày quá trình kiểm tra mức độ mài mòn của cánh tua-bin tại nhà máy thủy điện Dakmi 3 (Quảng Nam). Dựa trên dữ liệu kiểm tra và bảo trì trong quá khứ, thông số về quá trình mài mòn cũng như chi phí kiểm tra và bảo trì của cánh tua-bin được cho trong Bảng 1. Thuật toán ước lượng giá trị tham số của quá trình hư hỏng được trình bày trong Phụ lục A. Bạn đọc muốn tìm hiểu về phương pháp ước lượng tham số quá trình hư hỏng của thiết bị có thể tham khảo nghiên cứu của Liu và cộng sự [11]. Lưu ý, đơn vị của  $c_i$ ,  $c_p$ , và  $c_f$  là triệu đồng; đơn vị của  $c^{lost}$  là triệu đồng/giờ.

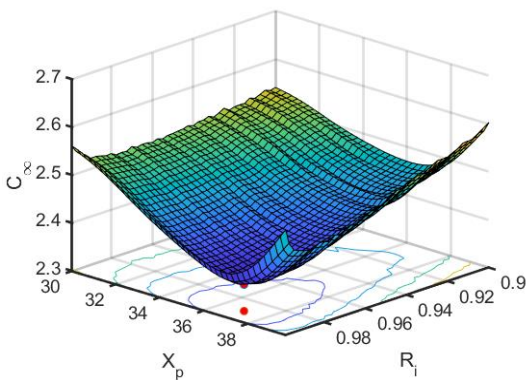
**Bảng 1.** Tham số của hệ thống

Tham số	$\mu$	$\sigma$	$c_i$	$c_p$	$c_f$	$c^{lost}$	L
Giá trị	0,04	0,12	50	2000	3000	10	40



**Hình 4.** (a) Tua bin được tháo ra để kiểm tra và (b) kỹ thuật viên kiểm tra mức độ mài mòn của cánh tua-bin

**4.1. Xác định kế hoạch bảo trì tối ưu**



**Hình 5.** Chi phí bảo trì trung bình tương ứng với các giá trị khác nhau của ngưỡng kiểm tra ( $R_i$ ) và ngưỡng bảo trì phòng ngừa ( $X_p$ )

Để xác định kế hoạch kiểm tra và bảo trì tối ưu cho tua-bin, thuật toán mô phỏng Monte Carlo được áp dụng.

Kết quả thu được giá trị tối ưu của ngưỡng kiểm tra và ngưỡng bảo trì phòng ngừa lần lượt là  $R_i = 0,9875$ , và  $X_p = 37$  tương ứng với chi phí bảo trì trung bình tối ưu là  $C_\infty = 2,34$  (triệu đồng/giờ). Hình 5 cho thấy chi phí bảo trì trung bình là một hàm lõm đối với  $R_i$  và  $X_p$  và đạt cực tiểu tại  $R_i = 0,9875$ , và  $X_p = 37$ .

**4.2. Nghiên cứu so sánh**

Để đánh giá sự hiệu quả của mô hình kiểm tra được đề xuất trong bài báo này (Ký hiệu là mô hình M1) một nghiên cứu so sánh chi phí bảo trì với các mô hình kiểm tra đã có được tiến hành. Hai mô hình kiểm tra đã có được lựa chọn là:

(1) Mô hình kiểm tra với chu kỳ cố định, ký hiệu là M2:

Bảo trì dự đoán có mô hình kiểm tra với chu kỳ cố định được trình bày như trong Hình 1. Theo đó, thiết bị được kiểm tra với chu kỳ kiểm tra T cố định.

(2) Mô hình kiểm tra với chu kỳ thay đổi nhưng không sử dụng thông tin dự đoán tuổi thọ trong xác định chu kỳ kiểm tra, ký hiệu là M3.

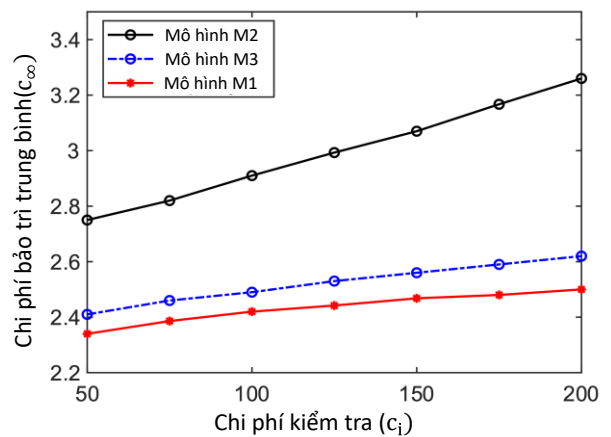
Mô hình kiểm tra với chu kỳ thay đổi sử dụng trong nghiên cứu so sánh này được đề xuất trong nghiên cứu của Zhao và cộng sự [10] và được mô tả như trong Hình 2. Theo đó, chu kỳ kiểm tra được xác định như sau:

$$\Delta T_{k+1} = \max \left\{ 1, a - \frac{a-1}{b} x_k \right\} \tag{14}$$

Trong đó,  $\Delta T_{k+1}$  là chu kỳ kiểm tra thứ k+1;  $x_k$  là mức độ hư hỏng tại thời điểm kiểm tra thứ k; a và b là hai tham số của mô hình.

**Bảng 2.** Chi phí bảo trì tối ưu ( $C_\infty$ ) tương ứng với các mô hình kiểm tra khác nhau

Tham số tối ưu	T	a	b	$R_i$	$X_p$	$C_\infty$
Mô hình M2	180	-	-	-	32,5	<b>2,75</b>
Mô hình M3	-	692	38,9	-	36,5	<b>2,41</b>
Mô hình M1	-	-	-	0,9875	37	<b>2,34</b>



**Hình 6.** Ảnh hưởng của chi phí kiểm tra đến chi phí bảo trì trung bình

Kết quả ở Bảng 2 cho thấy, chi phí bảo trì trung bình của mô hình kiểm tra trong nghiên cứu này nhỏ hơn so với hai mô hình sẵn có. Tuy nhiên, kết quả này có được với một giá trị nhất định của chi phí kiểm tra. Tiếp theo, nhóm tác giả thay đổi chi phí kiểm tra để phân tích ảnh hưởng của thông số này đến chi phí bảo trì. Hình 6 trình bày sự



thay đổi của chi phí bảo trì trung bình tối ưu khi thay đổi chi phí kiểm tra của cả ba mô hình kiểm tra. Dễ dàng nhận ra chi phí bảo trì trung bình của mô hình M1 luôn thấp hơn mô hình M3 và thấp hơn mô hình M2 rất nhiều và khoảng cách này càng ngày càng tăng khi chi phí kiểm tra tăng lên. Điều đó cho thấy, mô hình kiểm tra với chu kỳ thay đổi ít bị tác động bởi sự tăng lên của chi phí kiểm tra hơn là mô hình kiểm tra có chu kỳ cố định.

## 5. Kết luận

Trong bài báo này, một mô hình kiểm tra với chu kỳ thay đổi cho bảo trì dự đoán được đề xuất. Chu kỳ kiểm tra được xác định dựa trên thông tin về tình trạng hư hỏng và tuổi thọ được dự đoán của thiết bị. Khi mức độ hư hỏng của thiết bị còn thấp, chu kỳ kiểm tra có thể dài để giảm tần suất kiểm tra, giảm chi phí kiểm tra. Ngược lại, khi mức độ hư hỏng tăng cao, chu kỳ kiểm tra ngắn lại, tần suất kiểm tra tăng lên để giảm khả năng hư hỏng xảy ra. Kết quả mô phỏng số chỉ ra rằng, mô hình kiểm tra này có chi phí bảo trì trung bình thấp hơn đáng kể đối với các mô hình hiện có.

Mặc dù, đã tạo được một bước tiến đáng kể trong tối ưu hoá bảo trì cho thiết bị công nghiệp, nghiên cứu này chỉ đề cập đến hệ thống bao gồm một thiết bị. Hướng nghiên cứu tiếp theo sẽ cải thiện mô hình để áp dụng cho hệ thống bao gồm nhiều thiết bị cũng như xem xét hệ thống có cấu trúc phức tạp.

**Lời cảm ơn:** TS. Đình Đức Hạnh được tài trợ bởi Chương trình học bổng sau tiến sĩ trong nước của Quỹ Đổi mới sáng tạo Vingroup (VINIF), mã số VINIF.2024.STS.04.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] D. D. Hanh and T. Q. Bang, "Particle filter for condition estimation and lifetime prognosis of manufacturing system considering degradation of condition monitoring device", *The University of Danang - Journal of Science and Technology*, vol. 22, no. 4, pp. 95-99, 2024.
- [2] J. Kim, Y. Anh, and H. Yeo, "A comparative study of time-based maintenance and condition-based maintenance for optimal choice of maintenance policy", *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 12, no. 12, pp. 1525-1536, 2016.
- [3] R. Ahmadi, "A bivariate process-based mean residual lifetime model for maintenance and inspection planning", *Computers & Industrial Engineering*, vol. 163, pp. 107792, 2022.
- [4] K. Mukhopadhyay, B. Liu, T. Bedford, and M. Finkelstein, "Remaining lifetime of degrading systems continuously monitored by degrading sensors", *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 231, pp. 109022, 2023.
- [5] X. Zhao, S. He, Z. He, and M. Xie, "Optimal condition-based maintenance policy with delay for systems subject to competing

failures under continuous monitoring", *Computers & Industrial Engineering*, vol. 124, pp. 535-544, 2018.

- [6] I. T. Castro, R. J. Basten, and G. J. Houtum, "Maintenance cost evaluation for heterogeneous complex systems under continuous monitoring", *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 200, pp. 106745, 2020.
- [7] J. L. Oakley, K. J. Wilson, and P. Philipson, "A condition-based maintenance policy for continuously monitored multi-component systems with economic and stochastic dependence", *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 222, pp. 108321, 2022.
- [8] S. Alaswad and Y. Xiang, "A review on condition-based maintenance optimization models for stochastically deteriorating system", *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 157, pp. 54-63, 2017.
- [9] Z. Zhu, Y. Xiang, S. Alaswad, and C. R. Cassady, "A sequential inspection and replacement policy for degradation-based systems", Proc. In *2017 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, Florida, USA, 2017, pp.1-6.
- [10] X. Zhao, M. Fouladirad, C. Bérenguer, and L. Bordes, "Nonperiodic Inspection/Replacement Policy for Monotone Deteriorating System with Covariates", *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 42, no. 8, pp. 1617-1622, 2009.
- [11] J. Li, B. Jing, H. Dai, X. Jiao, and X. Liu, "Remaining useful life prediction based on variation coefficient consistency test of a Wiener process", *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 31, no. 1, pp. 107-116, 2018.

## PHỤ LỤC A

### Thuật toán ước lượng giá trị tham số quá trình hư hỏng.

Giả sử chúng ta có tập dữ liệu mài mòn của tua-bin được lưu trữ dưới dạng file txt, bao gồm  $n$  điểm dữ liệu  $(x_i, t_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , trong đó  $x_i$  độ mài mòn của cánh tua-bin tại thời điểm  $t_i$ .

**Input:** Tập dữ liệu mức độ mài mòn  $(x_i, t_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  lưu trữ trong tệp "data.txt"

**Output:** Tham số của quá trình hư hỏng  $\mu, \sigma$

```
data=importdata('data.txt');
```

```
X=data(:,1); t=data(:,2);
```

```
n=length(X);
```

```
 $\Delta X = 0; \Delta t = 0; \Delta = 0$ 
```

```
for (i = 1 → n) do
```

```
 $\Delta X \leftarrow \Delta X + (X(i+1) - X(i));$ 
```

```
 $\Delta t \leftarrow \Delta t + (t(i+1) - t(i));$ 
```

```
end for
```

```
 $\mu \leftarrow \frac{\Delta X}{\Delta t};$ 
```

```
for (i = 1 → n) do
```

```
 $\Delta \leftarrow \Delta + \frac{[(X(i+1)-X(i))-\mu*(t(i+1)-t(i))]^2}{(t(i+1)-t(i))};$ 
```

```
end for
```

```
 $\sigma \leftarrow \frac{\Delta}{n};$ 
```

```
Return  $\mu, \sigma$ 
```