

Nghiên cứu, thử nghiệm công nghệ sóng âm bề mặt không dây thụ động để giám sát nhiệt độ trong các thiết bị dẫn điện cao áp

Lê Quốc Tuấn¹, Nguyễn Văn Đưa^{*}, Nguyễn Quốc Hưng¹, Nguyễn Hoàng Long¹, Nguyễn Thị Thu Hà², Nguyễn Thị Huệ²

¹Trung tâm Công nghệ Vi điện tử và Tin học, Viện Ứng dụng Công nghệ, C6, phường Thanh Xuân Bắc, quận Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam

²Trường Điện - Điện tử, Đại học Bách khoa Hà Nội, 1 Đại Cồ Việt, phường Lê Đại Hành, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

Ngày nhận bài 18/7/2023; ngày chuyển phản biện 20/7/2023; ngày nhận phản biện 11/8/2023; ngày chấp nhận đăng 15/8/2023

Tóm tắt:

Bài báo trình bày về nghiên cứu và thiết kế hệ thống giám sát nhiệt thụ động sử dụng cảm biến nhiệt độ không dây dựa trên nguyên lý sóng âm bề mặt (Surface acoustic wave - SAW). Hệ thống giám sát được sử dụng trên các đối tượng cần được theo dõi phát nhiệt như ở các tiếp điểm đóng cắt, thanh cái và các kết nối cáp tại các tủ hợp bộ hoặc tủ trung thế RMU (Ring main unit). Cảm biến nhiệt độ SAW không dây được sử dụng trong nghiên cứu này chịu được các xung điện áp, còn được gọi là mức cách ly xung cơ bản (BIL - Basic impulse insulation level) và không cần cấp nguồn cho các cảm biến phù hợp với yêu cầu cao đối với các thiết bị lắp trong các tủ kín, tủ hợp bộ trung thế. Trong nghiên cứu này, các tác giả đã tiến hành lựa chọn cảm biến, thiết kế chế tạo bộ truyền dữ liệu và xây dựng phần mềm. Kết quả thử nghiệm trong điều kiện phòng thí nghiệm cho thấy hệ thống hoạt động ổn định, sai số nhiệt độ nằm trong ngưỡng $\pm 2^\circ\text{C}$.

Từ khóa: cảm biến không dây thụ động, cảm biến nhiệt độ dựa trên nguyên lý sóng âm bề mặt, tủ hợp bộ.

Chỉ số phân loại: 2.2

1. Đặt vấn đề

Ngày nay, các trạm cung cấp điện thường phải hoạt động ở hiệu suất cao và bị quá tải dẫn đến nhiều sự cố nguy hiểm, cũng như gây thiệt hại lớn về kinh tế. Trong năm 2012, một giờ mất điện ở Sở Thương mại Chicago, Mỹ đã gây thiệt hại hơn 20 tỷ USD do việc lưu thông buôn bán bị đình trệ. Công ty Sun Microsystems đánh giá cứ mỗi 1 phút mất điện tại Mỹ làm thiệt hại 1 triệu USD [1]. Nguyên nhân gây hỏng hóc tại các trạm điện có thể đến từ nhiều thiết bị như động cơ, máy phát điện, máy biến áp cũng như các bộ phận của hệ thống phân phối điện (kim điện, điểm kết nối, đường dây) do hiện tượng quá nhiệt hoặc do vật liệu hay do quá tải trong từng thiết bị. Các thiết bị trong tủ hợp bộ có thể bị quá nhiệt do tải quá nhiều, hao mòn và điều kiện môi trường hoạt động. Nếu không được giám sát, những điều kiện này có thể dẫn đến hỏng hóc, thiết bị đóng cắt và thiết bị xung quanh, tổn thất sản xuất điện, trong trường hợp nghiêm trọng, có thể gây thương tích tới người vận hành. Các chế độ hư hỏng phổ biến bao gồm nhiệt độ quá cao, phóng điện cục bộ và độ ẩm cao. Nhiệt độ cao có thể xảy ra ở các tiếp điểm đóng cắt, thanh cái và các kết nối cáp có xu hướng lỏng lẻo hoặc bị ăn mòn theo thời gian. Các lỗi tăng nhiệt không được phát hiện như thế này sẽ tăng cường quá trình oxy hóa và sinh nhiệt dẫn đến cháy, bong tróc, nóng chảy và ăn mòn vật liệu cách nhiệt. Nếu không xác định và kiểm soát kịp thời, mức độ quá nhiệt sẽ ảnh hưởng lớn đến vật liệu bảo vệ và tuổi thọ thiết bị trong tủ hợp bộ. Nguy cơ nổ thiết bị đóng cắt có thể làm ảnh hưởng đến an toàn.

*Tác giả liên hệ: Email: nguyenduabka@gmail.com

Việc giám sát nhiệt độ là một phương pháp để phát hiện các sự cố của thiết bị trong tủ hợp bộ, bên cạnh việc giám sát phóng điện cục bộ. Một thách thức trong việc thực hiện giám sát nhiệt độ liên tục của các điểm kết nối quan trọng (thiết bị đóng cắt, thanh cái và kết nối cáp) là các cảm biến phải chịu được các xung điện áp, còn được gọi là mức cách ly xung cơ bản. Do đó, cần phải đảm bảo khoảng cách tối thiểu giữa các dây dẫn, cảm biến... để tránh đánh thủng. Một khó khăn khác là cấp nguồn cho các cảm biến để hạn chế yêu cầu bảo trì thường xuyên các thiết bị này. Việc sử dụng các hệ thống giám sát nhiệt độ tiếp xúc trực tiếp, chẳng hạn như cặp nhiệt điện và nhiệt điện trở, là rất khó khăn vì chúng dễ bị nhiễu điện từ/nhiều tần số vô tuyến trong môi trường điện áp cao. Vì vậy, các hệ thống đo không tiếp xúc như cảm biến sợi quang, cảm biến hồng ngoại hoặc cảm biến tiếp xúc trực tiếp không dây thường được sử dụng để giám sát nhiệt độ trong tủ hợp bộ trung thế và hạ thế.

Phương pháp thường sử dụng nhất để đo các điểm phát nhiệt là sử dụng các máy soi chiếu hồng ngoại bằng tay để kiểm tra các điểm phát nhiệt [2, 3]. Tuy nhiên, phương pháp này có một số nhược điểm như hạn chế về số điểm đo, không giám sát được các điểm bị che khuất, khi điện áp quá cao hoặc bức xạ nhiệt quá mạnh có thể gây hại cho người kiểm tra, việc kiểm tra toàn bộ các điểm phát nhiệt thường xuyên khó có thể thực hiện. Ngoài ra, các hệ thống này thường đắt tiền và khó cài đặt.

Trong một số trạm, các điểm phát nhiệt được kiểm tra bằng hệ thống cảm biến nhiệt độ sợi quang [4, 5]. Các cảm biến được gắn chặt vào các vị trí điểm nóng và hoàn toàn miễn nhiễm với nhiễu điện từ hoặc các hiện tượng nhiễu do chuyển mạch điện

Research and experiment the wireless passive surface acoustic wave technology for conductor temperature monitoring of high voltage equipment

Quoc Tuan Le¹, Van Dua Nguyen^{1*}, Quoc Hung Nguyen¹,
Hoang Long Nguyen¹, Thi Thu Ha Nguyen², Thi Hue Nguyen²

¹Center for Microelectronics and Information Technology,

National Center for Technological Progress,

C6, Thanh Xuan Bac Ward, Thanh Xuan District, Hanoi, Vietnam

²School of Electrical and Electronic Engineering,

Hanoi University of Science and Technology,

1 Dai Co Viet Street, Le Dai Hanh Ward, Hai Ba Trung District, Hanoi, Vietnam

Received 18 July 2023; revised 11 August 2023; accepted 15 August 2023

Abstract:

This paper presents the research and design of a passive thermal monitoring system using wireless temperature sensors based on the principle of surface acoustic wave (SAW). The monitoring system is employed on components that need to be monitored for heat generation, including switch contacts, busbars, and cable connections at switchgears or ring main units (RMUs). The basic impulse insulation level (BIL), or voltage spike tolerance, of the wireless SAW temperature sensor utilised in this study, means that it is not necessary to power it with sensors that meet the high criteria for equipment installed in closed cabinets or medium voltage cabinets. The research team's activities in this study included software development, data transmission design and manufacture, and sensor selection. The system functions steadily, with a temperature error of no more than 2°C, according to the test findings under laboratory settings.

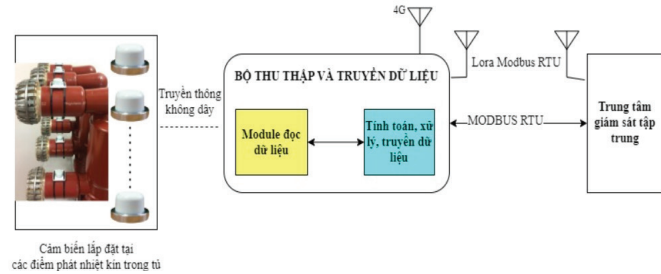
Keywords: passive surface acoustic temperature sensor, switchgears, wireless and passive sensor.

Classification number: 2.2

áp cao gây ra. Tuy nhiên, kết nối dây rất phức tạp và sử dụng cáp quang thì quá tốn kém.

Để giải quyết một phần các nhược điểm trên, trong nghiên cứu này, chúng tôi đề xuất sử dụng công nghệ cảm biến nhiệt độ không dây thụ động dựa trên nguyên lý sóng âm bề mặt [6-9]. Chúng tôi sử dụng cảm biến và mô-đun đọc dữ liệu cảm biến không dây thụ động thương mại và tập trung vào thiết kế bộ thu thập, truyền dữ liệu về trung tâm, xây dựng phần mềm theo dõi, giám sát các thông số nhiệt độ trả về của cảm biến. Các thí nghiệm được tiến hành trong phòng thí nghiệm với các điều kiện thử nghiệm về thay đổi nhiệt độ, thử nghiệm trong điều kiện hoạt động khi có điện áp cao cho thấy hệ thống hoạt động ổn định, cảm biến hoạt động được trong điều kiện điện áp cao phù hợp trong bài toán giám sát phát nhiệt trong các thiết bị trung và cao áp trong tủ hợp bộ, tủ trung áp.

2. Đối tượng và phương pháp nghiên cứu

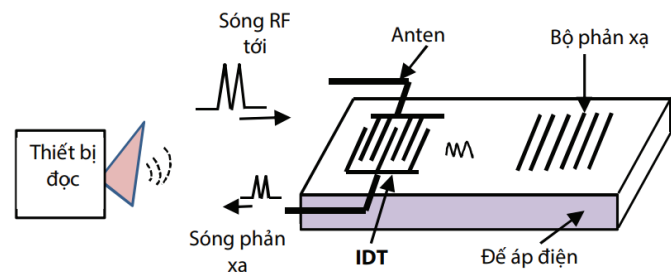


Hình 1. Sơ đồ khối hệ thống giám sát nhiệt.

Nhóm nghiên cứu đề xuất một mô hình hệ thống giám sát nhiệt tủ kín sử dụng cảm biến không dây thụ động (hình 1) gồm 3 thành phần như sau:

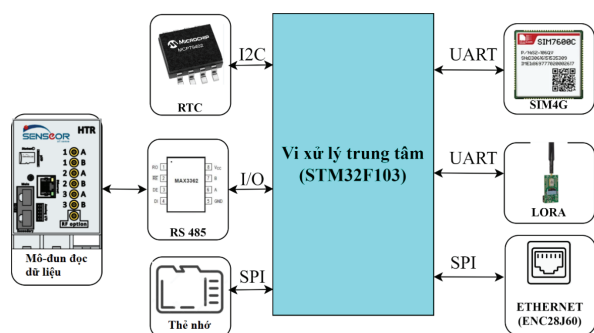
2.1. Khối cảm biến

Bộ 6 cảm biến SAW tiếp xúc trực tiếp vào điểm cần đo và được bố trí bên trong tủ kín, tủ trung áp. Nguyên lý của cảm biến thụ động không dây dạng sóng âm bề mặt được thể hiện ở hình 2. Một số nghiên cứu cho thấy, sóng vô tuyến không dây từ bộ đọc dữ liệu được truyền đến cảm biến thông qua anten gắn trên cảm biến, sau đó đưa qua bộ IDT (Inter-digital transducer) [10, 11]. Dựa trên tính chất của vật liệu áp điện, điện áp giữa các chân IDT sẽ gây ra biến dạng bề mặt của vật liệu nên tạo ra sóng âm lan truyền trên bề mặt. Các sóng lan truyền tới các bộ phận phản xạ, một phần sóng này sẽ phản xạ theo hướng ngược lại và lan truyền đến IDT. Tại đây, các tín hiệu cơ biến đổi thành tín hiệu điện và phát đi qua anten. Các thiết bị đọc sẽ căn cứ vào thời gian trễ, sự khác biệt về tần số hoặc pha sóng RF phát ra và sóng RF phản xạ trở về để tính toán ra giá trị đo trả về. Khi có sự thay đổi của nhiệt độ trên cảm biến, vận tốc truyền sóng và độ trễ của sóng phản xạ sẽ thay đổi [12, 13]. Phân tích trên miền thời gian của đầu đọc sẽ đưa ra được giá trị nhiệt độ của cảm biến trả về.



Hình 2. Sơ đồ nguyên lý của cảm biến thụ động không dây dạng sóng âm bề mặt [10].

Cảm biến SAW TSA EV01 của SENSEOR được chúng tôi lựa chọn sử dụng trong hệ thống này. Cảm biến đo được nhiệt độ đo từ -25 đến 150°C, đảm bảo tương thích trường điện từ IEC 62271, chịu được điện áp cao lên đến trên 500 kV, miễn nhiễm với xung sét [14]. Mỗi cảm biến được thiết kế có tần số cộng hưởng khác nhau trong dải tần số từ 430,60 đến 449,00 MHz.

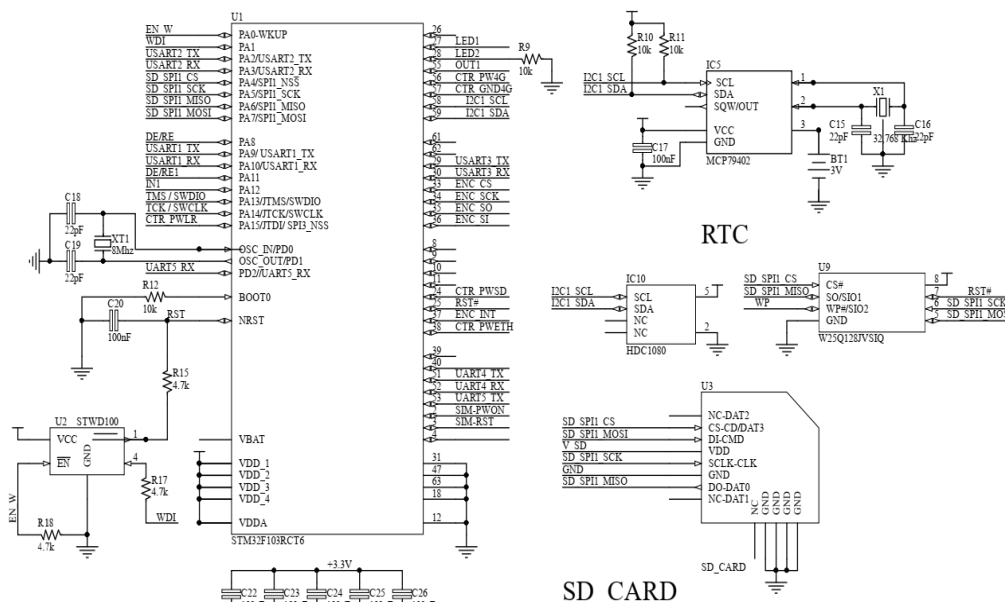


Hình 3. Sơ đồ khối thu thập và truyền dữ liệu.

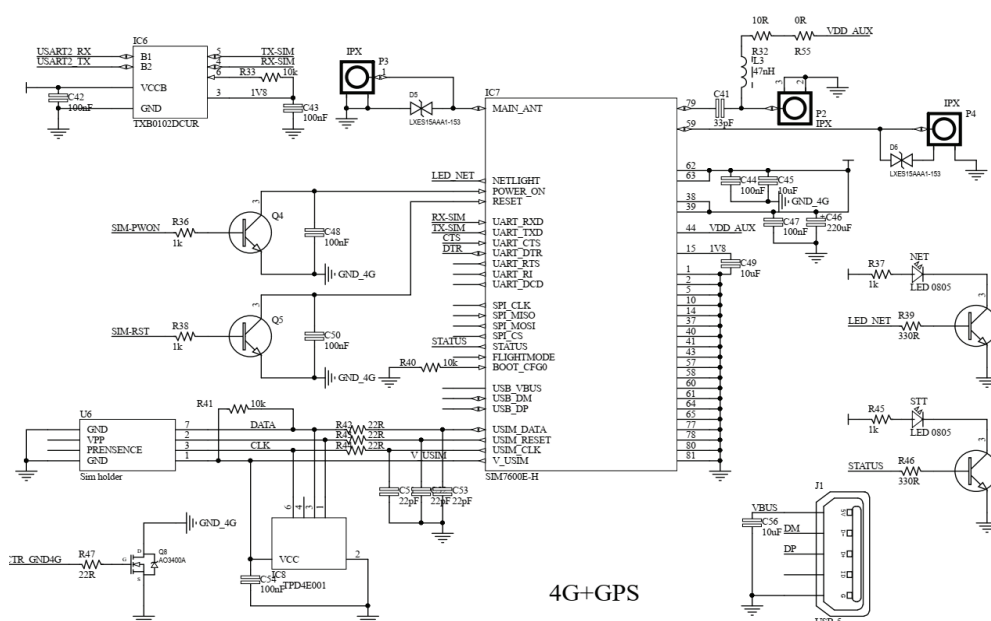
2.2. Bộ thu thập và truyền dữ liệu

Bộ phận này có chức năng kết nối với mô-đun đọc dữ liệu từ cảm biến sóng âm bề mặt (HTR02-6AWS của Hãng SENSEOR) thông qua chuẩn truyền thông RS485, xử lý dữ liệu và truyền dữ liệu thu thập được về phần mềm trung tâm. Mô-đun đầu đọc dữ liệu sẽ gửi tín hiệu RF đã được điều chế qua anten phát đến từng cảm biến và thu được tín hiệu RF trả về để tính toán xử lý trả ra giá trị nhiệt độ. Mỗi cặp anten sẽ giao tiếp được với 6 cảm biến. Trong nghiên cứu này, chúng tôi thiết kế bộ thu thập dữ liệu có chức năng đọc dữ liệu nhiệt

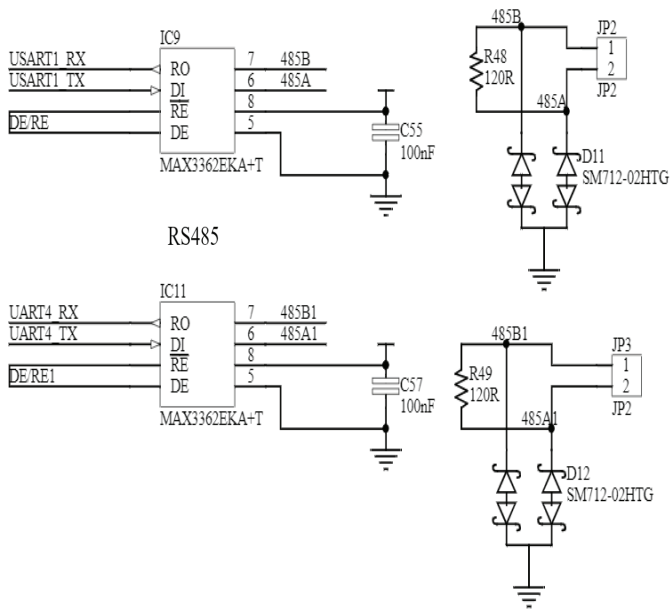
độ trả về từ mô-đun HTR02-6AWS thông qua chuẩn truyền thông Modbus RTU và truyền dữ liệu lên server. Phần mềm quản lý từ xa các tín hiệu cảnh báo được nhóm nghiên cứu thiết kế trên nền tảng website. Trong trường hợp cần kết nối giám sát tại chỗ và không có kết nối mạng internet, thiết bị có thể truyền dữ liệu về trung tâm giám sát tập trung thông qua chuẩn truyền thông Lora hoặc chuẩn truyền thông RS485 sử dụng giao thức Modbus RTU. Sơ đồ khối của bộ thu thập và truyền dữ liệu được thể hiện ở hình 3. Bộ thu thập và truyền dữ liệu sử dụng vi xử lý trung tâm STM32F103. MAX3362 được lựa chọn để thiết kế khối giao tiếp RS485 với mô-đun HTR02-6AWS. Để truyền dữ liệu về server, chúng tôi sử dụng SIM7600 của SIMCOM có chuẩn kết nối 4G và có tích hợp định vị vệ tinh. Để lưu trữ dữ liệu tại chỗ, chúng tôi đã thiết kế đồng thời giải pháp lưu trữ bằng thẻ nhớ và sử dụng chip nhớ FLASH MCP79402. Hình 4 đến 6 thể hiện chi tiết sơ đồ nguyên lý các khối chức năng được thiết kế.



Hình 4. Sơ đồ nguyên lý khối vi xử lý trung tâm và lưu trữ.



Hình 5. Sơ đồ nguyên lý khối truyền thông 4G và định vị vệ tinh.



Hình 6. Sơ đồ nguyên lý khối truyền thông RS485.

2.3. Phần mềm giám sát tập trung trên máy tính

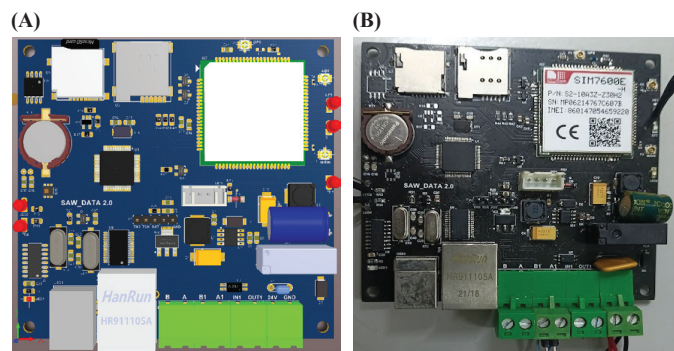
Phần mềm giám sát được phát triển trên hệ thống server lưu trữ dữ liệu, phần mềm theo dõi trên các nền tảng website. Phần mềm có tính năng hiển thị dữ liệu nhiệt độ theo thời gian thực của từng điểm đo kèm theo vị trí đặt cảm biến. Theo yêu cầu thực tế tại Tập đoàn Điện lực Việt Nam, dựa trên độ chênh nhiệt $\Delta T = T_{do} - T_{min}$ (trong đó, T_{do} là nhiệt độ điểm đo, T_{min} là nhiệt độ thấp nhất trả về của các cảm biến), phần mềm sẽ đưa ra cảnh báo tình trạng các điểm ở bảng 1 và các hành động khuyến cáo kèm theo. Bên cạnh đó, phần mềm còn có chức năng vẽ đồ thị theo thời gian để người dùng có thể phân tích xu thế tăng nhiệt độ và đưa ra các hành động bảo trì, sửa chữa.

Bảng 1. Đánh giá độ chênh lệch nhiệt độ lớn nhất và đưa ra cảnh báo đối với các vị trí giám sát nhiệt ở máy biến áp.

Kết quả [°C]	Tình trạng	Điểm	Hành động
$\Delta T \leq 5$	Tốt	3	Duy trì tần suất lấy dữ liệu nhiệt độ 30 phút/lần.
$5 < \Delta T \leq 10$	Khá	2	Đưa ra tín hiệu cảnh báo. Tăng tần suất lấy dữ liệu nhiệt độ 5 phút 1 lần.
$10 < \Delta T \leq 15$	Trung bình	1	Đưa ra tín hiệu cảnh báo xấu và yêu cầu sửa chữa bảo dưỡng. Tăng tần suất lấy dữ liệu nhiệt độ 1 phút/lần.
$15 < \Delta T$	Xấu	0	

3. Kết quả

Hình 7 thể hiện mạch in thiết bị truyền dữ liệu và hình ảnh sản phẩm sau khi thiết kế, gia công và tích hợp. Hình 8 thể hiện giao diện phần mềm theo dõi và giám sát tại trung tâm.



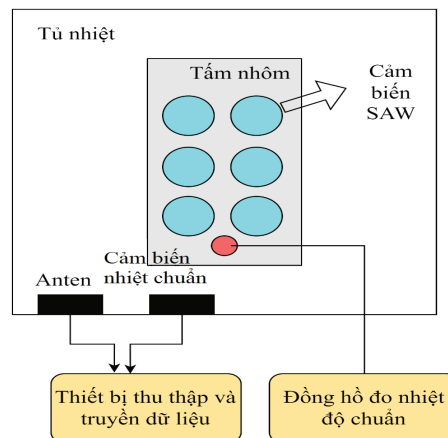
Hình 7. Hình ảnh 3D (A) và hình ảnh mạch thu thập dữ liệu sau khi gia công (B).



Hình 8. Giao diện phần mềm theo dõi và giám sát nhiệt độ.

Để tiến hành đánh giá hoạt động của cảm biến và hệ thống thiết bị theo dõi nhiệt độ đã chế tạo, chúng tôi thực hiện các bài thử nghiệm mô phỏng tình huống sử dụng thiết bị trong thực tế như sau:

Thử nghiệm đánh giá sai số nhiệt độ của cảm biến: Nghiên cứu đã tiến hành đặt 6 cảm biến nhiệt độ SAW trên tấm nhôm dày đồng chất và đặt trong tủ gia nhiệt Carbolite Gero AX 120. Dải nhiệt độ có thể điều chỉnh từ nhiệt độ phòng đến 250°C, độ ổn định 0,5°C. Mô hình thử nghiệm thể hiện ở hình 9. Để có thể đánh giá chính xác sai số của cảm biến, chúng tôi sử dụng đồng hồ đo đa năng Keithly DMM6500 và cảm biến RTD với sai số 0,1°C để làm giá trị tham chiếu. Tiến hành cài đặt tủ gia nhiệt ở các nhiệt độ 40, 80, 100 và 140°C, sau đó ghi lại giá trị từ đồng hồ đo nhiệt chuẩn và các giá trị của cảm biến.



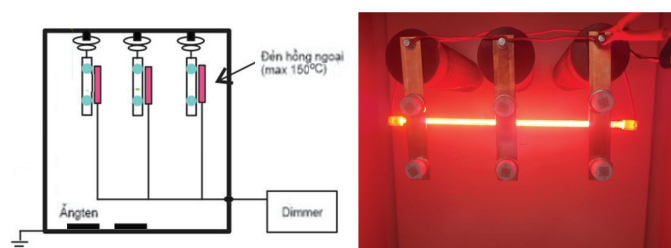
Hình 9. Thử nghiệm đánh giá sai số nhiệt độ của cảm biến.

Bảng 2 thể hiện kết quả thử nghiệm đánh giá sai số nhiệt độ của cảm biến. Kết quả cho thấy, sai số nhiệt độ của cảm biến lớn nhất là 2°C, phù hợp với công bố của nhà sản xuất.

Bảng 2. Kết quả nhiệt độ của cảm biến khi thay đổi nhiệt độ môi trường.

Nhiệt độ chuẩn (°C)	Nhiệt độ CB1	Nhiệt độ CB2	Nhiệt độ CB3	Nhiệt độ CB4	Nhiệt độ CB5	Nhiệt độ CB6	Sai số tuyệt đối lớn nhất (°C)	Sai số tương đối (%)
38,10	38,5	37,8	37,7	37,7	38,3	37,7	0,4	1,1
78,13	78,8	77,8	77,4	77,7	78,5	78,5	0,8	1,0
98,02	99,1	97,5	97,9	98,1	98,5	98,4	1,1	1,1
136,4	138,4	136,7	137,7	137,2	137,7	137,5	2,0	1,5

Thử nghiệm hoạt động của cảm biến khi có điện áp cao: Trong thử nghiệm này, tủ điện được thiết kế sử dụng các thanh đồng để dẫn điện áp cao từ bộ phát cao áp AC phenix 6CP120/50-7.5 và hoạt động ở chế độ không tải. Các cảm biến được gắn lên các thanh đồng và cách nhau khoảng 15 cm (hình 10). Trong nghiên cứu này, để đảm bảo an toàn nhóm sử dụng bộ phát cấp điện áp vào theo ngưỡng 10, 20 và 30 kV. Sau đó đọc giá trị nhiệt độ của các cảm biến thông qua phần mềm đã được thiết kế. Kết quả được thể hiện ở bảng 3.



Hình 10. Mô hình thử nghiệm đánh giá hoạt động của cảm biến trong môi trường điện áp cao.

Bảng 3. Kết quả của cảm biến khi thay đổi điện áp đặt.

Điện áp (kV)	Nhiệt độ CB1 (°C)	Nhiệt độ CB2 (°C)	Nhiệt độ CB3 (°C)	Nhiệt độ CB4 (°C)	Nhiệt độ CB5 (°C)	Nhiệt độ CB6 (°C)
10,0	25,1	25,0	25,0	24,9	25,1	25,2
20,0	25,1	25,3	25,3	25,0	25,1	25,0
30,0	25,2	25,1	25,2	25,4	25,2	25,3

Từ kết quả bảng 3 có thể thấy, hệ thống vẫn hoạt động ổn định trong môi trường điện áp cao. Giá trị nhiệt độ trả về của cảm biến dao động quanh ngưỡng 25°C. Trong thí nghiệm này, nghiên cứu không tiến hành đặt cảm biến nhiệt độ chuẩn để tham chiếu do thí nghiệm với điện áp cao nên việc lắp đặt các cảm biến chuẩn có dây không đảm bảo an toàn.

4. Kết luận

Bài báo trình bày về nghiên cứu, thiết kế hệ thống giám sát nhiệt không dây ứng dụng trong tủ phát nhiệt kín và một số thử nghiệm trong điều kiện phòng thí nghiệm. Qua quá trình thử nghiệm tại các nhiệt độ khác nhau, các cảm biến SAW cho giá trị chính xác với sai số nhỏ hơn $\pm 2^\circ\text{C}$. Kết quả nghiên cứu cho thấy, khi được đặt vào không gian hẹp và khép kín cảm biến hoạt động rất tốt và trả về các giá trị nhiệt độ với độ đáp ứng nhanh. Hệ

thống hoạt động tốt trong điều kiện điện áp cao, phù hợp với các ứng dụng giám sát nhiệt độ trong các tủ hợp bộ, tủ RMU trung áp. Trong thời gian tới, chúng tôi sẽ tập trung thử nghiệm giám sát các điểm phát nhiệt tại thanh cái, điểm đấu nối tại tủ hợp bộ hoặc tủ trung áp để đánh giá hiệu quả của hệ thống và tích hợp thêm các tính năng theo dõi dòng điện, điện áp để xây dựng bộ dữ liệu phục vụ quá trình quản lý, vận hành hệ thống.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi đề tài cấp Bộ Khoa học và Công nghệ theo Hợp đồng số 15/2021/HĐ-ĐTCB ký ngày 10/06/2021. Các tác giả xin chân thành cảm ơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] R. Godina, E.M.G. Rodrigues, J.C.O. Matias, et al. (2015), "Effect of loads and other key factors on oil-transformer ageing: Sustainability benefits and challenges", *Energies*, **8**(10), pp.12147-12186, DOI: 10.3390/en81012147.
- [2] Z. Yan, X. Yu, W. Ding (2017), "Context-aware verifiable cloud computing", *IEEE Access*, **5**, pp.2211-2227, DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2666839.
- [3] Y. Yan, D. Qi, H. Gu (2017), "A real-time ir-fusion switchgear contact monitoring system (SCMS)", *IEEE Access*, **5**, pp.12114-12124, DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2698060.
- [4] Y. Ding, X. Dai, T. Zhang (2010), "Low-cost fiber-optic temperature measurement system for high-voltage electrical power equipment", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **59**(4), pp.923-933, DOI: 10.1109/TIM.2009.2030930.
- [5] Y. Li, W. Cheng (2010), "A novel temperature monitoring system based on FBG for switchgear", *2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, pp.1-4, DOI: 10.1109/APPEEC.2010.5448990.
- [6] M.A.M. Cavaco, M.E. Benedet, L.R. Neto (2011), "Temperature measurements on hot spots of power substations utilizing surface acoustic wave sensors", *International Journal of Thermophysics*, **32**, pp.2343-2350, DOI: 10.1007/s10765-011-1080-1.
- [7] G. Ostermayer (2001), "Correlative signal processing in wireless SAW sensor applications to provide multiple-access capability", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **49**(4), pp.809-816, DOI: 10.1109/22.915468.
- [8] A. Pohl (2000), "A review of wireless SAW sensors", *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, **47**(2), pp.317-332, DOI: 10.1109/58.827416.
- [9] X. Ma, H. Zou, T. Xu (2014), "The online temperature measurement system for substation equipment based on the internet of things (IoT)", *Modern Applied Science*, **8**(3), pp.217-222, DOI: 10.5539/mas.v8n3p217.
- [10] N.T. Ha, P.V. Minh, D.D. Phu (2018), "The introduction to passive wireless sensors based on surface acoustic wave and an orientation of application in power transmission systems", *Journal of Science and Technology - Hanoi University of Industry*, **48**, pp.12-15 (in Vietnamese).
- [11] N.T. Ha, T.V. Thai, T.L. Cung, et al. (2023), "A calculation method of the passive wireless surface acoustic wave sensor response phase", *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, **12**(1), pp.86-97, DOI: 10.11591/eei.v12i1.4068.
- [12] R. Fachberger, G. Bruckner, R. Hauser, et al. (2006), "Wireless SAW based high-temperature measurement systems", *2006 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition*, pp.358-367, DOI: 10.1109/FREQ.2006.275412.
- [13] X. Gao, L. Cheng, X. Xue, et al. (2021), "Development of wireless and passive SAW temperature sensor with very high accuracy", *Applied Sciences*, **11**(16), DOI: 10.3390/app11167422.