

NGHIÊN CỨU, THIẾT KẾ, CHẾ TẠO HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN VÀ GIÁM SÁT TẬP TRUNG CỤM MÁY NÉN KHÍ TRỤC VÍT CÔNG NGHIỆP

RESEARCH, DESIGN AND MANUFACTURE OF A CENTRALIZED CONTROL AND MONITORING SYSTEM FOR INDUSTRIAL SCREW COMPRESSOR CLUSTERS

Nguyễn Văn Đưa^{1,*}, Nguyễn Quốc Hưng¹, Trần Hùng Mạnh¹,
Đỗ Trọng Tấn¹, Phạm Thanh Phúc², Nguyễn Thu Hà³

DOI: <https://doi.org/10.57001/huivh5804.2026.045>

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày nghiên cứu và chế tạo một hệ thống điều khiển và giám sát tập trung cho cụm máy nén khí trục vít công nghiệp, kết hợp thuật toán dự báo trạng thái áp suất trung tâm nhằm nâng cao hiệu suất và tiết kiệm năng lượng. Hệ thống bao gồm bộ điều khiển trung tâm, các thiết bị ngoại vi và phần mềm giám sát qua giao diện web. Thuật toán điều khiển dựa trên việc điều chỉnh linh hoạt các ngưỡng tải (Load) và không tải (Unload) theo xu thế thay đổi áp suất (dP/dt), giúp cân bằng tải giữa các máy nén và duy trì áp suất ổn định. Kết quả thử nghiệm cho thấy hệ thống có thời gian phản hồi nhanh (trung bình 3,0 - 10,0 giây) và tiết kiệm điện năng khoảng 3 - 5% so với vận hành truyền thống. Các kết quả này khẳng định hiệu quả của giải pháp điều khiển tập trung và đóng góp quan trọng trong tối ưu hóa hệ thống khí nén công nghiệp.

Từ khóa: Khí nén công nghiệp, hệ thống điều khiển tập trung, tiết kiệm năng lượng.

ABSTRACT

This paper presents the research, design and implementation of a centralized control and monitoring system for an industrial screw compressor cluster, combined with a central pressure forecasting algorithm to improve efficiency and save energy. The system consists of a central controller, peripheral devices, and web-based monitoring software. The control algorithm dynamically adjusts the load and unload pressure thresholds based on the rate of pressure change (dP/dt), optimizing compressor loading to maintain stable pressure. Experimental results show fast response (3,0–10,0 s on average), and about 3-5% energy savings compared to conventional operation. These findings validate the proposed centralized control solution and its contribution to enhancing compressor system performance.

Keywords: Industrial compressed air, centralized control system, energy saving.

¹Viện Ứng dụng công nghệ

²Công ty Điện lực Lai Châu

³Trường Điện - Điện tử, Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: nguyenduabka@gmail.com

Ngày nhận bài: 13/11/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 28/12/2025

Ngày chấp nhận đăng: 30/3/2026

1. GIỚI THIỆU

Hệ thống máy nén khí là một thành phần quan trọng và tiêu thụ nhiều năng lượng trong công nghiệp. Trong những năm 2020, điện năng tiêu thụ của hệ thống khí

nén chiếm 10% tổng năng lượng công nghiệp sử dụng tại Úc [1] và các nước Châu Âu [2] tương đương hơn 80TWh mỗi năm trong EU (có thể kể đến: Đức gần 14TWh, Pháp và Ý 12TWh mỗi nước, Anh gần 10TWh) [3], đặc biệt lên

tới 30% tại Hoa Kỳ [4]. Trong khi đó, đây còn là một trong những hệ thống có hiệu suất sử dụng năng lượng kém nhất, chỉ 10 - 30% năng lượng điện được chuyển hóa thành năng lượng khí dưới dạng cơ năng và nội năng, phần lớn bị thất thoát dưới dạng năng lượng nhiệt, rò rỉ và cách quản lý không hiệu quả [5, 6]. Để giải quyết vấn đề hiệu suất thấp này, các nghiên cứu quốc tế đã chỉ ra xu hướng dịch chuyển mạnh mẽ sang việc tích hợp IoT và thuật toán điều khiển thông minh. Theo nghiên cứu mới nhất từ nhóm nghiên cứu Trường Đại học Bách khoa - Đại học Quốc gia TP.HCM [7], việc tối ưu hóa lịch trình hoạt động của cụm máy nén thông qua giải thuật điều khiển tập trung là chìa khóa để giảm thiểu lãng phí năng lượng do chạy không tải. Đồng quan điểm này, các mô hình thực nghiệm của Xia Yudong và cộng sự [8] cũng chứng minh rằng việc áp dụng điều khiển phối hợp có thể cải thiện đáng kể hiệu suất năng lượng so với các phương pháp vận hành truyền thống.

Ở nước ta, theo thống kê của Bộ Công Thương, tổng lượng điện tiêu thụ trong sản xuất công nghiệp lên tới trên 40% trong tổng số 250TWh tổng điện năng tiêu thụ của cả nước, trong đó, hệ thống khí nén thường chiếm từ 12-25% tổng điện năng tiêu thụ của nhà máy, tùy theo quy mô và ngành nghề [9]. Ngoài ra, theo thống kê từ các nhà máy lớn như Stanley Electric Vietnam, việc sử dụng máy nén khí không hiệu quả có thể gây thất thoát năng lượng lên tới 30 - 40%, chủ yếu do rò rỉ, vận hành không tối ưu và thiếu kiểm soát tải [10]. Điều này đặt ra nhu cầu lớn và tiềm năng phát triển mạnh mẽ cho các hệ thống điều khiển và giám sát giúp nâng cao hiệu suất sử dụng hệ thống khí nén đồng thời giảm thiểu các hiện tượng rò rỉ khí. Việc nghiên cứu và chế tạo hệ thống điều khiển và giám sát tập trung cụm máy nén khí trực vít công nghiệp kết hợp thuật toán dự báo trạng thái áp suất trung tâm với mục đích tăng hiệu suất sử dụng và giảm thiểu sự thất thoát điện năng trong hệ thống máy nén.

Hiện nay, đa số các máy nén kiểu cũ không được trang bị biến tần hoặc các máy nén có biến tần trong hệ thống máy nén không có bộ điều khiển tập trung, việc tiêu tốn năng lượng xảy ra khi máy nén hoạt động ở chế độ không tải (Unload) không tạo ra khí nén nhưng vẫn tiêu tốn tới 30 - 40% điện năng so với khi chạy toàn tải (Load). Việc không có bộ điều khiển tập trung cũng khiến cho dải áp suất của hệ thống từ điểm ngưỡng dưới (Min) lên đến điểm ngưỡng trên (Max) cũng phải được nới rộng, khiến cho áp suất trung bình của hệ thống phải duy trì ở mức cao hơn (thông thường là 0,5 - 1 bar) so với nhu cầu thực sự của nhà máy để đảm bảo duy trì áp suất. Theo thống

kê của hãng máy nén Kobelco Nhật Bản, cứ giảm được 1 bar áp suất trung bình sẽ giúp tiết kiệm tối đa tới 7% công suất đầu trục của động cơ máy nén khí. Thêm vào đó, việc điều khiển các máy nén chạy độc lập dẫn đến tình trạng không đồng bộ về thời gian chạy dừng (Running time), khiến cho hệ thống máy nén khí không được bảo dưỡng tại cùng một thời điểm, làm tăng chi phí cho nhà máy.

Thực trạng này đặt ra nhu cầu cấp thiết về việc áp dụng các giải pháp quản lý năng lượng tiên tiến, phù hợp với các hướng dẫn kỹ thuật quốc gia mới nhất về tối ưu hóa hệ thống khí nén công nghiệp [11]. Bên cạnh đó, các nghiên cứu trong nước gần đây về giám sát năng lượng thời gian thực [12] và ứng dụng IoT trong công nghiệp [13] cũng đang mở ra cơ hội lớn cho việc phát triển các hệ thống điều khiển và giám sát giúp nâng cao hiệu suất, đồng thời giảm thiểu hiện tượng rò rỉ khí.

Trong bài báo này, hệ thống điều khiển - giám sát tập trung cho cụm máy nén khí trực vít công nghiệp được thiết kế và xây dựng nhằm nâng cao hiệu quả vận hành và giảm tiêu thụ điện năng. Các nội dung nghiên cứu được trình bày trong các phần tiếp theo và được minh chứng bằng các kết quả thử nghiệm đáng tin cậy.

2. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

2.1. Xây dựng thuật toán hệ thống điều khiển

2.1.1. Mục đích

Thuật toán điều khiển được phát triển nhằm mục đích phối hợp hoạt động của các máy nén trong hệ thống sao cho áp suất đầu ra tại bình tích luôn nằm trong ngưỡng đã cài đặt [P_{LOW} , P_{HIGH}]. Đồng thời, hệ thống cố gắng thu hẹp dải áp suất này càng nhiều càng tốt (để giảm áp suất trung bình yêu cầu) mà vẫn đảm bảo ổn định. Nhờ kiểm soát áp suất chặt chẽ và cân bằng công suất tải, hệ thống cải thiện hiệu suất tổng thể và giảm tiêu hao điện năng của cụm máy. Ngoài ra, thuật toán điều khiển cũng xây dựng cơ chế phân bổ thời gian vận hành giữa các máy nén (ví dụ xoay vòng ưu tiên theo máy, theo giờ làm việc), qua đó đảm bảo mọi thiết bị đều được đưa vào bảo trì đồng bộ theo chu kỳ, tránh tình trạng một số máy quá tải trong khi máy khác nhàn rỗi.

2.1.2. Nguyên tắc điều khiển

Các máy nén được điều khiển bật/tắt khi áp suất nằm ngoài khoảng [P_{LOW} - P_{HIGH}] và việc lựa chọn máy nén để tiến hành bật/tắt phải tuân thủ các điều kiện tương ứng với từng chế độ hoạt động bao gồm:

Chế độ hoạt động theo mức ưu tiên: Ở chế độ này, các máy nén được người vận hành cài trước với các mức ưu

tiên cố định. Bộ điều khiển căn cứ vào các mức ưu tiên đó để quyết định Load/Unload máy nén tương ứng.

Chế độ hoạt động theo thời gian: Ở chế độ này, ngoài các mức ưu tiên cài đặt sẵn như ở chế độ hoạt động theo mức ưu tiên, bộ điều khiển sẽ ưu tiên căn cứ theo thời gian chạy của từng máy nén để lựa chọn Load/Unload, đảo máy nén sao cho thời gian vận hành của các máy nén sau một khoảng thời gian hoạt động (1 tháng, 3 tháng,...) sẽ xấp xỉ bằng nhau.

Chế độ hoạt động tiết kiệm năng lượng: ở chế độ này, bộ điều khiển sẽ phân tích các thông số về công suất máy nén, lưu lượng khí nén, loại máy nén, thời gian ổn định liên tục của áp suất bình tích để thực hiện lựa chọn Load/Unload, đảo máy nhằm tối ưu hóa năng lượng tiêu thụ cho hệ thống.

Chế độ lập lịch thủ công: Các máy nén có thể cài đặt thời gian làm việc cụ thể theo ca, theo ngày,... để phù hợp với kế hoạch vận hành của nhà máy.

Việc Load/Unload các máy nén tại thời điểm nào cũng cần được tính đến nhằm tránh việc áp suất ngoài bình bị tụt sâu hoặc vọt lớn do sự thay đổi đột ngột tải sử dụng khí nén dẫn đến có những thời điểm, lượng khí nén trong bình tích được sử dụng quá nhiều hoặc quá ít. Do vậy nếu chỉ đơn thuần Load/Unload các máy nén khi áp suất chạm ngưỡng P_{LOW} và P_{HIGH} thì sẽ không thể giúp ổn định được áp suất khí trong bình mà bộ điều khiển cần căn cứ vào sự thay đổi của áp suất bình tích để có thể đưa ra các lệnh điều khiển sớm hơn nhằm tránh việc áp suất bị tụt sâu hoặc vọt lớn.

2.1.3. Thuật toán điều khiển

Nguyên tắc cơ bản là điều khiển bật/tắt máy nén khi áp suất vượt ra ngoài khoảng $[P_{LOW}, P_{HIGH}]$. Việc lựa chọn máy nén nào để chạy ở chế độ toàn tải hoặc không tải tuân theo các điều kiện của chế độ hoạt động như trên. Đặc biệt, bài toán đặt ra cách thức xác định các ngưỡng tải (Load Region, LR) và không tải (Unload Region, UR) một cách linh hoạt. Có ba phương án được xem xét:

Phương án a: Ngưỡng cố định. Xác định trước các điểm LR/UR với hệ số cố định. Ví dụ, có thể đặt

$$\begin{aligned} LR_1 &= P_{LOW} + 10\% \times (P_{HIGH} - P_{LOW}) \\ LR_2 &= P_{LOW} + 20\% \times (P_{HIGH} - P_{LOW}) \\ UR1 &: P_{HIGH} - 10\% (P_{HIGH} - P_{LOW}) \\ UR2 &: P_{HIGH} - 20\% (P_{HIGH} - P_{LOW}) \end{aligned} \quad (1)$$

Ưu điểm là đơn giản, dễ triển khai; nhược điểm là thay đổi của áp suất nhất là trong các trường hợp nhu cầu sử dụng khí nén thay đổi đột ngột có thể dẫn đến việc

Load/Unload các máy nén không kịp, gây ra tình trạng tụt áp suất quá sâu hoặc vọt lớn.

Phương án b: Điều chỉnh theo dP/dt . Thay vì cố định các điểm LR và UR bằng các hệ số cố định (10%, 20%...) thì hệ thống liên tục tính toán các điểm LR/UR dựa trên tốc độ thay đổi áp suất (dP/dt). Cụ thể, tại 2 thời điểm $t - 1$ và t liên tục, cách nhau 1 giây ta luôn tính được tốc độ thay đổi áp suất v_t và gia tốc a_t theo công thức sau:

$$v_t = \frac{dP}{dT} = P_t - P_{t-1} \quad (2)$$

$$a_t = \frac{\left(\frac{dP}{dT}\right)}{dT} = v_t - v_{t-1} \quad (3)$$

Dựa trên v_t , hệ thống xác định lại các điểm LR/UR trong thời gian thực bằng công thức sau:

$$LR = P_{LOW} + (\alpha \cdot v_t) (P_{HIGH} - P_{LOW}), \quad (4)$$

$$UR = P_{HIGH} - (\alpha \cdot v_t) (P_{HIGH} - P_{LOW}),$$

Trong đó, α gọi là Region Change Coefficient (RCC), đơn vị %, có thể cấu hình theo hệ thống.

Ngoài ra, bộ điều khiển còn dự báo áp suất tương lai sau thời gian ΔT bằng công thức động học đơn giản:

$$P_{t+\Delta T} = P_t + v_t \Delta T + \frac{1}{2} a_t \Delta T^2 \quad (5)$$

Khoảng thời gian " ΔT " được cấu hình và cài đặt phụ thuộc vào hệ thống máy nén cụ thể. Khi áp suất dự báo $P_{t+\Delta T}$ chạm ngưỡng LR hoặc UR, bộ điều khiển sẽ ra lệnh **Load** hoặc **Unload** phù hợp và chờ một thời gian trễ T_{delay} trước khi điều khiển tiếp tục (để tránh thao tác liên tục).

Ưu điểm của phương án này là khắc phục phần nào nhược điểm của ngưỡng cố định - bộ điều khiển sẽ đưa ra quyết định sớm hơn theo xu thế, giảm độ trễ và tránh trượt áp suất quá sâu.

Nhược điểm là phương pháp này phụ thuộc vào độ chính xác của ước lượng v_t , a_t và tính toán động học đơn giản chưa hẳn phản ánh đầy đủ đặc tính áp suất (áp suất thay đổi chậm, có nhiễu). Ngoài ra tốc độ lấy mẫu của hệ thống rất nhỏ (dưới 10Hz) khiến cho việc tính toán a_t đôi khi không phản ánh đúng xu thế thay đổi áp suất. Tuy nhiên, trong các hệ thống khí nén công nghiệp, việc sử dụng dP/dt vẫn giúp cải thiện chất lượng điều khiển chung

Phương án c: sử dụng hồi quy tuyến tính (Linear regression) để ước lượng xu thế thay đổi áp suất. Thay vì sử dụng a_t vốn nhạy cảm với tốc độ lấy mẫu của hệ thống, phương án này sử dụng mô hình Hồi quy tuyến

tính (Linear Regression) với phương pháp Bình phương tối thiểu OLS (Ordinary Least Squares) để quan sát sự thay đổi của áp suất trong cửa sổ thời gian T_{window} (5 - 10s) nhằm đưa ra được xu thế thay đổi của áp suất (Slope).

Với đặc điểm thay đổi của áp suất là chậm, hệ số có tần số lấy mẫu là 1Hz, phương án này xấp xỉ phương trình thay đổi áp suất trong khoảng thời gian T_{window} thành phương trình bậc nhất có dạng:

$$P(t) = a + b * t \tag{6}$$

Với b: độ dốc (Slope): phản ánh xu thế thay đổi áp suất trong khoảng thời gian T_{window}

Hệ thống lấy mẫu áp suất trong một khoảng thời gian $T_{window} = n$ (giây) vừa đủ. Cấu hình khoảng thời gian này tùy theo từng hệ máy. Gọi các mẫu tại thời điểm $t_i = 0, 1, 2, \dots, n-1$ có áp suất tương ứng là P_i . Phương pháp OLS được sử dụng để tính b và a, theo công thức:

$$b = \frac{n * \sum(t_i * P_i) - \sum t_i * \sum P_i}{n * \sum t_i^2 - (\sum t_i)^2} \tag{7}$$

$$a = \bar{P} - b * \bar{t}$$

Với $\bar{P} = \frac{1}{n} * \sum P_i$ và $\bar{t} = \frac{1}{n} * \sum t_i$

Hệ thống dự đoán áp suất tại thời điểm $t' = t + T_{delay}$:

$$P_{t'} = a + b * t' \tag{8}$$

Khi áp suất dự đoán $P_{t'}$ chạm ngưỡng LR hoặc UR, bộ điều khiển sẽ gửi lệnh để Load hoặc Unload máy nén đã được lựa chọn tương ứng theo chế độ hoạt động.

Ưu điểm nổi bật của cách tiếp cận này là tính đơn giản và chi phí tính toán thấp, rất phù hợp với môi trường thiết bị nhúng có tài nguyên hạn chế. Bộ điều khiển đánh giá sự thay đổi của áp suất sau khi Load/Unload, tránh việc Load/Unload liên tục các máy nén khiến cho áp suất hệ thống dao động lên xuống liên tục. Việc không Load các máy nén liên tục cũng giúp giảm áp suất trung bình của cả hệ thống, từ đó giúp tiết kiệm điện năng hơn.

Nhược điểm của phương pháp này là áp suất có thể bị ảnh hưởng bởi nhiễu nếu không có bước xử lý nhiễu. Để khắc phục nhược điểm trên có

thể áp dụng thêm bộ lọc trung vị (Median Filter) để loại bỏ nhiễu (spike) kết hợp với lọc Trung bình động hàm mũ (Exponential Moving Average) để làm mượt các mẫu thu được. Tuy nhiên khi sử dụng lọc sẽ làm chậm đáp ứng của hệ thống tùy vào hệ số α của bộ lọc

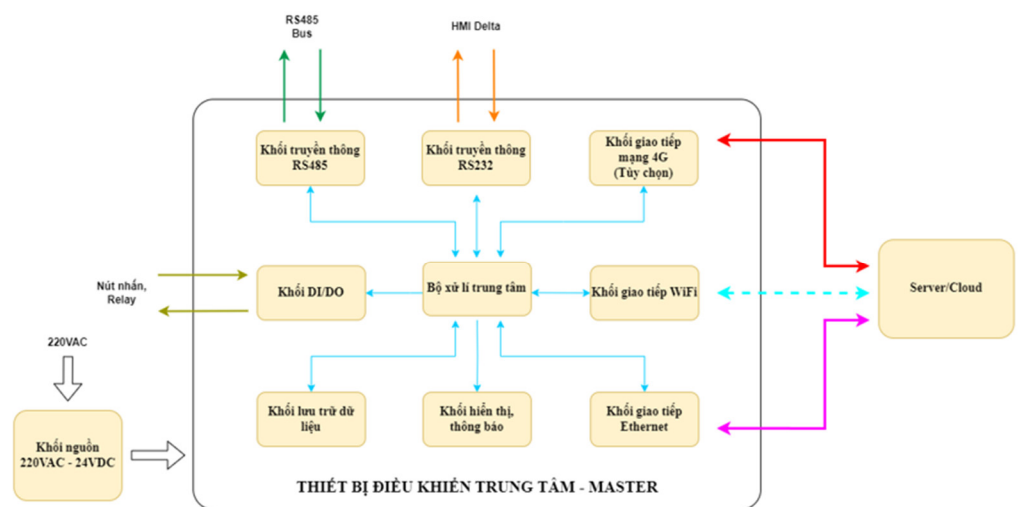
Trong bài báo này, phương án sử dụng hồi quy tuyến tính để ước lượng xu thế thay đổi áp suất được lựa chọn sử dụng để thiết kế phần mềm bộ điều khiển tập trung.

2.2. Thiết kế hệ thống điều khiển và giám sát tập trung hệ máy nén trực vít

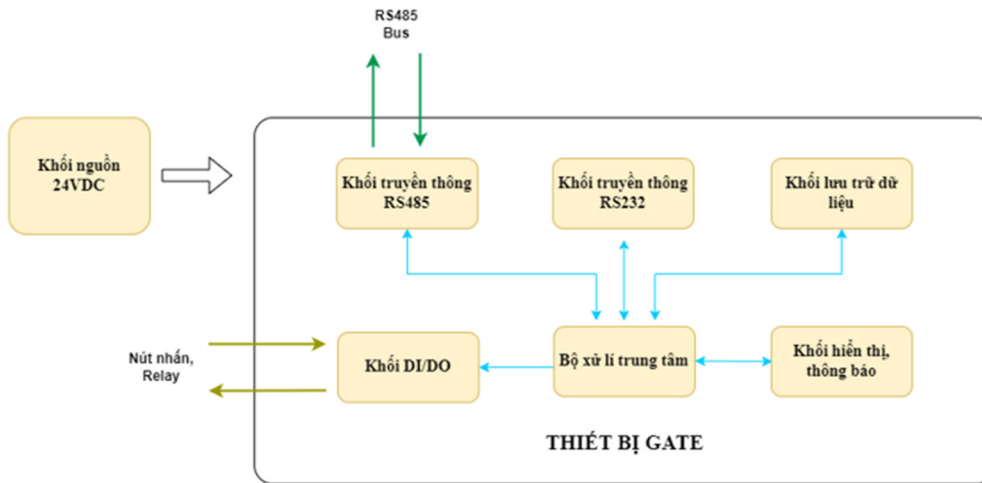
2.2.1. Thiết kế phần cứng

Hệ thống bao gồm bộ điều khiển trung tâm và các thiết bị ngoại vi gắn bên cạnh mỗi máy nén. Bộ điều khiển trung tâm (đặt trong phòng máy) chịu trách nhiệm thu nhận dữ liệu áp suất và trạng thái từ tất cả các máy nén, rồi điều khiển hoạt động của từng thiết bị. Sơ đồ khối điều khiển trung tâm được gắn tại hiện trường phòng máy nén được thể hiện ở hình 1.

Bộ điều khiển trung tâm sẽ điều phối hoạt động của các máy nén dựa theo áp suất đầu bình tích, nhằm bảo đảm cho các máy nén sẽ hoạt động một cách tối ưu nhất mà vẫn bảo đảm yêu cầu về áp suất đầu ra. Bộ điều khiển trung tâm sẽ lấy các thông tin của máy nén thông qua đường truyền RS485, đồng thời gửi các tín hiệu điều khiển tương ứng trên đường truyền này. Ngoài ra tại thiết bị điều khiển trung tâm có gắn kèm màn hình HMI để người vận hành có thể dễ dàng theo dõi trạng thái vận hành của hệ thống hoặc can thiệp điều khiển nếu cần. Các thông tin về hoạt động của hệ thống được lưu trữ và được gửi lên hệ thống giám sát qua Internet bằng các kết nối nổi như 4G/WiFi hoặc Ethernet. Hệ thống được cấp nguồn 24VDC thông qua bộ chuyển đổi nguồn 220VAC - 24VDC.



Hình 1. Sơ đồ khối thiết bị điều khiển trung tâm

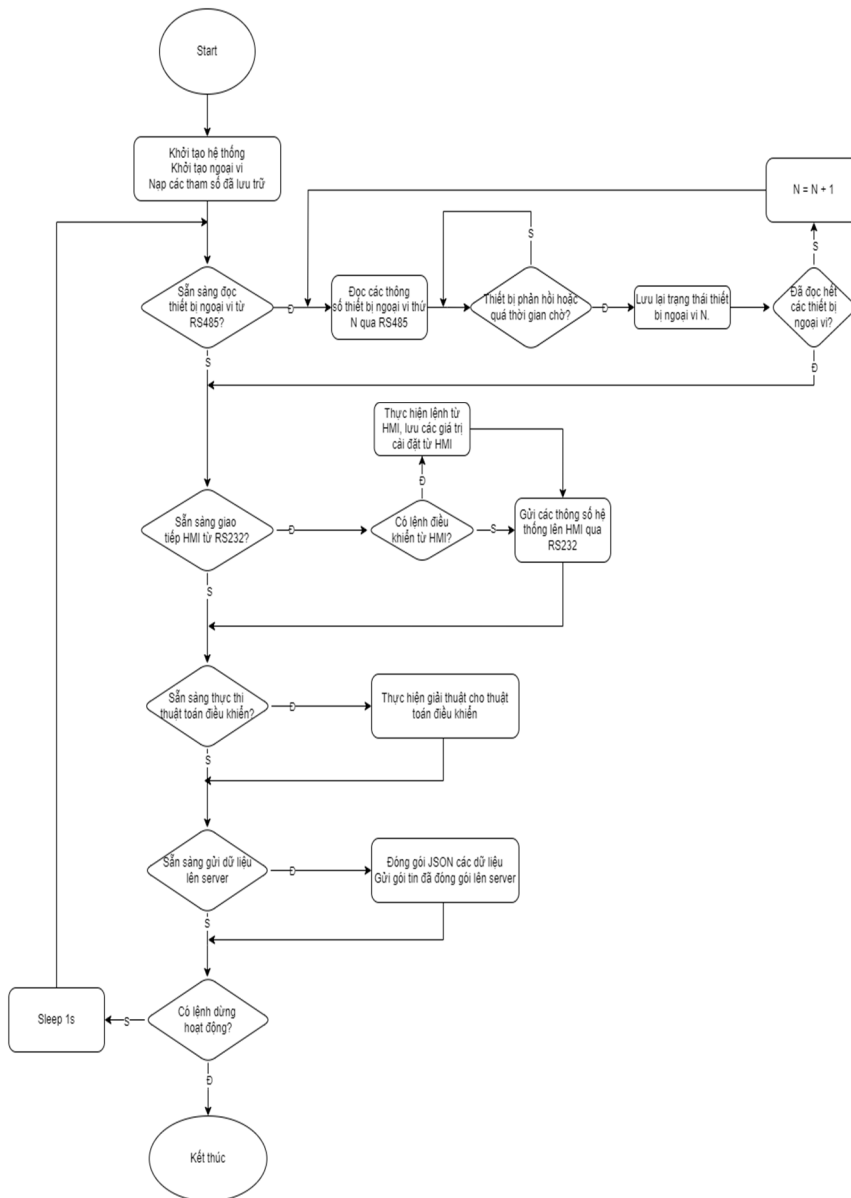


Hình 2. Sơ đồ khối thiết bị ngoại vi

Ngoài ra, các thiết bị ngoại vi được đặt bên cạnh các máy nén, có nhiệm vụ chuyển đổi các tín hiệu điều khiển từ thiết bị điều khiển trung tâm để thực hiện điều khiển máy nén tương ứng. Đồng thời thu thập các thông tin về trạng thái hoạt động của máy nén để gửi về thiết bị điều khiển trung tâm. Sơ đồ khối thiết bị ngoại vi được thể hiện ở hình 2.

2.2.2. Thiết kế phần mềm nhúng

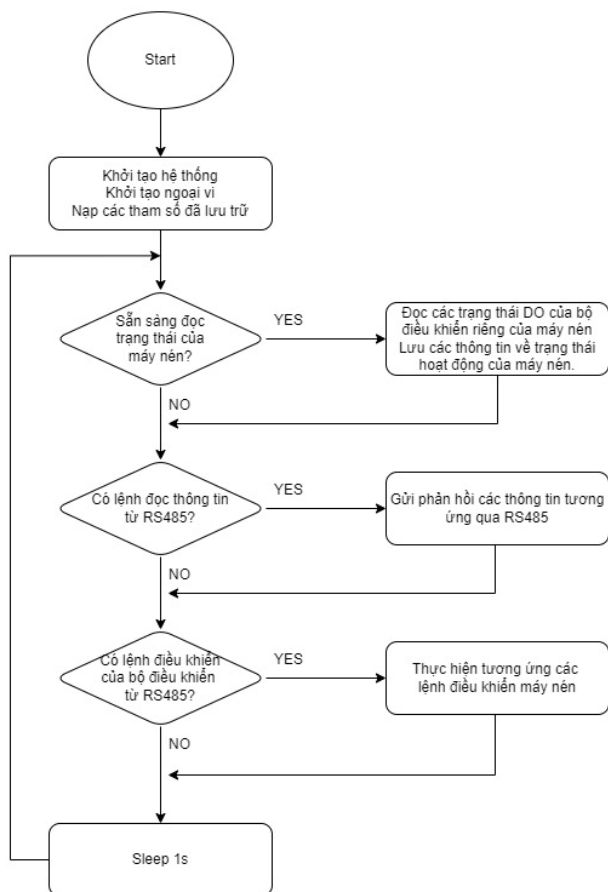
Phần mềm nhúng cho bộ điều khiển trung tâm được thiết kế theo hai quy trình chính: khởi động và thực thi chương trình. Khi cấp nguồn hoặc khởi động lại, vi điều khiển thực hiện khởi tạo hệ thống: khởi tạo thư viện, các ngoại vi (các chân I/O, UART,...) và nạp thông số từ bộ nhớ. Sau đó thiết bị chuyển sang giai đoạn vận hành chính, thực hiện luân phiên các công việc sau: (i) đọc dữ liệu từ thiết bị ngoại vi qua RS485, (ii) giao tiếp với màn hình HMI qua RS232, (iii) thực thi thuật toán điều khiển (đánh giá áp suất, tính dP/dt , ra lệnh Load/Unload), và (iv) gửi dữ liệu giám sát lên server qua giao thức 4G/WiFi/Ethernet. Lưu đồ thuật toán cho bộ điều khiển trung tâm được minh họa ở hình 3 và đảm bảo toàn bộ các bước trên được lặp lại liên tục để duy trì áp suất ổn định.



Hình 3. Lưu đồ thuật toán thiết bị điều khiển trung tâm

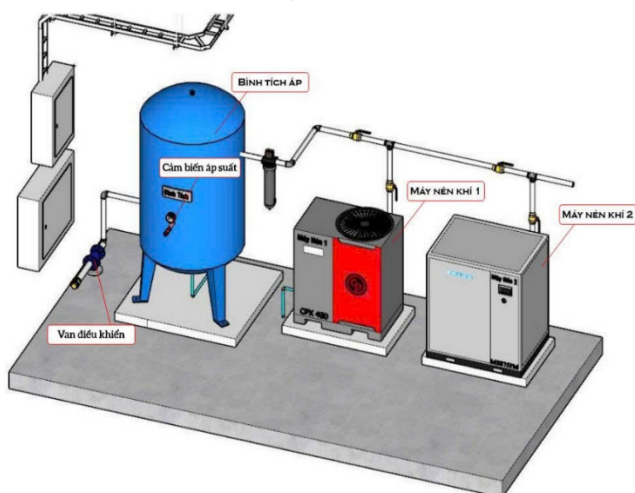
Tương tự, các thiết bị ngoại vi với nhiệm vụ chuyển đổi các tín hiệu điều khiển từ thiết bị điều khiển trung tâm để thực hiện điều khiển máy nén tương ứng. Đồng thời thu thập các thông tin về trạng thái hoạt động của máy nén để gửi về thiết bị điều khiển trung tâm. Lưu đồ thuật toán của thiết bị ngoại vi được thể hiện ở hình 4. Phần mềm nhúng cho thiết bị ngoại vi cũng có hai giai đoạn: khởi động (khởi tạo hệ thống, nạp thông số) và thực thi. Trong giai đoạn vận hành, thiết bị ngoại vi liên tục đọc tín hiệu từ

bộ điều khiển tại máy nén (áp suất, trạng thái Load/Unload, thời gian chạy,...), lưu trữ đệm. Khi nhận lệnh đọc từ bộ trung tâm qua RS485, nó gửi dữ liệu lưu trữ về và sau đó tiếp tục đọc tín hiệu mới. Quy trình này được lập liên tục cho đến khi thiết bị bị ngắt nguồn hoặc khởi động lại.



Hình 4. Lưu đồ thuật toán thiết bị ngoại vi

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN



Hình 5. Sơ đồ thiết lập hệ thống thử nghiệm

Để đánh giá hoạt động của thiết bị, một hệ thống máy nén khí được thiết lập (hình 5) bao gồm: 01 máy nén khí OSP-7.5VA III công suất 7,5kW của hãng HITACHI, 01 máy nén khí XLAM15A công suất 11kW của hãng KOURITSU, 01 bình tích chứa khí dung tích 1000 lit, áp suất thiết kế 10 bar, 01 van xả khí mã KZQ10A-220V có thể điều khiển thông qua MODBUS-RTU. Trong nội dung này, thử nghiệm đánh giá thời gian phản hồi điều khiển và đánh giá khả năng tiết kiệm điện năng khi áp dụng hệ thống được nhóm nghiên cứu tiến hành.

3.1. Đánh giá thời gian phản hồi điều khiển

Thử nghiệm này được tiến hành nhằm đánh giá khả năng đáp ứng của bộ điều khiển trung tâm khi áp suất trong hệ thống thay đổi đột ngột. Mục tiêu là xác định thời gian phản hồi điều khiển, tức khoảng thời gian từ khi bộ điều khiển tác động đến khi áp suất bình tích trở về trạng thái ổn định (nằm trong giới hạn cài đặt). Biến thiên áp suất được tạo ra bằng cách điều khiển van xả khí, đồng thời ghi nhận tín hiệu áp suất thực tế và tín hiệu đầu ra điều khiển của bộ điều khiển trung tâm. Các tín hiệu này được thu thập đồng bộ từ cảm biến áp suất, bộ điều khiển trung tâm và phần mềm giám sát để đảm bảo độ chính xác phép đo.

Bước 1: Thiết lập áp suất ban đầu: Khởi động hệ thống máy nén và điều chỉnh áp suất trong bình chứa về gần giá trị áp suất cài đặt $[P_{LOW} - P_{HIGH}]$. Đợi cho hệ thống đạt trạng thái ổn định (áp suất dao động trong khoảng $\pm 0,05$ bar trong ít nhất 10 giây).

Bước 2: Tạo biến thiên áp suất: Thực hiện điều khiển van xả khí ở các mức độ mở khác nhau (từ 10% đến 100%) để mô phỏng các tình huống sụt áp khác nhau trong hệ thống. Đồng thời, ghi nhận áp suất thực tế theo thời gian và tín hiệu đầu ra điều khiển của bộ điều khiển trung tâm (tín hiệu mở van tăng tải cho máy nén) song song.

Bước 3: Xác định thời điểm và tính toán: Xác định các thông số thời điểm quan trọng trong quá trình. Thời gian phản hồi điều khiển Δt_{set} và thời gian phản ứng trước Δt_{early} của bộ điều khiển được tính theo công thức:

$$\Delta t_{set} = T_s - T_C$$

$$\Delta t_{early} = T_{os} - T_C$$
(9)

Trong đó:

- T_{os} : thời điểm mà nếu giữ nguyên xu thế hiện tại và bộ điều khiển không can thiệp thì áp suất sẽ chạm ngưỡng P_{LOW} hoặc P_{HIGH}
- T_C : thời điểm bộ điều khiển ra lệnh điều khiển máy nén.

- T_s : thời điểm áp suất đổi chiều và nằm trong ngưỡng $[P_{LOW} - P_{HIGH}]$

Bước 4: Đánh giá và kết luận kết quả: Tiến hành thử nghiệm lặp lại với các mức mở van khác nhau (20%, 40%, 60%, 80%, 100%) để đánh giá tính ổn định của bộ điều khiển trong nhiều điều kiện tải.

Bảng 1. Thời gian phản hồi và thời gian đáp ứng của hệ thống

Độ mở van (%)	Δt_{set}	Δt_{early}	Áp suất tại thời điểm $T_s(P_s)$
10	3	8	5,85
20	4	5	5,92
40	6	6	5,15
60	7	5	5,12
80	9	6	5,10
100	10	7	5,05

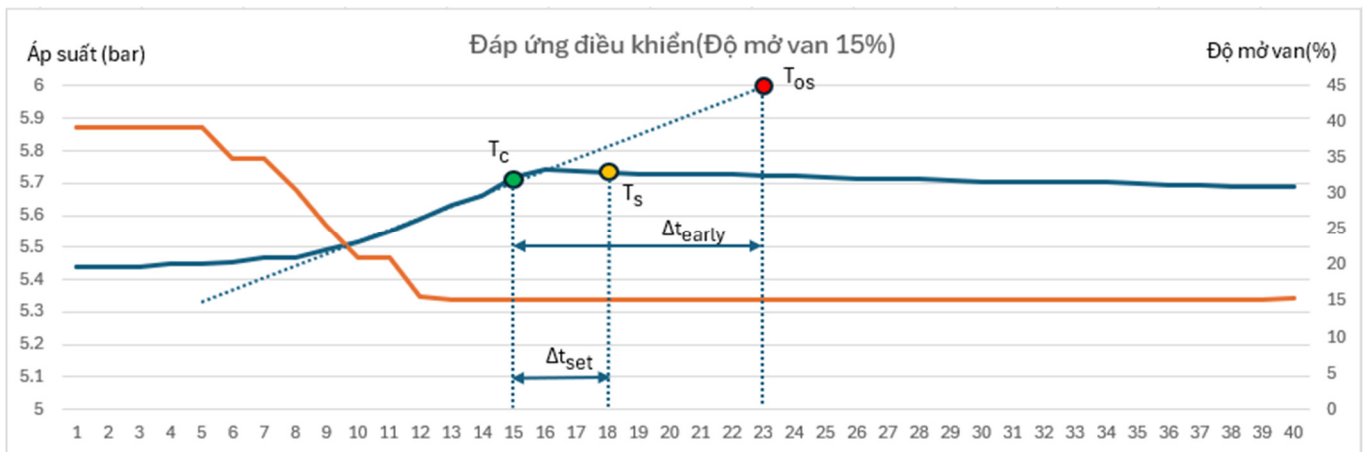
Kết quả được biểu diễn trên đồ thị $P(t)$ theo thời gian, thể hiện rõ thời điểm tác động điều khiển và khoảng thời gian hồi áp trong 2 trường hợp độ mở van là 15% (hình 6) và 93% (hình 7).

Nhận xét: Thời gian phản hồi trung bình của hệ thống nằm trong khoảng 3 - 10 giây, trong thời gian thử nghiệm, áp suất P_s luôn nằm trong giới hạn cài đặt $[P_{LOW} - P_{HIGH}]$ trong cả những trường hợp mà van xả đóng hoặc mở hoàn toàn. Kết quả chứng minh bộ điều khiển có khả năng đáp ứng nhanh, ổn định và chính xác trước biến động áp suất, đáp ứng yêu cầu kỹ thuật của bài toán điều khiển áp suất trung tâm.

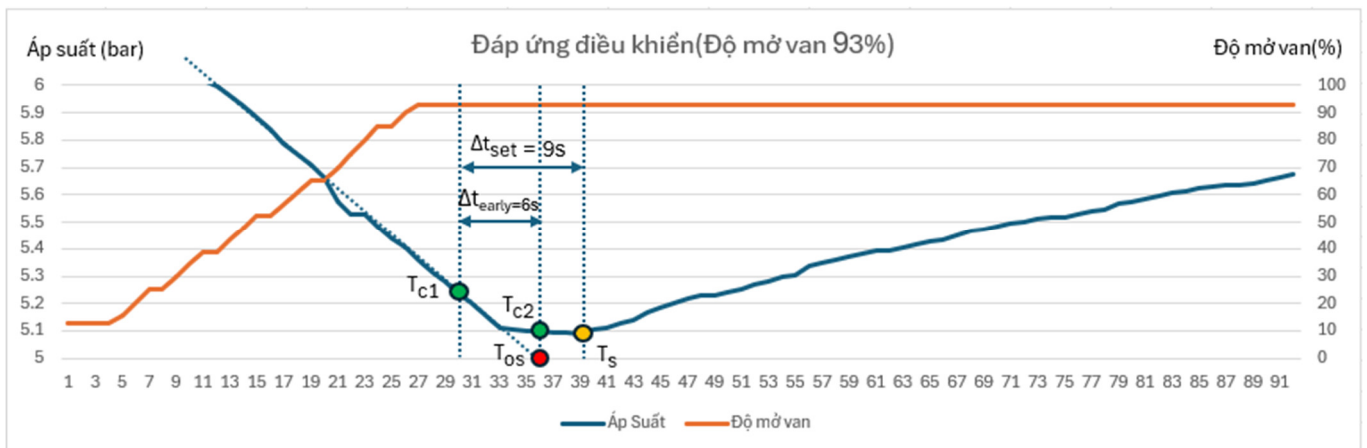
3.2. Đánh giá khả năng tiết kiệm năng lượng

Khả năng tiết kiệm năng lượng được đánh giá bằng cách so sánh hai kịch bản vận hành trong cùng điều kiện tải: (1) chế độ tập trung (Remote/Auto) với bộ điều khiển trung tâm, và (2) chế độ thủ công (Local) khi các máy nén vận hành độc lập theo phương pháp truyền thống. Trong mỗi kịch bản, hệ thống được chạy một khoảng thời gian xác định với kịch bản tải/xả cố định. Trong quá trình chạy, ghi lại dữ liệu áp suất thực tế, trạng thái hoạt động và điện năng tiêu thụ của từng máy.

Giai đoạn 1: Thử nghiệm vận hành hệ thống có sử dụng bộ điều khiển (Chế độ REMOTE)



Hình 6. Đồ thị áp suất theo thời gian trong trường hợp van mở 15%



Hình 7. Đồ thị áp suất theo thời gian trong trường hợp van mở 93%

Bước 1: Xác định dải áp suất làm việc của hệ thống: Yêu cầu áp suất làm việc của hệ thống là trên 5,0 bar. Thử nghiệm trong 2 trường hợp khác nhau: Trường hợp 1 với dải áp suất [5,0 – 6,0 bar] và trường hợp 2 với dải áp suất [5,0 - 5,5 bar]

Bước 2: Thiết lập dải giá trị điều khiển của các máy nén: Cấu hình dải điều khiển áp suất của từng máy nén trong phạm vi [4,5 - 6,5] bar, bao phủ toàn bộ dải áp suất làm việc của hệ thống. Mục đích là để các máy nén không tự Load/Unload mà phải hoạt động theo quyền điều khiển của bộ điều khiển trung tâm.

Bước 3: Chuyển các máy nén sang chế độ Remote.

Bước 4: Thiết lập kịch bản tải/ xả khí: Lập trình van xả khí để mô phỏng thay đổi tải thực tế trong nhà máy, đảm bảo kịch bản tải giống với giai đoạn sau.

Bước 5: Chạy hệ thống ở chế độ Auto: Đặt bộ điều khiển ở chế độ tự động tối ưu. Hệ thống tự động phân phối tải giữa các máy nén và chỉ duy trì số máy cần thiết để đáp ứng áp suất yêu cầu. Trong suốt quá trình chạy, thu thập dữ liệu liên tục: áp suất hệ thống, trạng thái hoạt động, điện năng tiêu thụ và thời gian chạy của từng máy nén.

Giai đoạn 2: Thử nghiệm vận hành hệ thống không sử dụng bộ điều khiển (Chế độ LOCAL)

Bước 1: Thiết lập điều kiện ban đầu: Yêu cầu áp suất của hệ thống là trên 5.0 bar.

Bước 2: Thiết lập dải áp suất làm việc độc lập cho mỗi máy: Máy nén 1 cấu hình dải điều khiển áp suất [5,0 - 6,0 bar]; Máy nén 2 cấu hình dải điều khiển áp suất [5,2 - 6,2 bar]. Khi đó, các máy hoạt động độc lập, không có cơ chế phối hợp tải. Như vậy do đặc điểm xếp chồng dải điều khiển của các máy nén, nên dải áp suất làm việc của hệ thống ở chế độ LOCAL sẽ phụ thuộc vào số lượng máy nén. Càng nhiều máy nén hoạt động độc lập, dải áp suất này càng lớn.

Bước 3: Chuyển các máy nén về chế độ Local

Bước 4: Thiết lập kịch bản tải/xả khí tương tự giai đoạn 1

Bước 5: Chạy hệ thống và ghi dữ liệu: Thực hiện chạy thử nghiệm, ghi lại log dữ liệu gồm thời gian hoạt động, áp suất tức thời, công suất tiêu thụ và chu kỳ Load/Unload của từng máy nén.

Đánh giá kết quả và kết luận

Sau khi hoàn tất hai giai đoạn thử nghiệm, dữ liệu được xử lý và tổng hợp lại. Mức tiết kiệm năng lượng được tính theo công thức:

$$\eta_{save} = \frac{E_{local} - E_{auto}}{E_{local}} \times 100\% \tag{10}$$

Trong đó: E_{local} và E_{auto} lần lượt là điện năng tiêu thụ ở chế độ Local và Remote. Kết quả thu được trình bày trong bảng 2.

Bảng 2. So sánh áp suất trung bình và điện năng tiêu thụ giữa hai chế độ vận hành

Chế độ	Thời điểm chạy	Thời điểm dừng	Tổng thời gian (h)	Áp suất trung bình (bar)	Điện năng tiêu thụ (kWh)	Tiết kiệm (%)
Thử nghiệm lần 1						
Local	10h37'	12h37'	2	5,64	29,57	3,4
Remote	12h55'	14h55'	2	5,60	28,56	
Thử nghiệm lần 2						
Local	10h48'	15h48'	5	5,62	70,15	3,15
Remote	10h26'	15h26'	5	5,57	67,94	
Thử nghiệm lần 3						
Local	10h43'	14h43'	4	5,55	57,08	4,5
Remote	11h00	15h00	4	5,18	54,51	
Thử nghiệm lần 4						
Local	09h30'	15h30'	6	5,58	84,90	5,10
Remote	09h25'	15h25'	6	5,49	80,57	

Nhận xét:

Trong các lần thử nghiệm, ở chế độ remote, bộ điều khiển có thể giúp cho hệ thống tiết kiệm được từ 3 → 5% điện năng tiêu thụ. Ở lần thử nghiệm thứ 3, áp suất trung bình được giảm xuống do dải áp suất cài đặt được thu hẹp lại xuống 5,0 → 5,5 bar, nhờ vậy là điện năng tiêu thụ được giảm nhiều hơn so với 2 lần thử nghiệm đầu tiên. Như vậy có thể thấy việc giảm áp suất trung bình của hệ thống xuống giúp giảm điện năng tiêu thụ.

Ở lần thử nghiệm thứ 4, bộ điều khiển bật tính năng cho phép các máy nén được phép STOP khi chạy không tải trong một khoảng thời gian cài sẵn, nhờ vậy mà điện năng tiêu thụ giảm, giúp tiết kiệm được khoảng 5.1%. Điều đó cho thấy rằng, nếu hệ thống có càng nhiều máy nén, thì việc tắt bớt các máy nén không cần thiết sẽ giúp hệ thống tiết kiệm càng nhiều điện năng.

Nhìn chung, giải pháp điều khiển tập trung đã có hiệu quả trong việc phân bổ tải giữa các máy nén, duy trì áp suất yêu cầu với mức trung bình thấp hơn và giảm được 3 - 5% điện năng so với vận hành truyền thống.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã thành công trong việc xây dựng và chế tạo hệ thống điều khiển - giám sát tập trung cho cụm máy nén khí trực vít công nghiệp. Hệ thống bao gồm phần cứng và phần mềm tích hợp chặt chẽ, cho phép quản lý chung nhiều máy nén qua một bộ trung tâm duy nhất. Thuật toán điều khiển dựa trên dự báo xu thế áp suất (kết hợp đo dP/dt và ước lượng áp suất tương lai) đã giúp hệ thống duy trì áp suất bình tích ổn định trong phạm vi yêu cầu, mở rộng dải điều khiển nhỏ hơn so với cơ chế cũ. Kết quả thử nghiệm cho thấy hệ thống đạt được độ phản hồi nhanh và ổn định (3,0 - 10,0 giây), đồng thời tiết kiệm điện năng đáng kể (khoảng 3 - 5%) so với vận hành thông thường. Những kết quả trên khẳng định đóng góp chính của đề tài là giải pháp điều khiển tập trung tiên tiến giúp tối ưu hóa hiệu suất và giảm thất thoát năng lượng trong hệ thống khí nén.

Về hướng phát triển, có thể tiếp tục tích hợp các thuật toán điều khiển tiên tiến hơn (ví dụ sử dụng mô hình dự báo dài hạn, tối ưu hóa thuật toán chuyển mạch máy nén) và mở rộng thử nghiệm trong môi trường công nghiệp thực tế để đánh giá toàn diện. Giải pháp này cũng có thể được khuyến nghị triển khai tại các nhà máy lớn để góp phần thúc đẩy sử dụng năng lượng hiệu quả và thúc đẩy chuyển đổi số trong quản lý thiết bị khí nén công nghiệp.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi đề tài cấp Bộ Khoa học và Công nghệ theo hợp đồng số 09/2024/HĐ-ĐTCB ngày 31/01/2024.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Australian Government Department of Industry, *Industrial Air Compressors: Technical Discussion Paper*. E3 Equipment Energy Efficiency, 2020.
- [2]. Miriam Benedetti, "Real Time Energy Performance Control for Industrial Compressed Air Systems: Methodology and Applications," *Energy Efficiency of Manufacturing Processes and Systems*, 12, 20, 4198-4203, 2019.
- [3]. H. Hernandez-Herrera, J. I. Silva-Ortega, V. L. Martínez Diaz, "Energy savings measures in compressed air systems," *International Journal of Energy Economics and Policy*, 10, 3, 414-422, 2020.
- [4]. U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, *Improving Compressed Air System Performance*. USA, 2020.
- [5]. Mohamad Thabet, "Management of Compressed Air to Reduce Energy Consumption Using Intelligent Systems," in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020.

[6]. P. Radgen, "Comparing Efficiency: Internet-Based Benchmarking for Compressed Air Systems," *ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry*, 2005.

[7]. Quoc Chi Nguyen, Thanh Huy Phung, Duy Anh Nguyen, Quang Phuoc Tran, Phuong Tung Pham, "Optimization Control of Pneumatic Compressor System," *VNUHCM Journal of Engineering and Technology*, 8, 4, 2681-2688, Oct. 2025.

[8]. Yudong Xia, Jian Wang, Aipeng Jiang, "Modeling and Energy-Efficient Control of a Compressed Air System equipped with Multi-Compressor," *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49, 5, 7527-7543, 2024.

[9]. A. Thư, *Tối ưu hóa hệ thống khí nén cho các doanh nghiệp công nghiệp phía Nam*. kiemtoannangluong.org, 21-5-2024. [Online]. Available: <https://kiemtoannangluong.org/index.php/vi/news/Tin-tuc/Toi-uu-hoa-he-thong-khi-nen-cho-cac-doanh-nghiep-cong-nghiep-phia-Nam-2109/>.

[10]. Duc Do, *Stanley Vietnam: Targeting a 4% Reduction in Annual Energy Consumption Intensity*. National Energy Efficiency Programme, Vietnam, 11-9-2025. [Online]. Available: <https://vneec.gov.vn/tin-tuc/activities/t42992/stanley-vietnam-targeting-a-4-reduction-in-annual-energy-consumption-intensity>.

[11]. Bộ Công Thương và UNIDO, *Hướng dẫn kỹ thuật tối ưu hóa hệ thống khí nén công nghiệp*. Hà Nội, 2024.

[12]. Trần Hồng Hà, Nguyễn Kim Anh, "Điều khiển dự báo tube-mpc thích nghi cho hệ phi tuyến có khâu phi tuyến không biết trước thỏa mãn điều kiện liên tục lipschitz," *Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải*, 65, 39-43, 2021.

[13]. M. M. H. Sohan, S. K. Biswas, M. A. Rahman, A. N. M. Noman, "IoT-Based Real-Time Pneumatic Pressure Monitoring and Notification System: A Case Study in the Manufacturing Sector," in *2023 International Conference on Information and Communication Technology for Sustainable Development (ICICT4SD)*, 24-25 Feb. 2023.

AUTHORS INFORMATION

Nguyen Van Dua¹, Nguyen Quoc Hung¹, Tran Hung Manh¹, Do Trong Tan¹, Nguyen Thanh Phuc², Nguyen Thu Ha³

¹National Center for Technological Progress, Vietnam

²Lai Chau Power Company, Vietnam

³School of Electrical and Electronic Engineering, Hanoi University of Industry, Vietnam