

NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ CHẾ TẠO THIẾT BỊ GIÁM SÁT NĂNG LƯỢNG ẮC QUY

A RESEARCH ON DESIGN AND FABRICATION OF A MONITORING EQUIPMENT OF BATTERY

Nguyễn Đức Hiến, Nguyễn Hữu Đức*

TÓM TẮT

Hệ thống ắc quy (lưu trữ điện năng) được sử dụng rộng rãi trong nhiều ứng dụng khác nhau như hệ thống cung cấp điện dự phòng cho các thiết bị điện quan trọng, hệ thống bảo vệ tại các trạm điện, nhà máy điện,... Ngoài ra, với xu hướng phát triển các nguồn điện gió, điện mặt trời và xe điện thì hệ thống ắc quy càng trở nên phổ biến trong các ứng dụng như tích hợp các nguồn năng lượng tái tạo, trạm sạc xe điện,... Hệ thống quản lý giám sát năng lượng cho ắc quy (BMS) đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo an toàn và tin cậy trong quá trình vận hành ắc quy. Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu thiết kế chế tạo thiết bị giám sát, quản lý năng lượng cho ắc quy. Đây là công nghệ rất quan trọng trong việc đảm bảo vận hành an toàn và tối ưu cho các hệ thống ắc quy. Các chức năng chính của thiết bị giám sát được đặt ra và thiết kế chế tạo các mạch điện tử thực hiện thuật toán giám sát, quản lý các thông số chính của ắc quy được thực hiện. Kết quả thực nghiệm thiết bị cho một hệ thống đơn giản được thực hiện trong phòng thí nghiệm để kiểm chứng sự hoạt động của thiết bị.

Từ khóa: Ắc quy; giám sát thông số; quản lý ắc quy.

ABSTRACT

Battery system (energy storage) is widely used in many different applications such as a backup power supply system for critical electrical equipments, protection systems at power stations, power plants,... In addition, with the development trend of wind power, solar power and electric vehicles, the battery energy storage system becomes more and more popular in applications such as integrating renewable energy sources, electric vehicle charging stations,... Battery Energy Management System (BMS) plays an important role in ensuring safety and reliability during battery operation. This paper presents the results of research, design and fabrication of a monitoring and management equipment for batteries. This is a very important technology in ensuring safe and optimal operation of battery systems. The main functions of the monitoring device are layouted and after that its design and manufacture of electronic circuits to implement the monitoring and management algorithm of the battery are performed. Equipment test results for a simple test case in a laboratory to verify the operation of the equipment is shown.

Keywords: Battery; monitoring and management system; BMS.

Trường Đại học Điện Lực

*Email: ducnh@epu.edu.vn

Ngày nhận bài: 26/2/2021

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 28/3/2021

Ngày chấp nhận đăng: 25/4/2021

1. GIỚI THIỆU

Sự phát triển mạnh mẽ của ngành công nghiệp xe điện gần đây và sự phát triển các nguồn điện gió, điện mặt trời đặt ra vấn đề giám sát, quản lý các thông số chính đối với các hệ thống ắc quy [1-5]. Trong các công nghệ lưu trữ năng lượng thì công nghệ ắc quy lithiumion (Li-ion) hiện nay đang phổ biến vì các ưu điểm vượt trội như mật độ công suất và năng lượng cao [2-10]. Hệ thống ắc quy lithium thường bao gồm hàng nghìn các tế bào (cell) được mắc nối tiếp và song song nhằm cung cấp điện áp, dòng điện phù hợp với từng ứng dụng cụ thể. Hệ thống ắc quy như vậy yêu cầu sự giám sát, quản lý và điều khiển vận hành một cách phù hợp. Các hiện tượng xảy ra trong quá trình vận hành như quá dòng, quá áp hoặc sạc/xả vượt định mức đều gây nên mất an toàn đối với hệ thống cũng như làm giảm tuổi thọ của hệ thống. Trong một số trường hợp, nó có thể dẫn đến hiện tượng cháy nổ gây nguy hiểm cho thiết bị và con người. Do vậy, hệ thống giám sát, quản lý năng lượng (BMS) cho ắc quy là rất quan trọng trong việc đảm bảo an toàn, nâng cao tin cậy cung cấp điện cũng như nâng cao tuổi thọ của ắc quy [1-8].

Các chức năng chính của hệ thống BMS gồm giám sát các thông số điện, nhiệt độ của từng tế bào (cell), quản lý quá trình nạp/xả, điều khiển và vận hành tối ưu. Một số thông số chính như trạng thái nạp xả (state of charge - SOC), tình trạng sức khỏe của ắc quy (state of health - SOH), nhiệt độ trong tế bào là thường không đo trực tiếp được. Mặc dù các thông số này đóng vai trò quan trọng trong việc quản lý, vận hành hệ thống ắc quy. Do đó, các thông số này cần các phương pháp đo lường gián tiếp. Phương pháp sạc/xả đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo an toàn vận hành cũng như tuổi thọ cho hệ thống ắc quy. Nếu sạc nhanh thì thời gian ắc quy đầy dung lượng sẽ ngắn và qua đó tăng tính sẵn sàng cung cấp năng lượng của ắc quy. Tuy nhiên sạc quá nhanh có thể dẫn đến các ảnh hưởng tiêu cực như tăng tổn thất và tăng già hóa ắc quy, thậm chí có thể dẫn đến quá nhiệt (overheating) hoặc quá lạnh (supercooling). Khi nhiệt độ tăng cao quá hoặc thấp quá đều dẫn đến giảm tuổi thọ cũng như gây nguy hiểm cho hệ thống ắc quy [1-5].

Hiện nay tại Việt Nam đang diễn ra rất mạnh quá trình triển khai các nguồn điện gió và điện mặt trời. Đến thời

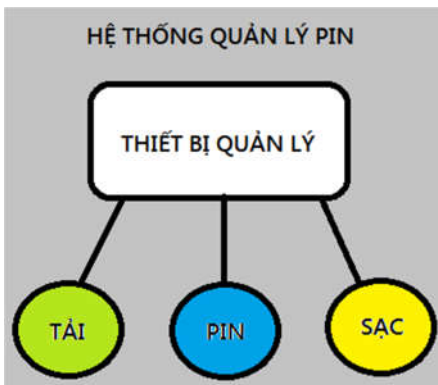
điểm này gần 20GWp các nguồn điện mặt trời được nối lưới. Khoảng 1GW điện gió đã vận hành thương mại. Các vấn đề đặt ra đối với hệ thống điện khi tích hợp các nguồn này là cần thiết triển khai các nguồn lưu trữ năng lượng phân tán nhằm giải quyết các khó khăn kỹ thuật, kinh tế do các nguồn điện gió, điện mặt trời gây ra. Ngoài ra, việc phát triển các phương tiện bằng điện cũng đang trong giai đoạn triển khai lớn như xe ô tô điện, xe máy/xe đạp điện.

Trước các vấn đề trên, việc chủ động công nghệ, cụ thể là công nghệ giám sát quản lý năng lượng của hệ thống ắc quy tại Việt Nam là cấp thiết và phù hợp với định hướng phát triển ngành công nghiệp năng lượng tái tạo tại Việt Nam. Nhóm nghiên cứu đã triển khai thiết kế, chế tạo thử nghiệm thiết bị giám sát, quản lý năng lượng cho đối tượng là ắc quy dạng lithium ion.

Bài báo này được cấu trúc như sau: Phần 2 sẽ là phần chính của bài báo, trình bày về thiết kế, chế tạo thiết bị giám sát, quản lý năng lượng cho ắc quy. Phần 3 trình bày thuật toán hoạt động của thiết bị. Phần 4 là kết quả thử nghiệm trong phòng thí nghiệm. Một số kết luận và hướng nghiên cứu sắp tới được trình bày tại phần 5.

2. THIẾT KẾ CHẾ TẠO THỬ NGHIỆM THIẾT BỊ GIÁM SÁT QUẢN LÝ NĂNG LƯỢNG CHO ẮC QUY

Hệ thống nghiên cứu gồm phụ tải, là các thiết bị tiêu thụ điện, pin lithium-ion và bộ sạc. Tất cả các thành phần trên được kết nối với thiết bị quản lý pin để tạo thành một hệ thống quản lý pin hoàn chỉnh. Hệ thống được mô tả như hình 1.



Hình 1. Sơ đồ khối hệ thống nghiên cứu

Trong nghiên cứu này, thiết bị giám sát quản lý năng lượng cho ắc quy sẽ có các chức năng chính như sau:

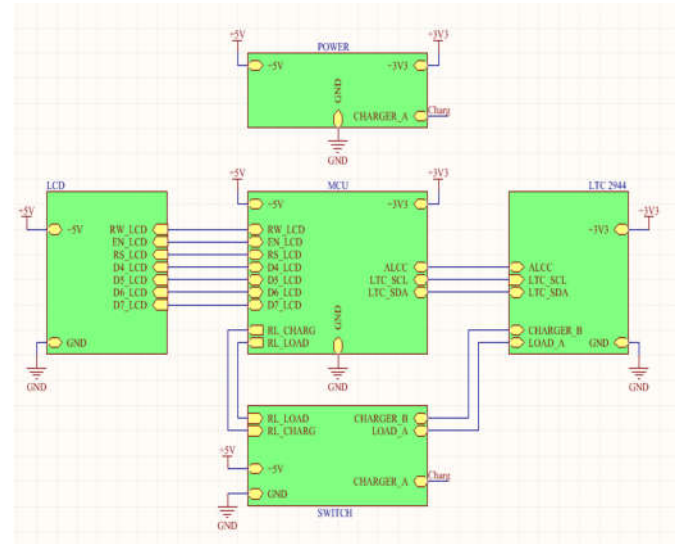
- Giám sát pin lithium-ion, với điện áp 12V đơn cell/ đa cell.
- Giám sát các thông số cơ bản như: điện áp, dòng điện, nhiệt độ, SOC.
- Bảo vệ quá dòng, áp, nhiệt độ.
- Cảnh báo qua còi chip.

Thông số kỹ thuật của ắc quy:

- Dung lượng pin: 1000mAh
- Điện áp sạc: 12,6V
- Bộ sạc: 12,6V - 30W

- Hiển thị LCD
- Tương tác với hệ thống qua nút nhấn

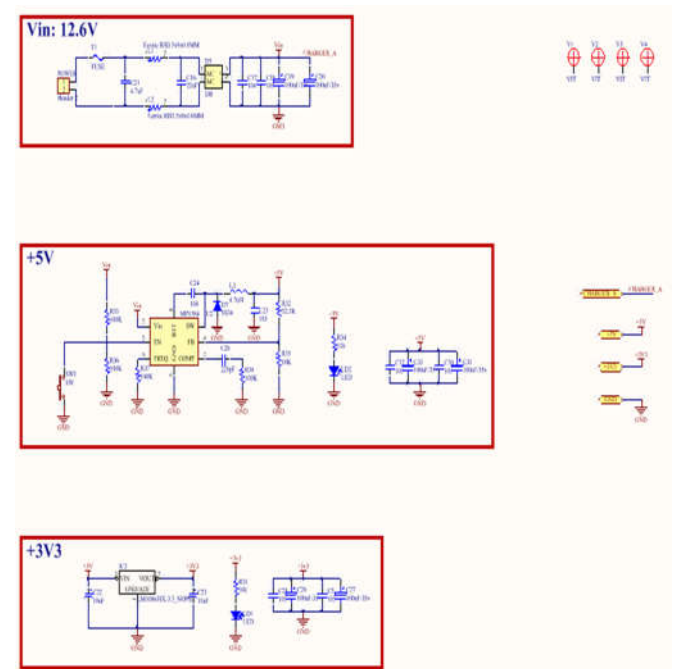
Hình 2 mô tả sơ đồ nguyên lý mạch thiết bị giám sát quản lý năng lượng. Thiết bị bao gồm 5 khối chính: (1) Khối POWER: Khối này có nhiệm vụ cung cấp điện năng cho thiết bị; (2) Khối LCD: Khối này có nhiệm vụ hiển thị thông tin giám sát; (3) Khối LTC 2944: Khối này có nhiệm vụ đo lường và giám sát; (4) Khối SWITCH: Khối này có nhiệm vụ điều khiển tải và quá trình nạp xả; (5) Khối MCU: Khối này sẽ xử lý dữ liệu và điều khiển chung.



Hình 2. Sơ đồ kết nối thiết bị

2.1. Khối nguồn (Power)

Khối nguồn là khối cung cấp nguồn điện năng cho toàn bộ thiết bị hoạt động ổn định. Hình 3 mô tả sơ đồ thiết kế của khối nguồn.



Hình 3. Sơ đồ nguyên lý khối POWER

Điện áp đầu vào cho khối POWER là 12,6V, đây cũng là điện áp của bộ sạc pin. Phần nguồn được bảo vệ bởi 1 cầu chì 1A, đảm bảo an toàn cho mạch điện trong trường hợp quá tải. Đối với thiết bị điện tử, xử lý nhiễu là ưu tiên hàng đầu. Vậy nên, phần nguồn đầu vào được đi qua các tụ điện có giá trị khác nhau và lõi từ hóa nhằm triệt các xung nhiễu.

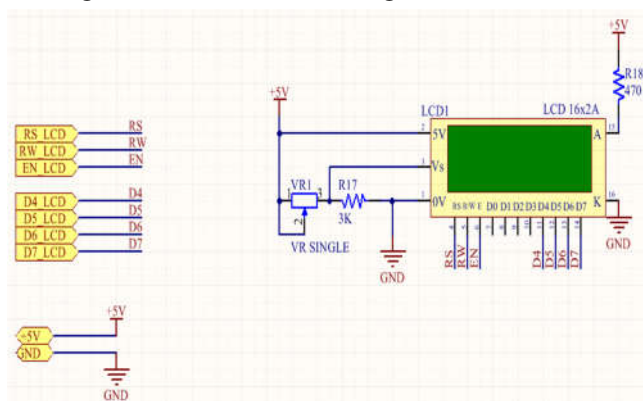
Khối POWER có 2 ngưỡng điện áp đầu ra là:

- Điện áp 5V: Sử dụng IC MP1584 cho dòng tối đa 3A, độ ổn định cao. MP1584 là IC nguồn xung với dải đầu vào rộng từ 4,5 - 28V và đầu ra có thể điều chỉnh được từ 0,8 - 25V thông qua trở phân áp
- Điện áp 3,3V: Sử dụng IC LM 1086 là nguồn tuyến tính, với thiết kế đơn giản, hạn chế linh kiện. LM 1086 với điện áp đầu vào là 5V cho ra điện áp 3,3V với dòng tối đa 1,5A, độ ổn định cực kì cao.

2.2. Khối màn hình hiển thị (LCD)

Khối màn hình hiển thị được thiết kế như trên hình 4. Các thông số kỹ thuật và chức năng chính của khối như sau:

- Sử dụng LCD 16x2 anot chung, nhỏ gọn.
- LCD 16x2 cho phép hiển thị 2 hàng với 16 kí tự trên 1 hàng.
- Biến trở chân Vs nhằm điều chỉnh độ tương phản cho LCD, giúp cải thiện phần hiển thị của LCD.
- Điện trở R₁₇ và R₁₈ là điện trở hạn dòng, bảo vệ đèn bên trong LCD, giúp tăng tuổi thọ của LCD.
- Sử dụng chế độ 4 bit cho LCD: Dữ liệu được truyền trên 4 đường từ DB4 tới DB7.
- Enable (E): Cho phép ghi vào LCD.
- Read/Write (R/W): Ghi trạng thái đọc/ghi dữ liệu.
- Register Select (RS): Lựa chọn ghi lệnh/ dữ liệu.



Hình 4. Sơ đồ nguyên lý khối LCD

2.3. Khối LTC 2944

Hình 5 mô tả mạch thiết kế khối LTC 2944. Các linh kiện điện trở R₂₄, R₂₅, R₂₆ với giá trị 2K Ohm nhằm thiết lập trạng thái ban đầu cho IC. Linh kiện quan trọng không kém IC LTC 2944 trong khối này là cảm biến điện trở R28. Giá trị điện trở được tính toán cẩn thận, để phù hợp với từng ứng dụng. Để đạt được độ chính xác được chỉ định của bộ đếm coulomb, điện áp chênh lệch giữa SENSE+ và SENSE- phải

nằm trong khoảng ±50mV. Với tín hiệu đầu vào lên đến 300mV, LTC2944 sẽ vẫn hoạt động nhưng độ chính xác của bộ đếm coulomb không được đảm bảo.

Giá trị yêu cầu của điện trở cảm nhận bên ngoài, R_{SENSE}, được xác định bởi phạm vi đầu vào tối đa của V_{SENSE} và dòng điện tối đa của ứng dụng:

$$R_{SENSE} \leq \frac{50mV}{I_{MAX}} \tag{1}$$

Việc lựa chọn giá trị điện trở cảm nhận bên ngoài ảnh hưởng đến độ lợi của bộ đếm coulomb. Một điện trở cảm biến lớn hơn tạo ra một điện áp chênh lệch lớn hơn giữa SENSE+ và SENSE- cho cùng một dòng điện dẫn đến việc đếm coulomb chính xác hơn. Lượng điện tích được biểu thị bằng bit quan trọng nhất (qLSB) của điện tích tích lũy (thanh ghi C, D) bằng:

$$q_{LSB} = 0,340mAh \frac{50m\Omega}{R_{SENSE}} \frac{M}{4096} \tag{2}$$

$$q_{LSB} = 0,340mAh \frac{50m\Omega}{R_{SENSE}} \tag{3}$$

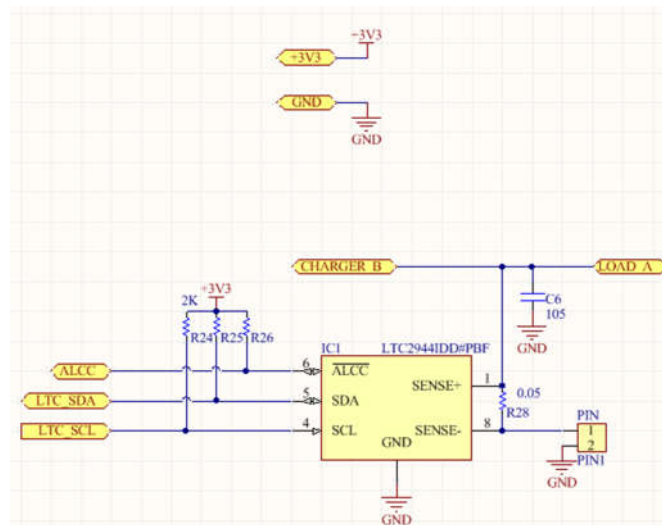
Lưu ý rằng 1mAh = 3,6C (coulomb).

Chọn R_{SENSE} = 50mV/I_{MAX} là không đủ trong các ứng dụng có dung lượng pin (QBAT) rất lớn so với dòng điện tối đa (I_{MAX}):

$$Q_{BAT} \geq I_{MAX} 22hours \tag{4}$$

Đối với các ứng dụng dòng điện thấp như vậy với pin lớn, việc chọn R_{SENSE} theo R_{SENSE} = 50mV/I_{MAX} có thể dẫn đến q_{LSB} nhỏ hơn Q_{BAT}/216 và thanh ghi tích lũy 16 bit có thể bị chảy trước khi pin cạn kiệt hoặc tràn trong khi sạc. Trong trường hợp này, chọn R_{SENSE} tối đa là:

$$R_{SENSE} \leq \frac{2^{16} \cdot 0,340mAh}{Q_{BAT}} 50m\Omega \tag{5}$$

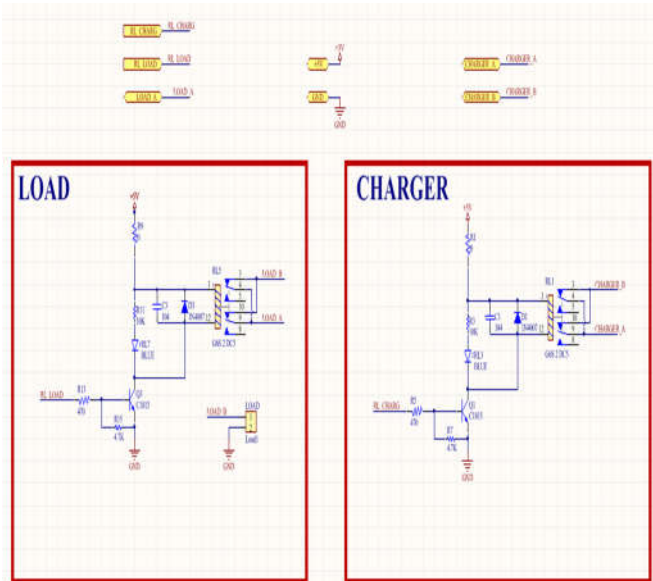


Hình 5. Sơ đồ nguyên lý khối LTC2944

2.4. Khối Switch

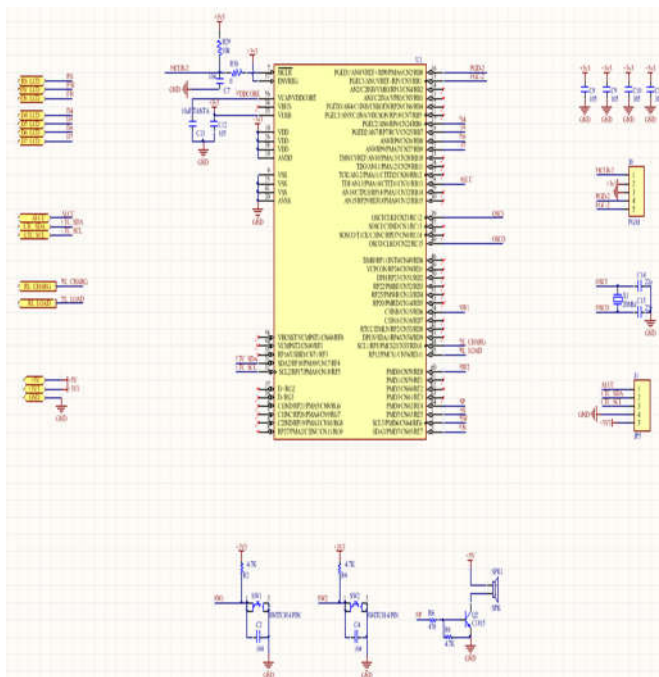
Hình 6 mô tả mạch thiết kế khối Switch. Khối Switch có các thông số chính như sau:

- Sử dụng relay GS6 - 5V 2A, với kích thước nhỏ gọn.
 - Sử dụng diode M7 nhằm bảo vệ MCU, tránh xung ngược từ cuộn dây trong relay.
 - Sử dụng Transistor C1815 để điều khiển relay.
 - LED báo trạng thái của relay:
- + Tắt: Relay ở trạng thái thường đóng.
 + Sáng: Relay ở trạng thái thường mở.



Hình 6. Sơ đồ nguyên lý khối SWITCH

2.5. Khối MCU



Hình 7. Sơ đồ nguyên lý khối MCU

Khối MCU có chức năng là khối điều khiển trung tâm. Hình 7 mô tả mạch thiết kế khối MCU. Các yêu cầu và chức năng chính của khối MCU được tóm tắt như sau:

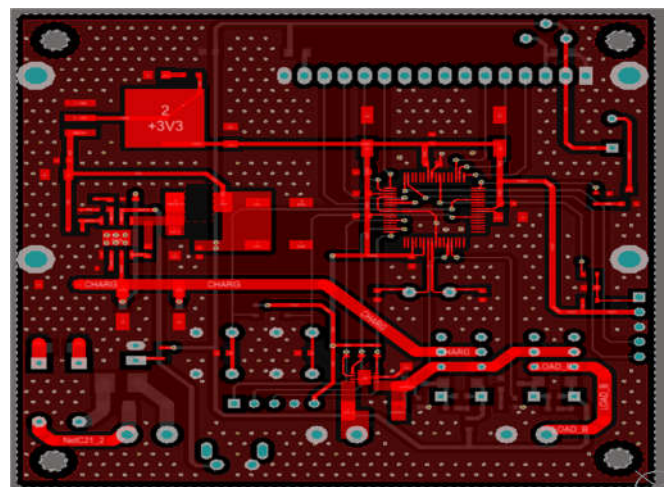
- PIC sử dụng dao động ngoại là thạch anh 25MHz nhằm nâng cao tốc độ xử lý dữ liệu.
- Chân MCLR cung cấp hai chức năng cụ thể của thiết bị: Reset thiết bị, lập trình và gỡ lỗi thiết bị. Nếu không cần lập trình và gỡ lỗi trong ứng dụng cuối, kết nối trực tiếp đến VDD có thể là tất cả những gì được yêu cầu. Việc bổ sung các thành phần khác, để giúp tăng khả năng chống chịu của ứng dụng đối với các đặt lại do sụt áp, có thể có lợi.
- Khi bộ điều chỉnh được bật, cần có tụ điện ESR thấp (<5Ω) trên chân VCAP / VDDCORE để ổn định điện áp đầu ra của bộ điều chỉnh điện áp. Chân VCAP / VDDCORE không được kết nối với VDD và phải sử dụng tụ điện 10uF nối đất. Loại có thể là gốm hoặc tantali. Một ví dụ phù hợp là Murata GRM21BF50J106ZE01 (10uF, 6,3V) hoặc tương đương.
- Nút nhấn SW1 và SW2 được treo mức cao, an toàn cho PIC khi sử dụng lâu dài. Nút nhấn nhằm tạo sự tương tác trực tiếp với thiết bị.
- Còi chip 5V nhằm phát thông báo cho những tình huống khẩn cấp.

2.6. Mạch in và mô hình 3D

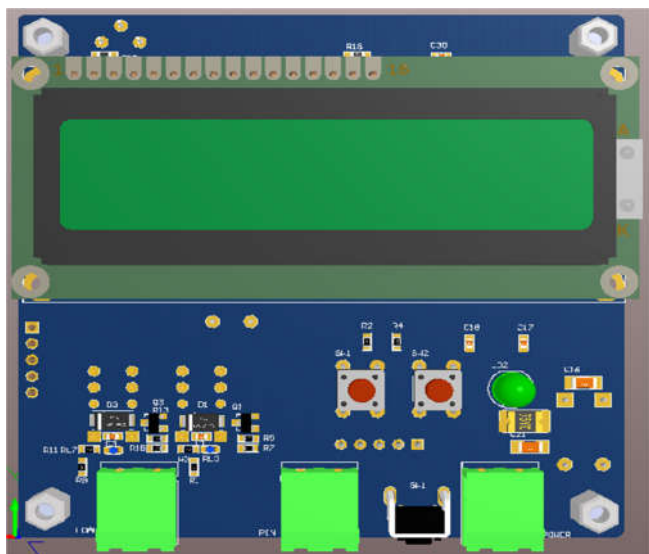
Sau khi thiết kế các khối chức năng, phần thiết kế mạch in sẽ được thực hiện. Trong quá trình thiết kế mạch in, các tiêu chuẩn về thiết kế được áp dụng nhằm tăng tính ổn định của thiết bị, đảm bảo an toàn cho mạch điện trong quá trình vận hành. Mạch in được mô tả trong hình 8 và 9.

Dưới đây là thông số chi tiết về bảng mạch đã được thiết kế:

- Kích thước đường tín hiệu: 12mil.
- Kích thước đường nguồn: 30mil.
- Kích thước lỗ via: lỗ 13mil, viền 25mil.
- Khoảng cách tối thiểu giữa các đối tượng: 10mil.
- Lớp phủ Soild được phủ làm lớp GND

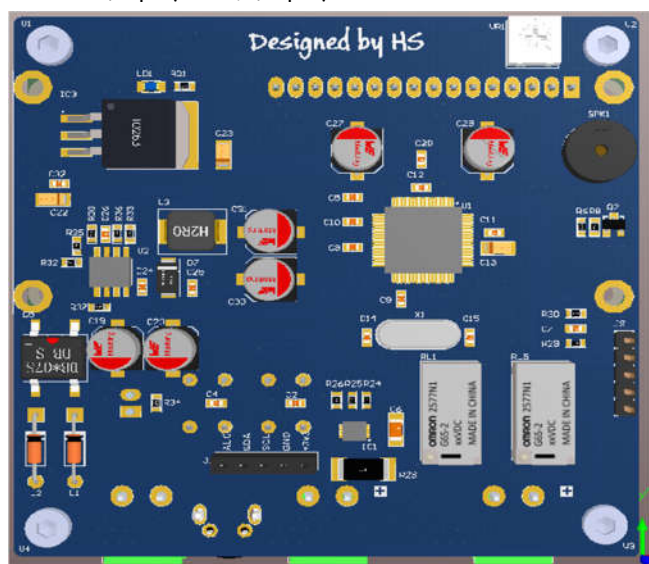


a)

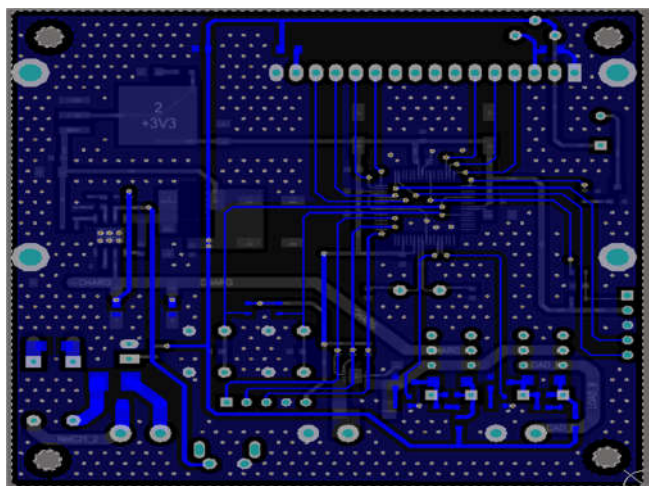


b)

Hình 8. a) Lớp mạch trên; b) Lớp mạch dưới



a)



b)

Hình 9. a) 3D mặt trên; b) 3D mặt dưới

2.7. Thiết kế vỏ hộp

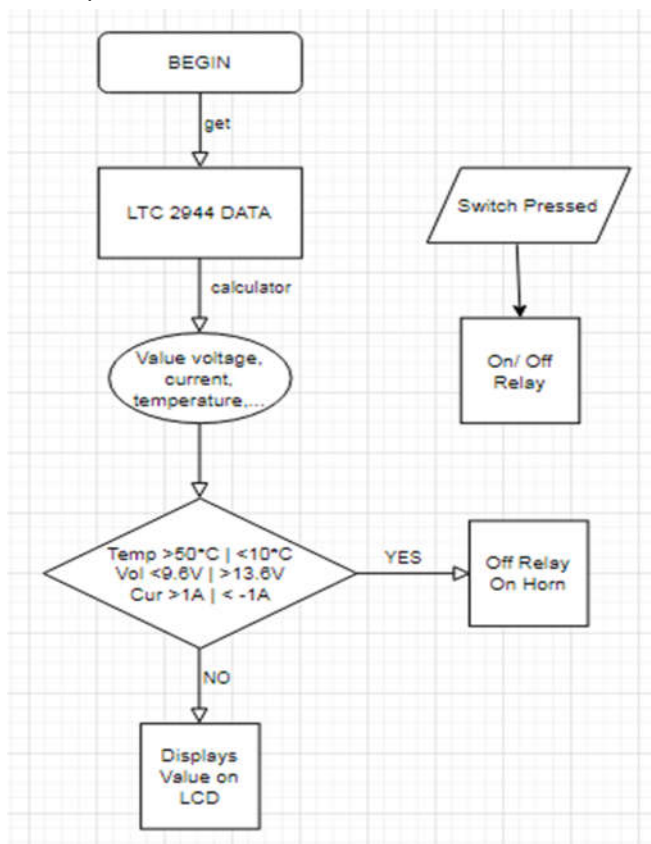


Hình 10. Vỏ hộp thiết bị

Sau khi đã triển khai thiết kế mạch in xong, vỏ hộp sẽ được thiết kế đảm bảo phù hợp với mạch in và các chức năng yêu cầu của thiết bị như trên hình 10. Thông số kỹ thuật chính của vỏ hộp được tóm lược như sau:

- Kích thước 86x86x26mm.
- Vỏ hộp chất lượng tốt, cứng chắc, bền bỉ.
- Vỏ hộp được thiết kế với các lỗ cho trước, phù hợp cho các nút nhấn và đèn led báo tình trạng nguồn.

3. THUẬT TOÁN



Hình 11. Lưu đồ thuật toán

Mục tiêu của thuật toán là giám sát được tình trạng vận hành của ắc quy và gồm các thông số quan trọng như điện áp, nhiệt độ và dung lượng ắc quy. Thuật toán giám sát áp dụng cho thiết bị được mô tả như hình 11. Các bước sẽ gồm các nội dung sau:

- Thiết bị lấy dữ liệu pin từ IC LTC2944 thông qua đọc giá trị thanh ghi. Sử dụng hàm I2C để đọc/ ghi giá trị.
- Các giá trị đọc về từ thanh ghi sẽ được tính toán để ra kết quả cuối cùng là các giá trị dòng điện, điện áp, nhiệt độ,...
- Ngưỡng giá trị an toàn được lập trình, nhằm bảo vệ pin và tải:
 - ✓ Điện áp: $9,6V < V < 12,6V$
 - ✓ Dòng điện: $-1A < I < 1A$
 - ✓ Nhiệt độ: $0^{\circ}C < T < 50^{\circ}C$

4. KẾT QUẢ THỬ NGHIỆM

Hình 12 mô tả hình ảnh thực tế hệ thống thử nghiệm cho thiết bị giám sát, quản lý năng lượng của ắc quy. Hệ thống thử nghiệm bao gồm: (1) Ắc quy lithium-ion 12V 900mAh; (2) Phụ tải là quạt tản nhiệt 12V - 2,16W và (3) Thiết bị giám sát năng lượng cho ắc quy.

Sau thời gian thử nghiệm, thiết bị giám sát năng lượng đã đảm bảo được các chức năng như yêu cầu đặt ra gồm:

- Giám sát thông số điện áp: 12,19V
- Giám sát thông số nhiệt độ ắc quy: 28^oC
- Giám sát dung lượng thực tế của ắc quy: 88%
- Giám sát được trạng thái của ắc quy: Đang sạc



Hình 12. Hệ thống thử nghiệm thực tế trong phòng thí nghiệm

Hình 13 minh họa giao diện của thiết bị giám sát năng lượng cho ắc quy. Các thông số hiển thị là điện áp; nhiệt độ; trạng thái và dung lượng thực tế của ắc quy.



Hình 13. Kết quả thực nghiệm của thiết bị

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã tiến hành nghiên cứu thiết kế chế tạo thử nghiệm thiết bị giám sát, quản lý năng lượng cho ắc quy. Đối tượng ắc quy thử nghiệm là 1 bộ ắc quy lithium. Các thông số chính của ắc quy được giám sát thời gian thực gồm điện áp, trạng thái, nhiệt độ và dung lượng của bộ ắc quy.

Hướng nghiên cứu tiếp theo của nhóm là tiếp tục phát triển thêm các chức năng sau cho thiết bị:

- Tích hợp chức năng truyền thông như: RS485, CAN bus, RS232;
- Thêm thông số giám sát như: SOH, DOC;
- Tăng khả năng giám sát của thiết bị;
- Tăng khả năng tương tác với thiết bị;
- Có thể gửi dữ liệu lên web server hoặc ứng dụng Local;
- Tích hợp thuật toán để có thể thông minh hơn trong quá trình vận hành.

Ngoài ra, nhóm nghiên cứu sẽ phát triển thêm hướng thiết kế, chế tạo một hệ thống giám sát, quản lý năng lượng cho nhiều dàn ắc quy và phân tán. Hướng này sẽ phù hợp với xu hướng tự động giám sát, và bảo trì bảo dưỡng theo điều kiện thực tế của thiết bị (CBM).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Raymond H. Byrne, Tu A. Nguyen, David A. Copp, Babu R. Chalamala, Imre Gyuk, 2017. *Energy Management and Optimization Methods for Grid Energy Storage Systems*. Special section on battery energy storage and management systems, IEEE Access.

[2]. Abada S, Marlair G, Lecocq A, et al., 2016. *Safety focused modeling of lithium-ion batteries: A review*. Journal of Power Sources, 306: 178–192

- [3]. Rao Z, Wang S., 2011. *A review of power battery thermal energy management*. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 15 (9): 4554–4571.
- [4]. Li J, Han Y, Zhou S., 2016. *Advances in Battery Manufacturing, Services, and Management Systems*. Hoboken: John Wiley-IEEE Press.
- [5]. Lu L., Han X., Li J., et al., 2013. *A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles*. *Journal of Power Sources*, 226: 272–288.
- [6]. Xiong R., Li L., Tian J., 2018. *Towards a smarter battery management system: A critical review on battery state of health monitoring methods*. *Journal of Power Sources*.
- [7]. Lu L., Han X., Li J., Hua J, Quyang M., 2013. *A review on the key issues for lithium ion battery management in electric vehicles*. *Journal of Power Sources*.
- [8]. Zheng Z., Zhang Z., Tang T., 2004. *Recent development of lithium ion batteries*. *Chem World*.
- [9]. Hannan MA., Lipu MS., Hussain A., Mohamedb A., 2017. *A review of the lithium ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle application: challenges and recommendations*. *Renew Sustain Energy Rev*.
- [10]. N.D. Hien, 2020. *Nghiên cứu và thiết kế thiết bị giám sát và quản lý năng lượng pin*. Đồ án tốt nghiệp, Đại học Điện Lực.
- [11]. N.H.Duc, 2016. *Energy storage systems: Roles and applications*. *Journal of science and technology*, Hanoi University of Industry.
- [12]. A. Nagarajan, R. Ayyanar, 2015. *Design and strategy for the deployment of energy storage systems in a distribution feeder with penetration of renewable resources*. *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 6, no. 3, pp. 1085–1092.
- [13]. M. Cacciato, G. Nobile, G. Scarcella, G. Scelba, 2017. *Real-time model-based estimation of SOC and SOH for energy storage systems*. *IEEETrans. Power Electron.*, vol. 32, no. 1, pp. 794–803.

AUTHORS INFORMATION

Nguyen Duc Hien, Nguyen Huu Duc

Electric Power University