

CHẨN ĐOÁN ĐỘ TIN CẬY LÀM VIỆC CỦA HỆ THỐNG TRUYỀN ĐỘNG ĐIỆN KHÔNG ĐỒNG BỘ: NGĂN NGỪA TAI NẠN VÀ KÉO DÀI TUỔI THỌ LÀM VIỆC

Nguyễn Tiến Dũng^{1,2,*}, Bunyaev V. A.², Nguyễn Sỹ Hồng Đức³

¹Trường Đại học Lương Thế Vinh, Số 9 Đường Cầu Đông, Phường Nam Định, tỉnh Ninh Bình, Việt Nam

²Đại học kỹ thuật Quốc gia Moskva Bauman, số 5/1 đường Baumanskaya số 2, Moskva 105005, Liên bang Nga

³Đại học Bách khoa Hà Nội, số 1 Đại Cồ Việt, Phường Bạch Mai, thành phố Hà Nội, Việt Nam

* Tác giả liên hệ: nguyentientrung@ltvu.edu.vn

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận: 19/05/2026

Ngày hoàn thiện: 27/05/2026

Ngày chấp nhận: 04/06/2026

Ngày đăng: 11/06/2026

TỪ KHÓA

Chẩn đoán định kỳ,

Độ tin cậy,

Bảo trì phòng ngừa,

Bảo trì theo tình trạng thực,

Đo lường - tham chiếu,

Phân tích rung động,

Phân tích quang phổ,

Lý thuyết phân phối

Weibull,

Mô hình Arrhenius,

Đường cong bồn tắm,

Thuật toán RULL.

TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu phát triển về các cách chẩn đoán và tích hợp các cách chẩn đoán thành một cách kết hợp về chẩn đoán Độ tin cậy làm việc của hệ thống truyền động điện không đồng bộ. Các chỉ số của Độ tin cậy làm việc của hệ thống truyền động điện không đồng bộ được tính toán và kiểm chứng thực tế. Các lỗi đặc trưng của động cơ điện; bộ biến tần; và các phần tử truyền động cơ khí, được xem xét phát triển. Các cách chẩn đoán được đề xuất và chứng minh bằng thực nghiệm. Nghiên cứu phát triển thuật toán RULL dựa trên mô hình Weibull được đề xuất. Một thực nghiệm chẩn đoán Độ tin cậy làm việc của hệ thống truyền động điện không đồng bộ với động cơ điện AIR160S4 và bộ biến tần Schneider Altivar 320 với tải là bơm nước ly tâm đã được nghiên cứu, thu được các kết quả, gồm: các chỉ số của Độ tin cậy và hiệu quả kinh tế khi sử dụng cách chẩn đoán kết hợp.

DIAGNOSING THE OPERATIONAL RELIABILITY OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE SYSTEMS: PREVENTING ACCIDENTS AND EXTENDING SERVICE LIFE

Tien Dung Nguyen^{1,2,*}, Bunyaev V. A.², Sy Hong Duc Nguyen³

¹Luong The Vinh University, 9 Cau Dong Street, Nam Dinh Ward, Ninh Binh Province, Viet Nam

²Bauman Moscow State Technical University, 2nd Baumanskaya St., 5/1, Moscow 105005, Russian Federation

³Hanoi University of Science and Technology, No. 1 Dai Co Viet Street, Bach Mai Ward, Hanoi, Vietnam

*Corresponding Author: nguyentientrung@ltvu.edu.vn

ARTICLE INFO

Received: May 19, 2026

Revised: May 27, 2026

Accepted: Jun 04, 2026

Published: Jun 11, 2026

KEYWORDS

Periodic diagnostics,

Reliability,

Preventive maintenance,

Condition-based

maintenance,

Measurement – reference,

Vibration analysis

Spectroscopic analysis,

Weibull distribution theory,

Arrhenius model,

Bath curve,

RULL algorithm.

ABSTRACT

This paper presents the results of research on the development of diagnostic methods and the integration of these methods into a combined approach for diagnosing the reliability of asynchronous electric drive systems. The reliability indicators of asynchronous electric drive systems are calculated and verified in practice. Characteristic faults of electric motors, inverters, and mechanical drive elements are considered and developed. Diagnostic methods are proposed and experimentally proven. The research develops the RULL algorithm based on the proposed Weibull model. An experiment to diagnose the reliability of an asynchronous electric drive system with an AIR160S4 electric motor and a Schneider Altivar 320 inverter with a centrifugal water pump as the load was studied, yielding results including reliability indicators and economic efficiency when using the combined diagnostic method.

1. Đặt vấn đề

Các động cơ điện công nghiệp tại các cơ sở công nghiệp ở bất kỳ Quốc gia phát triển nào thì đều tiêu thụ một lượng điện năng khá lớn (thường chiếm 60% lượng điện năng tiêu thụ của cả Quốc gia, thí dụ ở Cộng hòa Liên bang Nga, dữ liệu năm 2024 của Bộ Năng lượng). Các động cơ điện thường làm việc liên quan đến nhau trong dây chuyền sản xuất mà chúng thường được gọi là hệ thống truyền động điện, bất kỳ sự cố nào trong hệ thống truyền động điện đều thường dẫn đến ngừng sản xuất. Đặc biệt với các hệ thống truyền động điện quạt gió; bơm, các động cơ điện luôn hoạt động liên tục, điều này có thể ảnh hưởng đến độ tin cậy; độ bền của các hệ thống này.

Việc dừng hoạt động sản xuất do lỗi của hệ truyền động điện gây tổn thất trung bình là 18.198USD mỗi sự cố (tại Cộng hòa Liên bang Nga [3]), trong toàn bộ các lỗi xảy ra thì có thể dự đoán được 70% sự cố bằng phương pháp “Regular diagnostics” [3; 5]. Chẩn đoán có thể theo ba cách:

+ Cách “Bảo trì phòng ngừa” là phương pháp thực hiện việc bảo trì mà không tính đến tình trạng thực tế của các thiết bị trong hệ thống kỹ thuật. Phương pháp này thường dẫn đến việc thay thế các thiết bị; phần tử; linh kiện; ... cho dù chúng không hỏng.

+ Cách “Bảo trì theo tình trạng thực” là phương pháp được thực hiện dựa chẩn đoán “Độ tin cậy” cho ra kết quả xấu.

+ Cách “Đo lường – tham chiếu” cho các thông số, như dòng điện; nhiệt độ; độ rung gập; ... được đo lường và tham chiếu để chẩn đoán Độ tin cậy.

Vấn đề đặt ra là cần xem xét phát triển cả ba cách chẩn đoán này và nghiên cứu khả năng tích hợp ba cách này thành một cách chẩn đoán Độ tin cậy làm việc của hệ thống có tính tin cậy nhất và hiệu quả nhất về kinh tế trong suốt vòng đời làm việc của hệ thống truyền động điện không đồng bộ công nghiệp.

2. Mục tiêu nghiên cứu và phương pháp nghiên cứu

Mục tiêu nghiên cứu: phát triển cách tiếp cận Chẩn đoán tình trạng và tính toán tuổi thọ làm việc còn lại dựa trên tích hợp cả ba cách chẩn đoán và rút ra kết quả.

Phân tích kỹ thuật hệ thống; lý thuyết xác suất (gồm: lý thuyết phân phối Weibull; mô hình Arrhenius); FFT và MCSA; chụp ảnh nhiệt; đánh giá kỹ thuật và kinh tế là những phương pháp được sử dụng trong nghiên cứu về độ tin cậy làm việc của hệ thống truyền động điện không đồng bộ.

3. Nội dung và kết quả nghiên cứu:

3.1. Cơ sở lý thuyết về Độ tin cậy làm việc của hệ thống truyền động điện

3.1.1. Khái niệm và các chỉ số Độ tin cậy

Độ tin cậy là khả năng của một vật thể duy trì được các thông số hoạt động của nó trong một giới hạn xác định và trong một khoảng thời gian cho trước. Đối với các hệ thống phức tạp thì Độ tin cậy của hệ thống này được mô tả bằng một tập các chỉ số, gồm:

+ Xác suất làm việc không gặp sự cố $P(t)$ là thể hiện xác suất của một đối tượng làm việc không gặp bất kỳ sự cố nào trong một khoảng thời gian $[0; t]$. Đối với những cách thức xảy ra nhưng sự cố đơn giản nhất thì $P(t)$ có thể được tính theo (1):

$$P(t) = \exp(-\lambda \cdot t) \quad (1)$$

ở đây

λ – tỷ lệ hỏng hóc, h^{-1} ; t – thời gian làm việc, h .

Công thức (1) áp dụng cho làm việc bình thường của đối tượng với $\lambda \approx const$.

+ Thời gian trung bình giữa các lần hỏng hóc T_{mid} là kỳ vọng toán học về thời gian cho đến khi xảy ra lần hỏng hóc đầu tiên. Kỳ vọng này được xác định theo quy luật hàm mũ (2):

$$T_{mid} = 1 / \lambda. \quad (2)$$

Theo [5], động cơ AIR160S4 (15kW) có

$$\lambda = 5,2 \cdot 10^{-5} h^{-1},$$

suy ra

$$T_{mid} = 1 / (5,2 \cdot 10^{-5}) = 19.230h,$$

tức xấp xỉ hơn 2 năm làm việc liên tục mà không xảy ra hỏng hóc

+ Hệ số khả dụng K_g là một tỷ lệ của các thời gian khi đối tượng làm việc [1] và được tính theo (3):

$$K_g = \frac{T_0}{T_0 + T_v}, \quad (3)$$

ở đây

T_0 – thời gian làm việc trung bình giữa các lần hỏng hóc, h ;

T_v – thời gian trung bình cho sửa chữa, h .

Với động cơ AIR160S4, khi $T_0 = 19.230h$ và $T_v = 24h$ sẽ có $K_g = 0,9988$. Giá trị này là khá cao, tuy nhiên nếu dây chuyền sản xuất có khoảng 50 động cơ loại này thì số lượng động cơ cần thay thế hàng năm sẽ là khoảng 5 động cơ.

3.1.2. Quy luật dấu hiệu hỏng hóc: mô hình Đường cong bốn tâm

Sự phụ thuộc của tỷ lệ hỏng hóc của đối tượng vào thời gian làm việc của nó có dạng giống như hình dạng của bốn tâm. Ba đoạn của đường cong có nguồn gốc vật lý khác nhau, gồm:

+ Giai đoạn chạy thử (0-500 giờ): sẽ cao ở giai đoạn đầu, nguyên nhân là do hậu quả của các lỗi chế tạo ở dạng tiềm ẩn (thí dụ, lỗi rotor không được cân bằng động chính xác; lỗi ổ trục; lỗi lắp ráp);

+ Giai đoạn làm việc bình thường: [5], hầu như không thay đổi và các sự cố sẽ xảy ra (nếu có) là ngẫu nhiên và không thể dự đoán trước;

+ Giai đoạn hao mòn: các ổ trục già hóa; lớp cách điện xuống cấp và giá trị sẽ tăng lên theo thời gian. Với các động cơ tiêu chuẩn thì giai đoạn này là giai đoạn bước vào thời kỳ cuối của thời hạn bảo hành..

3.1.3. Cấu trúc của hệ thống truyền động điện và các yếu tố của Độ tin cậy của hệ thống truyền động điện

Hệ thống truyền động điện AC với biến tần được nghiên cứu có bốn hệ thống con [2; 9], gồm:

+ Động cơ điện có chức năng chuyển đổi điện năng thành cơ năng, ở đây là động cơ điện xoay chiều không đồng bộ AIR160S4 với các thông số kỹ thuật:

$$15kW; 1460v / p; \eta = 89\%; \cos \phi = 0,86;$$

+ Biến tần Schneider Altivar 320: 15kW; 0 ÷ 400Hz có chức năng thay đổi tốc độ động cơ AIR160S4;

+ Truyền động cơ khí;

+ Các thành phần khác.

Theo [3; 5]: động cơ AIR160S4 có tỷ lệ hỏng hóc là 40 ÷ 50% (vòng bi và lớp cách điện); biến tần có tỷ lệ hỏng hóc là 25 ÷ 35% (IGBT và tụ điện liên kết DC); truyền động cơ khí có tỷ lệ hỏng hóc là 15 ÷ 20%; các thành phần khác có tỷ lệ

CHẨN ĐOÁN ĐỘ TIN CẬY LÀM VIỆC CỦA HỆ THỐNG TRUYỀN ĐỘNG ĐIỆN KHÔNG ĐỒNG BỘ: NGĂN NGỪA TÀI NẠN VÀ KÉO DÀI TUỔI THỌ LÀM VIỆC

hồng học là $5 \div 10\%$.

3.2. Phân tích các lỗi và cách chẩn đoán Độ tin cậy cho hệ thống truyền động điện

3.2.1. Phân loại lỗi

3.2.1.1. Lỗi của động cơ không đồng bộ

Lỗi của động cơ không đồng bộ chiếm khoảng tổng số lỗi của cả hệ thống truyền động điện [3]. Động cơ này có ba loại lỗi chính: mòn ổ trục, là lỗi phổ biến nhất (chiếm hơn tổng số lỗi của động cơ) và thể hiện ra bên ngoài là sự gia tăng rung động ở các tần số khác nhau; lỗi cách điện là lỗi có hậu quả xuất hiện dòng điện rò và quá nhiệt, lâu ngày dẫn đến ngắn mạch, lỗi này được chẩn đoán bằng máy ảnh nhiệt PKI; lỗi thanh rotor bị gãy hoặc bị biến dạng, lỗi này gây gián đoạn tính đối xứng từ tính, sử dụng cách phân tích quang phổ hiện tại (MCSA) sẽ xác định được các sọc từ phụ hai bên ở.

3.2.1.2. Lỗi của biến tần

Biến tần là nguồn gây lỗi thứ hai của hệ thống truyền động điện được nghiên cứu, lỗi của nó chiếm khoảng tổng số lỗi của hệ. Biến tần chủ yếu có lỗi ở mô-đun IGBT do quá tải dòng điện hoặc điện áp. Ngoài ra, ở biến tần còn có lỗi của tụ điện do sự suy giảm điện dung bởi sự khô dần của chất điện phân ở nhiệt độ trên và qua đó gây ra hiện tượng xung điện.

3.2.1.3. Lỗi của truyền động cơ khí

Hệ truyền động cơ khí, theo thời gian sẽ xuất hiện lỗi: mòn bánh răng; lệch trục; ốc vít lỏng. Lỗi của truyền động cơ khí chiếm khoảng tổng số lỗi của hệ thống truyền động điện. Các lỗi này được chẩn đoán theo cách Phân tích rung động của hệ truyền động khi làm việc. Bảng 1 tóm tắt các loại lỗi và cách (phương pháp) chẩn đoán lỗi.

Bảng 1. Phân loại lỗi của hệ thống truyền động điện

Phần tử	Dạng lỗi	Nguyên nhân	Cách chẩn đoán
Ổ trục động cơ AC	Bong tróc do mài	Mài mòn; quá tải	Theo rung động thực tế
Cách điện cuộn dây stator	Sự cố ngắn mạch giữa các vòng dây	Quá nhiệt; già hóa	Bằng hình ảnh nhiệt
Rotor động cơ AC	Gãy thanh lồng sóc	Quá tải; khởi động	MCSA (sọc từ phụ hai bên $2sf_1$)
Trục động cơ AC	Sai lệch vị trí	Cài đặt (lắp ráp)	Theo rung động tần số cao $2f_{vr}$ thân động cơ AC khi chạy
Mô-đun IGBT của biến tần	Hồng Transistor	Quá nhiệt; điện áp tăng đột ngột	Máy ảnh nhiệt; dao động ký kiểm tra U_{DC}
Mô-đun điều khiển của biến tần	Lỗi phần mềm	Nhiều điện từ; già hóa	Nhật ký lỗi
Khớp nối truyền động cơ khí	Mài mòn; già hóa lớp đàn hồi kết nối	Rung động; quá tải	Theo rung động thực tế ở tần số f_{vr}
Ốc vít	Lỏng các	Rung động;	Theo rung

	kết nối bằng bu lông	môi	động thực tế với tần số thấp $0,5f_{vr}$
Hộp số truyền động cơ khí	Mòn răng	Môi; mài mòn tăng khe hở	Theo rung động thực tế ở tần số răng $z \cdot f_{vr}$
Cảm biến	Không đo lường được (không có tín hiệu)	Nhiều điện từ; độ ẩm cao	Theo tín hiệu đầu ra
Hộp đầu dây	Lỏng tiếp xúc kết nối, điện trở tiếp xúc cao	Rung động; ô xy hóa	Phân tích quang phổ MCSA (các hài 100; 150Hz)

3.2.2. Chẩn đoán dựa trên thông số trong chế độ động

Tình trạng kỹ thuật của động cơ điện AC được đánh giá theo ba chỉ số: k_i – cách điện; k_p – cuộn dây; k_r – độ dốc của đặc tính cơ học. Tích hợp ba tiêu chí trên có được tiêu chí tổng hợp (mang tính trung bình cộng) (4):

$$k_d = \left(\frac{1}{3}\right) \cdot (k_i + k_p + k_r). \quad (4)$$

Đối với động cơ điện hoạt động bình thường thì các hệ số k đều có giá trị là 1. Tức $k_d = 1$, và sự giảm giá trị của bất cứ hệ số nào cũng đều cho thấy xuất hiện lỗi cụ thể. Tiêu chí với hệ số k_r cho biết động cơ điện AC duy trì được mô-men xoắn tốt như thế nào (theo (5) khi điện áp nguồn cấp cho nó thay đổi:

$$k_r = \frac{s \cdot U_{nor}^2}{s_{nor} \cdot U^2 \cdot P_{nor}}, \quad (5)$$

ở đây

s – hệ số trượt; s_{nor} – hệ số trượt định mức, với động cơ

nghiên cứu:

$$s_{nor} = 0,027; U_{nor} = 380V; P_{nor} = 15kW.$$

Khi $U = U_{nor}$ sẽ có $k_r = 1$.

3.2.3. Chẩn đoán quang phổ

3.2.3.1. Phân tích rung động

Phân tích phổ vận tốc rung động có hiệu quả trong việc xác định các khuyết tật ở ổ trục. Tần số đặc trưng của rung động được tính toán theo hình dạng của ổ trục, công thức (7):

$$f_{BPFO} = \left(\frac{n}{120}\right) \cdot N \cdot \left(1 - \left(\frac{d}{D}\right)\right), \quad (7)$$

ở đây:

n – tần số quay, v/p;

N – số lượng các phần tử có chuyển động lăn;

d – đường kính của phần tử có chuyển động lăn, mm;

D – đường kính chia, mm. Đối với ổ trục 6311 trong hệ thống nghiên cứu, nó có

$$N = 8; d = 22,2mm; D = 90mm.$$

3.2.3.2. Phân tích quang phổ (MCSA)

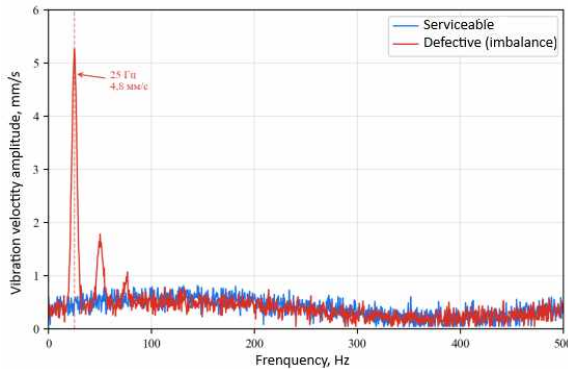
Phân tích quang phổ (MCSA) là phương pháp phát hiện các khuyết tật (lỗi) dựa trên phổ dòng điện stator. Độ lệch Δ so với phổ tham chiếu được tính theo công thức (6):

$$\Delta = \frac{\sqrt{\sum (A_i - A_{et,i})^2}}{n}, \quad (6)$$

ở đây, A_i – biên độ hài thứ của phổ hiện tại; $A_{et,i}$ – biên

độ tham chiếu; n – số lượng hài.

Phổ vận tốc dao động của động cơ điện AIR160S4 trong điều kiện hoạt động tốt và khi bị lỗi được trình bày trên **H. 1**.



H. 1. So sánh phổ tốc độ rung động của động cơ điện Ac AIR160S4 trong điều kiện bình thường và khi bị lỗi

3.2.3.3. Phân tích ảnh nhiệt

Ảnh nhiệt độ giúp phát hiện các điểm nóng trong cuộn dây stator và hộp đấu kết nối dây điện động lực. Đối với cuộn dây stator với cách điện loại F tiêu chuẩn thì nhiệt độ quá nhiệt cho phép là 105°C [4].

Theo quy tắc Montsinger, cứ mỗi 10°C tăng lên từ nhiệt độ giới hạn cho phép thì tuổi thọ lớp cách điện lại giảm đi một nửa. Thực hiện giám sát nhiệt độ; kết hợp giám sát dòng điện; và độ rung, sẽ cho ra một bức tranh toàn diện về tình trạng của bộ truyền động.

3.2.3.4. Cách kết hợp

Ma trận hình thành từ kết hợp các cách phân tích tạo ra ma trận “tần số, khuyết tật” cho phép xác định chính xác loại khuyết tật. Rung động xác định các lỗi cơ khí; dòng điện xác định các lỗi điện; hình ảnh nhiệt là kênh xác định thứ ba có tính độc lập.

3.2.3.5. So sánh các cách chẩn đoán

Các cách chẩn đoán được so sánh với nhau như trong **Bảng 2**. Cách chẩn đoán dựa trên tích hợp các cách cho khả năng bao phủ nhiều loại lỗi nhất với chi phí giám sát hợp lý.

Bảng 2. So sánh các cách chẩn đoán Độ tin cậy

Cách chẩn đoán	Loại lỗi	Chi phí, USD	Phát hiện sớm	Độ tin cậy chẩn đoán, %
Chẩn đoán rung động	Ổ trục; mất cân bằng; lệch trục	2.000 đến 5.500	4 đến 8 tuần	85% đến 95%
MCSA (dòng điện)	Rotor; kết nối dây điện động lực kém	1.100 đến 2.800	2 đến 4 tuần	70% đến 85%
Máy ảnh nhiệt	Lớp cách điện; mô-đun IGBT; đầu nối cáp điện động lực	1.400 đến 4.900	2 đến 6 tuần	80% đến 90%
Tích hợp	Tất cả lỗi	4.900 đến 12.600	4 đến 10 tuần	92% đến 98%

3.3. Dự đoán tuổi thọ còn lại của hệ thống truyền động điện

3.3.1. Mô hình tỷ lệ hỏng hóc Weibull

Để mô tả tuổi thọ các thành phần cơ khí, phân bố Weibull thường được sử dụng. Mật độ xác suất hỏng hóc được tính theo hàm (8):

$$f(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \cdot \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}\right]. \quad (8)$$

Hàm Độ tin cậy (xác suất làm việc không lỗi) theo Weibull (9):

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}\right]. \quad (9)$$

Tỷ lệ hỏng hóc theo mô hình Weibull (10):

$$\lambda(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \cdot \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}. \quad (10)$$

Các tham số mô hình Weibull: β – tham số hình dạng (phản ánh cơ chế hỏng hóc); η – thang đo, tính bằng giờ (đặc trưng cho tuổi thọ).

Khi $\beta > 1$, hệ thống nằm trong vùng đã bị mài mòn cơ khí. Đối với động cơ điện AC AIR AIR160S4 được nghiên cứu thì $\beta = 2,1 \div 2,5$ (cho mô hình mài mòn); $\eta = 35.000 \div 40.000$ giờ.

Các tham số Weibull được tìm thấy bằng cách tuyến tính hóa trên lưới xác suất sử dụng dữ liệu thống kê hỏng hóc được tích lũy của một số đối tượng tương tự.

3.3.2. Mô hình Arrhenius cho sự già hóa của vật liệu cách điện

Sự suy giảm cách điện của lớp cách điện cuộn dây theo thời gian được xem xét theo định luật Arrhenius [8]. Tuổi thọ còn lại được tính tại thời điểm có nhiệt độ $T(K)$ (11):

$$L = A \cdot \exp\left(\frac{E_a}{k_b \cdot T}\right), \quad (11)$$

ở đây, A – nhân tố “pre-exponential”; E_a – năng lượng kích hoạt, J ; $k_b = 1,38 \cdot 10^{-23} J/K$ – hằng số Boltzmann.

Từ (11) này, dẫn đến quy tắc Montsinger: cứ tăng 10°C nhiệt độ làm việc thì tuổi thọ của vật liệu làm lớp cách điện cuộn dây sẽ giảm đi một nửa. Đối với lớp cách điện tiêu chuẩn loại F (được xem xét ở 155°C) thì cứ tăng 10°C sẽ làm giảm tuổi thọ đi 50%.

3.3.3. Thuật toán dự báo tuổi thọ làm việc còn lại RUL

Tuổi thọ còn lại (RUL) được tính theo công thức [9]. Khi $R(t) = 0,5$ thì tuổi thọ còn lại được gọi là tuổi thọ trung bình t_{50} :

$$t_{50} = \eta \cdot (\ln 2)^{\frac{1}{\beta}}. \quad (12)$$

Tuổi thọ làm việc còn lại:

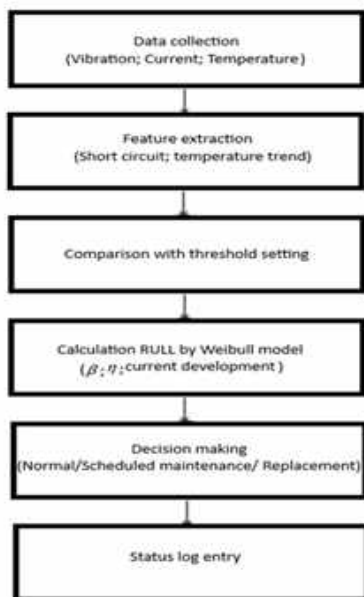
$$RUL = t_{50} - t_{cur},$$

ở đây, t_{cur} – tuổi thọ làm việc còn lại tại thời điểm xem xét.

Thuật toán dự báo tuổi thọ làm việc còn lại được trình bày trong **H. 2**.

Thuật toán: thu thập dữ liệu từ ba kênh; trích xuất các đặc trưng (vận tốc rung; k_d ; ΔT); tính toán $R(t)$ theo Weibull; tìm t_{50} và thu được RUL. Các dữ liệu đầu vào: $\beta = 2,3$; $\eta = 38.000h$; $t_{cur} = 18.000h$.

CHẨN ĐOÁN ĐỘ TIN CẬY LÀM VIỆC CỦA HỆ THỐNG TRUYỀN ĐỘNG ĐIỆN KHÔNG ĐỒNG BỘ: NGĂN NGỪA TAI NẠN VÀ KÉO DÀI TUỔI THỌ LÀM VIỆC



H.2. Thuật toán dự đoán tuổi thọ làm việc còn lại của hệ thống nghiên cứu

Bảng 3 trình bày nội dung cài đặt các thông số điều khiển cho động cơ điện AC AIR160S4 được nghiên cứu theo tiêu chuẩn IEC [4].

Bảng 3. Cài đặt thông số điều khiển cho động cơ điện AC AIR160S4

Thông số	Bình thường	Cảnh báo	Tai nạn
Tốc độ rung ngắn mạch, mm/s.	$\leq 2,8$	$2,8 \div 7,1$	$> 7,1$
Nhiệt độ cuộn dây, °C	≤ 95	$95 \div 130$	> 130
Mất cân bằng dòng điện pha, %.	< 5	$5 \div 10$	> 10

3.4. Thử nghiệm nghiên cứu

3.4.1. Đối tượng và trang thiết bị chẩn đoán

Hệ thống truyền động điện của một tổ bơm trong hệ thống cấp nước trung tâm của một doanh nghiệp được nghiên cứu về Chẩn đoán Độ tin cậy làm việc, các thành phần chính của hệ thống là động cơ điện AC AIR160S4-15kW-1460v/p; và bộ biến tần Schneider Altivar 320; bơm ly tâm K100-65-200 (dùng cấp nước nóng/lạnh trung tâm).

Thiết bị chẩn đoán: máy phân tích rung động BALTECH VP-3470; đồng hồ kẹp Fluke 435; máy ảnh nhiệt FLIR T620.

3.4.2. Tính toán các chỉ số của Độ tin cậy của động cơ AC AIR160S4

Theo [5], động cơ không đồng bộ AIR1560S4 là loại động cơ điện công nghiệp đa dụng có $\lambda = 5,2 \cdot 10^{-5} h^{-1}$; thời gian trung bình giữa các lần hỏng hóc kề nhau được tính theo (2):

$$T_{mid} = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{5,2 \cdot 10^{-5}} = 19.230h.$$

Việc tính toán xác suất làm việc không có sự cố $P(t)$ cho ba mốc thời gian bằng cách sử dụng công thức (1) cho kết quả trong Bảng 4. Còn hệ số khả dụng theo công thức (3) khi $T_v = 24h$ thì $K_g = 0,998$.

Bảng 4. Kết quả tính toán xác suất làm việc

không có sự cố $P(t)$.

Phạm vi nhận thức, t	Thời gian làm việc t, h	λ	$P(t) = \exp(-\lambda t)$
1 năm	8760	0,456	0,634
2 năm	17.520	0,911	0,402
3 năm	26.280	1.367	0,255

Từ Bảng 4 cho thấy rằng, trong năm thứ ba thì $P(t)$ giảm xuống còn 0,255. Tức cứ có bốn động cơ thì sẽ có một động cơ hỏng trước khi kết thúc năm thứ ba.

3.4.3. Phân tích phổ rung động và dòng điện

Thử nghiệm được tiến hành ở bốn chế độ: làm việc bình thường; rotor mất cân bằng; lỗi ổ trục 6311; hộp đấu dây điện động lực có kết nối dây lỏng. ở mỗi chế độ thử nghiệm thì vận tốc rung RMS; dòng điện pha A; và nhiệt độ cuộn dây stator đều được ghi lại. Kết quả thử nghiệm được trình bày trong Bảng 5.

Bảng 5. Kết quả đo lường chẩn đoán ở bốn chế độ làm việc

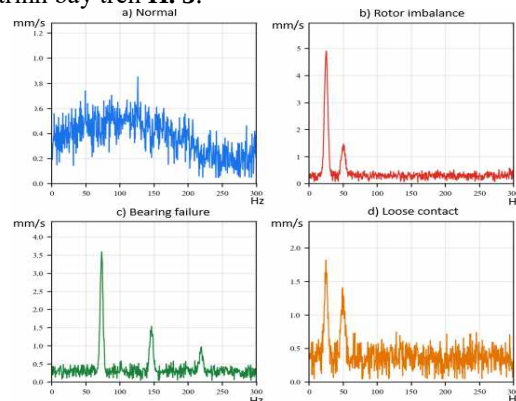
Chế độ làm việc thực nghiệm	Rung động, mm/s	Dòng điện pha A, A	Nhiệt độ cuộn dây, °C	Tình trạng làm việc của hệ thống
Bình thường (định mức)	1,2	28,5	52	Hoạt động tốt
Rotor mất cân bằng	4,8	29,1	55	Cảnh báo
Ổ trục lỗi 6311	6,5	28,7	78	Cảnh báo
Tiếp xúc kết nối kém	1,5	31,5	92	Cảnh báo

Chế độ làm việc mất cân bằng của rotor động cơ: rung động ở tần số 25Hz với tốc độ cao nhất 4,8mm/s, tốc độ rung động vượt ngưỡng cảnh báo là 2,3mm/s [4], lỗi này được phát hiện bằng cách chẩn đoán rung động.

Chế độ lỗi ổ trục 6311: ở tần số 73,3Hz có tốc độ rung động cao nhất là 6,5mm/s, gần ngưỡng báo động 7,1mm/s. Trạng thái làm việc là không đạt yêu cầu.

Chế độ tiếp xúc lỏng cầu các dây điện động lực: gây rung động bình thường, nhưng dòng điện pha A tăng lên 31,5A cho thấy mất đối xứng các dòng điện pha. Hình ảnh nhiệt phát hiện vị trí kết nối lỏng lẻo có nhiệt độ là 92 °C (bình thường là 52 °C)

Phổ của vận tốc rung động ở cả bốn chế độ thử nghiệm được trình bày trên H. 3.



H. 3. Phổ vận tốc rung động của AIR160S4 trong bốn chế độ

Phổ biên độ dòng điện pha A khi kết nối dây điện động lực lỏng lẻo, H. 4.

3.4.3. Tính toán URL theo mô hình Weibull

Theo dữ liệu có trong tài liệu [5; 11], ổ trục với vòng bi

6311 của động cơ điện AC AIR160S4 có:

$$\beta = 2,3; \eta = 38.000h.$$

Thời gian làm việc thực tế $t_{cur} = 18.000h$.

Độ rung thực tế $4,8mm/s$, như vậy vượt quá tiêu chuẩn cho phép ($1,2mm/s$) là 4 lần.

Theo mô hình suy giảm tuyến tính:

$$\eta = 38.000 \cdot (1,2 / 4,8) = 32.500h.$$

Xác suất làm việc không gặp sự cố theo (12):

$$t_{50} = 32.500 \cdot (\ln 2)^{1/2,3} = 32.500 \cdot (0,693)^{0,435} = 27.851h.$$

Tuổi thọ còn lại:

$$URL = 27.851 - 18.000 = 9.851h \approx 9.850h.$$

Nếu làm việc 2 ca (4.380 giờ/năm), tức tuổi thọ còn lại là 2,2 năm. Vòng bi 6311 cần thay thế trong 2 đến 3 năm gần nhất.

3.5. Đánh giá kinh tế-kỹ thuật

Hiệu quả kinh tế từ việc thực hiện giám sát được tính toán dựa trên dữ liệu của doanh nghiệp và nguồn mở [3; 5]. Việc đánh giá kỹ thuật và kinh tế nhờ triển khai một hệ thống chẩn đoán được trình bày trong Bảng 6.

Bảng 6. Đánh giá kinh tế-kỹ thuật khi triển khai hệ thống chẩn đoán

Chỉ số	Trước khi triển khai	Sau khi triển khai	Hiệu quả
Số lần dừng khẩn cấp mỗi năm	2	0,5	-1,5 leave
Chi phí cho một lần dừng khẩn cấp, USD	13.927	13.927	-
Chi phí giám sát trong một năm, USD	0.00	838	+838
Hiệu quả hàng năm, USD	-	-	41.000
Chi phí đầu tư (máy phân tích rung động), USD	0.00	4.500	-
Thời gian hoàn vốn, năm	-	-	1,3 tháng

Từ **Bảng 6**, có thể tính ra hiệu quả kinh tế hàng năm là xấp xỉ 41.000USD; thời gian hoàn vốn là 1,3 tháng. Việc triển khai hệ thống chẩn đoán “Độ tin cậy” là hợp lý về mặt kinh tế.

4. Thảo luận về kết quả

Dữ liệu kết quả nghiên cứu đã xác nhận ý tưởng chính của nghiên cứu. Quá trình chẩn đoán toàn diện đã xác định được cả bốn lỗi chính được tạo ra một cách nhân tạo, bốn lỗi này là bốn lỗi đặc trưng nhất của hệ thống truyền động điện động cơ không đồng bộ công nghiệp, ảnh hưởng trực tiếp đến thời gian làm việc liên tục/gián đoạn của hệ.

Việc tính toán theo các công thức lý thuyết cho tuổi thọ còn lại (RULL), cho ra kết quả là 9.850 giờ làm việc ở tốc độ rung động $4,8mm/s$. Kết quả này phù hợp với đánh giá của các chuyên gia trong quá trình kiểm tra thực tế.

5. Kết luận

Bài báo trình bày việc nghiên cứu phát triển một cách chẩn đoán tình trạng và tính toán tuổi thọ làm việc của hệ thống truyền động điện không đồng bộ dựa trên động cơ AIR160S4 và bộ biến tần Schneider Altivar 320.

Các kết luận chính:

+ Các chỉ số của “Độ tin cậy” được nghiên cứu, gồm:

$$P(t); T_{mid} = 19.230h; K_g = 0,9988.$$

+ Một loạt lỗi được phát triển, gồm: ổ bi (50%); cách điện; rotor; IGBT; tụ điện; hộp số; ốc vít.

+ Các cách chẩn đoán được lựa chọn, gồm: rung động (85% đến 95% với các lỗi cơ khí); MCSA (cho rotor); chụp ảnh nhiệt (cho cách điện và tiếp xúc điện).

+ Phát triển thuật toán để tính toán RULL bằng cách sử dụng mô hình Weibull, cho kết quả:

$$\beta = 2,3; \eta = 38.0002,$$

suy ra RULL= 9.850 giờ (tương đương 2,2 năm cho hoạt động 2 ca/ngày)

+ Một thực nghiệm đã được tiến hành với: bốn lỗi đặc trưng được xác định đầy đủ; hiệu quả của việc bảo trì dựa trên triển khai cách chẩn đoán kết hợp là 41.000USD/năm với thời gian hoàn vốn đầu tư thiết bị và triển khai hệ thống chẩn đoán là 1,3 tháng.

Những kết quả nghiên cứu công bố trong bài báo này, hoàn toàn có thể áp dụng tại các doanh nghiệp công nghiệp; các dịch vụ kỹ thuật khu đô thị; ..., trong công tác vận hành các hệ bơm; thông gió; ..., nhằm giảm chi phí bảo trì.

Kết quả nghiên cứu này có thể tiếp tục phát triển theo hướng: mở rộng mô hình cho các hệ truyền động điện sử dụng động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu; thêm giả hóa nhiệt vào tính toán tuổi thọ còn lại; phát triển một mô-đun có chức năng giám sát tự động.

6. Tài liệu tham khảo

- [1] ГОСТ 27.002–2015. Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения. — Москва: Стандартинформ, 2016. — 24 с.
- [2] ГОСТ 31606–2012. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные мощностью от 0,12 до 400 кВт включительно. Общие технические требования. — Москва: Стандартинформ, 2014. — 32 с.
- [3] РД 153–34.0–20.611–2018. Методика оценки технического состояния электродвигателей по результатам диагностики. — Москва: ОАО «ВНИИЭ», 2018. — 48 с.
- [4] ГОСТ ISO 10816–3–2017. Вибрация. Оценка состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. — Москва: Стандартинформ, 2017. — 28 с.
- [5] Барков, А. В. Вибрационная диагностика машин и оборудования: учебное пособие / А. В. Барков, Н. А. Баркова. — Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического университета, 2020. — 380 с.
- [6] Цырук, С. А. Надёжность систем электропривода: учебное пособие / С. А. Цырук. — Москва: Энергоатомиздат, 2021. — 290 с.
- [7] Исмагилов, Ф. Р. Диагностика электродвигателей: монография / Ф. Р. Исмагилов, И. Х. Хайруллин. — Уфа: УГАТУ, 2019. — 210 с.
- [8] Лурье, З. Я. Прогнозирование остаточного ресурса электрических машин / З. Я. Лурье, М. М. Бронштейн. — Екатеринбург: УрФУ, 2022. — 168 с.
- [9] Шрейнер, Р. Т. Электромеханические и тепловые режимы асинхронных двигателей в системах частотного управления / Р. Т. Шрейнер, А. В. Костылев, В. К. Кривовяз. — Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т», 2018. — 361 с.
- [10] Прахов, В. И. Современные методы диагностики асинхронных двигателей / В. И. Прахов, А.

С. Бычков // Электротехника. — 2021. — № 8. — С. 24–31.

[11] Антипов, В. Н. Применение модели Вейбулла для оценки надёжности систем электропривода / В. Н. Антипов, Д. А. Шахов // Промышленная энергетика. —

2022. — № 5. — С. 17–24.

[12] Технический каталог. Двигатели асинхронные общепромышленного применения серии АИР: справочник / ОАО «ВЭМЗ». — Владимир, 2023. — 96 с.а.