

THIẾT KẾ, CHẾ TẠO NÚT CẢM BIẾN CÓ KHẢ NĂNG TÙY BIẾN PHỤC VỤ NGHIÊN CỨU, PHÁT TRIỂN NỀN TẢNG MÔ PHỎNG MẠNG CẢM BIẾN

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF CUSTOMIZABLE SENSOR NODE FOR RESEARCH AND DEVELOPMENT OF A SENSOR-NETWORK SIMULATION PLATFORM

Hà Văn Phương^{1,2,*}, Phạm Thị Ngọc Yến¹,
Lê Minh Hoàng¹, Đào Trung Kiên¹, Nguyễn Thanh Hường¹

TÓM TẮT

Mạng cảm biến hiện nay được ứng dụng trong hầu hết các lĩnh vực thực tế. Việc mô phỏng mạng cảm biến là rất cần thiết, nhất là trong công đoạn thiết kế. Hiện nay, các phần mềm mô phỏng nhằm nghiên cứu, thiết kế và ứng dụng cho mạng cảm biến chỉ tập trung chủ yếu đến truyền thông giữa các nút trong mạng. Vấn đề về năng lượng của các nút cảm biến và toàn mạng chưa được quan tâm thích đáng. Việc nghiên cứu vấn đề còn khuyết thiếu đó cần xem xét cụ thể đến mức tiêu thụ năng lượng ở từng trạng thái hoạt động của nút cảm biến. Bài báo này trình bày việc thiết kế, chế tạo nút cảm biến có khả năng tùy biến giúp thuận lợi cho việc đo năng lượng tiêu thụ ở các trạng thái làm việc khác nhau của nút như trạng thái ngủ, trạng thái sẵn sàng, trạng thái đo lường và trạng thái truyền thông. Điều này sẽ giúp phân tích được sự khác nhau về mức tiêu thụ năng lượng giữa các trạng thái hoạt động của nút. Kết quả này sẽ làm dữ kiện quan trọng trong quá trình phát triển nền tảng mô phỏng và tối ưu hoá các bài toán liên quan tới năng lượng cho mạng cảm biến.

Từ khóa: Thiết kế nút cảm biến, cảm biến tùy biến, cảm biến tiêu thụ năng lượng thấp, công suất của cảm biến, cảm biến không dây, mạng cảm biến.

ABSTRACT

Sensor networks are now used in almost every field of practice. Simulation of sensor networks is essential, especially in the design stage. Currently, simulation software for research, design and application for sensor networks only focuses on communication between nodes in the network. The energy problem of sensor nodes and the entire network has not been properly developed. Studying the missing problem needs to consider specifically the energy consumption in each operating state of the sensor node. This paper presents the design and manufacture of a customizable sensor node that facilitates measurement of power consumption in different states of the node such as sleep status, ready status, measurement status and communication status. This will help analyze the differences in energy consumption between the operating states of the node. This results will be important data in the process of developing the simulation platform and optimizing energy-related problems for the sensor network.

Keywords: Design sensor node, customizable sensor, low power sensor, power of sensor, wireless sensor, sensor networks.

¹Viện MICA, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

²Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: havanphuong@hau.edu.vn / van-phuong.ha@mica.edu.vn

Ngày nhận bài: 03/7/2020

Ngày nhận bài sửa sau phân biện: 01/8/2020

Ngày chấp nhận đăng: 18/8/2020

1. GIỚI THIỆU

Mạng cảm biến không dây với những tính năng vượt trội như tính mềm dẻo và linh hoạt, khả năng tùy biến cao, dễ triển khai trên diện rộng và trong các môi trường phức tạp, mang lại hiệu quả cao về kinh tế nên trong thời gian gần đây được đặc biệt quan tâm, nghiên cứu và ứng dụng rất mạnh mẽ trong nhiều lĩnh vực như giám sát môi trường [1], sức khỏe [2], kiểm soát sản xuất công nghiệp, nông nghiệp, năng lượng [3], giao thông, an ninh, quân sự [4] và dân dụng. Trong thực tế, việc sử dụng kết hợp cảm biến có dây và không dây sẽ khiến các ứng dụng cảm biến trong các hệ thống được linh hoạt hơn. Tuy nhiên, việc cung cấp và đảm bảo duy trì năng lượng hoạt động của mạng cảm biến hỗn tạp trong thời gian dài là một vấn đề còn nhiều thách thức.

Để giải quyết vấn đề trên, nhóm nghiên cứu đã đề xuất phương pháp tối ưu điều phối năng lượng cho mạng cảm biến. Với mục tiêu đó, rất cần nền tảng mô phỏng mạng cảm biến không chỉ có chức năng như những phần mềm khác [5, 6] mà còn có khả năng mô phỏng năng lượng từng trạng thái hoạt động của từng nút và toàn mạng, tức là mức tiêu thụ năng lượng, trạng thái năng lượng của mỗi nút đều được giám sát, quản lý và điều phối theo kịch bản chung của toàn mạng. Từ đó, nhóm nghiên cứu sẽ thực hiện bài toán tối ưu hóa điều phối năng lượng trong mạng cảm biến và hướng đến mạng cảm biến tự chủ năng lượng.

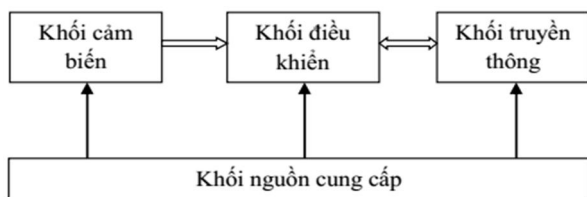
Việc xây dựng một nền tảng mô phỏng như vậy cần được thực hiện bằng cách mô hình hóa nút cảm biến cho phù hợp thực tiễn và thực nghiệm đo năng lượng tiêu thụ ở từng trạng thái hoạt động của nút mạng. Tuy nhiên, vấn đề khảo sát và đo năng lượng từng trạng thái hoạt động của nút cảm biến thương mại sẵn có trên thị trường rất khó khăn thậm chí không thể thực hiện. Vì vậy, nhóm nghiên cứu thực hiện thiết kế và chế tạo nút mạng với các thành phần cơ bản theo mô hình nút thực tế và giúp có thể dễ dàng thực hiện đo năng lượng tiêu thụ ở từng trạng thái hoạt động của nút cảm biến.

2. THIẾT KẾ, CHẾ TẠO VÀ ĐO NĂNG LƯỢNG CỦA NÚT CẢM BIẾN

Từ mục tiêu đã đề ra, nhóm nghiên cứu sẽ thiết kế chế tạo nút cảm biến cơ sở có khả năng tùy biến với sự môđun hóa các khối chức năng chuyên trách cơ bản như khối nguồn, khối cảm biến, khối xử lý và khối truyền thông. Từ đó sẽ tạo ra nhiều nút cảm biến có chức năng đo, thu thập nhiều đại lượng từ môi trường như nhiệt độ, độ ẩm, ánh sáng, rung động, nồng độ chất khí,... bằng cách thay đổi đầu cảm biến đo các đại lượng theo ý muốn.

2.1. Phân tích chức năng

Một nút thực tế hiện có cấu trúc với những thành phần cơ bản như khối nguồn cung cấp, khối cảm biến, khối điều khiển và khối truyền thông như hình 1 [7-12]. Khối nguồn cung cấp sẽ cung cấp năng lượng cho tất cả các khối trong nút cảm biến hoạt động. Khối cảm biến có nhiệm vụ cảm nhận tín hiệu đo và biến đổi chuẩn hóa tín hiệu phù hợp với đầu vào khối điều khiển. Khối truyền thông thực hiện việc truyền nhận thông tin đo cũng như giao tiếp với các nút khác trong mạng. Khối điều khiển đóng vai trò rất quan trọng, thu thập thông tin đo từ cảm biến và xử lý tín hiệu, đồng thời điều phối các chế độ hoạt động cũng như việc sử dụng năng lượng của các khối chức năng cho toàn nút.

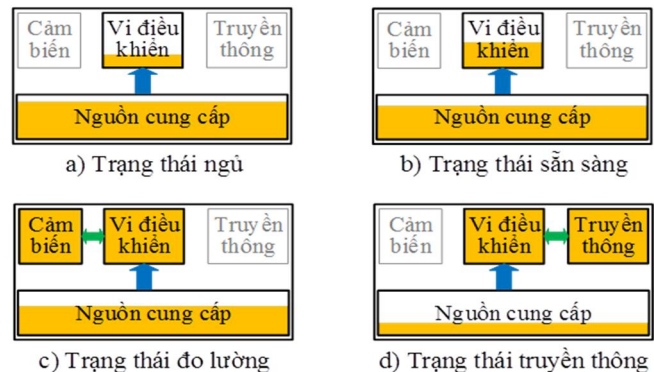


Hình 1. Cấu trúc cơ bản nút cảm biến

Mỗi nút cảm biến được thiết kế với bốn trạng thái hoạt động gồm: trạng thái ngủ, trạng thái sẵn sàng, trạng thái đo lường và trạng thái truyền thông. Mỗi trạng thái hoạt động của nút có mức độ tiêu thụ năng lượng khác nhau. Có thể nhìn nhận một cách định tính về mức năng lượng tiêu thụ của từng trạng thái hoạt động của nút cảm biến như trong hình 2 [13,14]. Ở mỗi trạng thái hoạt động sẽ có những thành phần làm việc (khối hiện rõ) và những thành phần không làm việc (khối bị mờ). Khi một thành phần làm việc sẽ tiêu tốn một mức năng lượng nhất định được tượng trưng bởi phần tô màu đậm trên thành phần đó.

Trạng thái ngủ: tất cả các khối đo và khối truyền thông hoàn toàn không được cấp nguồn (thể hiện bị mờ) còn

khối điều khiển ở trạng thái ngủ. Ở trạng thái này, nút cảm biến chỉ cần được cấp một mức năng lượng rất nhỏ, nên sẽ tiêu thụ năng lượng ít nhất (mức năng lượng tiêu thụ được tượng trưng là phần tô màu đậm) và phần năng lượng trong khối nguồn pin chỉ cung cấp một lượng rất nhỏ nên năng lượng còn nhiều và được tượng trưng bởi phần tô màu đậm với mức cao.



Hình 2. Mức năng lượng tiêu thụ ở các trạng thái hoạt động của nút cảm biến

Trạng thái sẵn sàng: các khối cảm biến và truyền thông cũng không được cấp nguồn giống ở trạng thái ngủ. Khối điều khiển được khởi động và sẵn sàng thực hiện các công việc theo các yếu tố kích thích. Ở trạng thái này, nút cảm biến sẽ tiêu thụ mức năng lượng nhiều hơn trạng thái ngủ.

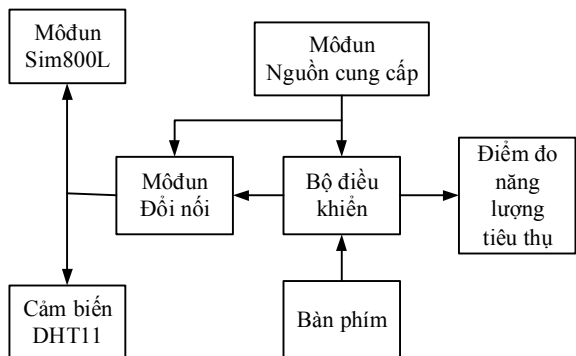
Trạng thái đo lường: ở trạng thái này, cả khối điều khiển và khối cảm biến đều được cấp nguồn năng lượng để làm việc. Khối truyền thông không được cấp nguồn. Mức năng lượng tiêu thụ của nút ở trạng thái đo lường sẽ lớn hơn hai trạng thái trên.

Trạng thái truyền thông: khối điều khiển sẽ thực hiện lệnh không cấp nguồn cho khối cảm biến. Mặt khác, thực hiện cấp nguồn cho khối truyền thông. Ở trạng thái này, khối điều khiển và khối truyền thông cùng tiêu thụ năng lượng. Vì việc truyền thông đòi hỏi nhiều năng lượng nên ở trạng thái truyền thông nút cảm biến sẽ tiêu thụ năng lượng nhiều nhất (trên hình 2 thể hiện mức năng lượng trong nguồn cung cấp bị cạn đi nhiều hơn).

Để thuận tiện cho việc sử dụng nút cảm biến trong các công việc đo năng lượng tiêu thụ của từng trạng thái hoạt động và chạy thử nghiệm, nút cảm biến được thiết kế với hai chế độ làm việc. Chế độ bằng tay thực hiện chuyển qua lại giữa bốn trạng thái hoạt động nhờ bàn phím. Chế độ tự động nút sẽ làm việc theo kịch bản với những ràng buộc về thời gian, số liệu đo hoặc tham số khác được cài đặt sẵn bởi người dùng. Như vậy, nút cảm biến sẽ được thiết kế và chế tạo với các mô đun chức năng, làm việc theo hai chế độ và hoạt động theo bốn trạng thái cơ bản nói trên.

2.2. Chế tạo nút cảm biến

Phục vụ cho việc thử nghiệm các chức năng, chế độ làm việc và đo năng lượng tiêu thụ ở từng trạng thái hoạt động của nút cảm biến, nhóm nghiên cứu thực hiện chế tạo nút cảm biến với đầu cảm biến cụ thể là đo nhiệt độ và độ ẩm. Sơ đồ khối của nút cảm biến này được chỉ ra trên hình 3.



Hình 3. Sơ đồ khối nút cảm biến đo nhiệt độ - độ ẩm

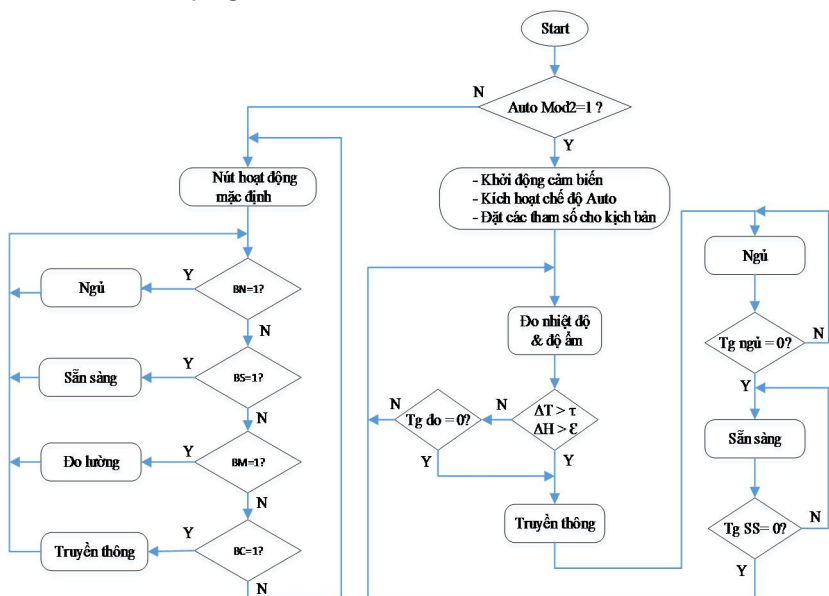
Đầu cảm biến được sử dụng là DHT11 sẽ đo nhiệt độ và độ ẩm môi trường. Đây là đầu cảm biến tiêu thụ năng lượng thấp, dòng tiêu thụ lớn nhất là 2,5mA. Module Sim800L chịu trách nhiệm việc truyền thông dữ liệu. Bộ điều khiển (sử dụng loại ATmega8A) chịu trách nhiệm thu thập, xử lý dữ liệu và điều phối chung cho mọi hoạt động của nút cảm biến như nhận lệnh tương tác với người dùng từ bàn phím, điều khiển cấp nguồn cũng như ra lệnh cho các chức năng của nút. Module nguồn cung cấp sẽ cấp điện cho toàn bộ cảm biến làm việc. Để thực hiện điều phối năng lượng ở các trạng thái hoạt động cho các module chức năng sẽ được bộ điều khiển điều phối thông qua module đối nối cấp nguồn.

trị nhiệt độ có sự thay đổi một lượng ΔT , hoặc giá trị độ ẩm một lượng ΔH) thì sẽ chuyển sang hoạt động ở trạng thái truyền thông để truyền dữ liệu hiện tại về phục vụ các xử lý của mạng. Lưu đồ thuật toán cho nút cảm biến được chỉ ra trong hình 4.

Chế độ bằng tay sẽ dùng chương trình con cho từng trạng thái hoạt động, các trạng thái hoạt động này không quan tâm đến vấn đề thời gian hay các điều kiện khác mà hoàn toàn phụ thuộc vào tác động của người dùng từ bàn phím. Việc này giúp có thể chủ động trong việc thực hiện đo năng lượng tiêu thụ ở từng trạng thái hoạt động của nút. Nút cảm biến cung cấp điểm đo phục vụ việc đo năng lượng tiêu thụ ở các trạng thái hoạt động. Nút cảm biến đo nhiệt độ và độ ẩm sau khi hoàn tất có hình ảnh như hình 5.



Hình 5. Hình ảnh thực nút cảm biến đo nhiệt độ và độ ẩm



Hình 4. Lưu đồ thuật toán của nút cảm biến

Với chế độ tự động, người dùng có thể cài đặt kịch bản hoạt động cho nút cảm biến theo thời gian thực, tham số nhiệt độ và độ ẩm của môi trường một cách tùy ý. Có thể chia một ngày thành các khoảng thời gian và trong mỗi khoảng thời gian đó có thể đặt thời lượng cho các trạng thái hoạt động của nút (thời gian đo: $Tg_đo$, thời gian ngủ: $Tg_ngủ$, thời gian sẵn sàng: Tg_SS). Có thể ưu tiên hoạt động theo các sự kiện về nhiệt độ hoặc độ ẩm của môi trường. Tức là mặc dù nút đang làm việc theo các sự kiện thời gian nhưng khi có sự kiện về nhiệt độ hoặc độ ẩm (giá

2.3. Đo công suất và năng lượng tiêu thụ của nút cảm biến

Do mức năng lượng tiêu thụ ở các trạng thái hoạt động của nút cảm biến này tương đối thấp, ở trạng thái ngủ dòng tiêu thụ nhỏ có thể chỉ vài mA đến vài chục mA. Vì vậy việc đo năng lượng tiêu thụ ở từng trạng thái hoạt động của nút cảm biến đòi hỏi thiết bị đo phải có độ nhạy cao, độ phân giải cao và tốc độ lấy mẫu cao. Trong thực nghiệm này, nhóm nghiên cứu sử dụng bộ thu thập dữ liệu NI-DAQ/BNC2110 của hãng National Instruments, có khả năng lấy mẫu tới 10.000 (mẫu/s). Bên cạnh đó, phần mềm LabVIEW trên máy tính được sử dụng để đọc số liệu đo từ NI-DAQ/BNC-2110 và lưu dữ số liệu vào ổ cứng máy tính sau đó năng lượng tiêu thụ sẽ được tính toán theo công thức (1).

$$W = \int_{t_1}^{t_2} u \cdot i \cdot dt \text{ (Wh)} \tag{1}$$

trong đó:

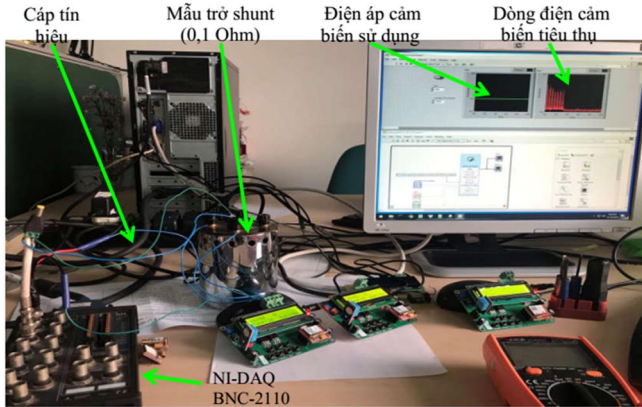
W: Năng lượng tiêu thụ (Wh)

u: Điện áp nút cảm biến sử dụng (V)

t_1-t_2 : Thời gian tiêu thụ năng lượng (h)

i: Dòng điện tiêu thụ của nút (A)

Nhằm thực hiện phép đo công suất và năng lượng tiêu thụ của nút cảm biến, một thực nghiệm được cài đặt như hình 6.



Hình 6. Thực nghiệm đo công suất và năng lượng của nút cảm biến

Trong thực nghiệm này, nhóm nghiên cứu thực hiện đo và lấy mẫu đồng thời giá trị điện áp và dòng điện theo hai kênh đo của NI-DAQ/BNC2110, dữ liệu bao gồm giá trị tín hiệu và thời gian lấy mẫu được lưu vào tập dưới dạng excel, từ đó dựa trên công thức (1) tính toán được năng lượng tiêu thụ của nút cảm biến. Giả sử thời gian lấy mẫu là Δt /mẫu và trong khoảng thời gian từ t_1 đến t_2 lấy được n mẫu thì năng lượng tiêu thụ có thể tính theo công thức (2).

$$W = \sum_{k=0}^n U_k \cdot I_k \cdot \Delta t \quad (Wh) \quad (2)$$

trong đó:

W : Năng lượng tiêu thụ (Wh)

U_k : Điện áp nút sử dụng lần lấy mẫu k (V)

Δt : Thời gian lấy mẫu (s)

I_k : Dòng tiêu thụ của nút lần lấy mẫu k (A)

n : Số lần lấy mẫu.

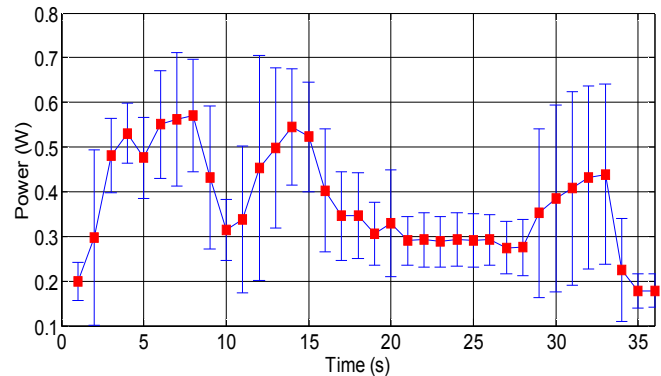
Tuy nhiên, ngoài việc tính toán được công suất và năng lượng tiêu thụ của nút ở mỗi trạng thái hoạt động, cũng có thể vẽ được đồ thị công suất và năng lượng tiêu thụ ở từng trạng thái hoạt động của nút cảm biến.

3. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

Trong quá trình thực nghiệm, nút sẽ được chọn làm việc ở chế độ bằng tay. Các nút nhấn được sử dụng để chủ động trong việc chọn chế độ đo năng lượng tiêu thụ của từng trạng thái hoạt động. Với các trạng thái hoạt động như đo lường, sẵn sàng và ngủ của nút cảm biến, năng lượng tiêu thụ sẽ được đo trong một khoảng thời gian tùy ý, còn trạng thái truyền thông thì chỉ được đo cho mỗi một lần truyền tin để biết mỗi lần truyền tiêu tốn hết bao nhiêu năng lượng. Trong thực nghiệm đo năng lượng tiêu thụ này, tốc độ lấy mẫu được sử dụng là 1000 mẫu mỗi giây. Theo thực nghiệm, ở chế độ truyền thông, nội dung bản tin được gửi về gồm thời điểm đo, giá trị nhiệt độ và độ ẩm. Mỗi lần truyền thông sẽ mất khoảng thời gian T_{tt} (thời gian thực hiện một lần truyền thông). Hình 7 chỉ ra năng lượng tiêu thụ ở trạng thái truyền thông của một trong những lần thực nghiệm.

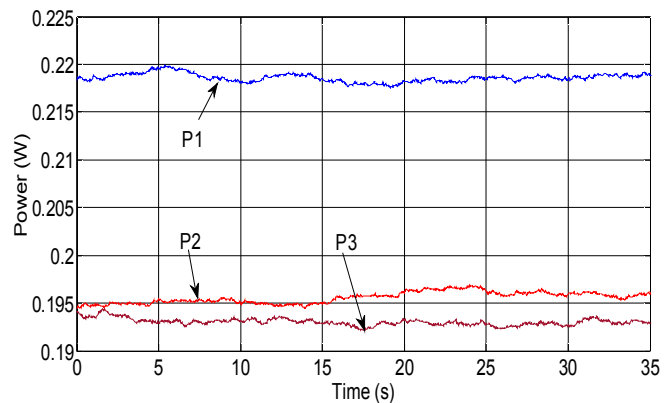
Kết quả thực nghiệm về đo năng lượng tiêu thụ ở các trạng thái đo lường, sẵn sàng và ngủ được trình bày trong hình 8, trong đó P1 là công suất tiêu thụ khi nút cảm biến

làm việc ở trạng thái đo lường, P2 là công suất tiêu thụ khi nút ở trạng thái sẵn sàng và P3 là công suất tiêu thụ khi nút ở trạng thái ngủ.



Hình 7. Năng lượng tiêu thụ một lần truyền thông của nút cảm biến

Trong quá trình thực nghiệm, nhóm nghiên cứu đã thực hiện đo và tính toán các kết quả năng lượng tiêu thụ ở các trạng thái hoạt động nhiều lần. Các kết quả nhận được tương đối ổn định và cũng nhận thấy rằng năng lượng sử dụng cho truyền thông lớn hơn nhiều so với các trạng thái hoạt động khác của nút cảm biến. Đối với trạng thái truyền thông, các lần thực nghiệm đo cho thấy khoảng thời gian và năng lượng tiêu tốn để truyền thông tương đối ổn định.



Hình 8. Năng lượng tiêu thụ ở các trạng thái đo lường, sẵn sàng và ngủ

Vấn đề năng lượng tiêu thụ khi truyền thông của nút cảm biến trong quá trình làm việc được xem xét theo số lần truyền thông, nên nhóm nghiên cứu đã thực hiện đo và tính toán năng lượng tiêu thụ trung bình \bar{W} cho mỗi lần truyền thông của nút. Còn đối với các trạng thái còn lại mức năng lượng tiêu thụ là tương đối ổn định theo thời gian, để thuận tiện cho việc sử dụng sau này, nhóm nghiên cứu sẽ đo và tính toán công suất tiêu thụ trung bình \bar{P} của từng chế độ này. Trong thực nghiệm, nhóm nghiên cứu đã đo nhiều lần, với các thời điểm khác nhau và điều kiện môi trường khác nhau về nhiệt độ và độ ẩm. Sau đó tính toán, gia công kết quả [15] và được các kết quả như sau:

Công suất tiêu thụ trung bình ở trạng thái ngủ:

$$\bar{P}_{ngủ} = 192,132 \text{ (mW)}$$

$$\Delta(-7,997\text{mW}, +7,997\text{mW}); P(\Delta) = 0,95$$

Công suất tiêu thụ trung bình ở trạng thái sẵn sàng:

$$\bar{P}_{\text{sản sàng}} = 195,215 \text{ (mW)}$$

$$\Delta(-8,228\text{mW}, +8,228\text{mW}); P(\Delta) = 0,95$$

Công suất tiêu thụ trung bình ở trạng thái đo lường:

$$\bar{P}_{\text{đo lường}} = 218,562 \text{ (mW)}$$

$$\Delta(-6,942\text{mW}, +6,942\text{mW}); P(\Delta) = 0,95$$

Năng lượng tiêu thụ trung bình ở trạng thái truyền thông:

$$\bar{W}_{\text{truyền thông}} = 3,650 \text{ (mWh)}$$

$$\Delta(-0,215\text{mWh}, +0,215\text{mWh}); P(\Delta) = 0,95$$

Kết quả thực nghiệm đo năng lượng tiêu thụ ở từng trạng thái hoạt động của nút cảm biến sẽ góp phần rất quan trọng trong việc nghiên cứu và phát triển các vấn đề liên quan đến năng lượng mạng cảm biến. Kết quả này đặt biệt có ích trong việc xây dựng và triển khai nền tảng mô phỏng năng lượng của mạng cảm biến, là bộ cơ sở dữ liệu giúp tính toán mô phỏng và so sánh giữa việc mô phỏng và thực nghiệm để đánh giá về nền tảng mô phỏng. Từ đó phát triển về tối ưu hóa, điều phối tối ưu năng lượng cho mạng cảm biến.

4. KẾT LUẬN

Bài báo này đã trình bày về việc thực hiện thiết kế chế tạo nút cảm biến với khả năng tùy biến và thực nghiệm đo năng lượng tiêu thụ của nút cảm biến. Với nút cảm biến này, nhóm tác giả đã thực hiện đo và phân tích năng lượng tiêu thụ ở từng trạng thái hoạt động của nút cảm biến. Từ đó chúng ta có thể tham số hóa được năng lượng của nút cảm biến, thực hiện việc giám sát tới từng trạng thái hoạt động và mức năng lượng của từng nút và toàn mạng.

Hướng phát triển tiếp theo của bài báo này là thực hiện xây dựng nền tảng mô phỏng cho mạng cảm biến quan tâm đến năng lượng, đồng thời so sánh, đánh giá giữa thực tế và mô phỏng về năng lượng tiêu thụ của từng nút cũng như của toàn mạng cảm biến.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Srivastava N., 2010. *Challenges of next-generation wireless sensor networks and its impact on society*. Journal of Telecommunications, pp. 128-133.
- [2]. Noel A. B., Abdaoui A., Elfouly T., Ahmed M. H., Badawy A., Shehata M. S., 2017. *Structural health monitoring using wireless sensor networks: A comprehensive survey*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 19(3), 1403-1423.
- [3]. Guinard A., McGibney A., Pesch D. 2009. *A wireless sensor network design tool to support building energy management*. In Proceedings of the First ACM Workshop on Embedded Sensing Systems for Energy-Efficiency in Buildings (pp. 25-30). ACM.
- [4]. Pompili D., Akyildiz I. F. 2009. *Overview of networking protocols for underwater wireless communications*. IEEE Communications Magazine, 47(1), 97-102.
- [5]. Siraj S., Gupta A., Badgajar R. 2012. *Network simulation tools survey*. International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering, 1(4), 199-206.

[6]. Xian X., Shi W., Huang H., 2008. *Comparison of OMNET++ and other simulator for WSN simulation*. In 2008 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (pp. 1439-1443). IEEE.

[7]. Shaikh F. K., Zeadally S., 2016. *Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 55, 1041-1054.

[8]. Sharma S., Kumar D., Kishore K., 2013. *Wireless sensor networks - A review on topologies and node architecture*. International Journal of Computer Sciences and Engineering, 1(2), 19-25.

[9]. Han Q., Liu P., Zhang H., Cai Z., 2019. *A wireless sensor network for monitoring environmental quality in the manufacturing industry*. IEEE Access, 7, 78108-78119.

[10]. Zrelli A., Ezzedine T., 2018. *Design of optical and wireless sensors for underground mining monitoring system*. Optik, 170, 376-383.

[11]. Lee Y., Blaauw D., Sylvester D., 2016. *Ultralow power circuit design for wireless sensor nodes for structural health monitoring*. Proceedings of the IEEE, 104(8), 1529-1546.

[12]. Lynch J. P., Law K. H., Kiremidjian A. S., Carrier E., Farrar C. R., Sohn H., Wait J. R., 2004. *Design and performance validation of a wireless sensing unit for structural monitoring applications*. Structural Engineering and Mechanics, 17(3-4), 393-408.

[13]. Shoichi Oshima, Kenichi Matsunaga, Toshihiko Kondo, Hiroki Morimura, 2015. *Ultralow power Sensor Node with Nanowatt Wireless Circuit Technology*. NTT Technical Review, Vol. 13 No. 1 Jan. 2015.

[14]. Wang Q., Hempstead M., Yang W., 2006. *A realistic power consumption model for wireless sensor network devices*. In 2006 3rd annual IEEE communications society on sensor and ad hoc communications and networks (Vol. 1, pp. 286-295). IEEE.

[15]. Nguyễn Trọng Quế, Nguyễn Thị Lan Hương, Phạm Thị Ngọc Yến, 2009. *Cơ sở kỹ thuật đo*. NXB Khoa học và Kỹ thuật

AUTHORS INFORMATION

**Ha Van Phuong^{1,2}, Phạm Thị Ngọc Yến¹, Le Minh Hoang¹,
Đào Trung Kiên¹, Nguyễn Thanh Hoàng¹**

¹MICA Institute, Hanoi University of Science and Technology

²Hanoi University of Industry